

# ANALIZA NAPREZANJA I DEFORMACIJA PRI MANIPULACIJI SEKCIJAMA U PROCESU GRADNJE BRODA

---

Lovrić, Anja

Master's thesis / Diplomski rad

2022

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Engineering / Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:998640>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-12-25**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Engineering](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Diplomski sveučilišni studij brodogradnje

Diplomski rad

**ANALIZA NAPREZANJA I DEFORMACIJA PRI  
MANIPULACIJI SEKCIJAMA U PROCESU GRADNJE BRODA**

Rijeka, rujan 2022.

Anja Lovrić

0035197154

SVEUČILIŠTE U RIJECI

**TEHNIČKI FAKULTET**

Diplomski sveučilišni studij brodogradnje

Diplomski rad

**ANALIZA NAPREZANJA I DEFORMACIJA PRI  
MANIPULACIJI SEKCIJAMA U PROCESU GRADNJE BRODA**

Mentor: Prof. dr. sc. Marko Hadjina

Rijeka, rujan 2022.

Anja Lovrić

0035197154

SVEUČILIŠTE U RIJECI  
TEHNIČKI FAKULTET

**IZJAVA**

Sukladno članku 9. *Pravilnika o diplomskom radu i završnom ispitu na diplomskom sveučilišnom studijima* Tehničkog fakulteta, Sveučilišta u Rijeci iz lipnja 2011., izjavljujem da sam samostalno izradila diplomski rad pod nazivom: „Analiza naprežanja i deformacija pri manipulaciji sekcijama u procesu gradnje broda“, uz konzultacije s mentorom.

Anja Lovrić

U Rijeci, 19. rujna 2022.

---

0035197154

## Sadržaj

1. UVOD.....	1
2. TRANSPORT U BRODOGRADILIŠTU .....	3
2.1. Dizalično - transportna oprema brodogradilišta.....	4
2.2. Proces transporta sekcije 639/T02.....	5
3. PROBLEMATIKA POJAVE DEFORMACIJA .....	8
3.1. Deformacije.....	8
3.2. Posljedice pojave deformacija.....	9
4. DEFINIRANJE PROBLEMA .....	11
4.1. Definiranje strukture za FEM analizu .....	11
5. DEFINIRANJE UŠKI.....	15
5.1. Razmještaj uški .....	15
5.2. Proračun uški.....	17
5.3. Provjera nosivosti škopca.....	21
6. MREŽENJE STRUKTURE.....	23
6.1. Osnove metode konačnih elemenata .....	23
6.2. Uvoz geometrije u FEM alat .....	27
6.3. Postupak mreženja.....	30
6.4. Opterećenja.....	36
7. REZULTATI STATIČKE ANALIZE .....	38
7.1. Deformacije.....	40
7.2. Naprezanja.....	41
8. DINAMIČKA ANALIZA .....	47
8.1. Ploča.....	48

---

8.1.1. Materijal .....	49
8.1.2. Rubni uvjeti.....	51
8.1.3. Brzina .....	53
8.1.4. Rezultati .....	55
8.2. Materijali .....	57
8.3. Rubni uvjeti .....	58
8.4. Brzina .....	61
8.5. Implicitna analiza .....	63
8.6. Trajanje analize .....	64
9. REZULTATI DINAMIČKE ANALIZE .....	66
9.1. Prva iteracija.....	66
9.1.1. Zadavanje gravitacije .....	67
9.2. Druga iteracija.....	68
9.3. Moguća poboljšanja .....	69
9.3.1. Treća iteracija.....	71
10. ZAKLJUČAK.....	73
10.1. Usporedba sa stvarnom sekcijom.....	74
11. LITERATURA .....	76

## 1. UVOD

Transport je jedan od najvažnijih faktora brodograđevnog proizvodnog procesa. Za njegovu izvedbu potrebni su detaljno planiranje i priprema kako bi cijeli proces prošao prema planu. Međutim, određene neželjene posljedice se mogu dogoditi i uz najbolju pripremu, a mogu biti uzrokovane prevelikim deformacijama i naprezanjima. Transport je sam po sebi skup postupak, a pojava prevelikih deformacija i naprezanja, čak i pucanja, čini ga još skupljim.

Osnovni zadatak ovog rada je odrediti te deformacije i naprezanja za postupak okretanja. Proračun će biti proveden metodom konačnih elemenata kao jednom od najdominantnijih i najrasprostranjenijih numeričkih metoda. Predmet razmatranja je sekcija 639/T02 aluminijskog nadgrađa polarnog *kruzera Scenic Eclipse II (Slika 1.1)* koja se gradi naopako na kolijevci.

Rad je podijeljen u osam velikih cjelina. Prva cjelina odnosi se na transport općenito te će ukratko biti opisana važnost transporta u brodogradilištu i neki faktori o kojima on ovisi. Zatim će u kratkim crtama biti opisan sam postupak transporta zadane sekcije od gradnje do montaže na brod.

Drugi dio rada bavi se problematikom pojave deformacija. Pojava deformacija ne može se izbjeći, ali potrebno ih je na vrijeme predvidjeti kako bi se njihov utjecaj na strukturu, a kasnije i na poslovanje, minimizirao. Potrebno je točno procijeniti moguće deformacije kako bi se osigurala kvaliteta proizvoda. U ovom dijelu bit će dana teorijska pozadina iza deformacija te će biti navedene neke od glavnih posljedica njihove pojave.

Nadalje, kratko su opisane osnovne karakteristike strukture, način modeliranja te primjenjena pojednostavljena na preuzeti model i stvarno stanje konstrukcije. Model je izrađen u programskom paketu *Siemens NX*.

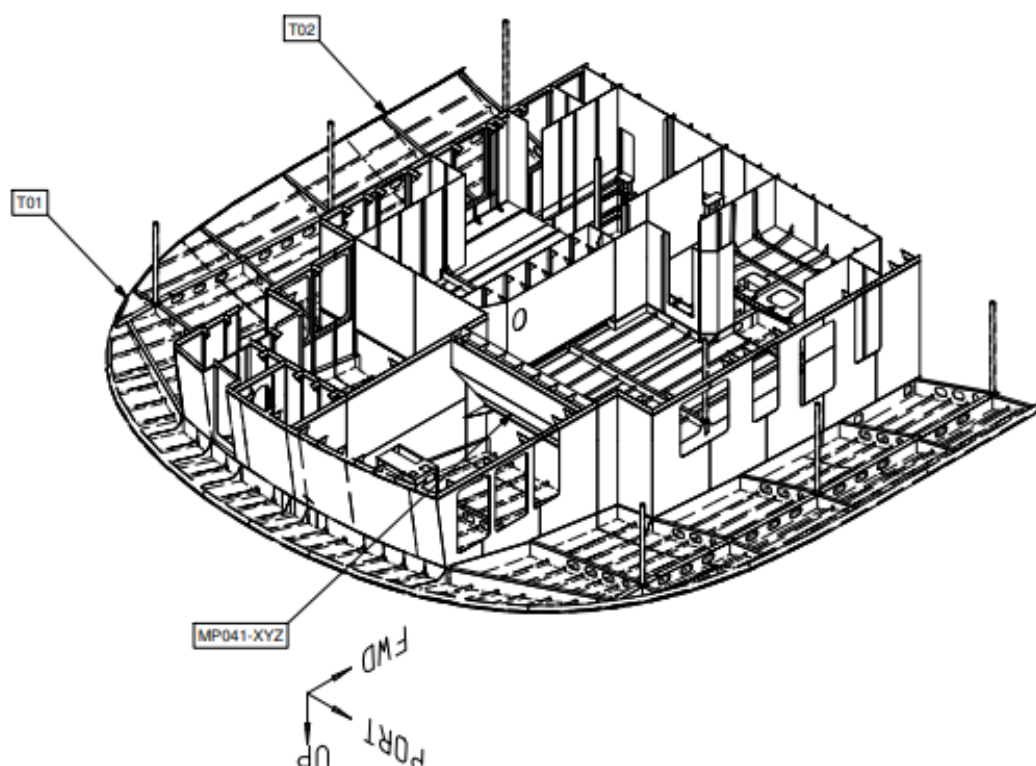
U idućem poglavlju dan je proračun uški. Odlučeno je da će se na sekciju zavariti ukupno šest uški, dvije od kojih su čelične, a ostale aluminijske. Proračun je proveden za najgori slučaj, odnosno za trenutak kada sekcija visi na samo dvije uške. Cilj proračuna bio je odrediti dimenzije uški dovoljne nosivosti da izdrže opterećenje u tom položaju.

Nakon toga slijedi sama analiza. Najprije će biti dan teorijski uvod, a zatim će biti i provedena. Za provedbu statičke je korišten programski paket *FEMAP*. Najprije je napravljena mreža te su zadani

oslonci i opterećenja, u ovom slučaju samo od težine. Oslonci su adaptirani ovisno o fazi okretanja. Analiza je napravljena za tri osnovne faze: podizanje, ovješeno na dvije uške te ovješeno na četiri uške u okrenutom položaju.

Slijedeća cjelina daje rezultate prethodno provedenih analiza. Bit će dobiveni pomaci i deformacije čije određivanje je bilo zadano zadatkom.

Konačno, slijedi provedba dinamičke analize. Ista će biti napravljena u *LS DYN*, a kao rezultat trebala bi se dobiti naprezanja koja će se usporediti s rezultatima statičke analize. To je ujedno i posljednja cjelina.



Slika 1.1. Sekcija 639/T02

Izvor: MKM Yachts



## 2. TRANSPORT U BRODOGRADILIŠTU

Transport u brodogradilištu [1] je jedan od najvažnijih čimbenika poslovanja brodogradilišta, bilo da se radi o vanjskom transportu koji omogućuje vezu s vanjskim suradnicima (npr. isporučitelji i dobavljači materijala, opreme itd.), ili o unutarnjem transportu, koji je u ovom slučaju nešto važniji. Unutarnji transport osigurava vezu među pojedinim fazama proizvodnog procesa, radionicama, radnim površinama, skladištima itd. Obavlja se raznim transportnim sredstvima ovisno o vrsti tereta (masa, količina, dimenzije), rasporedu objekata između kojih se obavlja transport, konfiguraciji terena itd. Pored općih zahtjeva, ovisi i o potrebama proizvodnog procesa - radi li se o prijenosu, pozicioniranju, preokretanju ili nekoj drugoj operaciji.

U brodograđevnoj industriji svaki organizirani rad sastoji se od tri osnovna postupka:

- ◁ Obrade materijala (izrade građevnih dijelova)
- ◁ Montaže građevnih dijelova u cjelinu (npr. sastavljanje sklopova u sekcije)
- ◁ Transporta materijala, građevnih dijelova, sklopova i sekcija, opreme u toku procesa gradnje broda

Transport povezuje postupke obrade i montaže u jedan neprekidan tok te se zato promatra kao sastavni dio proizvodnog procesa. S obzirom na svoju funkciju uvelike utječe na razinu troškova proizvodnje - u ukupnim troškovima može iznositi i do 50%. Da bi se došlo do odgovarajućeg načina transporta potrebno ga je projektirati što znači izabrati način prijenosa i uskladištenja tereta uz najmanje troškove. Osim transporta između pojedinih dijelova brodogradilišta, potrebno je naći i načine prenošenja materijala unutar pojedinih radionica. Pri izboru načina transporta treba definirati slijedeće:

- ◁ Vrstu tereta, težine i dimenzije pojedinih jedinica tereta
- ◁ Ukupnu količinu tereta i intenzitet prenošenja
- ◁ Duljinu puta prenošenja po horizontali i vertikali
- ◁ Gabaritne potrebe transportnih puteva i opreme
- ◁ Vrstu uređaja za utovar i istovar
- ◁ Potrebe tehnološkog procesa (pozicioniranje, okretanje itd.)

Izbor sredstava transporta ovisi o:

- < Vrsti i obliku tereta
- < Količini tereta
- < Načinu transporta s obzirom na način utovara i istovara
- < Načinu pripreme i odlaganja

Sukladno tome, postoje slijedeće vrste transportnih sredstava:

- < Fiksna (valjčane staze, konvejeri)
- < Pokretna (dizalice, transportna sredstva na kotačima, transporteri, kolica, viljuškari)
- < Kombinirana (poprečni transporteri)

### **2.1. Dizalično - transportna oprema brodogradilišta**

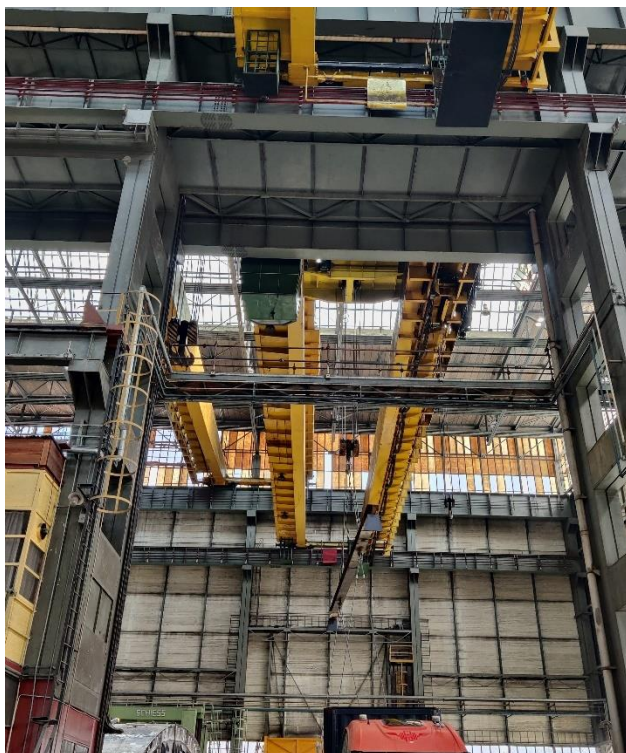
Dizalično-transportna oprema predstavlja jednu od osnovnih vrsta transportne opreme u brodogradnji. Koristi se u gotovo svim fazama brodograđevnog procesa i to za ukrcaj, iskrcaj, prijenos raznih vrsta tereta, okretanje, pozicioniranje te pridržavanje građevnih dijelova pri montaži. Osnovne vrste dizalica dane su u nastavku:

- < Mosne
- < Portalne ili poluportalne
- < Toranjske
- < Okretne
- < Samohodne na tračnicama, gusjenicama ili gumenim kotačima
- < Plovne (najčešće korištene u remontnim brodogradilištima)

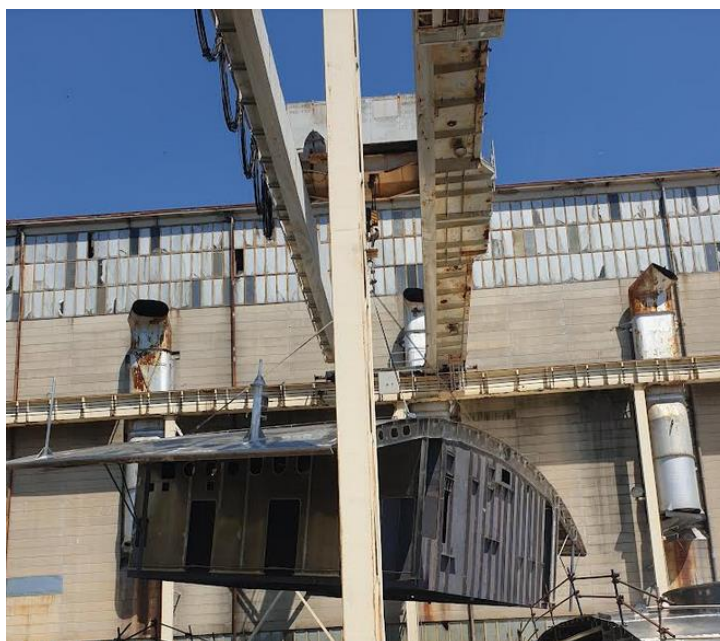
## 2.2. Proces transporta sekcije 639/T02

Za okretanje zadane sekcije korištene su dvije mosne dizalice (*Slika*) u brodogradilištu 3. Maj, dok ih sama hala ima tri. Općenito radionice mogu imati i više takvih dizalica, ovisno o veličini prostora, masi i dimenzijama tereta koji bi se njima mogao transportirati ili okretati, potrebama i mogućnostima brodogradilišta itd. Konstrukcijska izvedba ovisi o njihovom kapacitetu pa ih, stoga, u slučaju manje nosivosti karakterizira jedan „I“ nosač od valjanog čelika. Dizalice veće nosivosti uglavnom imaju nosivu metalnu konstrukciju koja se sastoji od dva glavna nosača. Neovisno o konstrukcijskom rješenju, princip translacijskog gibanja ostvaruje se kotačima duž vodilica postavljenih na vertikalnim pregradama radionice. Pogon se ostvaruje elektromotorima, a u zadnje vrijeme česte su izvedbe sa hidrauličkim motorima za vožnju i podizanje.

Nakon okretanja, sekciju je trebao prevesti u halu za bojanje. Kako sama mosna dizalica ne može prenijeti sekciju na potrebnu poziciju, transport je obavljen pomoću transportera. Općenito, transporter su dizajnirani tako da mogu nositi terete velikih masa [2]. To omogućuje platforma koja je izgrađena kao vrlo kruta struktura otporna na deformacije. S obzirom na to da je ova sekcija samo jedan dio krmene sekcije, najprije ju je trebalo iznijeti kako bi se isti postupak okretanja ponovio i sa drugim dijelom iste krmene sekcije. Nadalje, obje sekcije su prevezene u halu za bojanje, a zatim su spojene u veliku trodimenzionalnu sekciju. Taj je prijevoz, a kasnije i prijevoz VT sekcije do mjesta podizanja, obavljen istim transporterom, a sekcije su na njega stavljene pomoću vanjske poluportalne dizalice. Dodatno je na nju postavljen i dimnjak kako bi brod prije porinuća bio u što višem stupnju opremljenosti. U ovoj fazi gradnje brod je još uvijek na navozu pa se VT sekcija podiže portalnom dizalicom nosivosti 300 t, te zatim montira na brod. U nastavku su dane slike koje prikazuju dizalice za okretanje (*Slika 2.1.*), podizanje sekcije vanjskom poluportalnom dizalicom (*Slika 2.2.*), sekciju u hali za bojanje (*Slika 2.3.*) te podizanje tristotonskom dizalicom u svrhu montaže na brod (*Slika 2.4.*).



*Slika 2.1. Mosne dizalice u 3. Maju*



*Slika 2.2. Podizanje sekcije vanjskom poluportalnom dizalicom*



*Slika 2.3. Okrenuta sekcija u hali za bojanje*



*Slika 2.4. Montiranje VT sekcije na brod*

### 3. PROBLEMATIKA POJAVE DEFORMACIJA

#### 3.1. Deformacije

Deformacija [5] predstavlja promjenu relativnog položaja čestice tijela, a određuje se ovisno o njenoj vrsti. Uzrokuju ih vlačna/tlačna ili posmična naprezanja. Osnovne vrste deformacija navedene su u nastavku:

- ⟨ Elastična. Elastična deformacija je reverzibilna, tijelo se deformira pod ujecajem neke sile, ali čim sila prestane djelovati tijelo se vraća u svoj početni oblik.
- ⟨ Plastična. Plastična deformacija nije reverzibilna, no tijelo će prvo proći kroz elastično područje, što znači da će djelomično vratiti svoj početni oblik
- ⟨ Lom. Lom se javlja kada materijal prijeđe i elastičnu i plastičnu granicu jer su sile dovoljno velike da ga uzrokuju.

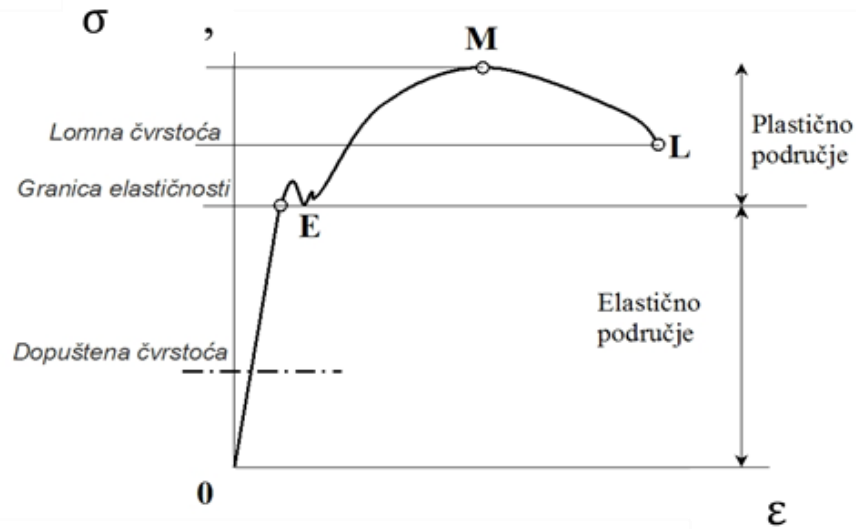
Ovisnost promjene oblika tijela o djelovanju vanjske sile najbolje opisuje Hooke-ov zakon (*Slika 3.1.*). Prema njemu, naprezanje je proporcionalno deformaciji:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (3.1.)$$

Gdje je:

- ⟨  $\sigma$  – naprezanje,  $\text{N/mm}^2$
- ⟨  $E$  – modul elastičnosti/ Youngov modul,  $\text{N/mm}^2$
- ⟨  $\varepsilon$  – deformacija, mm

Koliko će se tijelo deformirati ovisi o njegovoj krutosti, dakle modulu elastičnosti, te primjenjenom opterećenju i geometrijskim karakteristikama. Na konkretnom primjeru sekcije, deformacije će ovisiti isključivo o svojstvima materijala, aluminijske i čelike, te masi sekcije koja predstavlja jedini oblik opterećenja.



Slika 3.1. Dijagram napreznja

[https://hr.wikipedia.org/wiki/Dijagram\\_napreznja](https://hr.wikipedia.org/wiki/Dijagram_napreznja)

### 3.2. Posljedice pojave deformacija

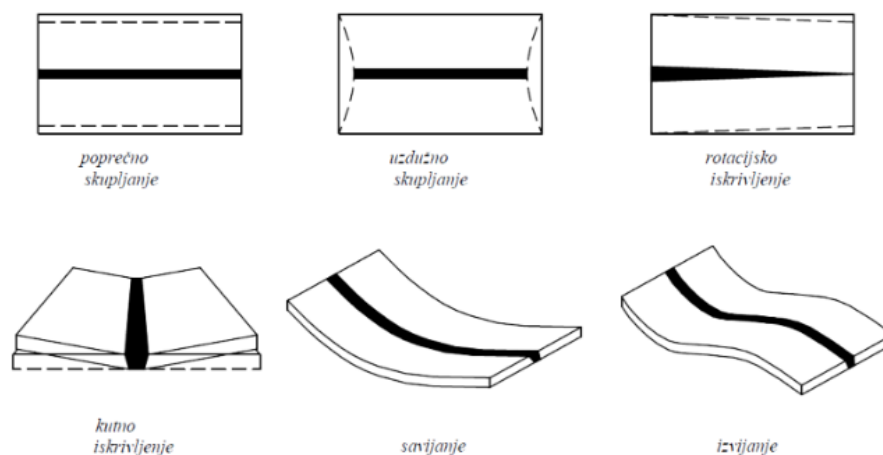
Neovisno o vrsti dizalica, pojava deformacija u sekciji koja se podiže je neizbježna. Te su sekcije velikih dimenzija i masa pa se, osim deformacija uslijed vlastite težine, mogu pojaviti i deformacije uzrokovane zaostalim napreznjima ili zbog načina zavarivanja, npr. kod toplinskog zavarivanja visoka lokalna temperatura može deformirati lim oko zavara. To se događa iz više razloga [6]:

- ⟨ Zagrijavanje materijala, a zatim njegovo hlađenje, odvija se neravnomjerno
- ⟨ Okolni hladniji materijal onemogućuju širenje i skupljanje zagrijanog materijala
- ⟨ Različitim postupcima zavarivanja unose se različite količine topline

Deformacije koje se javljaju uslijed zavarivanja se dijele u šest grupa: uzdužna, poprečna, rotacijska, kutna, savijanje te izvijanje (Slika 3.2.).

Kako se zavar hladi, ukoliko je onemogućeno stezanje, elastično se deformira. Uslijed deformacije u zavaru se javljaju zaostala vlačna napreznja, a u okolini se javlja tlačno napreznje. Posljedice tako zaostalih napreznja su slijedeće:

- ⟨ Smanjuje se ukupna nosivost konstrukcije
- ⟨ Mogućnost pojave pukotina i korozije
- ⟨ Veća podložnost ostalim vrstama naprezanja



Slika 3.2. Vrste deformacija uzrokovanih zavarivanjem

[http://repositorij.fsb.hr/7073/1/Matija\\_2016\\_diplomski.pdf](http://repositorij.fsb.hr/7073/1/Matija_2016_diplomski.pdf)

Iako zaostala naprezanja i deformacije nije moguće u potpunosti eliminirati, mogu se poduzeti neke mjere kako bi se oni smanjili. Najjednostavniji način je samnjiti visinu zavara. Na ovom konkretnom primjeru ne može se unaprijed znati kolika će biti zaostala naprezanja, ali može se izračunati minimalna visina zavara koja zadovoljava zahtjeve te nema potrebe koristiti veću od proračunate. Ta će visina biti određena u nastavku.

Pojava prevelikih deformacija predstavlja problem i s poslovnog stajališta. Naime, u slučaju pojave istih, a pogotovo ako se radi o lomu konstrukcije, potrebne su razne korekcije što znači dodatan utrošak radnih sati, ne samo radnika, nego i osoba odgovornih za planiranje procesa. Procjena radnih sati i troškova radi se u fazi izrade projektnog plana, a na temelju njega radi se mreža aktivnosti. Iznenadno povećanje radnih sati uzrokuje kašnjenja u obavljanju aktivnosti. Svako kašnjenje za sobom povlači niz drugih zakašnjenja i poremećaja u radu cijelog poslovnog sustava. To zatim predstavlja financijske izdatke, jer svako kašnjenje košta, a često je potrebno angažirati više radnika kako bi se ta kašnjenja što je moguće više smanjila.



## 4. DEFINIRANJE PROBLEMA

U prethodnom poglavlju kratko su opisani problemi koji se javljaju zbog pojave deformacija. Iz tog je razloga potrebno u što ranijoj fazi pretpostaviti mjesta njihovog pojavljivanja i iznose, a zato da bi se u što većoj mjeri eliminirale potencijalne opasnosti ili se efikasnije tretirale. To je ujedno i cilj ovog rada. Na odabranoj sekciji 639/T02 provest će se statička i dinamička analiza za postupke podizanja i okretanja, a u svrhu definiranja iznosa pomaka i naprezanja te pronalaženja dijelova strukture gdje potencijalno postoji mogućnost pojave istih. Ti će se dijelovi morati dodatno ukrutiti.

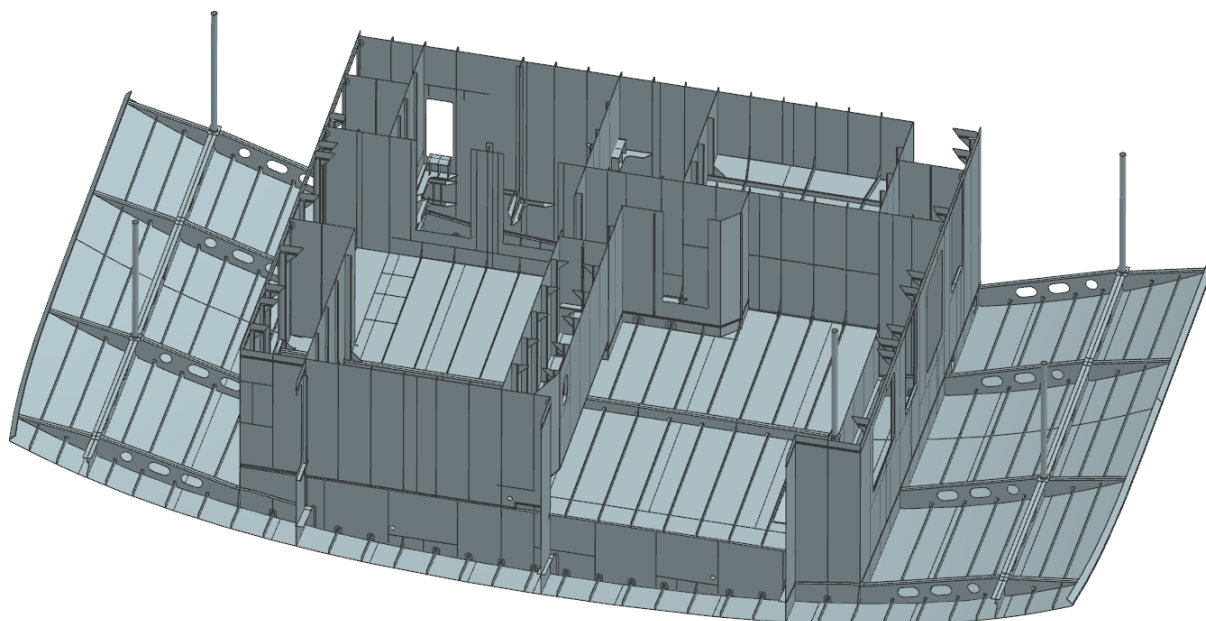
### 4.1. Definiranje strukture za FEM analizu

U suradnji sa *MKM Yachts* preuzet je model sekcije (*Slika 4.1*). Međutim, sekcija je napravljena vrlo detaljno te su uključene i debljine svih pojedinih elemenata. To je rezultiralo pojavom nekoliko problema. Prvi od njih je taj što mnogo elemenata strukture nema nikakav utjecaj na simulaciju i konačne rezultate pa ih je trebalo ukloniti. Nadalje, za potrebe FEM analize model mora biti izrađen tako da sve debljine elemenata budu jednake nuli, odnosno one će se dodati kasnije kao pripadajuće svojstvo (*Property*). Prva ideja bila je ukloniti sve debljine u programskom paketu *FEMAP* koristeći opciju *Midsurface*, no to je rezultiralo pojavom brojnih razmaka između elemenata čije spajanje jednostavno nije imalo smisla. Opcija *Midsurface* daje plohu na sredini debljine razmatranog tijela pa, primjerice, za tijelo debljine 8 mm ta bi opcija napravila plohu koja je 4 mm udaljena od okolnih tijela. Toliki razmak može se spojiti jedino ručno jer bi automatsko spajanje rezultiralo spajanjem ploha koje ne bi trebale biti spojene. Ručno spajanje takvih, čak i većih razmaka, iziskivalo bi previše vremena, pogotovo uzme li se u obzir ranije spomenuta kompleksnost geometrije. Kao dobra alternativna opcija pokazala se izrada novog i pojednostavljenog modela (*Slika 4.2.*) gdje su nepotrebni detalji izostavljeni i cijela struktura je prilagođena za jednostavniju izradu mreže. Ta pojednostavljenja uključuju primjerice zatvaranje prolaza uzdužnjaka i rupa promjera manjeg od 100 mm, koljena su napravljena kao trokutasti elementi (*Slika 4.3.*), a profili kao trake čiji moment otpora presjeka odgovara momentu otpora HP profila koji je zamijenjen tom trakom (*Slika 4.4.*). Maknute su i bimetalne pločice i trake na mjestima gdje se spajaju čelični i aluminijski elementi. U praksi one predstavljaju sredstvo

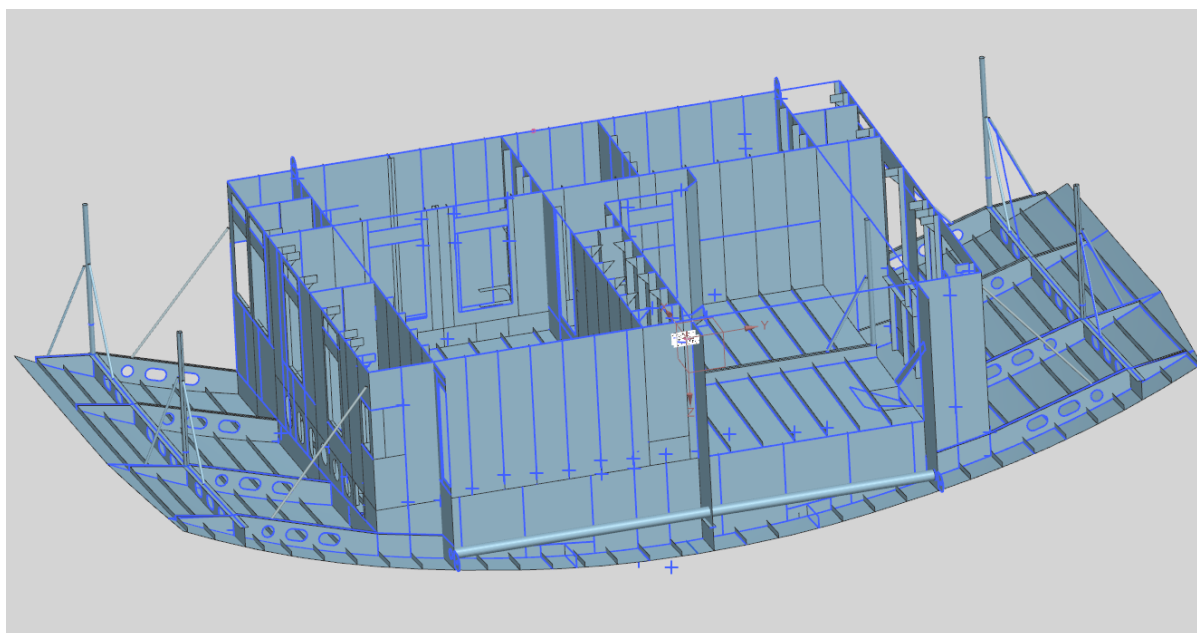
spajanja aluminijske i čelične strukture, aluminijski dio pločice se zavaruje za aluminijsku strukturu, a čelični za čelik. U sredini se nalazi bimetalni spoj aluminijske i čelike nastao eksplozivnim utiskivanjem jednog materijala u drugi. U razmatranom modelu način spajanja aluminijske i čelike nema nikakvu važnost pa nema smisla dodavati pločice. Drugi razlog izbacivanja pločica je njihova geometrija. Plohu visine 28 mm nije isplativo mrežiti jer korištenjem elemenata većih dimenzija na toj plohi znatno se narušava kvaliteta elemenata na okolnim ploham. Popis profila koji su zamijenjeni trakama i njihove dimenzije su dani u *Tablici 4.1*. Dodatno, dodane su i uške za podizanje, a proračun uški bit će dan u nastavku.

<b><i>HP</i></b>	<b><i>W, cm<sup>3</sup></i></b>	<b><i>FB</i></b>
60 x 6	4.55	70
80 x 6	8.15	100
100 x 8	16.3	120
120 x 6	18.5	140
140 x 7	29	160

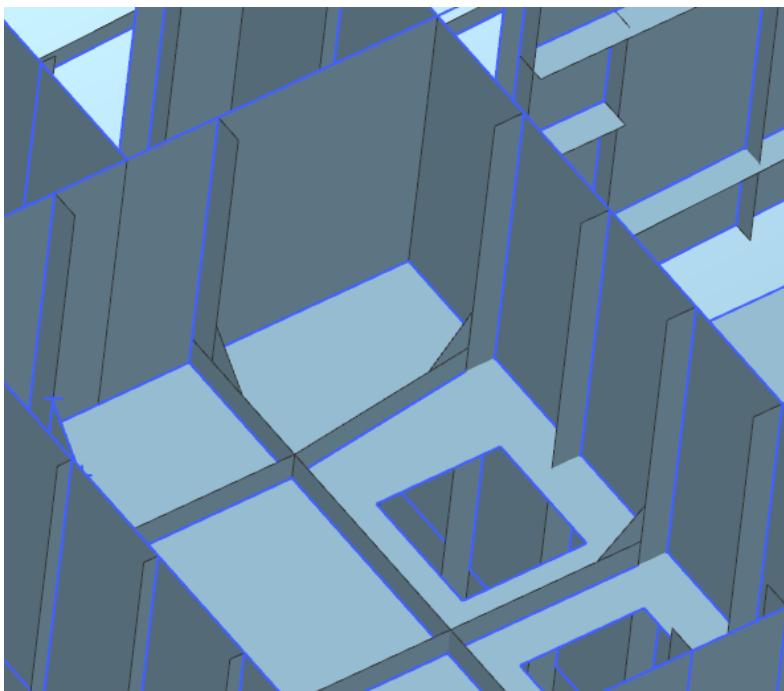
*Tablica 4.1. Popis profila*



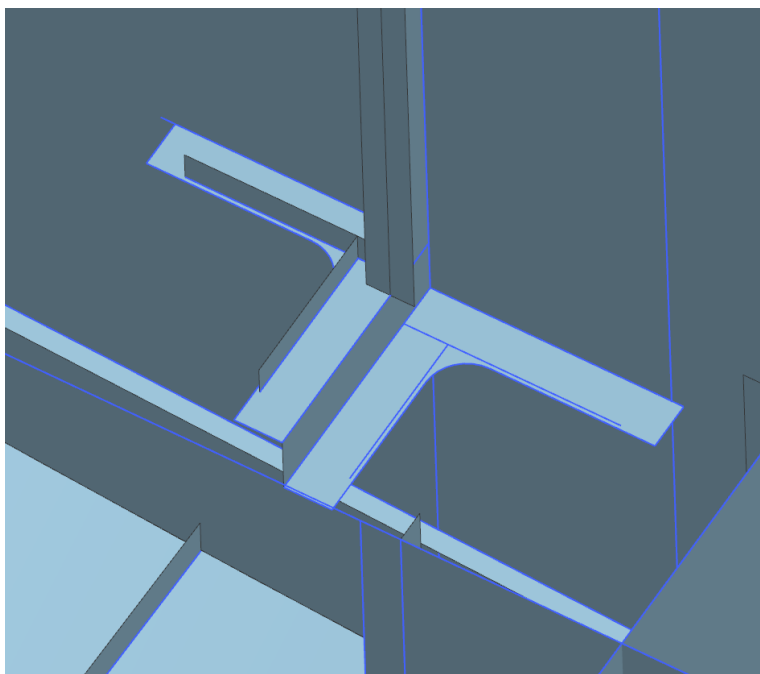
*Slika 4.1. Preuzeti model sekcije*



*Slika 4.2. Izrađeni model sekcije*



*Slika4.3. Detalj koljena kao trokutastih elemenata*



*Slika 4.4. Detalj profila na velikim koljenima*

## 5. DEFINIRANJE UŠKI

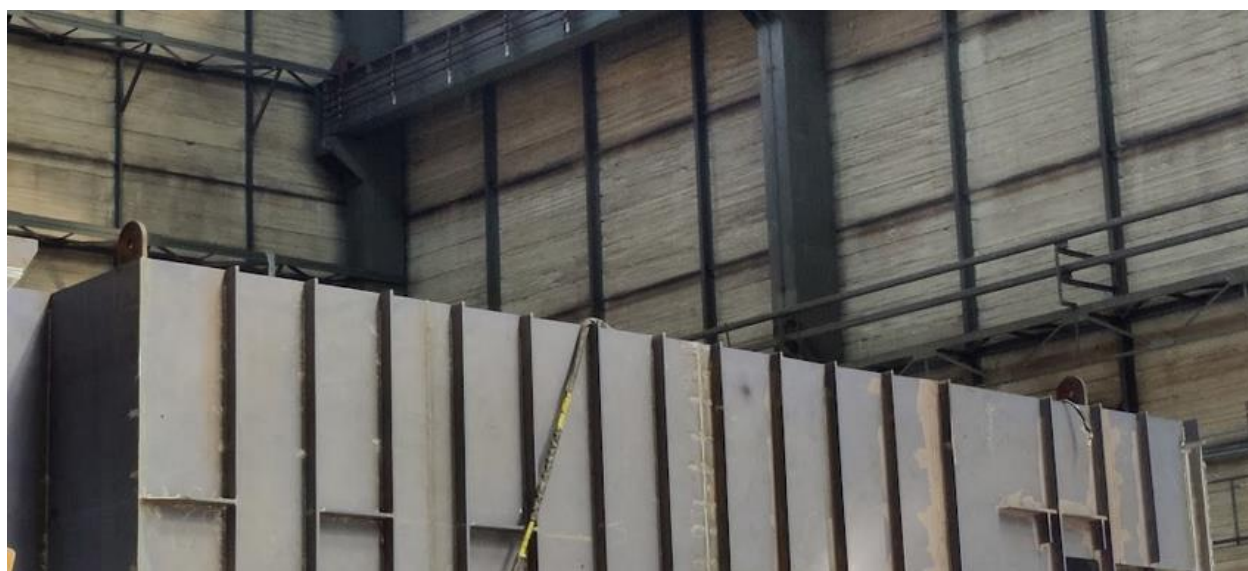
Kako bi postupak podizanja i okretanja bio uspješno izveden, potrebno je odrediti dimenzije i nosivost uški koje će moći izdržati zadana opterećenja. U nastavku je dan proračun kojim se došlo do traženih podataka, a određen je i tip pripadajućeg škopca.

### 5.1. Razmještaj uški

Za ovaj slučaj određeno je da će biti postavljene četiri aluminijske uške, po dvije na rebro *FR 69* te dvije na rebro *FR 78*, a u uzdužnom smjeru po dvije sa svake strane, udaljene 4500 mm od *centerline-a*. Zavarene su na jake uzdužne strukturne elemente te na spoju s aluminijskim krovom (*Slika 5.1.*). Njihov točan razmještaj dan je u *Prilogu 1.* Dodatno su stavljene dvije čelične uške, po jedna na uzdužnim pregradama 4500 mm od *CL-a*, na rebro *FR 78* (*Slika 5.2.*). One su dodane na jer je zaključeno da će okretanjem sekcije sa samo zadnje dvije uške doći do oštećenja strukture od priveznica dizalice. Pritom bi aluminijske uške na rebro *FR 69* te čelične uške služile za podizanje sekcije, zatim bi dizalica polako spuštala prednji kraj dok na kraju sekcija ne bi visila samo na aluminijskim uškama. Nakon toga bi dizalica došla s druge strane i podignula sekciju za aluminijske uške na rebro *FR 78* i na taj način bi se izvršilo okretanje.



*Slika 5.1. Aluminijske uške*



*Slika 5.2. Čelične uške*

## 5.2. Proračun uški

Da bi proračun mogao biti izvršen treba poznavati iznos opterećenja. U ovom slučaju to je samo masa sekcije, koja prema dokumentaciji iznosi  $20\ 890\text{ kg}$ . Na tu je masu dodano 5% kako bi se uključile i mase opreme za podizanje te mase zavora. Ukupna masa sada iznosi  $21\ 934,5\text{ kg}$  što daje silu opterećenja od  $215\ 178\text{ N}$ . Proračun je proveden za najgori slučaj kada će sekcija visiti na samo dvije uške pa će pritom opterećenje na svaku iznositi polovicu ukupnog opterećenja, odnosno  $107\ 589\text{ N}$ .

Nadalje, potrebno je poznavati i svojstva metrijala od kojih će se uške izraditi, u ovom slučaju to su obični čelik i aluminijska legura 5083.

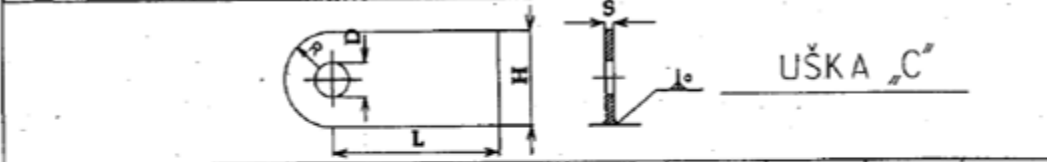
Svojstva aluminijske legure su sljedeća [7]:

- < Modul elastičnosti:  $70,3\text{ kN/mm}^2$
- < Vlačna čvrstoća:  $317\text{ N/mm}^2$
- < Granica tečenja:  $228\text{ N/mm}^2$
- < Poissonov koeficijent: 0,33
- < Gustoća:  $2,66\text{ g/cm}^3$

Svojstva čelika:

- < Modul elastičnosti:  $2,1\text{ kN/mm}^2$
- < Vlačna čvrstoća:  $420\text{ N/mm}^2$
- < Granica tečenja:  $235\text{ N/mm}^2$
- < Poissonov koeficijent: 0,25
- < Gustoća:  $7,85\text{ g/cm}^3$

S obzirom na masu sekcije, odabran je i tip uški koje će se koristiti. To je „Tip C“ uški nosivosti  $25\text{ t}$  odabran iz Standarda brodogradilišta 3. Maj (Slika 5.3.):



TIP UŠKE	RADNO OPTEREĆENJE (kg)	L	H	D	R'	L+R	S	$\alpha^\circ$
C-15	15000	500	270	80	135	635	16	6
C-25	25000	600	330	80	165	765	21	8
C-35	35000	750	400	80	200	950	28	10

Slika 5.3. Odabran tip uški

Izvor: Standardi 3. Maja

Sada su poznati svi podaci i može se izvršiti proračun kako bi se provjerilo hoće li odabrane uške zadovoljiti postavljene uvjete. Prvi uvjet je da izračunata naprezanja moraju biti ispod granice dopuštenog naprezanja između pozitivne i negativne maksimalne vrijednosti naprezanja u slučaju dinamičkog opterećenja [4]. Ta granica iznosi 40% vrijednosti granice tečenja za pojedini materijal i predstavlja svojevrsni faktor sigurnosti. Računa se prema formuli:

$$R_e \geq \frac{3 \cdot RSL}{2 \cdot H \cdot t - D_H \cdot t}, \quad N/mm^2 \quad (5.1.)$$

Gdje je:

- ⟨ RSL – Sila opterećenja / *Resulting sling load*, N
- ⟨ t – debljina uške / *Pad eye thickness*, mm
- ⟨ H – visina od središta uške do ruba / *Distance from center of pad eye hole to pad eye edge*, mm
- ⟨  $D_H$  – promjer uške / *Pad eye hole diameter*, mm
- ⟨  $R_e$  – dopušteno naprezanje pri promjeni opterećenja između pozitivne i negativne maksimalne vrijednosti / *Allowable yield strength deviation between positive and negative max value*,  $N/mm^2$
- ⟨  $R_{e, \max}$  – granica tečenja / *Yield strength*,  $N/mm^2$

Za aluminij dopušteno naprezanje iznosi  $91 \text{ N/mm}^2$ , dok za čelik isto naprezanje iznosi  $94 \text{ N/mm}^2$ .

Kako su dimenzije i opterećenje za obje vrste uški jednaki, naprezanja su slijedeća:

$$R_e = 62 \text{ N/mm}^2$$



Dobivena vrijednost je manja od dopuštene pa je prvi uvjet zadovoljen.

Drugi uvjet je da naprezanja moraju biti ispod granice tečenja. Ona se računaju prema formuli sa već poznatim vrijednostima:

$$R_e \geq 23,7 \cdot \sqrt{\frac{RSL}{D_H \cdot t}}, \quad N/mm^2 \quad (5.2.)$$

Uvrštavanjem ranije definiranih vrijednosti u formulu dobiva se naprezanje:

$$R_e = 190 \quad N/mm^2$$

Čiji iznos je manji od naprezanja i za čelik i za aluminij, što znači da je zadovoljen i drugi uvjet.

Slijedeći korak u proračunu je provjeriti čvrstoću zavara. To se radi za najslabiji presjek, odnosno za visinu zavara. Prema *Slici 5.3.* već je definirana potrebna visina zavara i ona iznosi 8 mm. Predviđeno je da će uške biti zavarene do duljine  $L-R$ , odnosno 435 mm. Uvjet koji zavar mora zadovoljiti je da smična naprezanja u najslabijem presjeku ne pređu dopuštena, koja iznose 110  $N/mm^2$ . Smična naprezanja se računaju prema formuli:

$$\tau = \frac{F}{A}, \quad N/mm^2 \quad (5.3.)$$

Gdje je:

- ◁ F – sila opterećenja / *RSL*, N
- ◁ A – površina zavara / *Welding area*,  $mm^2$

Ukupna površina zavara za visinu od 8 mm iznosi:

$$A = 9600 \quad mm^2$$

Time ukupno naprezanje u zavaru iznosi:

$$\tau = 11,25 \quad N/mm^2$$

čime je zadovoljen i ovaj uvjet.

Konačno, preostalo je odrediti maksimalni kut savijanja uški ( $\alpha$ ) do kojeg smije doći pri podizanju i okretanju. Kut savijanja mora biti takav da konačno dobiveno naprežanje dobiveno na temelju tog kuta ne pređe dopuštenih 40% vrijednosti granice tečenja:

$$\sigma_{max} = \frac{M}{W}, \text{ N/mm}^2 \quad (5.4.)$$

Gdje je:

< M – moment, Nmm

$$M = F_y \cdot l \quad (5.5.)$$

o  $F_y$  – horizontalna komponenta rezultantne sile opterećenja / RSL, N

$$F_y = RSL \cdot \sin(\alpha), \text{ N} \quad (5.6.)$$

o l – krak, udaljenost od centra okretanja, mm

$$l = 165 \text{ mm}$$

< W - moment otpora poprečnog presjeka,  $\text{mm}^3$

$$W = \frac{a \cdot h^2}{6}, \text{ mm}^3 \quad (5.7.)$$

o a – širina uške, mm

$$a = 330 \text{ mm}$$

o h – debljina uške, mm

$$h = 21 \text{ mm}$$

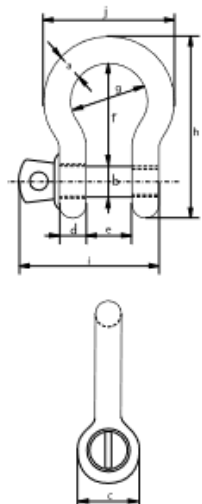
Na temelju raspoloživih vrijednosti i danih formula dolazi se do zaključka da najveći dopušteni kut savijanja može iznositi:

$$\alpha = 5^\circ$$

što na kraju daje naprežanje od  $64 \text{ N/mm}^2$ .

### 5.3. Provjera nosivosti škopca

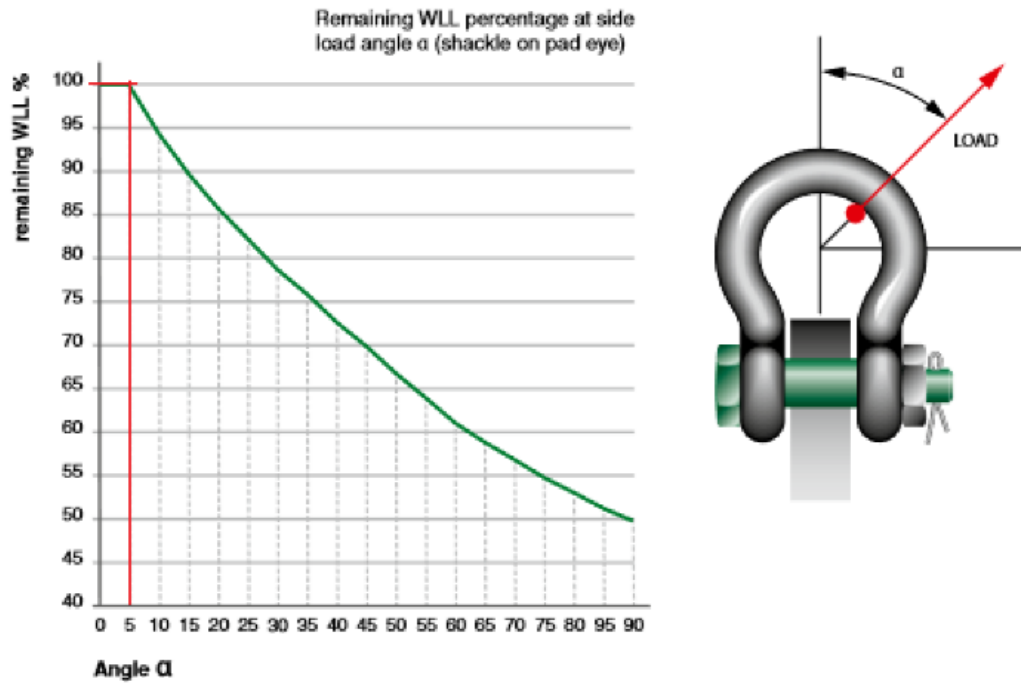
Pri izboru škopca je potrebno voditi računa o nosivosti, ali i o tome da se ostavi dovoljno prostora za sajlju za podizanje, dakle barem 30 mm. Unutarnja duljina  $f$  mora biti barem 30 mm veća od visine uške koja će se nalaziti unutar škopca, a koja iznosi 125 mm. Vrijednost  $f$  stoga mora iznositi minimalno 155 mm. Što se tiče nosivosti, kako se radi o teretu od gotovo 21 t, škopac od 25 t je logičan izbor (Slika 5.4.) [13].



working load limit	diameter bow	diameter pin	diameter eye	width eye	width inside	length inside	width bow	length	length bolt	width	weight each
t	a mm	b mm	c mm	d mm	e mm	f mm	g mm	h mm	i mm	j mm	kg
0.33	5	6	12	5	9.5	22	16	36	29.5	26	0.02
0.5	7	8	16.5	7	12	29	20	48.5	38	34	0.05
0.75	9	10	20	9	13.5	32	22	56	46.5	40	0.1
1	10	11	22.5	10	17	36.5	26	63.5	54	46	0.14
1.5	11	13	26.5	11	19	43	29	74	59.5	51	0.19
2	13.5	16	34	13	22	51	32	89	73	58	0.36
3.25	16	19	40	16	27	64	43	110	89	75	0.63
4.75	19	22	46	19	31	76	51	129	103	89	1.01
6.5	22	25	52	22	36	83	58	144	119	102	1.5
8.5	25	28	59	25	43	95	68	164	137	118	2.21
9.5	28	32	66	28	47	108	75	185	153	131	3.16
12	32	35	72	32	51	115	83	201	170	147	4.31
13.5	35	38	80	35	57	133	92	227	186	162	5.55
17	38	42	88	38	60	146	99	249	203	175	7.43
25	45	50	103	45	74	178	126	300	243	216	12.84
35	50	57	111	50	83	197	138	331	272	238	18.15
42.5	57	65	130	57	95	222	160	377	310	274	26.29
55	65	70	145	65	105	260	180	433	344	310	37.6

Slika 5.4. Određivanje škopca

Potrebno je provjeriti i koliko će se smanjiti nosivost škopca za određeni kut savijanja. Ta se vrijednost očitava sa Slike 5.5.:



Slika 5.5. Provjera nosivosti škopca

Prema očitavanju sa slike jasno se vidi na nosivost ostaje na 100%, odnosno ne smanjuje se.

## 6. MREŽENJE STRUKTURE

### 6.1. Osnove metode konačnih elemenata

Metoda konačnih elemenata predstavlja numeričku metodu rješavanja skupa parcijalnih diferencijalnih jednačbi koje su međusobno povezane, a dobivene su aproksimacijom nepoznatih varijabli nekog kontinuiranog područja skupom varijabli u konačnom broju čvorova. Svaki čvor je diskretna točka tog područja te predstavlja vezu među manjim i jednostavnijim dijelovima promatranog kontinuiranog područja, odnosno konačnim elementima. Povezane jednačbe čine jednačbe ravnoteže, a skup varijabli predstavlja pomake čvorova. Međusobna veza između sila i pomaka definira svaki element što znači da svaki čvor elementa predstavlja rubni uvjet koji treba riješiti. Svi elementi, dakle, čine cjelinu s konačnim brojem čvorova čime se diferencijalne jednačbe transformiraju u skup algebarskih jednačbi s nepoznatim pomacima u točkama među elementima. Dva elementa djeluju jedan na drugi isključivo preko zajedničkih vrijednosti konačnog skupa varijabli koje su definirane na zajedničkim rubovima [9].

Prvi korak u primjeni metode je diskretizirati područje, odnosno zadanu konstrukciju zamijeniti mrežom. Pritom se mogu pojaviti dvije greške u odnosu na stvarno ponašanje promatrane konstrukcije: greška modela te greška diskretizacije. Greška modela se očituje u razlikama između stvarne konstrukcije i napravljenog modela, što model više odgovara stvarnom stanju, to je greška manja. Greška diskretizacije ovisi o kvaliteti mreže te o veličini elemenata. Veći elementi rezultiraju njihovim manjim ukupnim brojem, a to podrazumijeva manji broj čvorova za koje se rješavaju jednačbe. Za veću točnost potrebno je koristiti kvalitetniju i finiju mrežu konačnih elemenata ili povećati stupanj slobode istih konačnih elemenata. Imajući ovo na umu, jasno je da će se na zadanom primjeru pojaviti određena odstupanja od stvarnih pomaka i deformacija, no dobiveni rezultati bi u konačnici trebali dovoljno točno prikazati stvarno stanje.

Kako točnost rezultata analize ovisi o pravilnom izboru elemenata, važno je razlikovati osnovne vrste: gredne, plošne te prostorne. Gredni elementi su jednodimenzionalni te čine jednodimenzionalnu mrežu  $K^h$  otvorenog skupa  $\Omega$ . Pritom mora biti zadovoljeno jedno od slijedećih svojstava:

$$K_i = K_j$$

$K_i \cap K_j$  je zajednički čvor

$$K_i \cap K_j = \emptyset$$

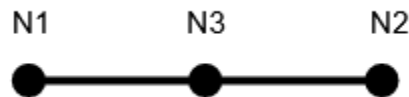
Pri čemu vrijedi:

$$\cup_{K_i \in K^h} K_i = \bar{\Omega} \quad (6.1.)$$

Za jednodimenzionalni slučaj to znači da mreža mora pokriti cijelu konstrukciju, a da pritom dva elementa:

- ⟨ mogu imati jedan zajednički čvor ili
- ⟨ nemaju nijednu dodirnu točku ili
- ⟨ isti su element.

Slika 6.1. prikazuje mrežu od dva jednodimenzionalna elementa spojena preko jednog čvora u sredini. Takva mreža može predstavljati npr. gredu.



Slika 6.1. Jednodimenzionalna mreža

Izvor: [https://wiki.freecadweb.org/FEM\\_Element\\_Types](https://wiki.freecadweb.org/FEM_Element_Types)

Za dvodimenzionalnu mrežu  $K^h$ , koju čine trokuti i četverokuti, otvorenog skupa  $\Omega$  vrijede ista svojstva kao i za jednodimenzionalnu, ali može vrijediti i dodatno svojstvo:

$K_i \cap K_j$  je zajednička stranica

U ovom slučaju to znači da dva dvodimenzionalna elementa, mogu imati:

- ⟨ zajednički čvor ili
- ⟨ zajedničku stranicu ili

- ⟨ nemaju zajednički čvor
- ⟨ isti su element

Slika 6.2. prikazuje dvije vrste plošnih elemenata:



Slika 6.2. Trokutasti i kvadratni plošni element

Izvor: <https://core.ac.uk/download/pdf/210570618.pdf>

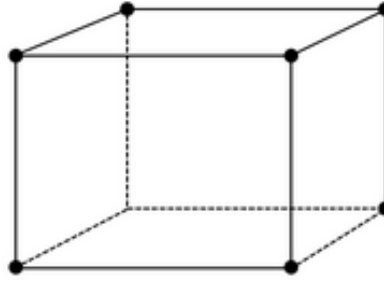
Kao i u prošlom slučaju, za trodimenzionalnu mrežu  $K^h$  otvorenog skupa  $\Omega$  može vrijediti još jedno dodatno svojstvo:

$K_i \cap K_j$  je zajednički brid

Nju čine tetraedri i heksaedri, a oni mogu imati:

- ⟨ zajednički čvor ili
- ⟨ zajednički brid ili
- ⟨ zajedničku stranicu ili
- ⟨ nemaju zajedničkih točaka ili
- ⟨ isti su element

Na Slici 6.3. je dan primjer prostornog elementa. Jasno se vidi da ima najviše stupnjeva slobode od svih vrsta elemenata te time daju najtočnije rezultate, međutim, za neke vrste konstrukcija jednostavno ih nema smisla koristiti. Jedan takav primjer je promatrana sekcija. Prostorni elementi su mogli biti korišteni na prvom modelu koji je preuzet, ali vrijeme koje je potrebno za provedbu analize je znatno duže. Uz to, potrebna je i velika računalna snaga.



Slika 6.3. Prostorni element

Izvor: <https://core.ac.uk/download/pdf/210570618.pdf>

Kako je ranije navedeno, pomaci se računaju u svakom čvoru mreže, a proračun se vrši preko matrice krutosti. Krutost predstavlja otpornost elementa na deformaciju, a matematički je definirana kao omjer sile  $F$  koja uzrokuje deformaciju i same te deformacije  $\varepsilon$ :

$$k = \frac{F}{\varepsilon} \left[ \frac{N}{mm} \right] \quad (6.2.)$$

Krutost može biti podijeljena u tri osnovne grupe: aksijalna, krutost na savijanje ili krutost na torziju, a ovisi o vrsti odabranog elementa. Za svaki čvor sastavlja se matrica krutosti koja ovisi o koeficijentu krutosti. Kako je cilj dobiti pomake, postavlja se pitanje koja je veza između pomaka i deformacije [3]. Već je ustanovljeno da deformacija predstavlja promjenu oblika tijela. Ako se na tijelu promatra neka točka  $A$ , nakon deformiranja uzrokovanog vlačnim ili tlačnim naprezanjima ta točka će prijeći u položaj  $A_1$ . Za slučaj jednodimenzionalnog tijela, npr. štapa, pomak točke će biti linearan, u smjeru jedine osi  $x$ , a iznositi će  $A_1-A$  i bit će jednak produljenju štapa. Općenito, u tom slučaju deformacija promjenu duljine po osi  $x$  te iznosi:

$$\varepsilon = \frac{du}{dx} , mm \quad (6.3.)$$

Ukoliko se radi o dvodimenzionalnom tijelu, pomaci će se rastaviti na  $x$  i  $y$  komponentu, dok će za trodimenzionalno tijelo postojati i  $z$  komponenta.

Matrica sastavljena za pojedini čvor predstavlja lokalnu matricu krutosti. Lokalne matrice svakog čvora treba povezati u jednu globalnu matricu koja vrijedi za cijelu mrežu. Da bi to bilo moguće, pomaci moraju biti kompatibilni te mora postojati ravnoteža sila u svakom čvoru mreže. Globalna



matrica krutosti nastaje superpozicijom lokalnih matrica te poprima slijedeći, pojednostavljeni i linearni, oblik:

$$\{F\} = [K] \cdot \{u\} \quad (6.4.)$$

Gdje je:

- < F – vektor sile
- < K – matrica krutosti
- < u – pomak čvora

Globalna, kao i lokalna, matrica krutosti je simetrična i singularna, odnosno determinanta joj je jednaka nuli. Rješava se raznim metodama, možda najpoznatija je Gaussova eliminacija. Neovisno o metodi koja se koristi, važno je da zauzima što je manje memorije moguće, da broj operacija koje se izvode bude što manji te da greška pri zaokruživanju bude što manja.

Da bi matrica bila riješena treba unijeti određene rubne uvjete, točnije poznate pomake. Pomaci su poznati u postavljenim osloncima i iznose nula. Time su neki članovi matrice eliminirani i preostalo je  $n$  jednadžbi s  $n$  nepoznanica. Opterećenja su poznata, dakle zna se vektor sile. Matrica krutosti je također poznata. Traženi pomaci se, konačno, dobivaju inverznom matricom:

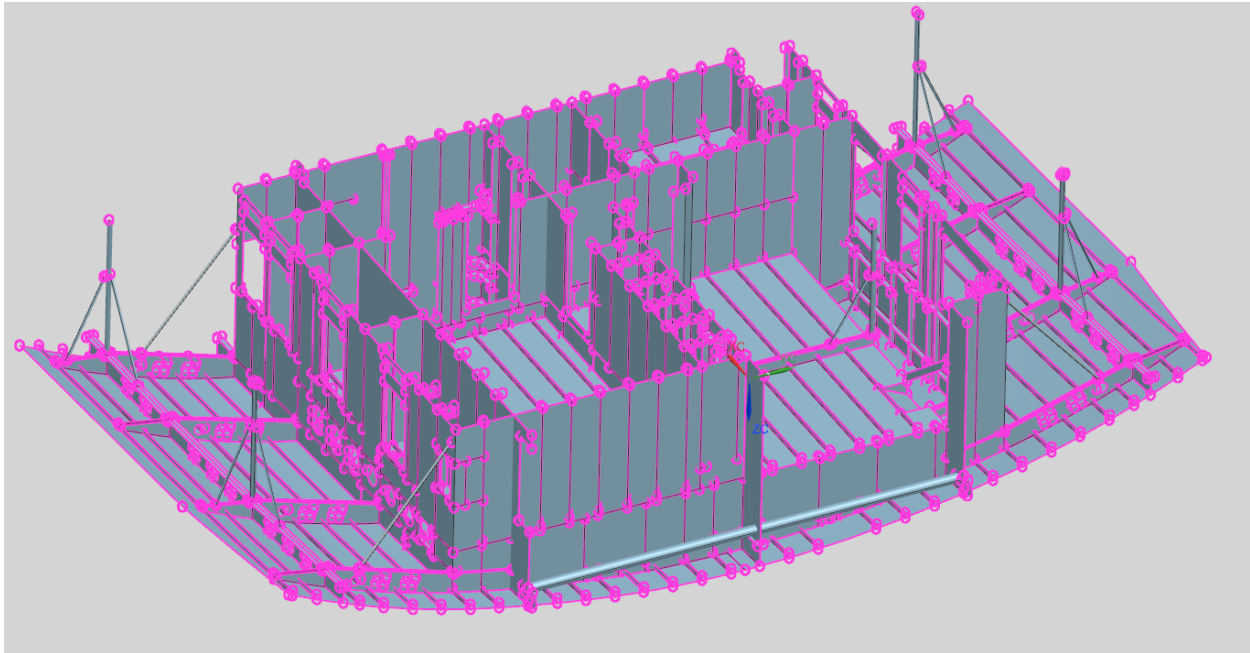
$$\{u\} = [K]^{-1} \cdot \{F\} \quad (6.5.)$$

Kada su pomaci poznati, lako je dobiti naprezanja pomoću već poznatog Hooke-ovog zakona.

## 6.2. Uvoz geometrije u FEM alat

Za izradu sekcije korišten je programski paket *Siemens NX*. Razlog tome je bio izbjegavanje pojave razmaka, tzv. *gapova* između ploha koji se inače javljaju pri uvozu geometrije u neki alat za FEM analizu. To se događa jer FEM alat pretvara uvezenu geometriju u matematički model na kojem računalo radi proračune, a pretvaranjem jednog formata modela u drugi, pojednostavljeni, tolerancije se mijenjaju. Time se javljaju razmaci među plohami koji do tada nisu postojali. Ukoliko se isti pojave, potrebno ih je spojiti kako kasnije ne bi došlo do greški u mreženju i u konačnim rezultatima analize. Ukoliko postoje razmaci koji nisu uklonjeni, neće ni mreža biti povezana, te elementi ne mogu djelovati jedan na drugoga. Kako *Siemens NX* već sadrži aplikaciju

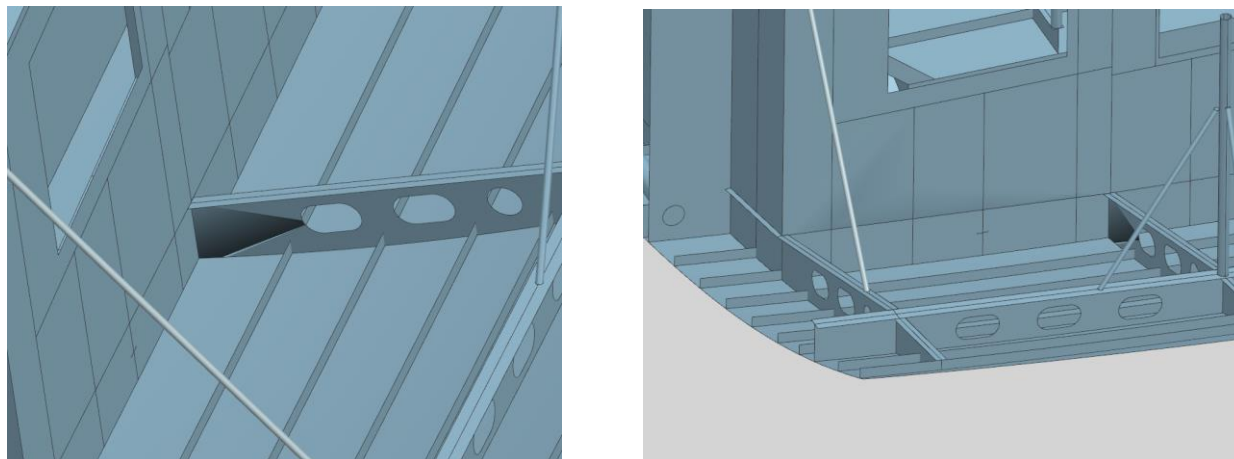
za FEM analizu, odlučeno je izraditi mrežu odmah u njoj. *Slika 6.4.* prikazuje slobodne rubove (*Free edges*) koji su se pojavili na sekciji nakon prelaska u aplikaciju za FEM.



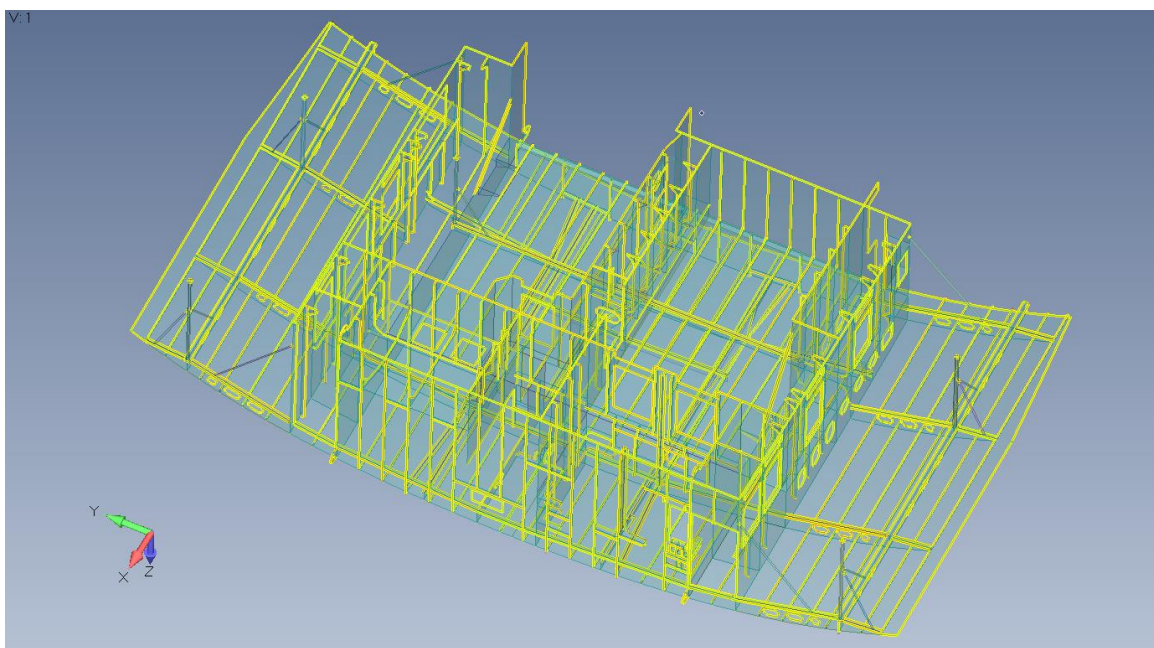
*Slika 6.4. Slobodni rubovi*

Može se vidjeti da nijedan rub nije spojen za pripadajuću plohu, odnosno da postoje *gapovi* između svih ploha u modelu. Moguće je da se to dogodilo zbog greške u tolerancijama ili zbog postojanja duplih elemenata. No, bez obzira na prikazano, pokušana je provedba automatskog spajanja rubova. Rezultati su naizgled bili zadovoljavajući, međutim, daljnjim pregledavanjem uočene su razne greške. *Slika 6.5.* prikazuju jednu takvu grešku gdje su plohe nakon spajanja rubova postale iskrivljene. To se vjerojatno dogodilo zbog složenosti modela, korištenjem automatskog spajanja rubova gubi se kontrola nad samim procesom pa se preporuča korištenje ručnog spajanja, bilo da se radi o spajanju ruba na plohu ili jednog ruba na drugi. Kako je ručno spajanje rubova isključeno zbog velikog broja istih, a samim time iziskuje previše vremena, taj je problem riješen prebacivanjem geometrije u *FEMAP*. *Gapovi* su spojeni opcijom *NonManifold Add* koja automatski povezuje slobodne rubove s tolerancijom  $1E-6$ . Rezultati spajanja prikazani

su na *Slici 6.6*. Naravno, uz ovaku malu toleranciju neki rubovi, čiji je razmak veći, će ostati nepovezani. To će se kasnije napraviti ručno.



*Slika 6.5. Iskrivljene plohe*



*Slika 6.6. Spojeni rubovi pomoću opcije NonManifold Add*

### 6.3. Postupak mreženja

Prvi korak kod izrade mreže bio je definirati materijale koji su korišteni za izradu sekcije. Materijali su, dakako, aluminij i čelik te su im pridružena pripadajuća, ranije navedena svojstva. Oni su služili kao podloga za definiranje tzv. *Property-ja*. U ovom slučaju to znači da su napravljene grupe ovisno o vrsti elemenata. Elementi su podijeljeni prema materijalu te prema debljinama. Popis grupa s pripadajućim materijalima i debljinama je dan u *Tablici 6.1*. Cijeli ovaj postupak i nije nužan u trenutnoj fazi izrade mreže, ali uvelike olakšava cijeli proces mreženja. Svakom *property-ju* je dodijeljena i različita boja, no to je napravljeno čisto iz estetskih razloga i radi lakšeg snalaženja u modelu.

Treba napomenuti i da je kod definiranja materijala od velike važnosti pravilan izbor mjernih jedinica. Naime, *FEMAP* koristi bezdimenzijske veličine pa treba paziti da sve vrijednosti koje se upisuju budu usklađene. *Slika 6.7* prikazuje odabrane mjerne jedinice:

MASS	LENGTH	TIME	FORCE	STRESS	ENERGY	Steel Density	Steel Modulus	G - Gravity Constant
kg	m	s	N	Pa	Joule	7.83E+03	2.07E+11	9.81
kg	mm	ms	kN	Gpa	kN-mm	7.83E-06	2.07E+02	9.81E-03
g	cm	s	dyne	dyne/cm <sup>2</sup>	erg	7.83E+00	2.07E+12	9.81E+02
g	cm	us	1e7N	Mbar	1e7 N-cm	7.83E+00	2.07E+00	9.81E-10
g	mm	s	1e-6N	Pa	1e-9 J	7.83E-03	2.07E+11	9.81E+03
g	mm	ms	N	Mpa	N-mm	7.83E-03	2.07E+05	9.81E-03
ton	mm	s	N	Mpa	N-mm	7.83E-09	2.07E+05	9.81E+03
lbf-s <sup>2</sup> /in	in	s	lbf	psi	lbf-in	7.33E-04	3.00E+07	3.86E+02
slug	ft	s	lbf	psi	lbf-ft	1.52E+01	4.32E+09	32.2

*Slika 6.7. Odabrane mjerne jedinice*

Izvor: <https://community.sw.siemens.com/s/question/0D54O000061xq8gSAA/how-to-find-the-total-mass-of-structure>

<i>Redni broj</i>	<i>Property</i>	<i>Materijal</i>	<i>Debljina, mm</i>
1	Krov	Aluminij	6
2	Pregrade	Čelik	6
3	Profili	Čelik	6
4	Koljena	Čelik	6
5	Paluba	Aluminij	8
6	Profili	Aluminij	8
7	Koljena	Aluminij	8
8	Rebra	Aluminij	6
9	Trake	Aluminij	6
10	Uzdužni nosači	Aluminij	6
11	Stupovi	Aluminij	6
12	Uške	Čelik	21
13	Uške	Aluminij	21
14	Pregrade	Aluminij	6
15	Paluba	čelik	6

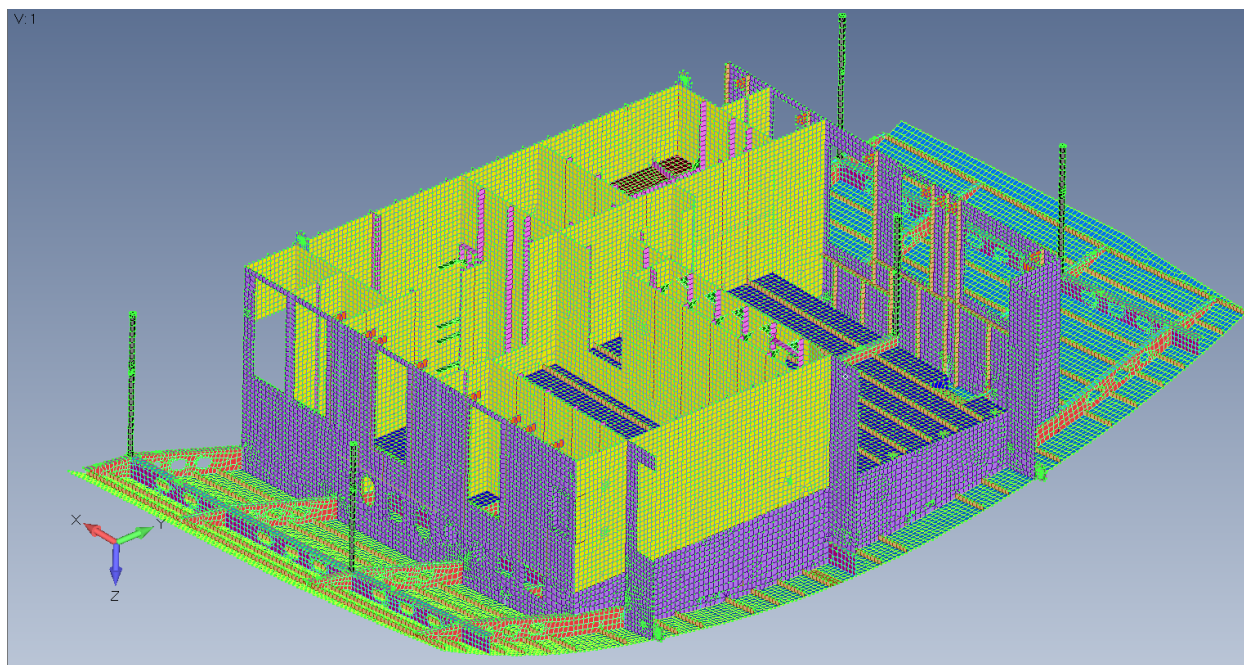
*Tablica 6.2. Materijali i debljine*

U modelu su postavljene privremene upore na mjestima gdje se očekuju velika naprezanja, međutim, u ovoj prvoj iteraciji ti elementi nisu mreženi pa stoga nisu ni navedeni u *Tablici 6.2.* Ideja je da se mreži samo struktura bez dodatnih pojačanja i provede analiza, te se na taj način i prema dobivenim rezultatima utvrdi točno na kojim mjestima su potrebna pojačanja.

Za mreženje su odabrani plošni kvadratni elementi veličine 100 mm te je ista veličina primjenjena na sve *Property-je*. Plošni elementi se općenito koriste za prikaz tankostijenih elemenata konstrukcije, odnosno onih kojima je iznos debljine zanemariv u odnosu na duljinu i širinu, a prenose opterećenja isključivo u vlastitoj ravnini. Cijeli problem je dvodimenzionalan upravo zbog tog zanemarivanja debljine, a postaje trodimenzionalan zadavanjem debljine u *Property-ju*. Iako se javljaju u dva oblika, trokutasti ili četverokutni, ovdje su odabrani četverokutni jer omogućuju

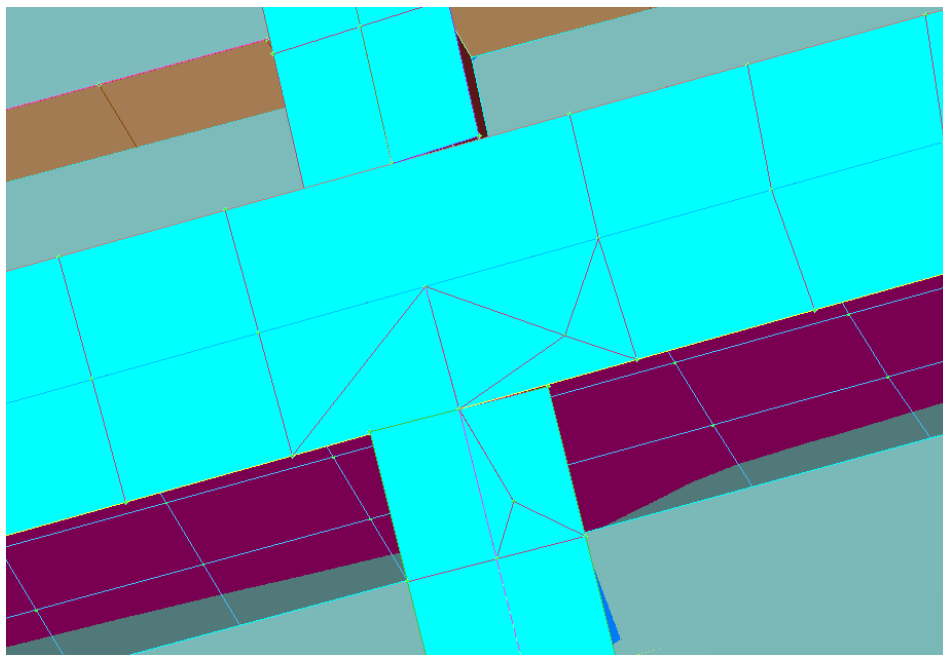
više stupnjeva slobode gibanja. Međutim, pojava trokutastih elemenata ne može biti izbjegnuta u područjima gdje se nalazi kompleksnija geometrija poput zakrivljenih rubova, otvora ili presjecišta pojedinih dijelova strukture.

Rezultat mreženja prikazan je na *Slici 6.8.*:

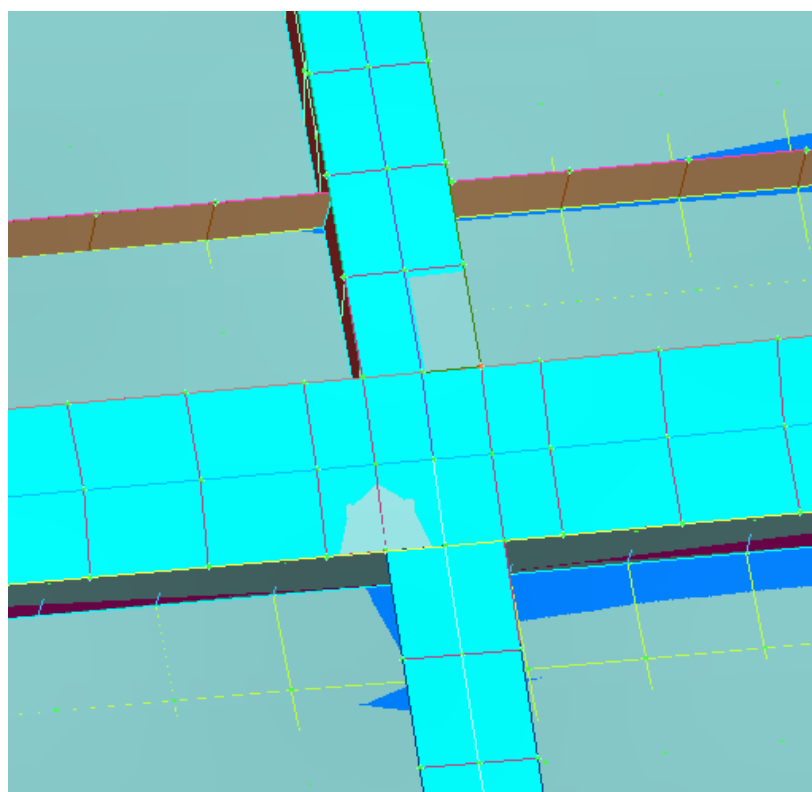


*Slika 6.8. Dobivena mreža*

Dobivenu mrežu je trebalo pregledati i riješiti sve greške koje su se pojavile. Najčešće se to događalo na križanjima elemenata koji nisu bili spojeni prilikom početnog spajanja rubova. Jedan takav primjer dan je na *Slici 6.9.* Problem je riješen ručnim spajanjem elemenata mreže. Najprije je korištena opcija *Unrefine* kako bi se maknuli trokutasti elementi. Zatim je tako dobiveni element podijeljen na dva dijela opcijom *Edit – Interactive* te su, konačno, elementi spojeni opcijom *Move To - Node To Location – On Node*. Rezultat ručnog spajanja elemenata je prikazan na *Slici 6.10.*

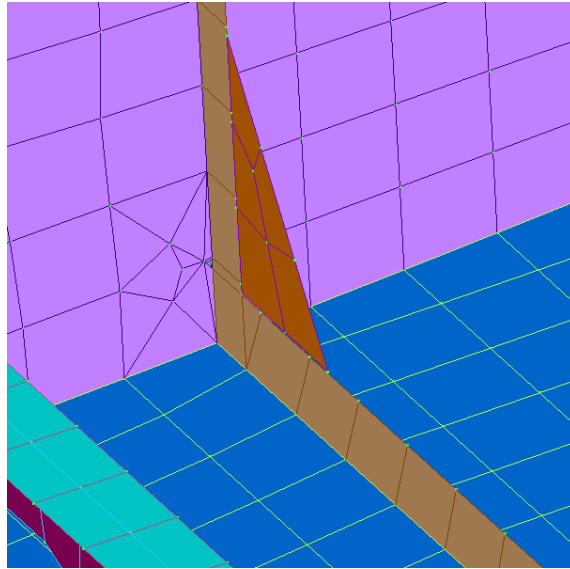


*Slika 6.9. Primjer pogrešno spojenih elemenata*

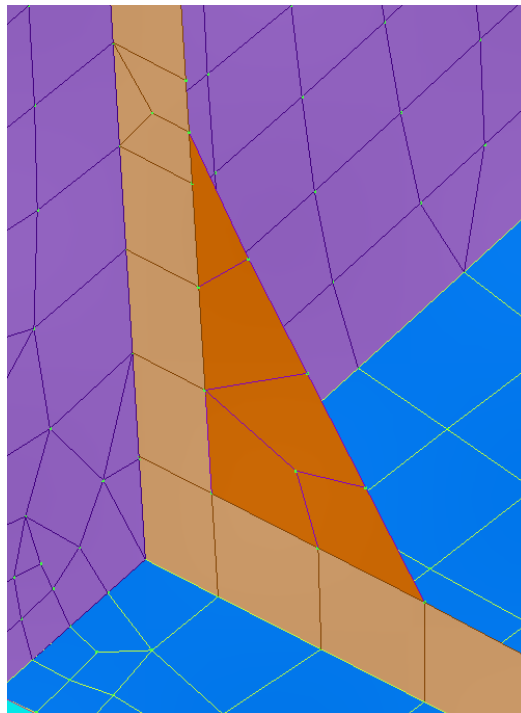


*Slika 6.10. Ručno spojeni elementi*

Još jedan od problema koji se pojavio su bili dupli elementi koji su išli jedan preko drugoga, što je rezultiralo njihovim nespajanjem (*Slika 6.11.*). Takve elemente je trebalo obrisati i, već opisanim postupkom, napraviti nove elemente. Naravno, potrebno je ispraviti i mrežu na okolnoj strukturi (*Slika 6.12.*).



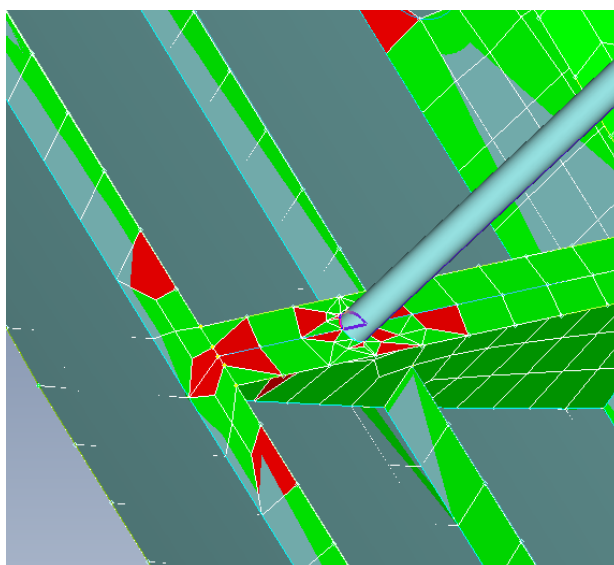
*Slika 6.11. Dupli elementi*



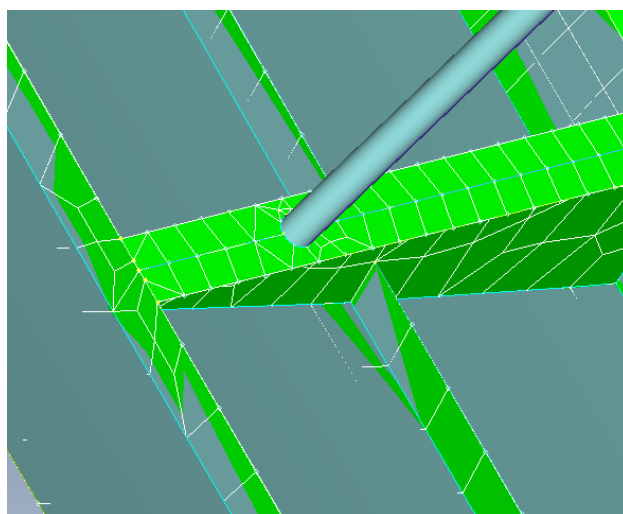
*Slika 6.12. Ispravljena mreža*



Posebnu pozornost trebalo je obratiti na mrežu oko privremenih upora. Iako one nisu mrežene u prvoj iteraciji, njihovi rubovi su spojeni za plohe u slučaju mreženja u kasnijim fazama. S obzirom na to da imaju okrugli poprečni presjek i naslanjaju se na strukturu male širine, odnosno tamo gdje nema dovoljno prostora, dobivena mreža je vrlo sitna i nepravilna. Provjerom kvalitete mreže (Slika 6.13.) uočeno je da postoji veći broj loših elemenata koje je trebalo ukloniti. Oni su također uklonjeni ručno, ali zbog geometrije neki sitni elementi se i dalje pojavljuju te je mreža i dalje nepravilna. Međutim, daljnjom provjerom vidi se da je njihova kvaliteta zadovoljavajuća (Slika 6.14.).

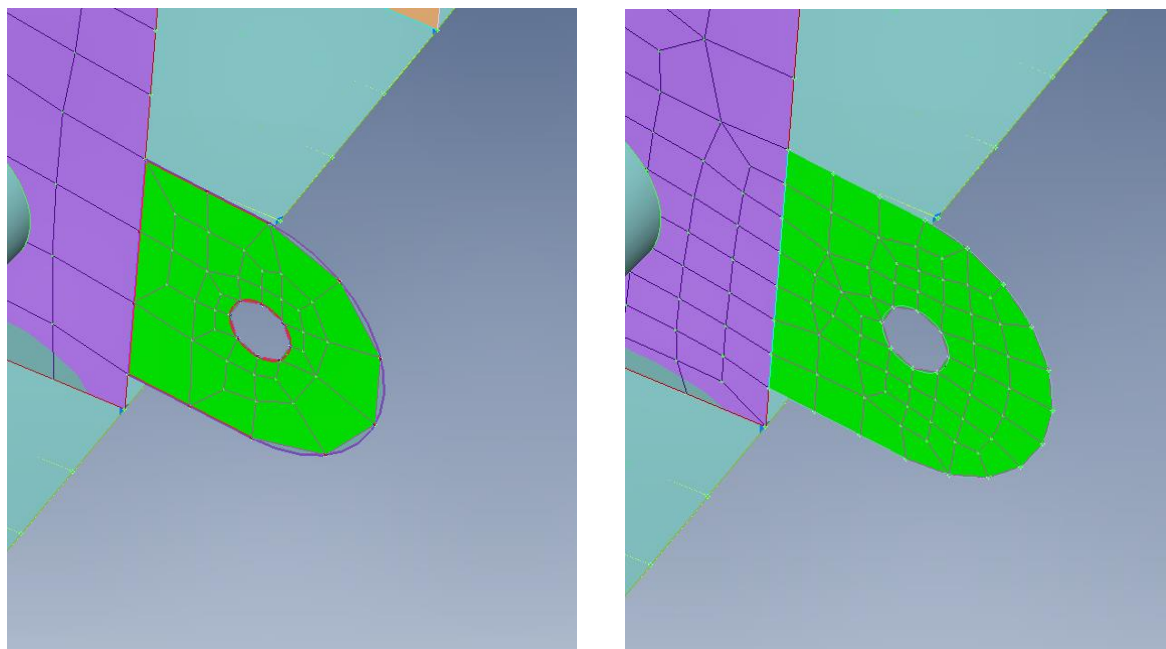


*Slika 6.13. Mreža oko privremene upore*



*Slika 6.14. Mreža nakon ispravljanja*

Još jedna važna stvar je prilagoditi mrežu na mjestima koja su posebno opterećena. U ovom primjeru to su uške. Naime, zbog velikih opterećenja kojima su izložene, napravljena je sitnija mreža sa elementima veličine 50 mm (*Slika 6.15.*).



*Slika 6.15. Mreža na uškama: elementi veličine 100 mm (prva slika), elementi veličine 50 mm (druga slika)*

#### 6.4. Opterećenja

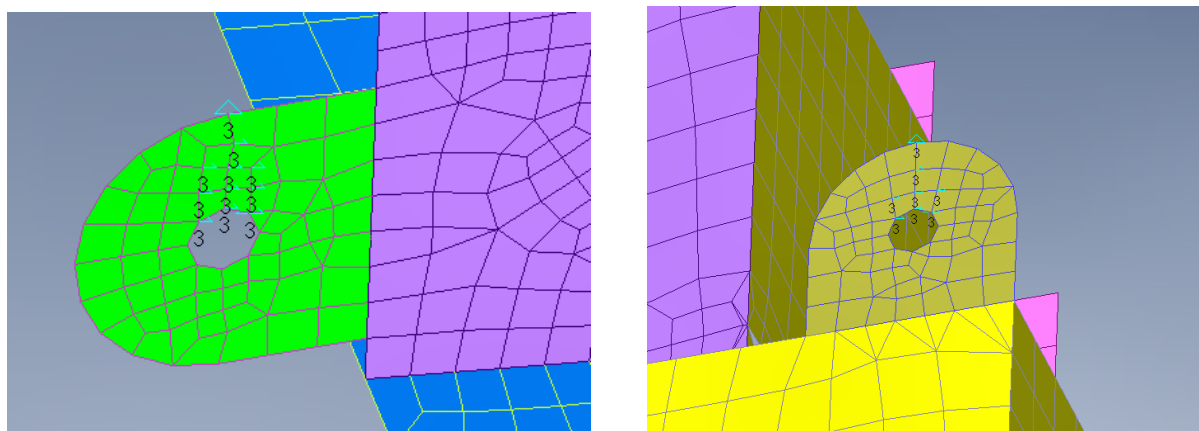
U početnoj fazi, dakle prije podizanja, sekcija je opterećena samo vlastitom težinom, što znači da je potrebno zadati samo ubrzanje sile teže. Međutim, kako se radi o pojednostavljenom modelu, njegova masa ne odgovara stvarnoj masi sekcije. Da bi rezultati bili što točniji, ubrzanje sile teže je potrebno korigirati kako bi se kompenzirala težina koja nedostaje. Opcijom *Mass Properties* utvrđena je slijedeća masa modela:

$$m = 19\,337,39 \text{ kg}$$

Već je navedeno da stvarna masa iznosi  $20\,890\text{ kg}$  pa se stavljanjem te dvije vrijednosti u omjer dobiva nova vrijednost  $g$ :

$$g = 10,594\text{ m/s}^2$$

Slijedeći korak je postaviti oslonce, odnosno *Constraints*. Oni su postavljeni u čvorove, *Nodalno*, i to u nekoliko čvorova na uškama (*Slika 6.16.*). Odlučeno je da će oslonci biti postavljeni na taj način, a ne samo u jednom čvoru, kako bi se izbjegla prevelika koncentracija opterećenja, a samim time i dobili točniji rezultati. Takav način raspodjele oslonaca i više odgovara stvarnom stanju uzevši u obzir da su uške opterećene po cijelom presjeku, a ne samo u jednoj točki. Treba napomenuti i da su oslonci fiksirani u smjeru osi  $z$ , odnosno, onemogućena je translacija po  $z$  osi, što znači da se sekcija pod zadanim opterećenjem ne može gibati u smjeru osi  $z$  u beskonačnost.



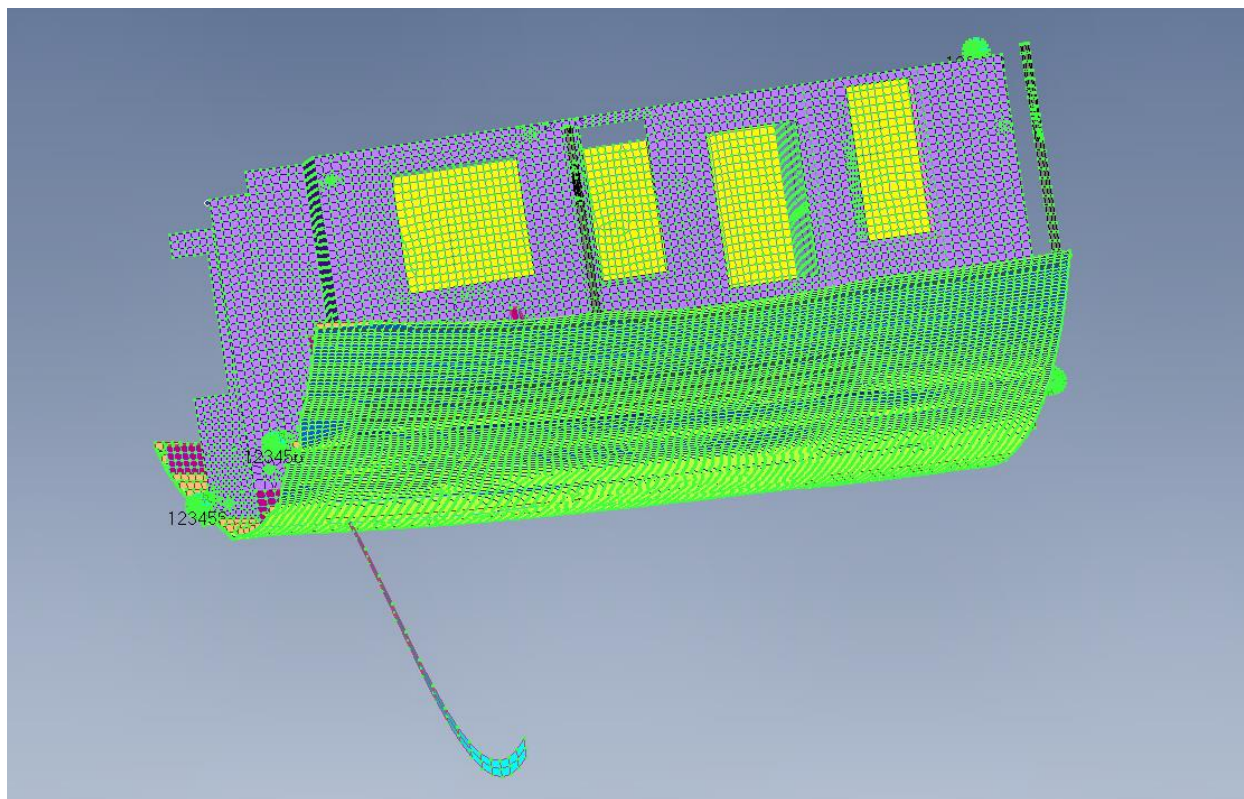
*Slika 6.16. Postavljeni oslonci*

## 7. REZULTATI STATIČKE ANALIZE

Nakon što su zadani opterećenje i oslonci može se započeti s prvom analizom. Kako je i očekivano, pojavile u se greške te prva analiza nije niti izvedena do kraja. Unatoč brojnim provjerama, uvrđeno je da su u modelu i dalje potojale greške koje su onemogućile dobivanje rezultata pa je iste trebalo pronaći i ispraviti. Opcijom *Check – Element Quality* pronađeni su izrazito loši elementi (*Slika 7.1.*) koje je ujedno i nemoguće pronaći samo vizualnim pregledom modela. Brisanjem tih elemenata problem je riješen te je provedena nova analiza. Rezultati su prikazani na *Slici 7.2.*

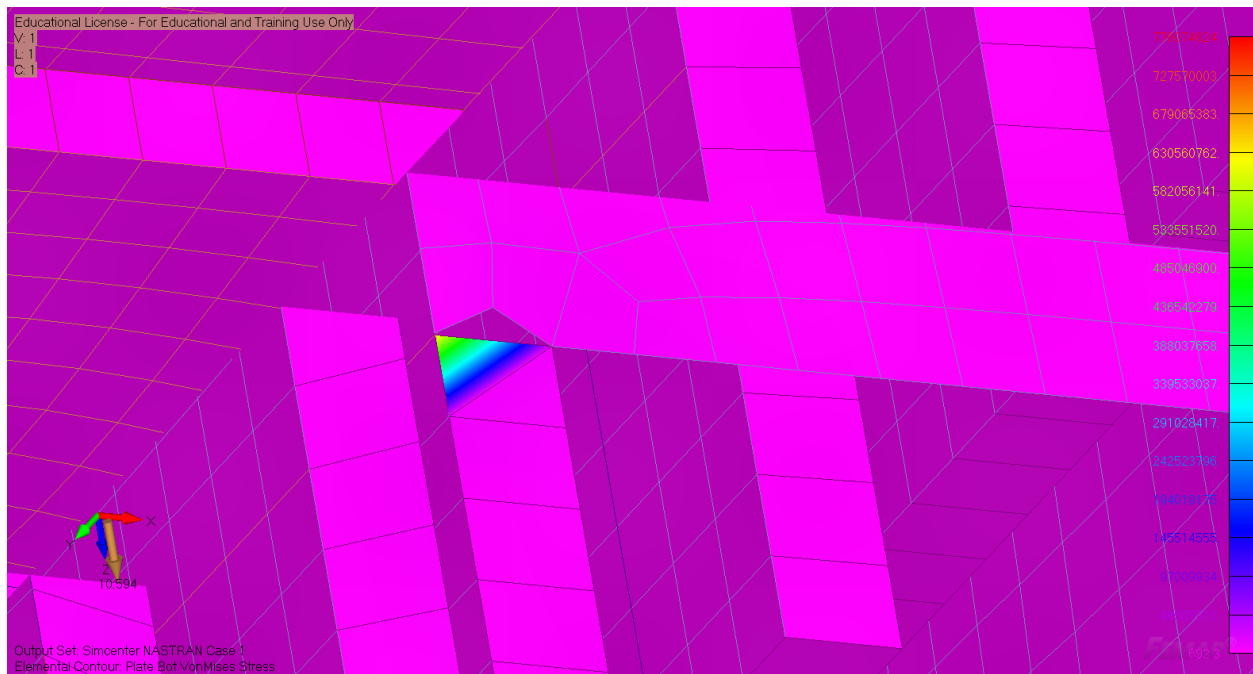


*Slika 7.1. Uzrok neprovođenja analize*



*Slika 7.2. Nespojeni elementi*

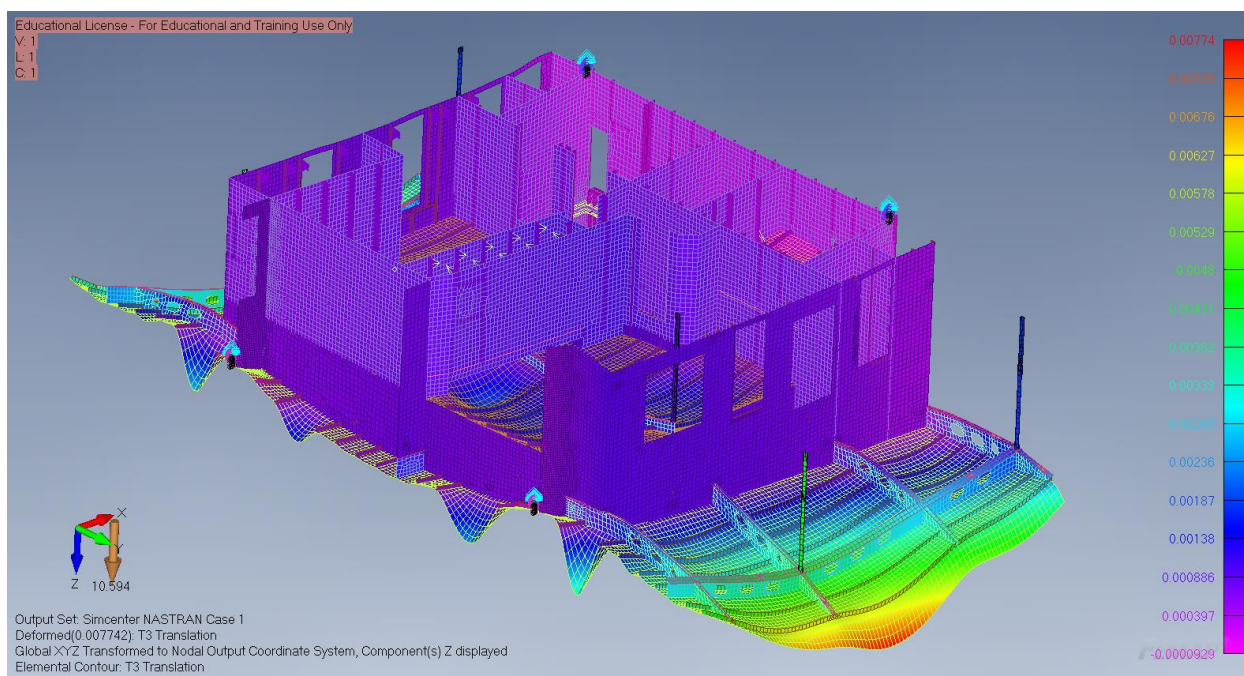
Iz *Slike 7.2.* se jasno vidi da postoji još greški koje nisu ispravljene, u ovom slučaju postoje nepovezani elementi. To je razlog zašto je dobiven ovako veliki pomak dijela strukture pa je taj dio bilo potrebno ručno spojiti. Provjereni su i rezultati naprezanja te je uočeno još problema (*Slika 7.3.*). *Slika 7.3.* prikazuje element koji također nije spojen za ostatak geometrije te se u njemu javljaju izrazito velika naprezanja, čak do 7 Gpa. Očito je da je takav rezultat nerealan pa je problem riješen ručnim crtanjem novog elementa pomoću opcije *Mesh – Between*, a zatim je spojen za ostatak geometrije opcijom *Coincident Nodes*. Konačno, provedena je još jedna analiza koja je napokon dala točne rezultate.



Slika 7.3. Nespojeni element koji utječe na naprezanja

## 7.1. Deformacije

Slika 7.4. prikazuje dobivene vrijednosti deformacija koje se javljaju prilikom podizanja sekcije. Maksimalna deformacija pritom iznosi  $7,742 \text{ mm}$  i nalazi se na samom rubu krova sekcije. Takav rezultat je poprilično točan s obzirom na to da se radi o aluminijskom krovu te o području najudaljenijem od točki podizanja. Vidi se da pomaci ovise o svojstvima materijala, primjerice, čelične pregrade su se znatno manje deformirale od aluminijskih. To se može primjetiti i u sredini na primjeru aluminijske palube čiji pomaci iznose otprilike  $1,38 \text{ mm}$  bez obzira na to što je ukrućena profilima.

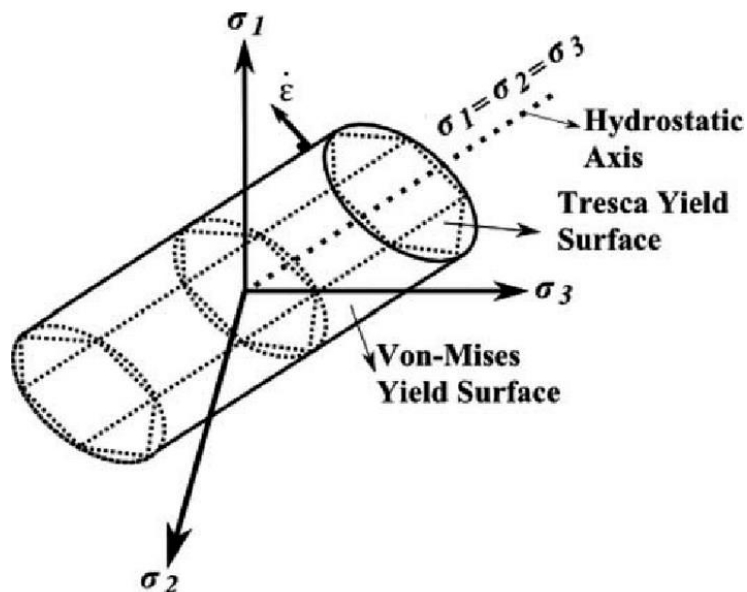


Slika 7.4. Deformacije

## 7.2. Naprezanja

Dobiveni rezultati izraženi su u paskalima te se gledaju prema Von Mises kriteriju. Za provjeru čvrstoće elementa čija su opterećenja izazvala jednoosna naprezanja, dovoljno je maksimalno naprezanje usporediti s kritičnim napreznjem koje je određeno pokusom (npr. pokusom rastezanja). Kod provjere čvrstoće za dvoosna i troosna stanja naprezanja, ovaj postupak nije praktičan jer bi trebalo eksperimentalno odrediti sve moguće kombinacije naprezanja kako bi se dobilo kritično naprezanje za svaki slučaj, a to je tehnički teško izvesti. Iz tog razloga uvode se teorije čvrstoće, odnosno kriteriji loma, koji nastoje predvidjeti pojavu loma za dvoosno i troosno stanje naprezanja na temelju podataka dobivenih pri jednoosnom napreznju. Von Misesov kriterij čvrstoće se zasniva na principu najveće distorzijske energije, a uzima se kao mjerodavan jer normalna i tangencijalna naprezanja opisuje elipsom čime osigurava svojevrzni faktor sigurnosti u odnosu na ostale tri teorije (Slika 7.5.) [3]. Jednadžba za troosno stanje naprezanja je:

$$\sigma_{von\ Mises} = \sqrt{\frac{(\sigma_{xx}-\sigma_{yy})^2+(\sigma_{xx}-\sigma_{zz})^2+(\sigma_{zz}-\sigma_{yy})^2+6(\tau_{xy}^2+\tau_{yz}^2+\tau_{xz}^2)}{2}} \quad (7.1.)$$

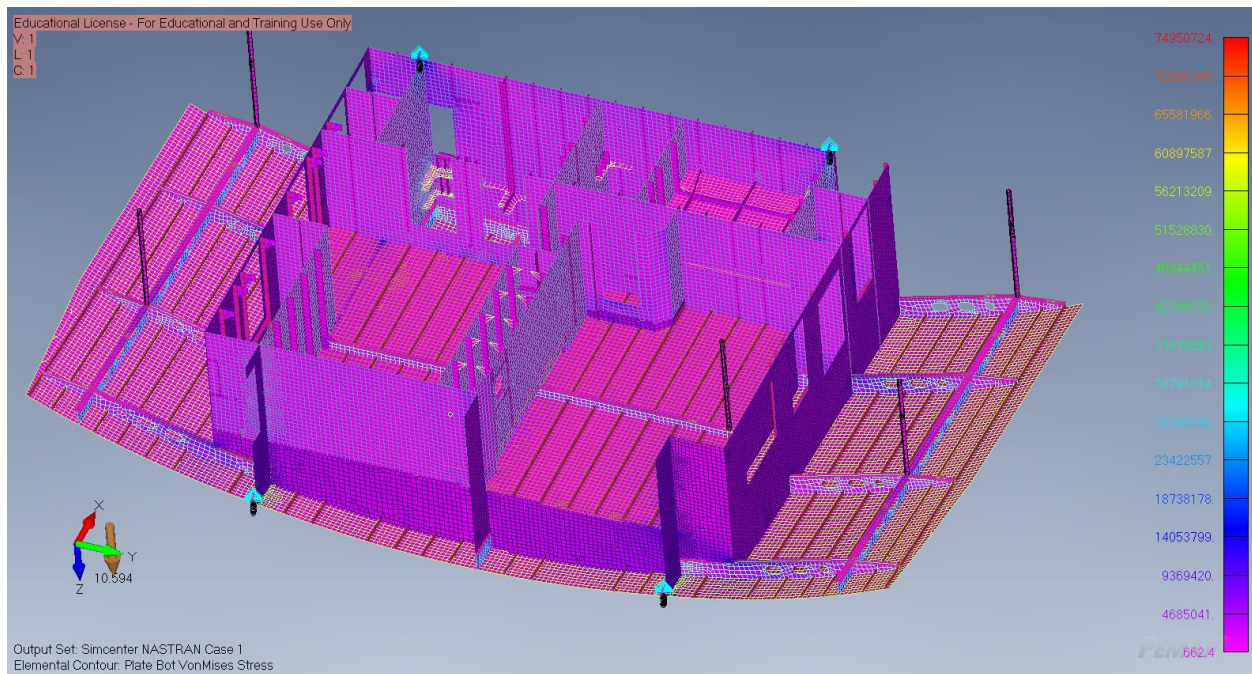


Slika 7.5. VonMises za troosno stanje naprezanja

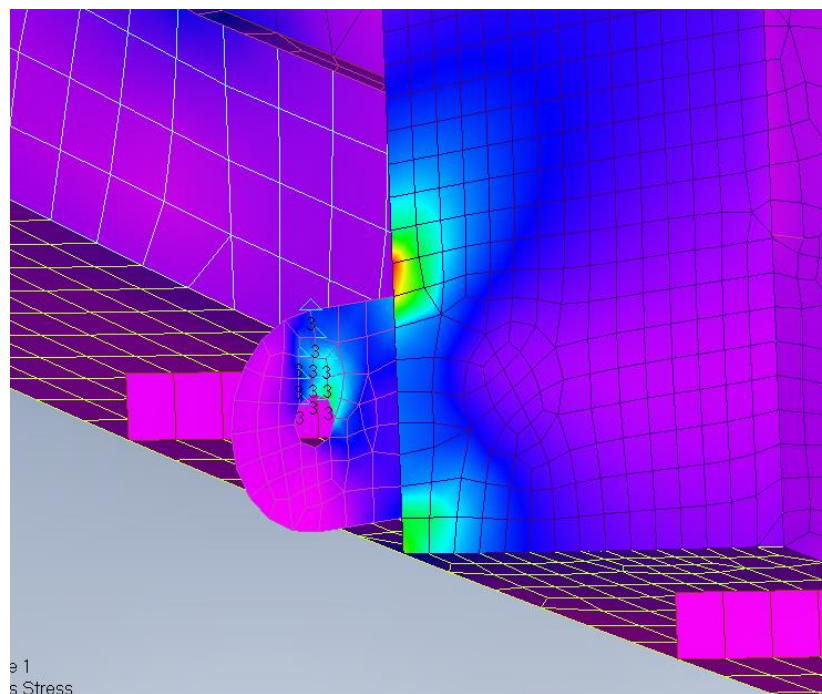
[https://www.researchgate.net/figure/Von-Mises-yield-criterion-and-the-normality-rule\\_fig2\\_267397286](https://www.researchgate.net/figure/Von-Mises-yield-criterion-and-the-normality-rule_fig2_267397286)

Slika 7.6. prkazuje dobivena naprezanja. Vidi se kako maksimalna naprezanja u sekciji idu uglavnom do cca 15 MPa što je i očekivano. Kao i kod deformacija, može se zaključiti da se nešto veća naprezanja javljaju na područjima aluminijske strukture. Međutim, primjećen je veći iznos naprezanja u području spajanja uški, također aluminijskih, s okolnom strukturom (Slika 7.7.). Iznos takvog naprezanja seže do 74,95 MPa.





Slika 7.6. Naprezanja



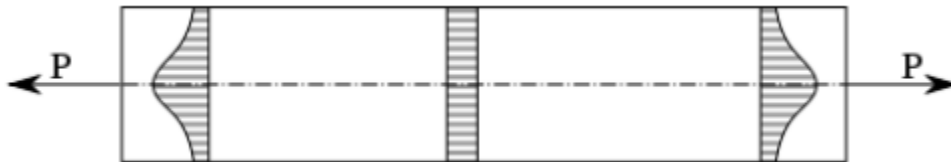
Slika 7.7. Koncentracija naprezanja

Naprezanje od 74,95 MPa je prihvatljivo rješenje, no što da taj iznos izvan granica dopuštenih vrijednosti? Postoje dva moguća razloga za to [11]. Prvi razlog je pojava singulariteta, odnosno točke u kojoj iznos naprezanja ne konvergira prema određenoj vrijednosti. Izradom finije mreže, odnosno smanjivanjem veličine elemenata, naprezanja u toj točki se sve više povećavaju. Teoretski, u toj točki naprezanja su beskonačna. To je česta pojava kod oštih rubova čiji kut je manji od 180° (u ovom slučaju taj kut iznosi 90°) ili na mjestima spajanja elemenata. Međutim, to ne znači da rezultati nisu pouzdani i točni. Okolni elementi će biti pod utjecajem ovog naprezanja, ali neće utjecati na iznose naprezanja, npr. u sredini sekcije. Ovo je izravna posljedica St. Vernantovog principa koji govori da utjecaj lokalnih poremećaja na ravnomjerno raspoređeno naprezanje ostaje lokalno (*Slika 7.8.*), pri čemu vrijedi:

$$\sigma = \frac{P}{A}, N/mm^2 \quad (7.2.)$$

Gdje je u ovom primjeru:

- ⟨ P – vlačna sila, N
- ⟨ A – površina poprečnog presjeka, mm<sup>2</sup>



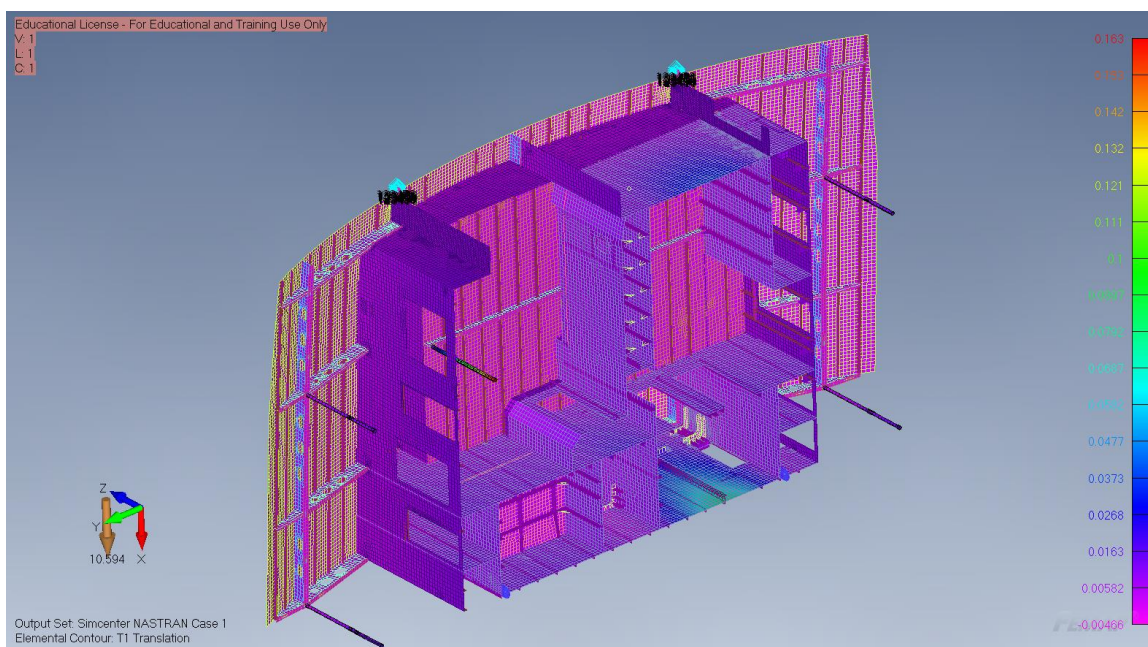
*Slika 7.8. St. Vernantov princip*

Izvor: [http://www.acin.net/2015/06/02/stress-singularities-stress-concentrations-and-mesh-convergence/?fbclid=IwAR31sGXf5I4m714GuWFJb-9WROplw2xGmCAgqGAI\\_63yRenZZbqhel3Jb8](http://www.acin.net/2015/06/02/stress-singularities-stress-concentrations-and-mesh-convergence/?fbclid=IwAR31sGXf5I4m714GuWFJb-9WROplw2xGmCAgqGAI_63yRenZZbqhel3Jb8)

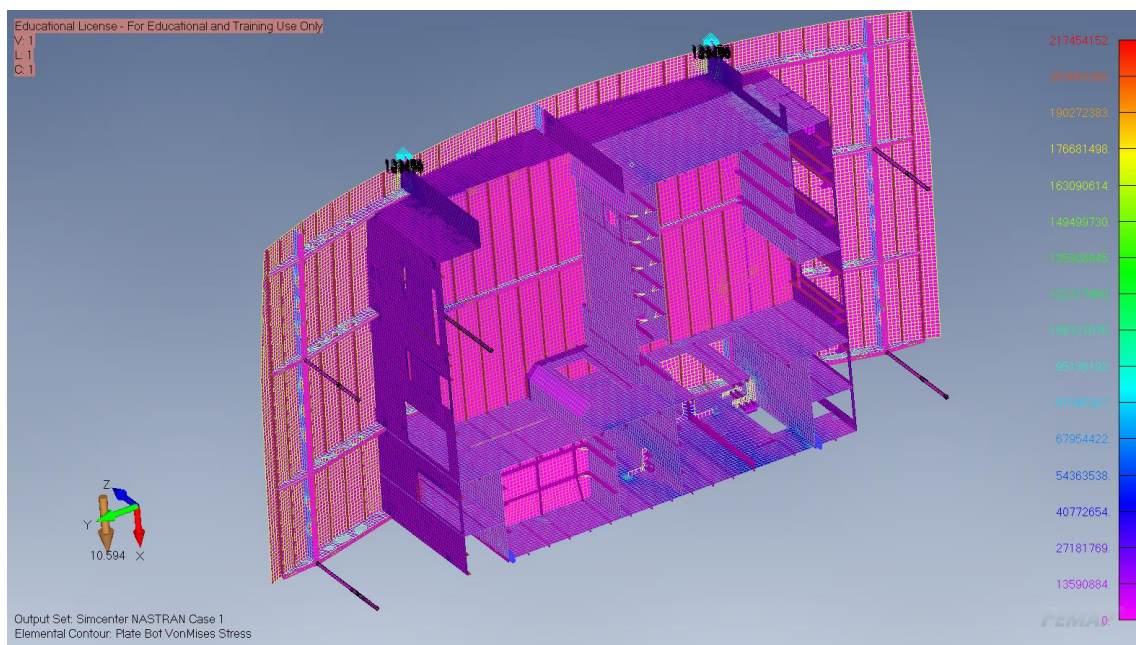
Drugi razlog je koncentracija naprezanja koja se razlikuje od singulariteta po tome što iznos naprezanja ne teži u beskonačnost nego ima neku konačnu vrijednost. Ona se javlja u područjima promjene geometrije, što bi ovdje značilo spoj dva elementa čije se debljine znatno razlikuju.

O korisniku ovisi hoće li ove nepravilnosti biti zanemarene ili ne. Naknadnim pregledavanjem slobodnih rubova i kvalitete mreže utvrđeno je da je mreža reprezentativna te, osim navedenog, nema razloga za pojavom nepravilnosti. U ovom slučaju će se dobivena naprezanja uzeti u obzir jer naprezanja u uškama su jednako važna za operaciju okretanja kao i naprezanja u ostatku strukture, a dobivene vrijednosti naprezanja još uvijek zadovoljavaju postavljene uvjete. Uostalom, ranije je utvrđeno da je uška dovoljne nosivosti da izdrži opterećenje od težine sekcije. Drugo rješenje bilo bi korištenje opcije *Fillet* kako bi se takav oštar spoj zaoblio. Možda najbolja opcija za izbjegavanje ovog problema bila bi koristiti *Solid Elements*, odnosno prostorne elemente, no s obzirom na pojednostavljenja ta je opcija odbačena.

Dodatno, za usporedbu rezultata s rezultatima dinamičke analize napravljena je analiza za slučaj kada sekcija visi na dvije uške. Pretpostavlja se da je to najgori slučaj te su uške odabrane sukladno tome. Nadalje, postavljeno je da gravitacija djeluje u smjeru osi x jer bi u suprotnom bili dobiveni rezultati koji fizikalno nisu mogući. Dobiveni su sljedeći rezultati (*Slika 7.9.*, *Slika 7.10.*):



*Slika 7.9. Deformacije*



Slika 7.10. Naprezanja

Pojedini dijelovi strukture su se znatno deformirali, a naprezanje u uškama od  $217 \text{ MPa}$  je vrlo blizu granici tečenja od  $228 \text{ MPa}$ . Iako je ovo opasna situacija, u stvarnosti deformacije i naprezanja nisu dosegali ove iznose. Objašnjenje leži u činjenici da su i uške modelirane pojednostavljeno, kao nastavak strukture. Drugim riječima, modeliran je samo dio uške koji izlazi iz gabarita sekcije, a stvarna duljina uške, koja preuzima dio opterećenja, je zanemarena. To je pak napravljeno kako bi se izbjeglo pojavljivanje duple mreže. Nadalje, zanemaren je i prijelaz koji se inače radi u ovakvom slučaju velikih razlika u debljini. Oba razloga spadaju pod ranije navedene greške modela pa su sukladno tome i rezultati došli s određenim odstupanjima.

## 8. DINAMIČKA ANALIZA

Dok statička analiza koristi samo konstantna opterećenja i ne uzima u obzir inerciju, u dinamičkoj analizi se sam sustav i/ili zadana opterećenja mijenjaju u vremenu i kojima je pridružena i akceleracija [14]. Matematički, dinamička analiza se od statičke razlikuje i u matrici krutosti. Točnije, za dinamičku analizu računaju se dodatno i matrica masa te matrica prigušenja (ako postoji). Zapis takve matrice je slijedeći:

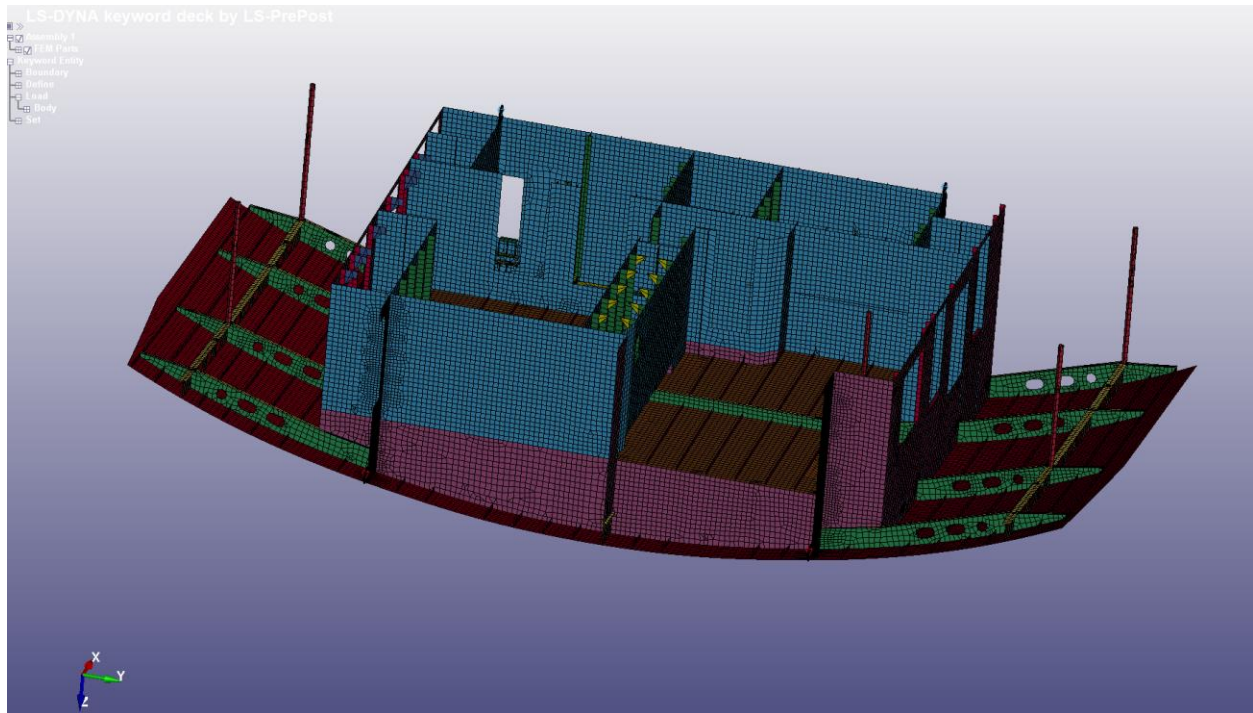
$$[M] \cdot \{u''\} + [C] \cdot \{u'\} + [K] \cdot \{u\} = \{f\} \quad (8.1.)$$

Gdje je:

- < M – masa, *kg*
- < C – koeficijent prigušenja, *kg/s*
- < K – matrica krutosti, *kg/s<sup>2</sup>*
- < u – pomak pojedinih čvorova, *mm*
- < u' – brzina pomaka, *mm/s*
- < u'' – akceleracija pomaka, *mm/s<sup>2</sup>*
- < f – vektor sila u lokalnom koordinatnom sustavu, *N*

Za provedbu dinamičkog dijela FEM analize odabran je programski paket *LS DYNA*. Model je iz *FEMAP-a* prebačen u *LS DYNU* sa svim ranije danim postavkama (Slika 8.1.). To znači da su materijali, njihova svojstva, zadane debljine i opterećenja te, konačno, cijela mreža ostali nepromijenjeni. To olakšava daljnji posao jer u ovoj fazi preostalo je samo napraviti simulaciju okretanja. *LS DYNA* nema unaprijed određene mjerne jedinice pa će za provedbu proračuna biti odabrane iste mjerne jedinice kao i u *FEMAP-u* (Slika 6.7.).

Analiza će biti provedena implicitno [12]. Implicitna se analiza koristi za vremenski ustaljene procese kao što je ovaj. Brzina okretanja je zadana kao konstantna. Rješenje svakog koraka zhatjeva nekoliko iteracija kako bi se dobila ravnoteža. Vremenski interval trajanja svakog koraka je znatno veći nego kod eksplicitne analize. U slučaju eksplicitne analize taj korak mora biti manji od vremena koje treba zvučnom valu da prođe kroz element. Implicitna analiza nema takvih ograničenja.



Slika 8.1. Model sekcije u LS DYNA

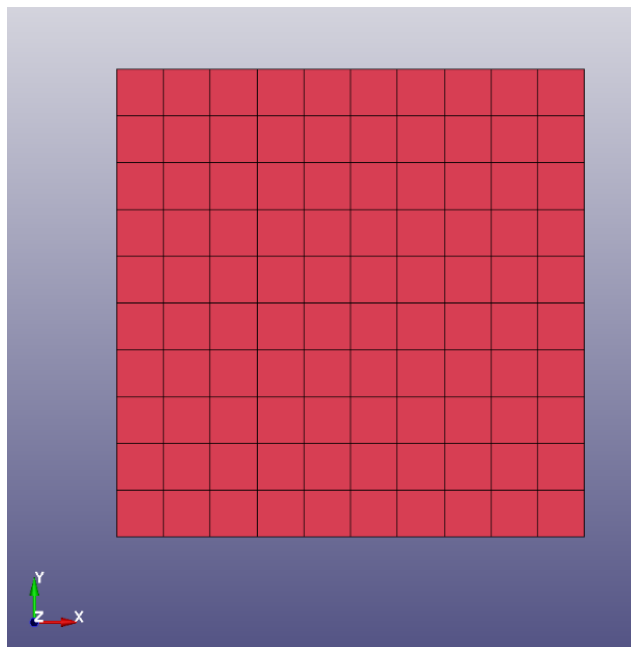
### 8.1. Ploča

Osnovna ideja bila je napraviti simulaciju na primjeru ploče, a zatim istu logiku primjeniti na zadanu sekciju. Razlog tome je prvenstveno nedostatak računalnih resursa, a i sam proces je znatno olakšan zbog jednostavnosti modela.

Analiza je provedena eksplicitno [12]. Eksplicitna analiza opisuje sustav koji se mijenja u vremenu, a temelji se na akceleraciji. Nisu potrebne nikakve iteracije, za razliku od implicitne analize, pa se akceleracije u čvorovima računaju direktno. Masa se gleda kao konstantna pa se inverz matrice računa samo po dijagonali. Stoga se suma sila računa jednostavno kao umnožak mase i akceleracije. Ako je u trenutku  $n$  poznata akceleracija, u trenutku  $n+1/2$  se računa brzina, a u trenutku  $n+1$  pomaci. Iz pomaka se zatim dobiva naprezanje.

### 8.1.1. Materijal

Kao primjer napravljena je ploča dimenzija 100x100 mm i debljine 10 mm, a njezina mreža sastoji se od 100 elemenata (*Slika 8.2.*). Odlučeno je da će materijal ploče biti aluminij, čija svojstva su prikazana na *Slici 8.3.* Ploči je dodana i gravitacija kao *Body Load* u smjeru suprotnom od osi z (*Slika 8.4.*). *Body Load* je zadan preko posebne krivulje čija je vrijednost 1 (*Slika 8.5.*), a vrijednost iznosa gravitacije je zadana kao *Scale Factor* i iznosi  $9810 \text{ mm/s}^2$ . Kako je već navedeno, trebalo je voditi računa o pravilnom izboru mjernih jedinica kako bi se na kraju dobili točni rezultati. U ovom slučaju su odabrane nešto drugačije mjerne jedinice pa će dobiveni rezultati naprezanja biti u megapaskalima, a ne u paskalima kao što je bio slučaj kod statičke analize.



*Slika 8.2. Primjer ploče*

Keyword Input Form ✕

1 aluminij

Use \*Parameter
  Comment
 (Subsys: 1 1.k)

\*MAT\_ELASTIC\_(TITLE) (001) ( 1 )

---

TITLE

aluminij

1	MID	RO	E	PR	DA	DB	NOT USED
1		2.660e-09	7.000e+04	0.3300000	0.0	0.0	0.0

COMMENT:

Total Card: 1    Smallest ID: 1    Largest ID: 1    Total deleted card: 0

*Slika 8.3. Svojstva aluminija*

Keyword Input Form ✕

1

Use \*Parameter
  Comment
 (Subsys: 1 1.k)

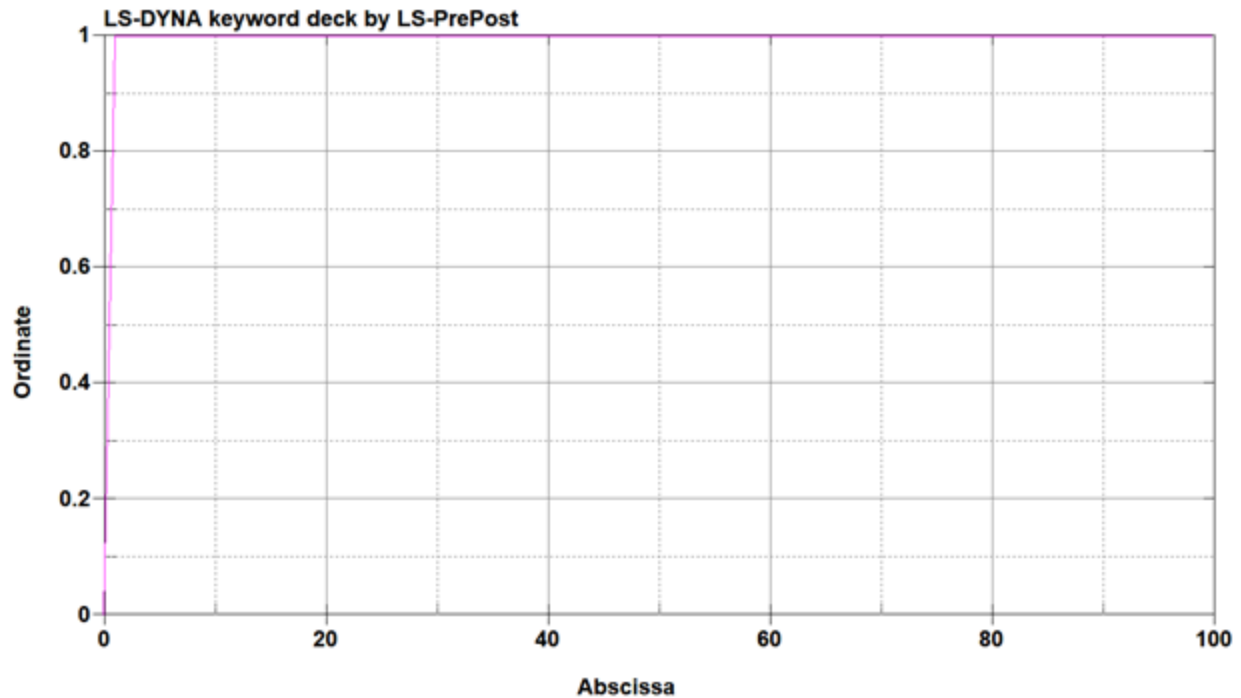
\*LOAD\_BODY\_Z ( 1 )

---

1	LCID	SF	LCIDDR	XC	YC	ZC	CID
1		-9810.0000	0	0.0	0.0	0.0	0

*Slika 8.4. Zadavanje gravitacije*



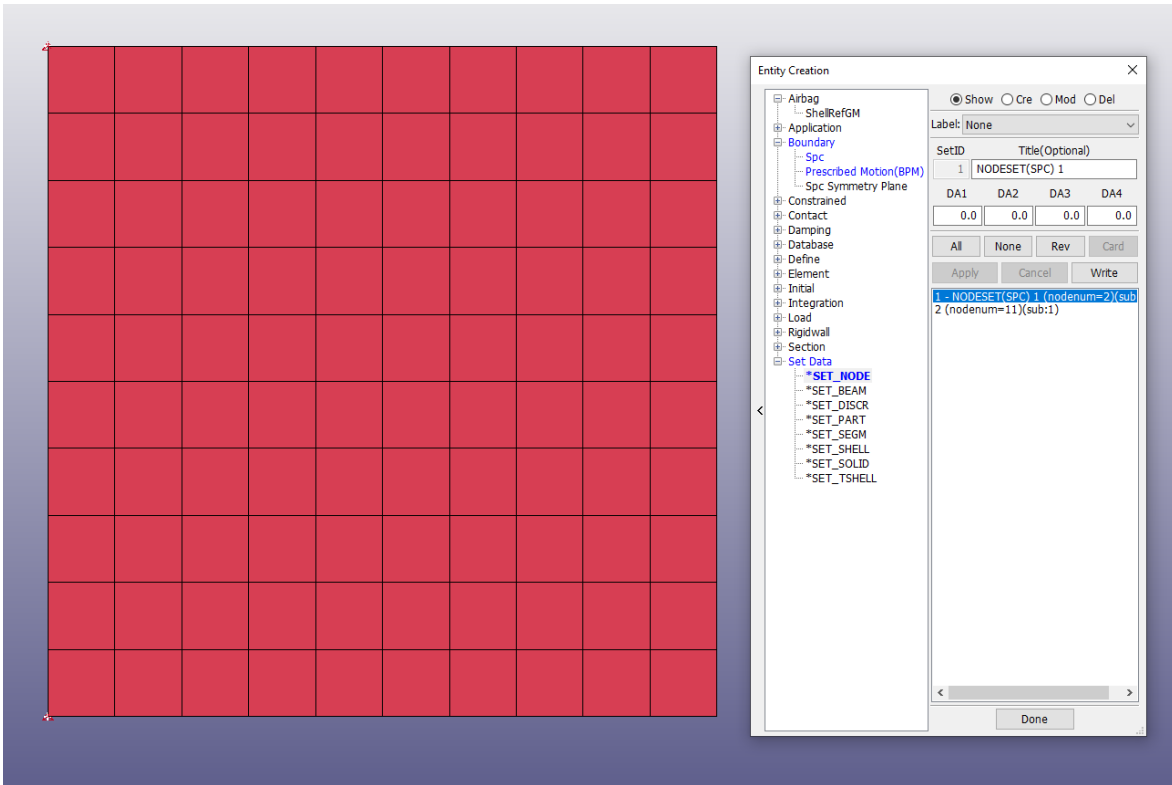


*Slika 8.5. Krivulja gravitacije*

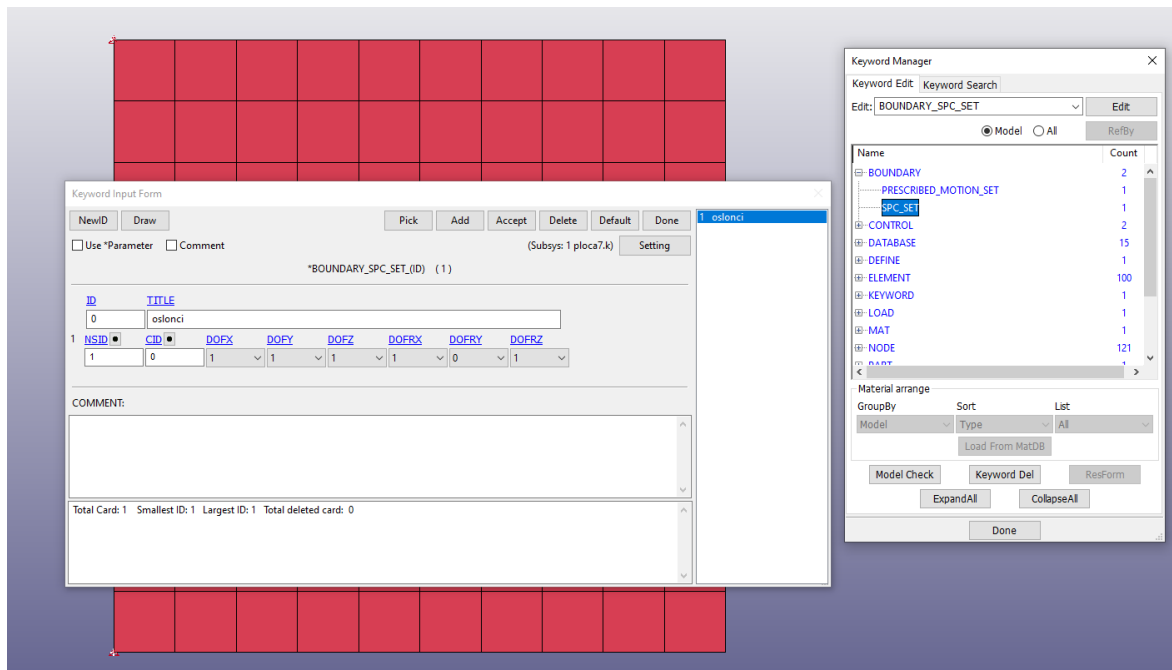
### 8.1.2. Rubni uvjeti

Prvi korak bio je odrediti rubne uvjete, odnosno točke oko kojih će se ploča okretati, a koje predstavljaju uške. Te će točke biti fiksne, dakle bit će im onemogućeno bilo kakvo translacijsko gibanje u smjeru sve tri osi, dok je od rotacijskih gibanja dopuštena samo rotacija oko osi y. *Slika 8.6.* prikazuje odabrane točke, a *Slika 8.7.* određene rubne uvjete.

Slobodnom kraju ploče također je dopuštena samo rotacija oko osi y, a pridružena mu je krivulja brzine (*Slika 8.8.*).



Slika 8.6. Oslonci



Slika 8.7. Rubni uvjeti na osloncima

Keyword Input Form ✕

NewID Draw Pick Add Accept Delete Default Done 1 okretanje2

Use \*Parameter  Comment (Subsys: 1 ploca8.k) Setting

\*BOUNDARY\_PRESCRIBED\_MOTION\_SET\_(ID) (1)

ID	TITLE
2	okretanje2

1	NSID	DOF	VAD	LCID	SF	VID	DEATH	BIRTH
2	2	6	0	2	1.0000000	0	1.000e+28	0.0

2	OFFSET1	OFFSET2	MRB	NODE1	NODE2
0.0	0.0	0	0	0	0

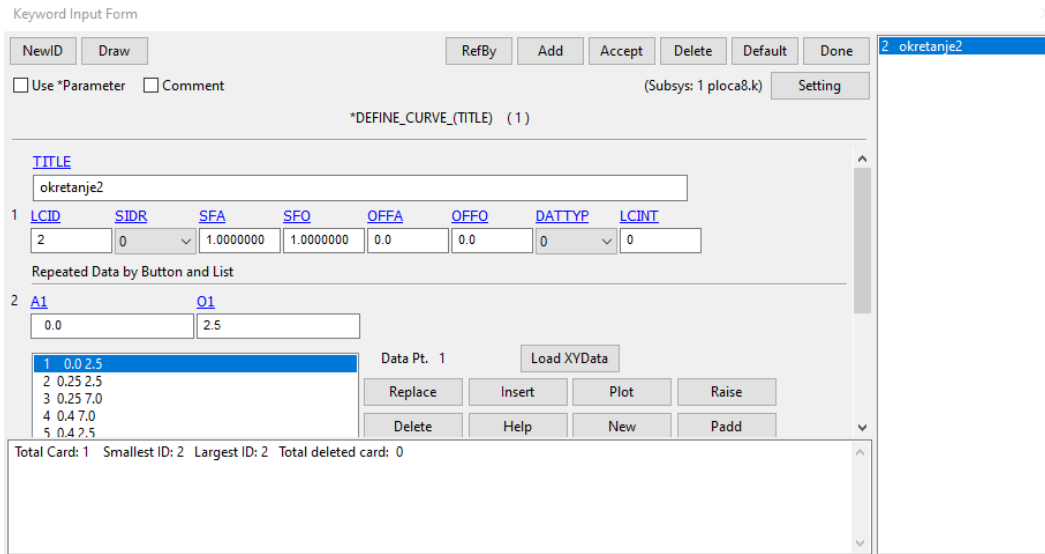
COMMENT:

Total Card: 1 Smallest ID: 1 Largest ID: 1 Total deleted card: 0

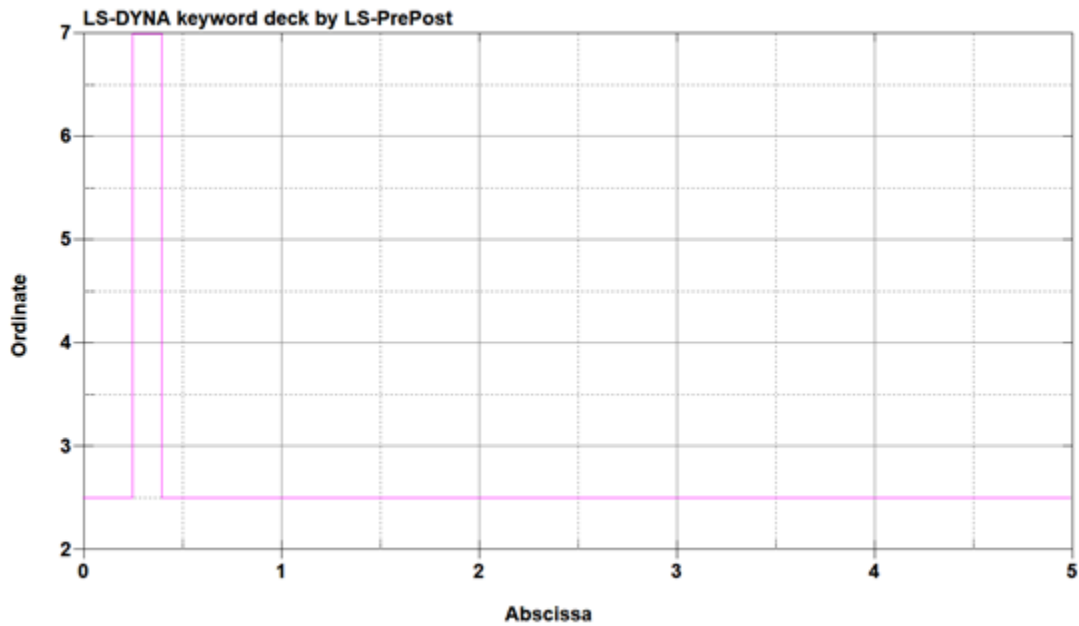
Slika 8.8. Slobodni kraj

### 8.1.3. Brzina

Da bi se slobodan kraj ploče okretao na njega je potrebno primjeniti određenu silu. U programskom paketu *LS DYNA* sila se definira kao krivulja ovisna o vremenu. U ovom slučaju, definirana je krivulja brzine kojom se ploča mora okretati da bi došla u željeni položaj. Djeluje u suprotnom smjeru od djelovanja gravitacije kako bi usporila padanje i rotiranje ploče zbog vlastite težine. Na taj se način zapravo simulira djelovanje dizalice. Brzina je zadana kao konstantna u pojedinom vremenskom intervalu (*Slika 8.9.*). Prema određenim vrijednostima, a i prema grafu krivulje (*Slika 8.10.*) vidi se da je brzina u prvom i zadnjem intervalu manja. Tako je napravljeno da bi se lakše simuliralo okretanje stvarne sekcije i u stvarnom vremenu. Već je rečeno da se sekcija okreće pomoću dvije dizalice. Pritom se sam proces podizanja i okretanja odvija vrlo sporo, briznom od oko 5 m/min. Dakle, dok jedna dizalica drži jedan kraj sekcije, a druga dizalica u isto vrijeme spušta drugi kraj, brzina će biti konstantna. To će vrijediti do trenutka do kada sekcija ne bude pod kutem od otprilike  $45^\circ$ . Tada će pod utjecajem svoje težine početi brže padati. To je ujedno i trenutak kada se otpuštaju kuke s druge dizalice i ona prelazi na drugu stranu i hvata uške s donje strane te polako počinje podizati sekciju u traženi položaj. Treba napomenuti da zadane brzine nipošto ne odgovaraju stvarnim brzinama podizanja, pogotovo jer se kod zadavanja brzine u *LS DYN* ona iskazuje u rad/s.



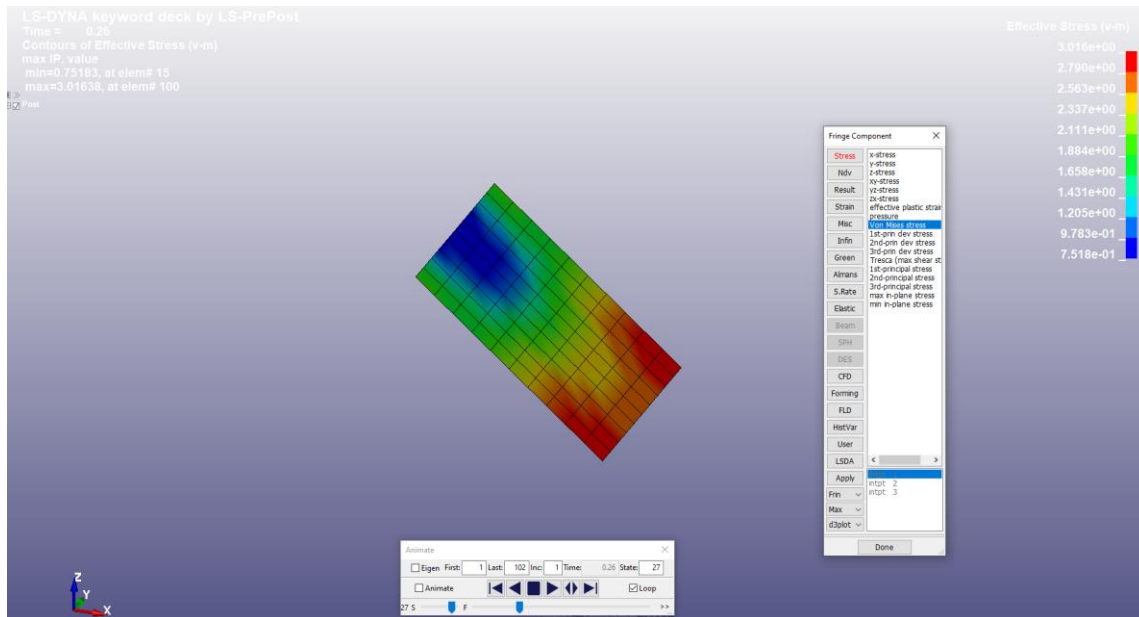
Slika 8.9. Definiranje brzine



Slika 8.10. Graf brzine

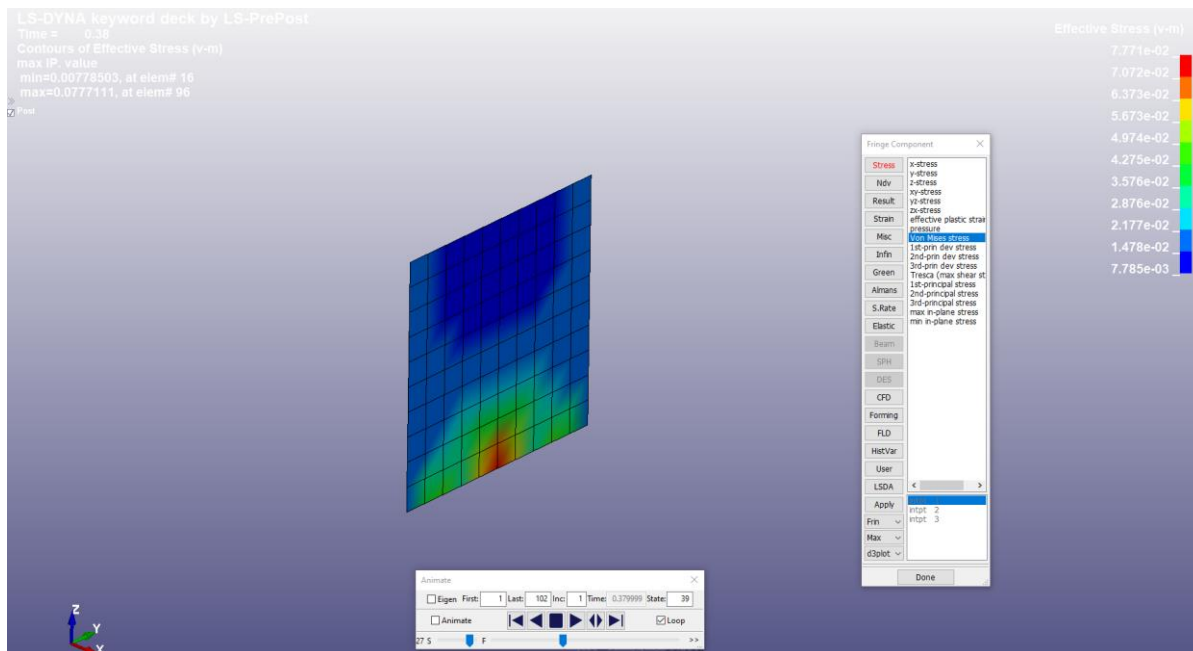
#### 8.1.4. Rezultati

Prikazani su rezultati za tri slučaja, kada je ploča pod kutem od  $45^\circ$ , kada visi vertikalno pod  $90^\circ$  te kada je pod kutem od  $135^\circ$ . Pri kutu od  $45^\circ$  javljaju se naprezanja nešto veća od 3 MPa (*Slika 8.11.*).



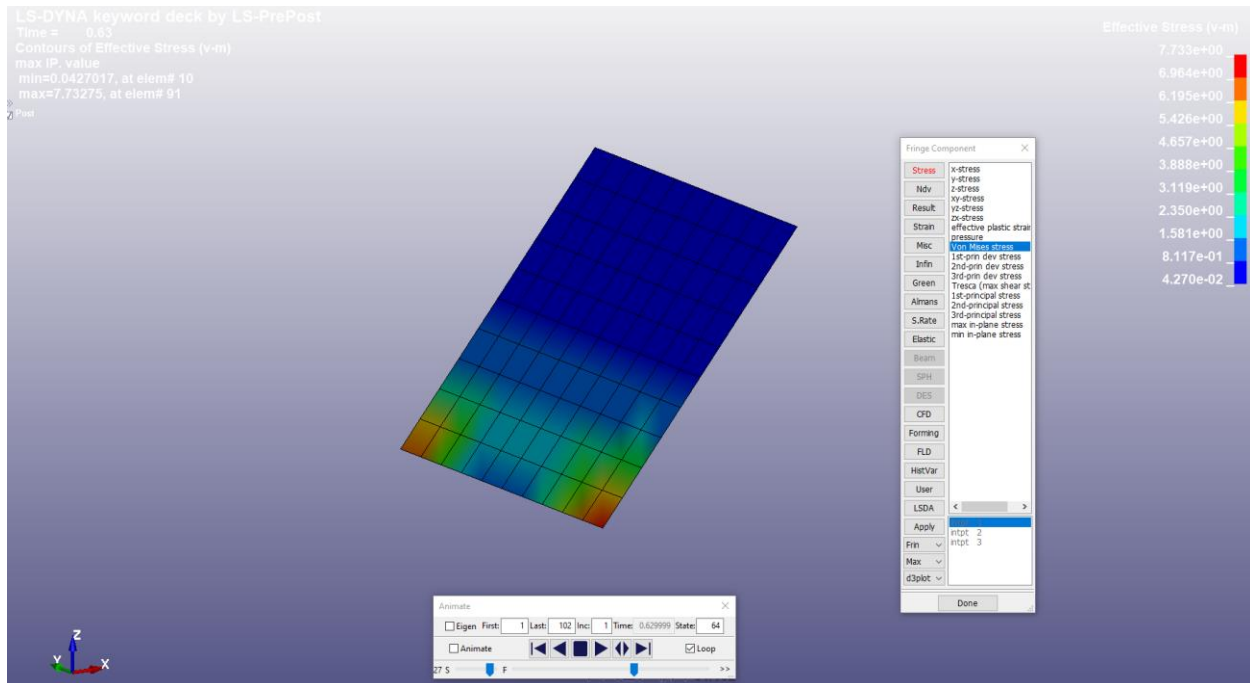
*Slika 8.11. Naprezanja pod kutem od  $45^\circ$*

Pod kutem od  $90^\circ$  naprezanja su vrlo mala, svega 0,077 MPa (*Slika 8.12.*). Razlog tome je vjerojatno povećanje brzine koja djeluje u suprotnom smjeru. Ovo je očito suprotno od onoga što se događa u stvarnosti. Ispravno bi bilo zadati smanjenje brzine u tom intervalu kako bi otpor ploče bio manji, a samim time bi brzina spuštanja bila veća. Ovaj slučaj jasno pokazuje koliko je važno točno zadati krivulje, odnosno opterećenja.



Slika 8.12. Naprezanja pod kutem od  $90^\circ$

Treći slučaj je zanimljiv za razmatranje jer se javljaju naprezanja i više nego duplo veća nego u prvom slučaju (Slika 8.13.), i iznose 7,7 MPa. Rotacija i gravitacija još uvijek djeluju u suprotnim smjerovima, ali zbog inercije uslijed djelovanja gravitacije ploča se nastavila gibati istim smjerom u kojem je zadana brzina. U svakom trenutku poslije toga iznosi naprezanja polako padaju.



Slika 8.13. Naprezanja pod kutem od 135°

## 8.2. Materijali

Uočeno je da je prilikom uvoza geometrije u *LS DYNU* nastala grupa materijala *Elastic*. To znači da je program sam svrstao oba ranije zadana materijala u elastično područje ranije opisanog  $\sigma$ - $\varepsilon$  dijagrama. Drugim riječima, materijali su aproksimirani u linearnom području pomoću već poznatog izraza (3.1.):

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

Nakon prelaska granice elastičnosti, ista formula prelazi u slijedeći oblik:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon^n \quad (8.2.)$$

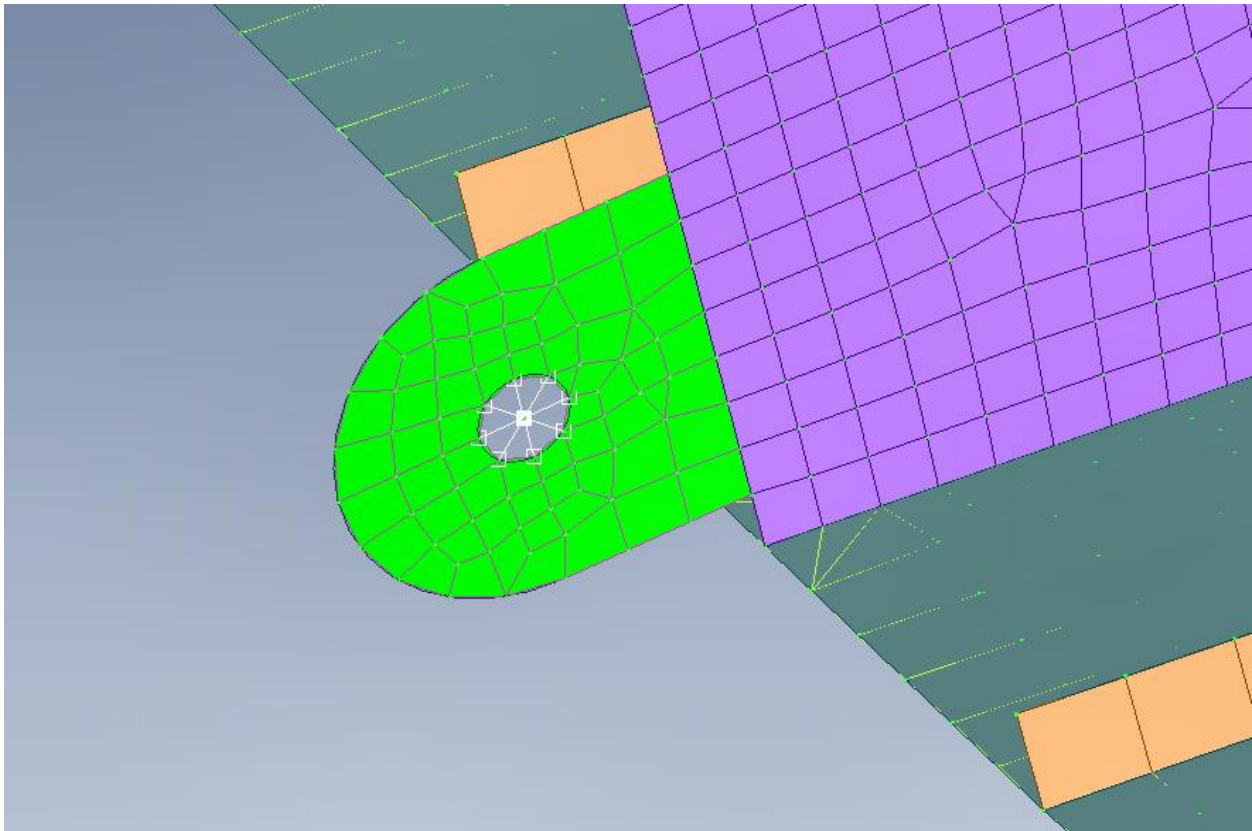
Gdje je:

< n – eksponent tvrdoće

Dakle, prelaskom u plastično područje elementi bi se počeli odvajati jedni od drugih, što ovdje nikako nije u interesu.

### 8.3. Rubni uvjeti

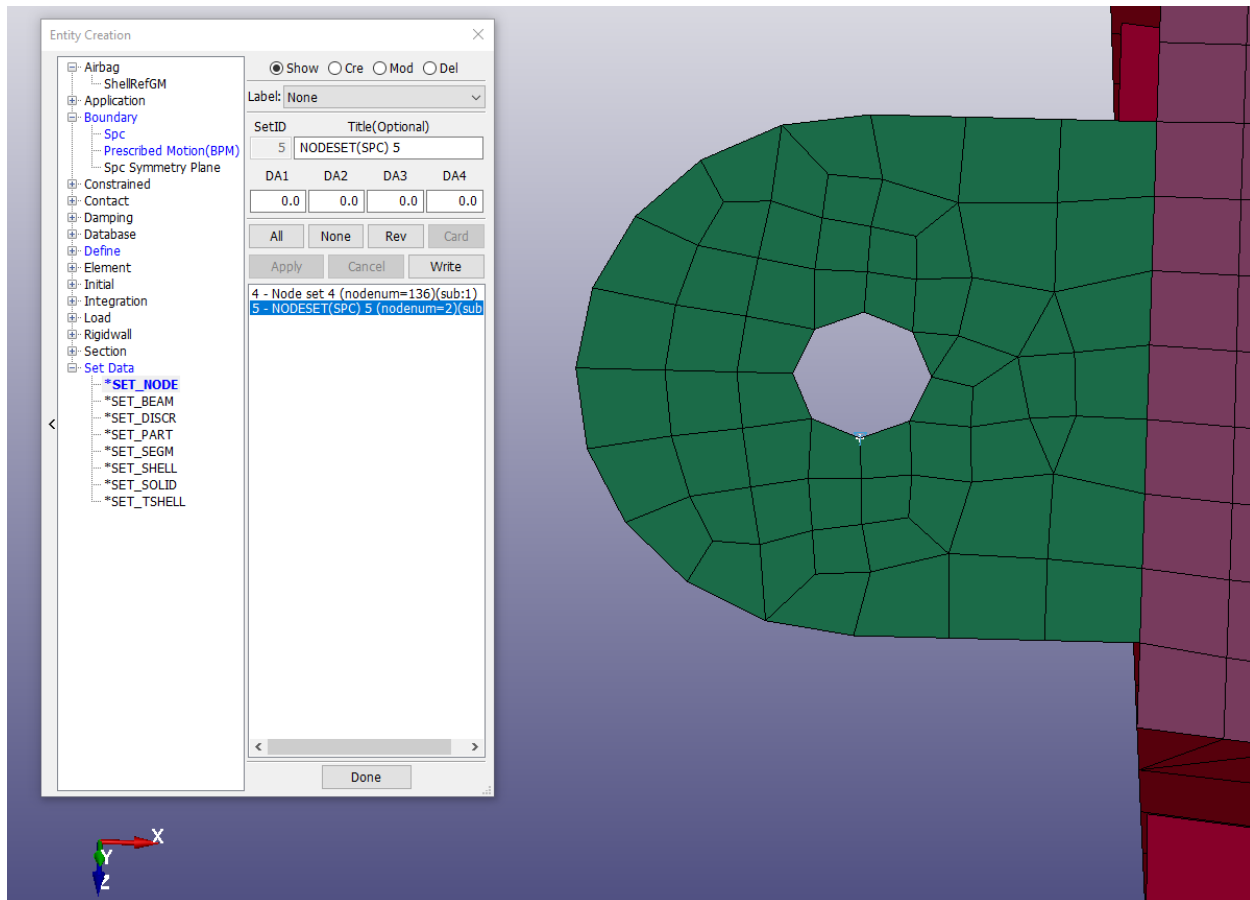
Iako su, skupa s geometrijom, uvezeni i oslonci zadani u FEMAP-u, oni nisu odgovarali ideji kako izvesti dinamički dio analize pa ih je trebalo zamijeniti prikladnijima. Zamišljeno je da će uške oko kojih se sekcija okreće biti fiksne, dok će suprotnim uškama biti dana određena brzina. Prva ideja bila je postaviti fiksni čvor u sredini otvora uške koji će sa okolnima biti povezan preko krutih, odnosno *rigid* elemenata. Ti su elementi napravljeni u *FEMAPU* pomoću opcije *Model - Element - Type - Rigid*. Pri odabiru čvorova bilo je važno paziti na stupnjeve slobode gibanja, točnije, trebalo je omogućiti rotaciju oko osi y. Dobiveni elementi su prikazani na *Slici 8.14*.



*Slika 8.14. Rigid elementi*



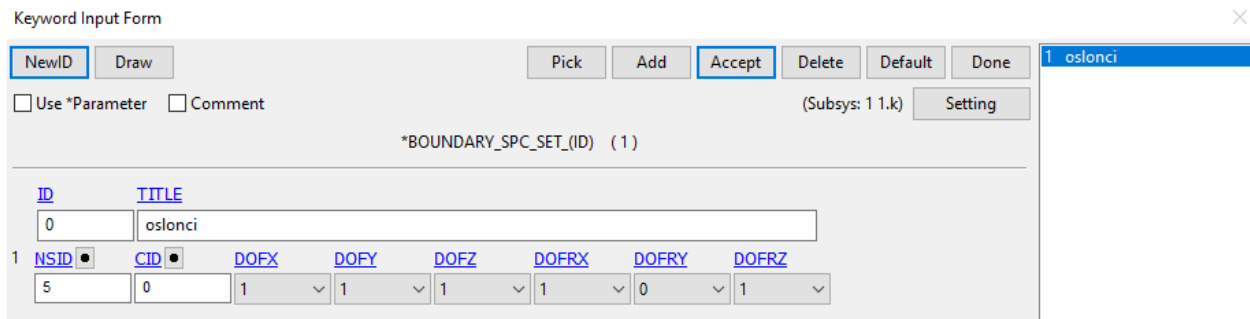
Međutim, od te ideje se kasnije odustalo jer se, unatoč brojnim kontrolama i adaptacijama postavki, nikako nije mogla dobiti tražena rotacija. Umjesto toga, rotacija je postavljena samo za jedan čvor na rubu otvora uške, također sa dopuštenom rotacijom oko y osi.



Slika 8.15. Fiksni čvor

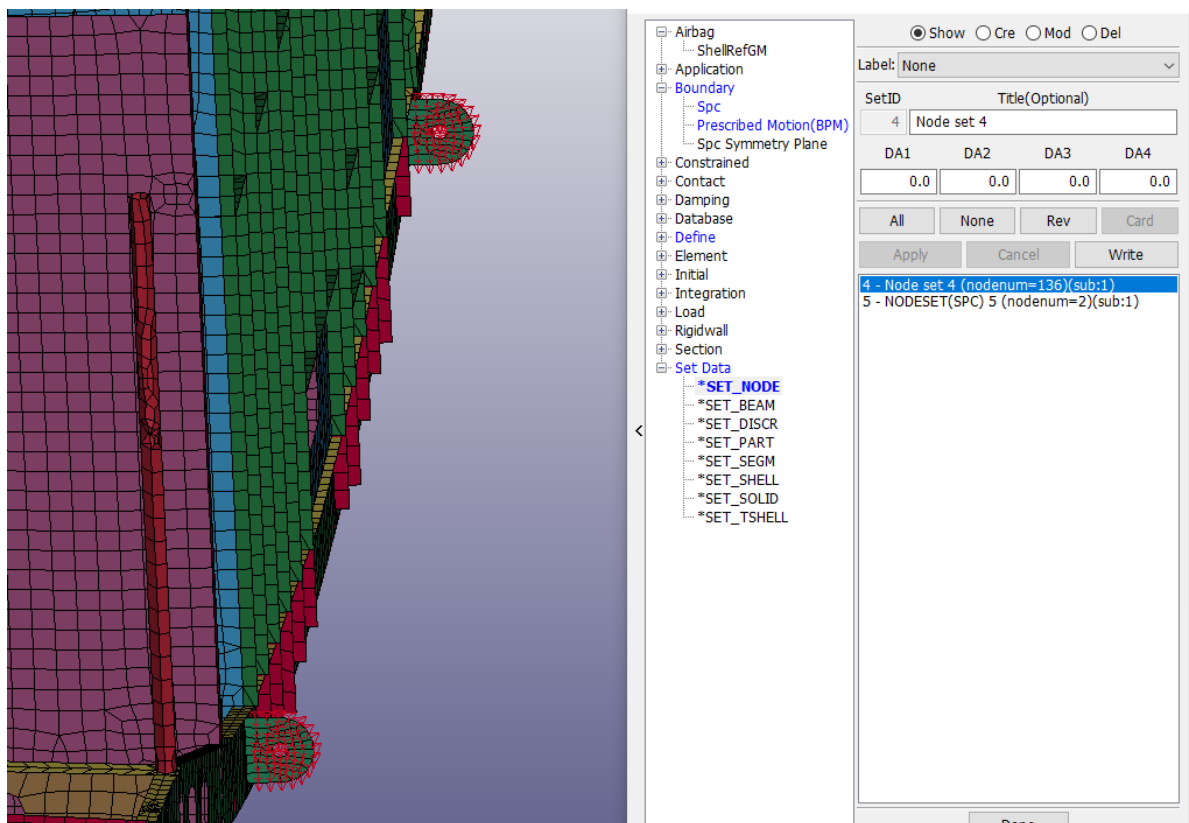
Kako se radi samo o jednom čvoru, nije važno koji od obodnih čvorova je odabran. Čvor koji je postavljen kao oslonac je prikazan na *Slici 8.15*. Isti čvor je odabran i na drugoj uški.

Postavke su dane na *Slici 8.16*.



Slika 8.16. Postavke fiksnih čvorova

Slijedeći korak je bio postaviti rotaciju na uške sa suprotne strane. Iako se sekcija prvo podiže pomoću para čeličnih uški, a zatim okreće pomoću aluminijskih, u ovom je slučaju rotacija odmah postavljena u aluminijske. To je napravljeno da bi se cijeli postupak malo olakšao. Dakle, odabrane su aluminijske uške (Slika 8.17.) te su im zadana svojstva (Slika 8.18).



Slika 8.17. Odabrane uške

Keyword Input Form ×

NewID Draw Pick Add **Accept** Delete Default Done

Use \*Parameter  Comment (Subsys: 1 1.k) Setting

\*BOUNDARY\_PRESCRIBED\_MOTION\_SET\_(ID) (1)

ID	TITLE
0	uske rotacija

1	NSID	DOF	VAD	LCID	SF	VID	DEATH	BIRTH
	4	6	0	1	1.0000000	0	1.000e+28	0.0

2	OFFSET1	OFFSET2	MRB	NODE1	NODE2
	0.0	0.0	0	0	0

Slika 8.18. Postavke rotacije

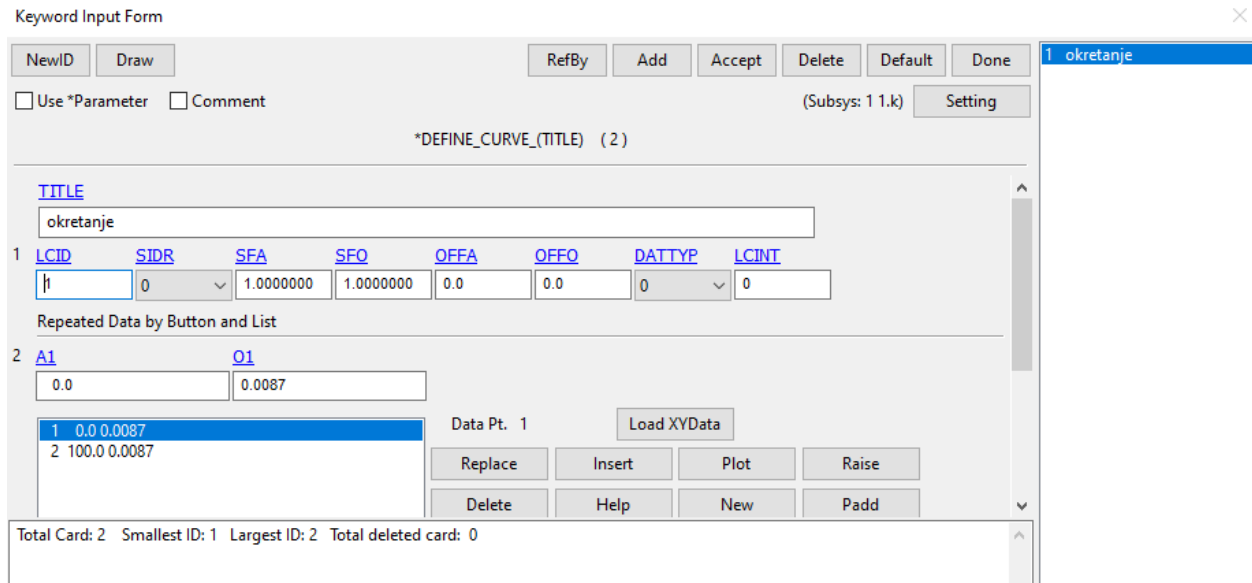
Sa slika 8.16 i 8.18 vidi se da svaki odabrani set čvorova mora biti povezan sa vlastitim postavkama. To radi opcija *NSID* (*Node Set ID*). Nadalje, oba para uški imaju zadanu istu slobodu gibanja. Kod fiksnih uški to je napravljeno je kao  $DOFRY=0$ , gdje nula znači da nema ograničenja, odnosno *Constraints*. Kod uški koje se okreću, rotacija je zadana preko  $DOF=6$ , gdje 6 označava rotaciju oko osi y.

#### 8.4. Brzina

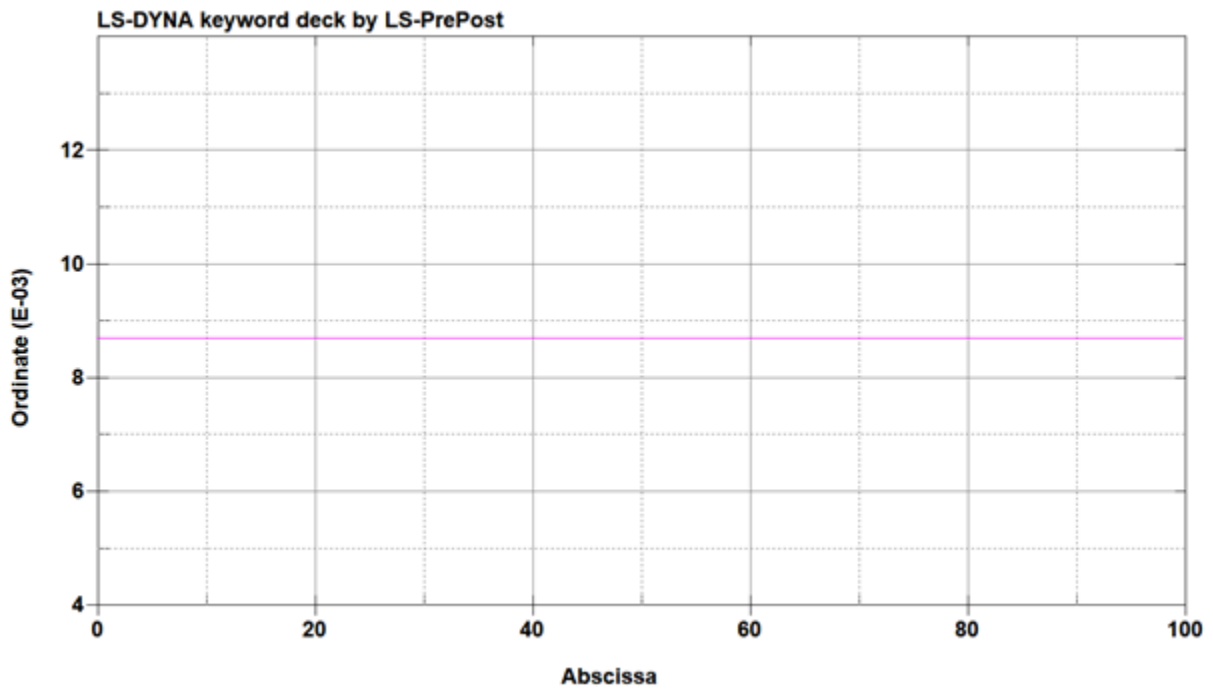
Na Slici 8.18 vidi se da je uškama koje se rotiraju pridružena krivulja 1 (*LCID, Load Curve ID*). Na primjeru ploče je navedeno kako se ona zadaje pa isto vrijedi i za sekciju. Brzina okretanja već je poznata i iznosi 5 m/min, odnosno 0,08333 m/s, no *LS DYNA* brzinu računa u radijanima po sekundi pa ova brzina iznosi:

$$v = 0,0087 \text{ rad/s}$$

Za tu se vrijednost radi krivulja brzine koja će biti zadana kao konstantna (Slika 8.19., 8.20.).



Slika 8.19. Zadavanje brzine

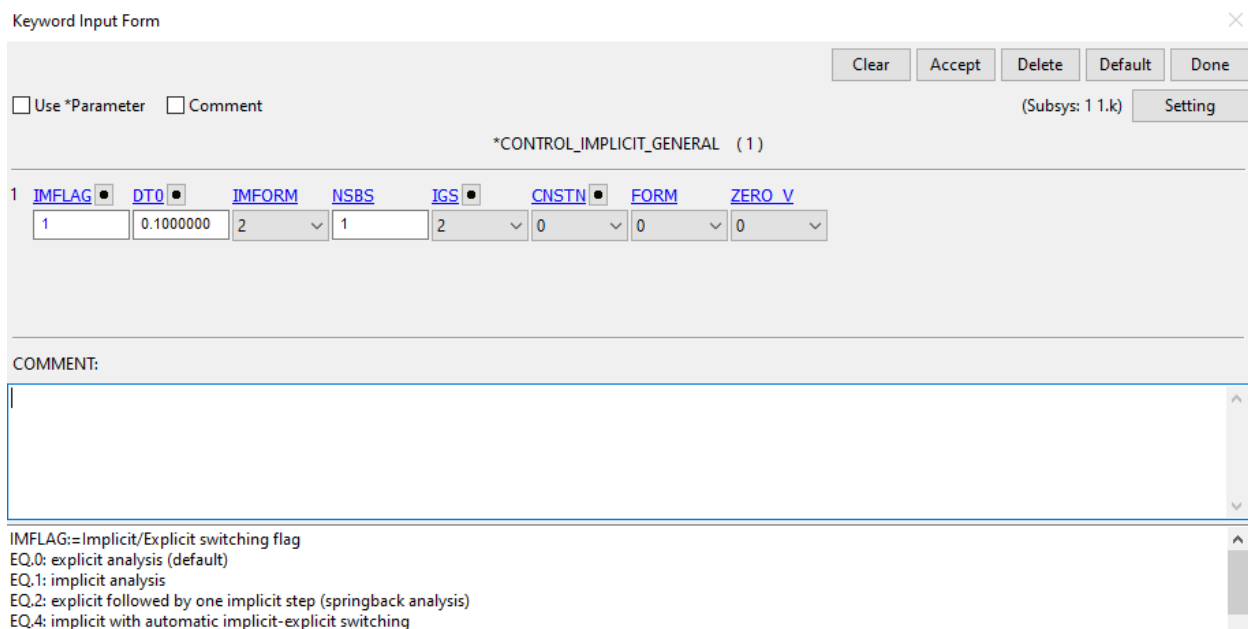


Slika 8.20. Graf brzine

## 8.5. Implicitna analiza

*LS DYNA* prema svojim zadanim postavkama probleme rješava eksplicitno pa, da bi se dobila implicitna analiza, potrebno je definirati postavke. Za to su korištene dvije opcije: *IMPLICIT\_GENERAL* te *IMPLICIT\_SOLUTION*.

*IMPLICIT\_GENERAL* služi za prelazak iz eksplicitne u implicitnu analizu. Pod karticom *IMFLAG* (*Implicit/Explicit switching flag*) potrebno je odabrati 1, odnosno implicitnu analizu (*Slika 8.21.*). Također, odabire se i vremenski korak, odlučeno je da će iznositi 0,1 ( $DT0=0,100000$ ).



Keyword Input Form

Clear Accept Delete Default Done

Use \*Parameter  Comment (Subsys: 1 1.k) Setting

\*CONTROL\_IMPLICIT\_GENERAL (1)

1	IMFLAG	DT0	IMFORM	NSBS	IGS	CNSTN	FORM	ZERO_V
	1	0.1000000	2	1	2	0	0	0

COMMENT:

IMFLAG:=Implicit/Explicit switching flag  
EQ,0: explicit analysis (default)  
EQ,1: implicit analysis  
EQ,2: explicit followed by one implicit step (springback analysis)  
EQ,4: implicit with automatic implicit-explicit switching

*Slika 8.21. Odabir implicitne analize*

*IMPLICIT\_SOLUTION* postavlja metodu rješavanja implicitne analize, a u ovom slučaju to je linearni model. Ta je postavka dana pod *NSOLVR* odabirom opcije 1 (*Slika 8.22.*).

Keyword Input Form ✕

Use \*Parameter     Comment
 (Subsys: 1 1.k)

\*CONTROL\_IMPLICIT\_SOLUTION (1)

1	<a href="#">NSOLVR</a>	<a href="#">ILIMIT</a>	<a href="#">MAXREF</a>	<a href="#">DCTOL</a> ▾	<a href="#">ECTOL</a> ▾	<a href="#">RCTOL</a> ▾	<a href="#">LSTOL</a>	<a href="#">ABSTOL</a>
	1 ▾	11	15	0.0010000	0.0100000	1.000e+10	0.9000000	1.000e-10
2	<a href="#">DNORM</a>	<a href="#">DIVERG</a>	<a href="#">ISTJF</a>	<a href="#">NLPRINT</a>	<a href="#">NLNORM</a>	<a href="#">D3ITCTL</a>	<a href="#">CPCHK</a>	
	2 ▾	1 ▾	1	0 ▾	1.0	0	0 ▾	
3	<a href="#">ARCCTL</a> ▾	<a href="#">ARCDIR</a>	<a href="#">ARCLEN</a>	<a href="#">ARCMTH</a>	<a href="#">ARCDMP</a>	<a href="#">ARCPSI</a>	<a href="#">ARCALE</a>	<a href="#">ARCTIM</a>
	0	0 ▾	0.0	1 ▾	2 ▾	0	0	0
4	<a href="#">LSMTD</a>	<a href="#">LSDIR</a>	<a href="#">IRAD</a>	<a href="#">SRAD</a>	<a href="#">AWGT</a>	<a href="#">SRED</a>		
	4 ▾	2 ▾	0.0	0.0	0.0	0.0		

COMMENT:

NSOLVR:=Solution method for implicit analysis:  
 EQ.1: Linear,  
 EQ.2: Nonlinear with BFGS updates (obsolete),  
 EQ.3: Nonlinear with Broyden updates,  
 EQ.4: Nonlinear with DFP updates,  
 EQ.5: Nonlinear with Davidon updates.

Slika 8.22. Odabir linearnog modela rješavanja analize

## 8.6. Trajanje analize

Konačno, preostalo je odrediti koliko će analiza trajati. Drugim riječima, treba odrediti vrijeme potrebno da sekcija prešla kut od  $180^\circ$ .

To se može dobiti jednostavno jednačbom kružnog gibanja:

$$s = \varphi \cdot r \quad (8.3.)$$

Gdje je:

- < s – put, m
- <  $\varphi$  – kut, rad
- < r – radijus, m

Kut za koji se mora okrenuti iznosi  $180^\circ$ , odnosno  $\pi$ . Radijus je jednak udaljenosti između fiksnih uški i onih koje se okreću te iznosi 10 m. Put koji sekcija mora prijeći stoga iznosi:

$$s = 31,4 \text{ m}$$

Vrijeme potrebno za to se može dobiti preko slijedećeg izraza:

$$t = \frac{s}{v} \quad (8.4.)$$

Gdje je:

- < t – vrijeme, s
- < v – brzina, m/s

Brzina okretanja već je poznata i iznosi 5 m/min, odnosno 0,08333 m/s. Vrijeme okretanja zatim iznosi:

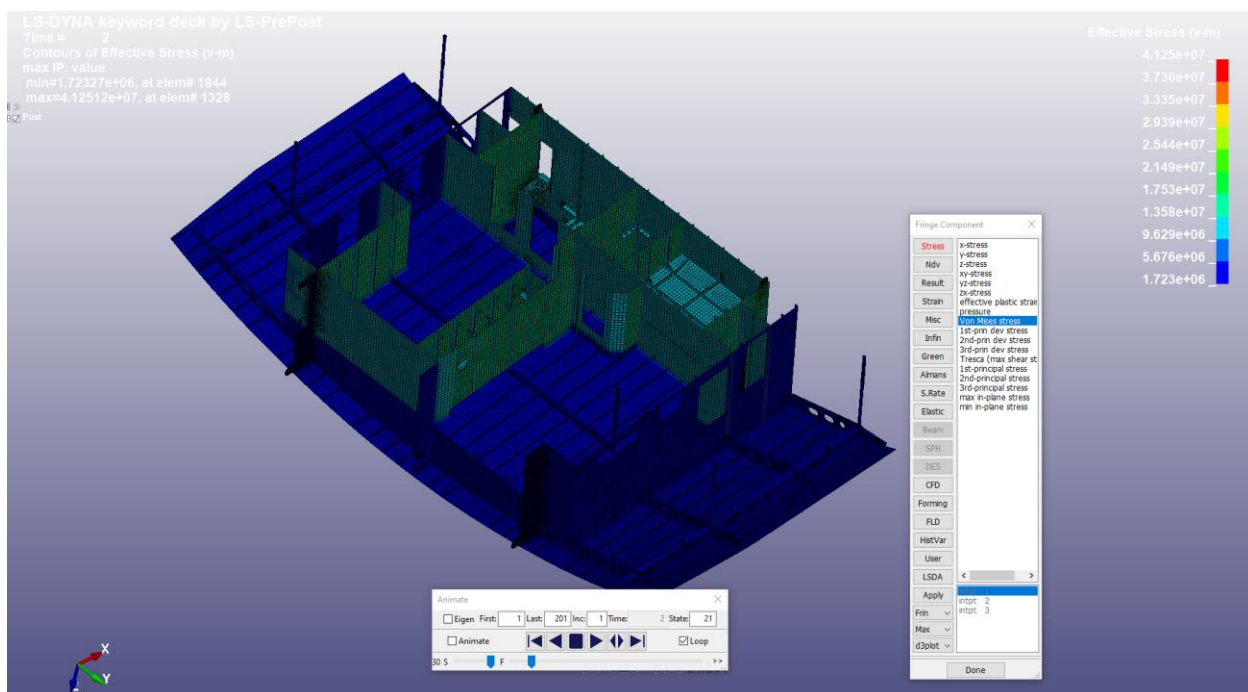
$$t = 377 \text{ s}$$

## 9. REZULTATI DINAMIČKE ANALIZE

Dobiveni rezultati analize prikazuju naprezanja prema Von Misesu. Sami razlikama u zadavanju opterećenja moglo se zaključiti da iznosi naprezanja dobiveni u *LS DYNI* i *FEMAPU* neće biti isti, no trebali bi biti slični, barem u trenutku kada sekcija visi pod  $90^\circ$ .

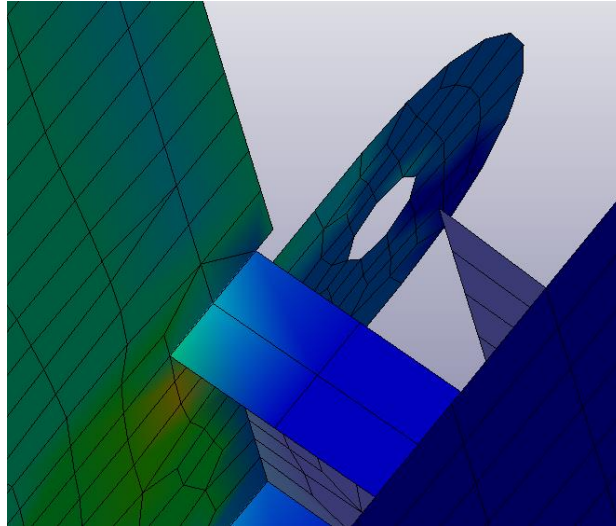
### 9.1. Prva iteracija

Rezultati dobiveni provođenjem implicitne analize dani su na *Slici 8.23.*, a naprezanja oko uški na *Slici 8.24.*



Slika 8.23. Rezultati dinamičke analize u prvoj iteraciji



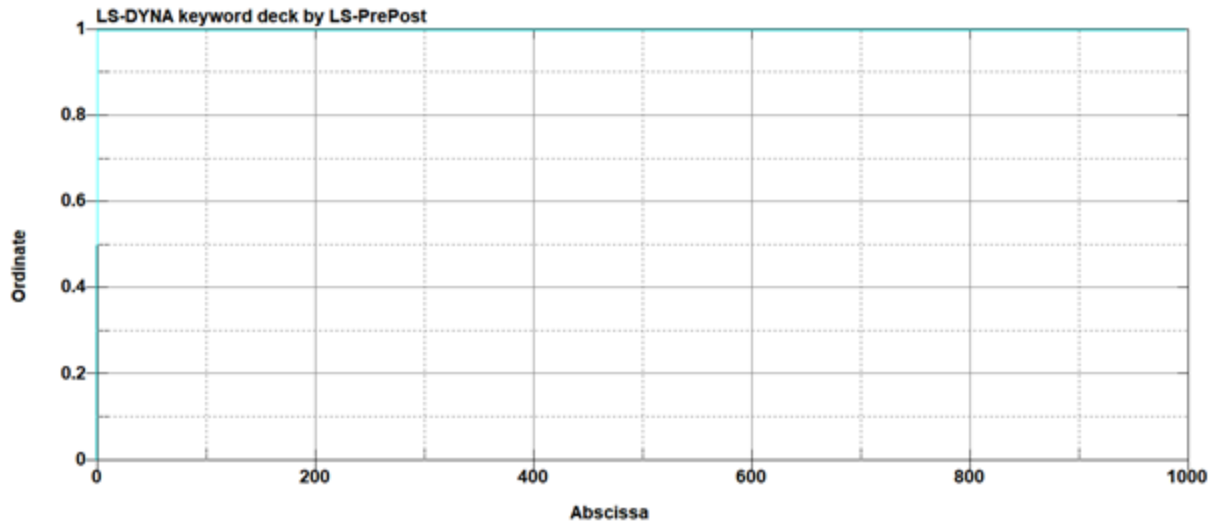


Slika 8.24. Koncentracija naprezanja

Dok se sa slika vidi da su se naprezanja pojavila na očekivanim mjestima, može se primjetiti i da dobiveni rezultati uopće nemaju smisla. Maksimalno naprezanje u području uški od 4,125 MPa za sekciju od gotovo 21 t je skoro pa zanemarivo. Razlog tome je izostanak zadavanja gravitacije, odnosno na sekciju ne djeluje njena vlastita težina.

#### 9.1.1. Zadavanje gravitacije

Krivulja gravitacije zadana je kao i za primjer ploče (Slika 8.25.), ali sa *Scale Factor-om* -10,594 (Slika 8.26.). *Scale Factor* odgovara gravitaciji dobivenoj u *FEMAP-u*, a njen smjer poklapa se sa smjerom djelovanja.



Slika 8.25. Graf krivulje gravitacije

Keyword Input Form

NewID Draw Pick Add Accept Delete Default Done

Use \*Parameter  Comment (Subsys: 1 1.k) Setting

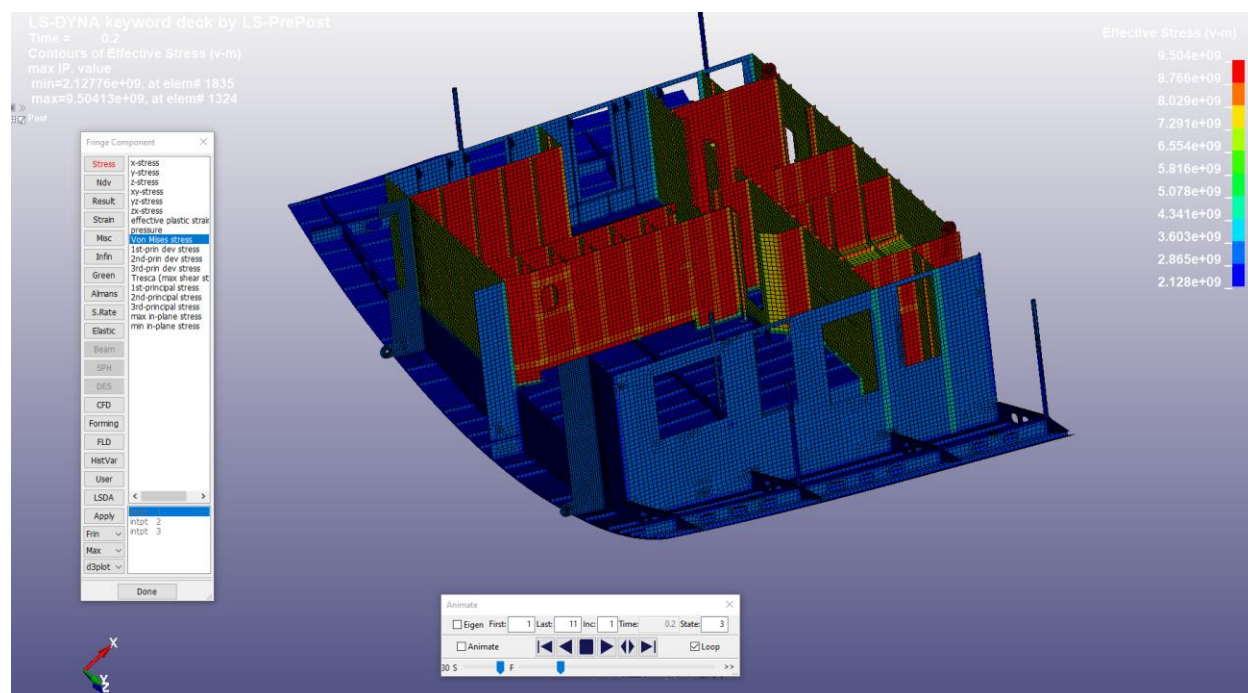
\*LOAD\_BODY\_Z (1)

1	LCID	SF	LCIDDR	XC	YC	ZC	CID
	z	-10.594000	0	0.0	0.0	0.0	2

Slika 8.26. Zadavanje gravitacije

## 9.2. Druga iteracija

Ponovno je provedena analiza, ovaj put s uključenom težinom sekcije. Dobiveni rezultati prikazani su na *Slici 8.27.*:



Slika 8.26. Rezultati dinamičke analize u drugoj iteraciji

Iz ovog se slučaja vidi da čak i minimalna naprezanja znatno premašuju dopuštena. Maksimalno naprezanje od 9,5 GPa jasno ukazuje na to da zadana brzina okretanja nije ni približno dovoljna da zaustavi padanje sekcije uslijed vlastite težine, iako djeluje u suprotnom smjeru.

### 9.3. Moguća poboljšanja

Jedno rješenje ovog problema bilo bi odrediti silu koju treba narinuti na uške, a čiji iznos bi poništio djelovanje gravitacije u tolikoj mjeri da bi se sekcija okretala traženom brzinom od 0,0087 rad/s. Ta bi sila morala djelovati u suprotnom smjeru od gravitacije, a pritom bi trebalo uzeti u obzir njene x i y komponente. Točnije, iznos sile bi uvijek ostao isti, ali mijenjao bi se iznos x i y komponenti pa bi krivulja takve sile morala biti sinusoida. Ovakvo rješenje je vrlo složeno, tim više što se javljaju i momenti tražene sile i gravitacije. Kako nema ispisa podataka o sili sa dinamometra dizalice, te bi sile trebalo računati. Zbog nedostatka vremena rješenje je traženo „metodom pokušaja i pogreške“, no to nije dalo zadovoljavajuće rezultate. Štoviše, svaka narinuta sila deformirala je uške toliko da su naprezanja imala iznose i veće od ranije navedenih 9,5 Gpa.

Drugo, nešto jednostavnije rješenje, bilo je ukloniti krivulju brzine te zadati novu krivulju pomaka. Ideja ovog rješenja je odrediti konstantni kutni pomak ( $u$ ) uške takav da suma svih pomaka daje ukupni put koji sekcija mora prijeći, 31,4 m, a u ukupnom trajanju od 377 sekundi. Tu se onemogućuje dodatan ujecaj brzine zbog djelovanja gravitacije te se sekcija rotira za točno određeni pomak. Pomak za svaki vremenski korak je slijedeći:

$$u = \frac{31,4}{377 \cdot 10} = 0,0083 \text{ m} = 8,3 \text{ mm}$$

Da bi taj pomak bio zadan, trebalo je adaptirati rubne uvjete. Na uške koje se okreću dodan je  $VAD=2$  (*Velocity/Acceleration/Displacement Flag*) gdje 2 označava pomake za kruta tijela i čvorove (*Slika 8.27.*). Krivulja pomaka dana je na *Slici 8.28.*

Keyword Input Form

NewID Draw Pick Add Accept Delete Default Done

Use \*Parameter  Comment (Subsys: 1 2.k) Setting

\*BOUNDARY\_PRESCRIBED\_MOTION\_SET\_(ID) (1)

ID	TITLE
0	uske rotacija

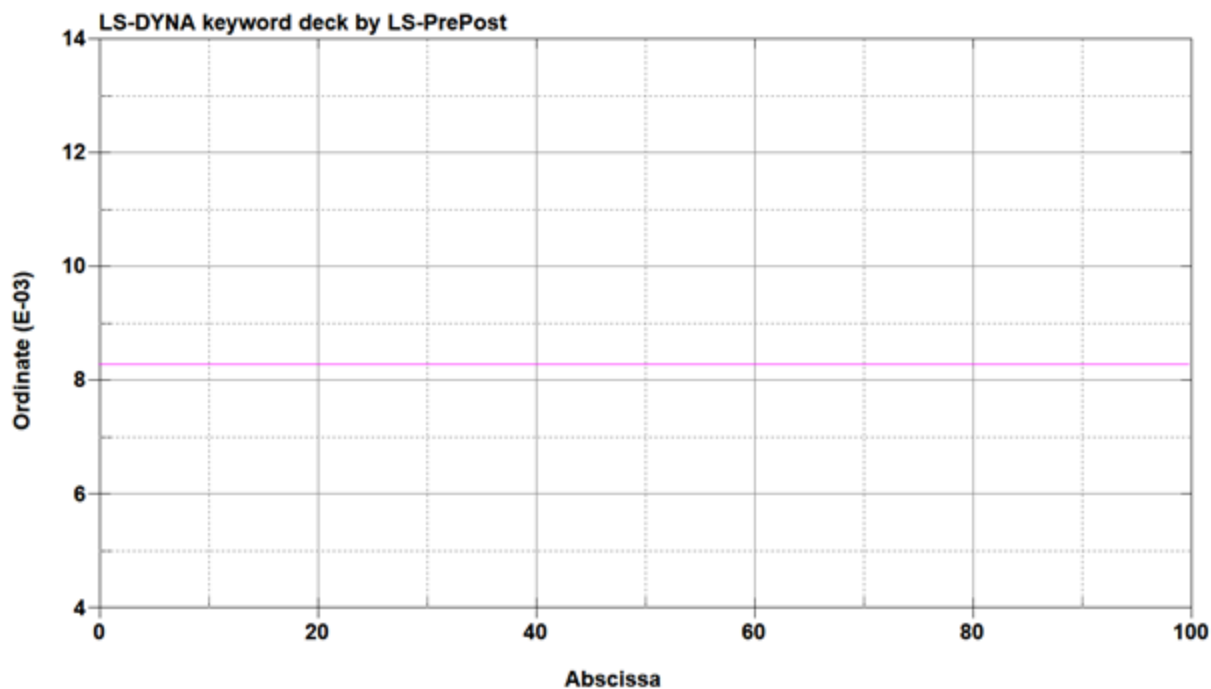
1	NSID	DOF	VAD	LCID	SF	VID	DEATH	BIRTH
	4	6	2	1	1.0000000	0	1.000e+28	0.0

2	OFFSET1	OFFSET2	MRB	NODE1	NODE2
	0.0	0.0	0	0	0

COMMENT:

VAD:=Velocity/Acceleration/Displacement flag:  
 EQ.0: velocity(rigid bodies and nodes),  
 EQ.1: acceleration(nodes only),  
 EQ.2: displacement(rigid bodies and nodes),  
 EQ.3: velocity versus displacement(rigid bodies),  
 EQ.4: relative displacement(rigid bodies only)

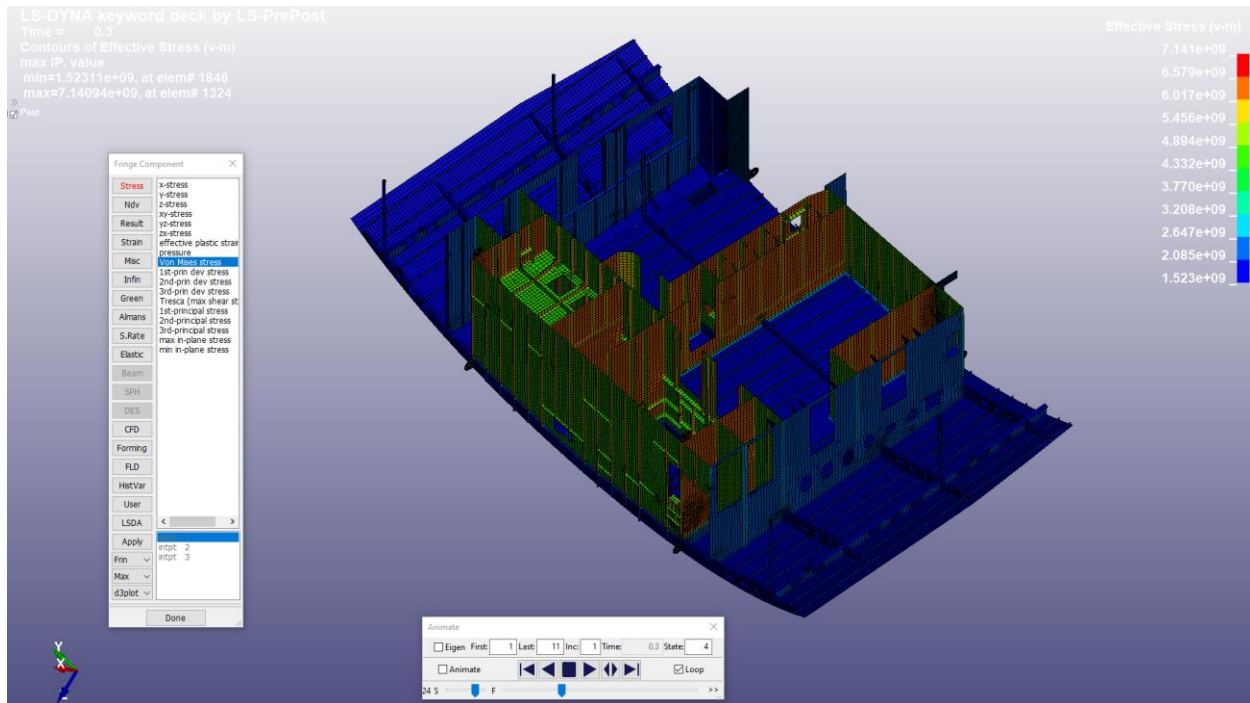
*Slika 8.27. Zadan pomak*



Slika 8.28. Krivulja konstantnog pomaka

### 9.3.1. Treća iteracija

Rezultati koji su dobiveni ovim pristupom dani su na *Slici 8.29*. Naprezanja su nešto manja nego u prethodnoj iteraciji, no i dalje su prevelika i nerealna.



Slika 8.29. Rezultati analize u trećoj iteraciji

Ovakvi rezultati, kao i prethodni, dokazuju da ili negdje u postavkama postoji pogreška koja nije uočena ili su opterećenja prevelika da budu zadana samo na čvorove dvije uške.

## 10. ZAKLJUČAK

Cilj ovog rada bio je analizirati deformacije i naprezanja za zadanu sekciju 639/T02 polarnog kruzera *Scenic Eclipse II*, a za postupak podizanja i okretanja.

Rad je podijeljen u osam velikih cjelina. Prvi dio rada u osnovama opisuje transport u brodogradilištu te transport promatrane sekcije u brodogradilištu 3. *Maj*.

Drugi dio govori o deformacijama općenito i posljedicama njihove pojave. Što ranije otkrivanje pojave deformacija omogućuje njihovu sanaciju, a upravo to je i zadatak ovog rada.

U trećem dijelu definirana je struktura sekcije. Model je preuzet u suradnji s *MKM Yachts*, no odlučeno je ponovno ga izraditi sa određenim pojednostavljenjima. Izrađen je u programskom paketu *Siemens NX*.

U slijedećem poglavlju definirane su uške. Izvršen je proračun kojim se određuju dimenzije i nosivost uški za opterećenje od 215 589 N. Prema standardima 3. *Maja* odabrane su uške nosivosti 25 t s pripadajućim škopcima.

Nadalje, pristupilo se mreženju strukture, no kao kratki uvod opisane su osnovne karakteristike FEM analize. Mreža je izrađena u *FEMAP-u*. Odabrani su kvadratni elementi veličine 100 mm za cijelu strukturu, no područja na kojima se očekuju veća naprezanja mrežena su gušće, to su npr. uške. Opisani su i neki od problema na koje se naišlo prilikom mreženja.

Iduće poglavlje daje rezultate statičke analize. Analiza je napravljena za tri slučaja ovješnja: ovješnje na četiri uške kod podizanja, ovješnje na 2 uške te ovješnje na četiri uške u okrenutom položaju. Prvi i zadnji slučaj dali su približno iste rezultate sa naprežanjem nešto iznad 70 MPa koje se pojavilo u području uški. Ti su rezultati očekivani i realni. Međutim, ovješnje na dvije uške, kada je sekcija pod 90°, dalo je naprežanje od 217 MPa. U ovom položaju jesu očekivana veća naprezanja, no ovaj iznos, iako ga ne premašuje, je vrlo blizu granci tečenja aluminija. Što se tiče deformacija, one su vrlo male i odgovaraju pomacima koji su se pojavili i u stvarnosti.

U slijedećem dijelu pristupilo se provedbi dinamičke analize. Zbog nedostatka računalnih resursa, kao primjer poslužila je ploča na kojoj se vršila analiza, a zatim su se postavke „prepisivale“ na zadanu sekciju. Za ploču je korištena eksplicitna analiza kao vremenski promjenjiva, dok je za sekciju korištena implicitna kao vremenski ustaljena.

Konačno, zadnja cjelina daje rezultate dinamičke analize. Unatoč naizgled točnim postavkama, traženi rezultati nisu dobiveni, čak ni uz brojne promjene postavki i iteracije. Naime, dobivena

naprezanja su bila prevelika da bi fizikalno bila moguća pa i sama usporedba rezultata sa statičkom analizom nije moguća.

### 10.1. Usporedba sa stvarnom sekcijom

U radu je navedeno da su prilikom izrade modela modelirane i privremene upore. Međutim, odustalo se od provođenja analize s njima jer nije poznat njihov točan broj i položaj. Prema dobivenim rezultatima može se zaključiti gdje su one najpotrebnije. Stupovi na uzdužnim nosačima imaju veće deformacije, a povećana naprezanja javljaju se oko većih otvora, primjerice vrata i prozora. Jasno je da nešto veća naprezanja javljaju kod slabijeg materijala, u ovom slučaju aluminijska.

U stvarnosti te su privremene upore postavljene kod svih otvora te na sredini sekcije. Kod podizanja, a uslijed djelovanja vlastite težine, u sredini sekcije će se javiti tlačno naprezanje. Kod spuštanja će se pak na sredini javiti vlak. Stoga je i taj dio potrebno dodatno ukrutiti. Slijedeće slike<sup>1</sup> prikazuju neke od dodanih upora.



*Slika 10.1. Upore oko stupova*



*Slika 10.1. Upora na aluminijskoj strukturi*

<sup>1</sup> Slike prikazuju sekciju u već okrenutom položaju.





*Slika 10.3. HP profili kao upore*



*Slika 10.4. Upore na sredini sekcije*

Odabir dimenzija upora zahtijevao je određeno vrijeme, a njihov razmještaj se temeljio i na iskustvu osoba odgovornih za ovaj postupak. Dodanih upora bilo je mnogo što je zahtijevalo određeni broj radnih sati radnika, a rezultiralo je i znatnim povećanjem mase cijele sekcije. Prema *Slici 10.5.* ta je masa iznosila 26,25 t. Bez obzira na navedeno, sekcija je uspješno okrenuta.



*Slika 10.5. Stvarna masa sekcije*

## 11.LITERATURA

- [1] „Transportni sustavi“, predavanje iz kolegija Tehnička logistika, s interneta, [https://www.fsb.unizg.hr/atlantis/upload/newsboard/24\\_04\\_2013\\_18782\\_TRANSPORT\\_NI\\_SUSTAVI\\_1.pdf](https://www.fsb.unizg.hr/atlantis/upload/newsboard/24_04_2013_18782_TRANSPORT_NI_SUSTAVI_1.pdf), FSB, Zagreb, 2013.
- [2] Anster resources: „Shipyard transporter ultimate guide- Learn the technical specs“, s interneta, <https://www.anstertrailer.com/shipyard-transporter-specs-guide/>
- [3] Alfirević, Ivo: „Nauka o čvrstoći 1“, Tehnička knjiga, Beograd, 1995.
- [4] Kraut, B.: “Strojarski priručnik”, Tehnička knjiga, Zagreb, 1982.
- [5] Mihalić, S.: “Osnove inženjerske geologije”, predavanja, s interneta, [http://rgn.hr/~smihalic/nids\\_snjezanamihalic/IG\\_skripta.pdf](http://rgn.hr/~smihalic/nids_snjezanamihalic/IG_skripta.pdf), RGN, Zagreb, 2007.
- [6] Matija, D.: „Analiza zaostalih naprezanja pri zavarivanju nelegiranih čelika primjenom programa Visual weld“, diplomski rad, s interneta, [http://repozitorij.fsb.hr/7073/1/Matija\\_2016\\_diplomski.pdf](http://repozitorij.fsb.hr/7073/1/Matija_2016_diplomski.pdf), Zagreb, 2016.
- [7] ASM Material Data Sheet: „Aluminum 5083 h-321“, s interneta, <https://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=ma5083h116>, Aerospace Specification Metals Inc.
- [8] Meštrović, M.: „Metoda konačnih elemenata“, s interneta, <https://www.grad.unizg.hr/download/repository/fem.pdf>, Zagreb, 2020.
- [9] Mirković, V., Užar, J.: „Primjena metode konačnih elemenata u građevinarstvu“, s interneta, <https://hrcak.srce.hr/file/139608>, Požega, 2012.
- [10] „Manipulating geometry and meshing in FEMAP“, s interneta, <https://structures.aero/blog/manipulating-geometry-meshing-femap/>, Structural Design & Analysis, Inc.
- [11] Acin, M.: „Stress singularities, stress concentrations and mesh convergence“, s interneta, [http://www.acin.net/2015/06/02/stress-singularities-stress-concentrations-and-mesh-convergence/?fbclid=IwAR31sGXf5I4m714GuWFJb-9WROplw2xGmCAgqGAI\\_63yRenZZbqhel3Jb8](http://www.acin.net/2015/06/02/stress-singularities-stress-concentrations-and-mesh-convergence/?fbclid=IwAR31sGXf5I4m714GuWFJb-9WROplw2xGmCAgqGAI_63yRenZZbqhel3Jb8), 2015
- [12] Harish, A.: „Implicit vs explicit finite element method (FEM): What is the difference?“, s interneta, <https://www.simscale.com/blog/implicit-vs-explicit-fem/>, 2020.

- [13] Green pin catalogue, s interneta, [https://www.greenpin.com/sites/default/files/2019-06/brochure-april-2019\\_0.pdf](https://www.greenpin.com/sites/default/files/2019-06/brochure-april-2019_0.pdf)
- [14] „Static vs dynamic analysis“, s interneta, <https://fea-solutions.co.uk/static-vs-dynamic-analysis/>, FEA Solutions, UK
- [15] Krpan, M., Franulović, A., Butković, M., Žigulić, R., Braut, S.; „Dinamika- teorija i primjena“, Tehnički fakultet Sveučilišta u Rijeci, Rijeka, 2001.
- [16] Shah, Q., Abid, H.: „LS-DYNA for beginners: an insight into Ls-Prepost and Ls-Dyna“, Lambert Academic Publishing

## Popis oznaka

A – površina,  $\text{mm}^2$

a – širina uške, mm

C - koeficijent prigušenja, kg/s

$D_H$  – promjer uške, mm

E – modul elastičnosti/ Youngov modul, MPa

F – sila, N

f - vektor sile u lokalnom koordinatnom sustavu, N

$F_y$  – horizontalna komponenta rezultantne sile opterećenja / RSL, N

g – gravitacijska konstanta,  $\text{m/s}^2$

h – debljina uške, mm

H – visina od središta uške do ruba, mm

k – koeficijent krutosti, MPa

K - matrica krutosti,  $\text{kg/s}^2$

l – krak, udaljenost od centra okretanja, mm

M - masa u matrici krutosti, kg

m – masa, kg

M – moment, Nmm

n – eksponent tvrdoće

P – vlačna sila, N

$r$  – radijus, m

$R_e$  – dopušteno naprezanje pri promjeni opterećenja između pozitivne i negativne maksimalne vrijednosti,  $N/mm^2$

$R_{e, max}$  – granica tečenja,  $N/mm^2$

$RSL$  – Sila opterećenja, N

$s$  – put, m

$t$  – debljina uške, mm

$t$  – vrijeme, s

$u$  – pomak, mm

$v$  – brzina, rad/s, m/s

$W$  – Moment otpora poprečnog presjeka,  $cm^3$

$x$  - pomak čvorova, mm

$x'$  - brzina pomaka, mm/s

$x''$  - akceleracija pomaka,  $mm/s^2$

$\alpha$  – maksimalni kut savijanja uški,  $^\circ$

$\varepsilon$ - relativno produljenje, mm

$\rho$  – gustoća,  $kg/m^3$

$\sigma$  – naprezanje, MPa

$\tau$  – tangencijalno naprezanje, Mpa

$\varphi$  – kut,  $^\circ$

## **Popis formula**

### 3.1. Naprezanje

5.1. Dopušteno naprezanje pri promjeni opterećenja između pozitivne i negativne maksimalne vrijednost

### 5.2. Granica tečenja

5.3. Smično naprezanje u zavaru

5.4. Maksimalno naprezanje uške

### 5.5. Moment

5.6. Horizontalna komponenta rezultantne sile opterećenja

5.7. Moment otpora poprečnog presjeka

6.1. Skup matrica krutosti

6.2. Krutost

6.3. Veza između deformacije i pomaka

6.4. Matrica krutosti

6.5. Određivanje pomaka preko matrice krutosti

7.1. Jednadžba za troosno stanje naprezanja prema Von Misesu

7.2. Naprezanje prema St. Venantovom principu

8.1. Matrica krutosti dinamičkog problema

8.2. Naprezanje u plastičnom području

8.3. Jednadžba kružnog gibanja

8.4. Vrijeme

## **Popis slika**

*Slika 1.1. Sekcija 639/T02*

*Slika 2.1. Mosne dizalice u 3. Maju*

*Slika 2.2. Podizanje sekcije vanjskom poluportalnom dizalicom*

*Slika 2.3. Okrenuta sekcija u hali za bojanje*

*Slika 2.4. Montiranje VT sekcije na brod*

*Slika 3.1. Dijagram naprezanja*

*Slika 3.2. Vrste deformacija uzrokovanih zavarivanjem*

*Slika 4.1. Preuzeti model sekcije*

*Slika 4.2. Izrađeni model sekcije*

*Slika 4.3. Detalj koljena kao trokutastih elemenata*

*Slika 4.4. Detalj profila na velikim koljenima*

*Slika 5.1. Aluminijske uške*

*Slika 5.2. Čelične uške*

*Slika 5.3. Odabran tip uški*

*Slika 5.4. Određivanje škopca*

*Slika 5.5. Provjera nosivosti škopca*

*Slika 6.1. Jednodimenzionalna mreža*

*Slika 6.2. Trokutasti i kvadratni plošni element*

*Slika 6.3. Prostorni element*

*Slika 6.4. Slobodni rubovi*

*Slika 6.5. Iskrivljene plohe*

*Slika 6.6. Spojeni rubovi pomoću opcije NonManifold Add*

*Slika 6.7. Odabrane mjerne jedinice*

*Slika 6.8. Dobivena mreža*

*Slika 6.9. Primjer pogrešno spojenih elemenata*

*Slika 6.10. Ručno spojeni elementi*

*Slika 6.10. Ručno spojeni elementi*

*Slika 6.12. Ispravljena mreža*

*Slika 6.13. Mreža oko privremene upore*

*Slika 6.14. Mreža nakon ispravljanja*

*Slika 6.15. Mreža na uškama*

*Slika 6.16. Postavljeni oslonci*

*Slika 7.1. Uzrok neprovođenja analize*

*Slika 7.2. Nespojeni elementi*

*Slika 7.3. Nespojeni element koji utječe na naprezanja*

*Slika 7.4. Deformacije*

*Slika 7.5. VonMises za troosno stanje naprezanja*

*Slika 7.6. Naprezanja*

*Slika 7.7. Koncentracija naprezanja*

*Slika 7.8. St. Vernantov princip*

*Slika 7.9. Deformacije*

*Slika 7.10. Naprezanja*

*Slika 8.1. Model sekcije u LS DYNA*

*Slika 8.2. Primjer ploče*



*Slika 8.3. Svojstva aluminija*

*Slika 8.4. Zadavanje gravitacije*

*Slika 8.5. Krivulja gravitacije*

*Slika 8.6. Oslonci*

*Slika 8.7. Rubni uvjeti na osloncima*

*Slika 8.8. Slobodni kraj*

*Slika 8.9. Definiranje brzine*

*Slika 8.10. Graf brzine*

*Slika 8.11. Naprezanja pod kutem od  $45^\circ$*

*Slika 8.12. Naprezanja pod kutem od  $90^\circ$*

*Slika 8.13. Naprezanja pod kutem od  $135^\circ$*

*Slika 8.14. Rigid elementi*

*Slika 8.15. Fiksni čvor*

*Slika 8.16. Postavke fiksnih čvorova*

*Slika 8.17. Odabrane uške*

*Slika 8.18. Postavke rotacije*

*Slika 8.19. Zadavanje brzine*

*Slika 8.20. Graf brzine*

*Slika 8.21. Odabir implicitne analize*

*Slika 8.22. Odabir linearnog modela rješavanja analize*

*Slika 8.23. Rezultati dinamičke analize u prvoj iteraciji*

*Slika 8.24. Koncentracija naprezanja*

*Slika 8.25. Graf krivulje gravitacije*

*Slika 8.26. Zadavanje gravitacije*

*Slika 8.26. Rezultati dinamičke analize u drugoj iteraciji*

*Slika 8.27. Zadan pomak*

*Slika 8.28. Krivulja konstantnog pomaka*

*Slika 8.29. Rezultati analize u trećoj iteraciji*

*Slika 10.1. Upore oko stupova*

*Slika 10.1. Upora na aluminijskoj strukturi*

*Slika 10.3. HP profili kao upore*

*Slika 10.4. Upore na sredini sekcije*

*Slika 10.5. Stvarna masa sekcije*

## **Popis tablica**

*Tablica 4.1. Popis profila*

*Tablica 6.2. Materijali i debljine*

## Sadržaj

Diplomski rad bavi se određivanjem deformacija i naprezanja u sekciji prilikom postupka okretanja. U tu svrhu odabrana je sekcija 639/T02 polarnog kruzera *Scenic Eclipse II*. Uvodni dio rada u kratkim crtama opisuje proces transporta u brodogradilištu, a zatim je opisana i teorijska pozadina iza pojave deformacija te metode konačnih elemenata. Ta će metoda služiti kao osnovni alat za izračun traženih veličina. Ostatak rada bavi se izradom modela i mreženjem, provedbom statičke, i konačno dinamičke analize. Rezultati bi trebali dati iznose deformacija i naprezanja koji će se javiti u strukturi za vrijeme okretanja te bi, na temelju istih, trebalo biti zaključeno koji su slabiji dijelovi strukture koje treba dodatno ukrutiti.

**Ključne riječi:** *Transport, okretanje, metoda konačnih elemenata, deformacije, naprezanja, statička analiza, dinamička analiza*

## Abstract

The master's thesis deals with finding deformations and stress in hull unit during the process of rotation. For that purpose, unit 639/T02 from *Scenic Eclipse II* polar cruise ship, was chosen. Introductory part of thesis shortly describes transportation process in shipyard, and then, theoretical background behind deformation occurrence and finite element method is given. Finite element method will be used as primary tool for deformation and stress calculation. The rest of thesis describes process of making the model and meshing, conduction of static analysis, and, at the end, dynamic analysis. The results should give deformations and stress that will appear in structure during process of rotation and, based on these results, conclusion shall be made about weaker parts of structure that need stiffening.

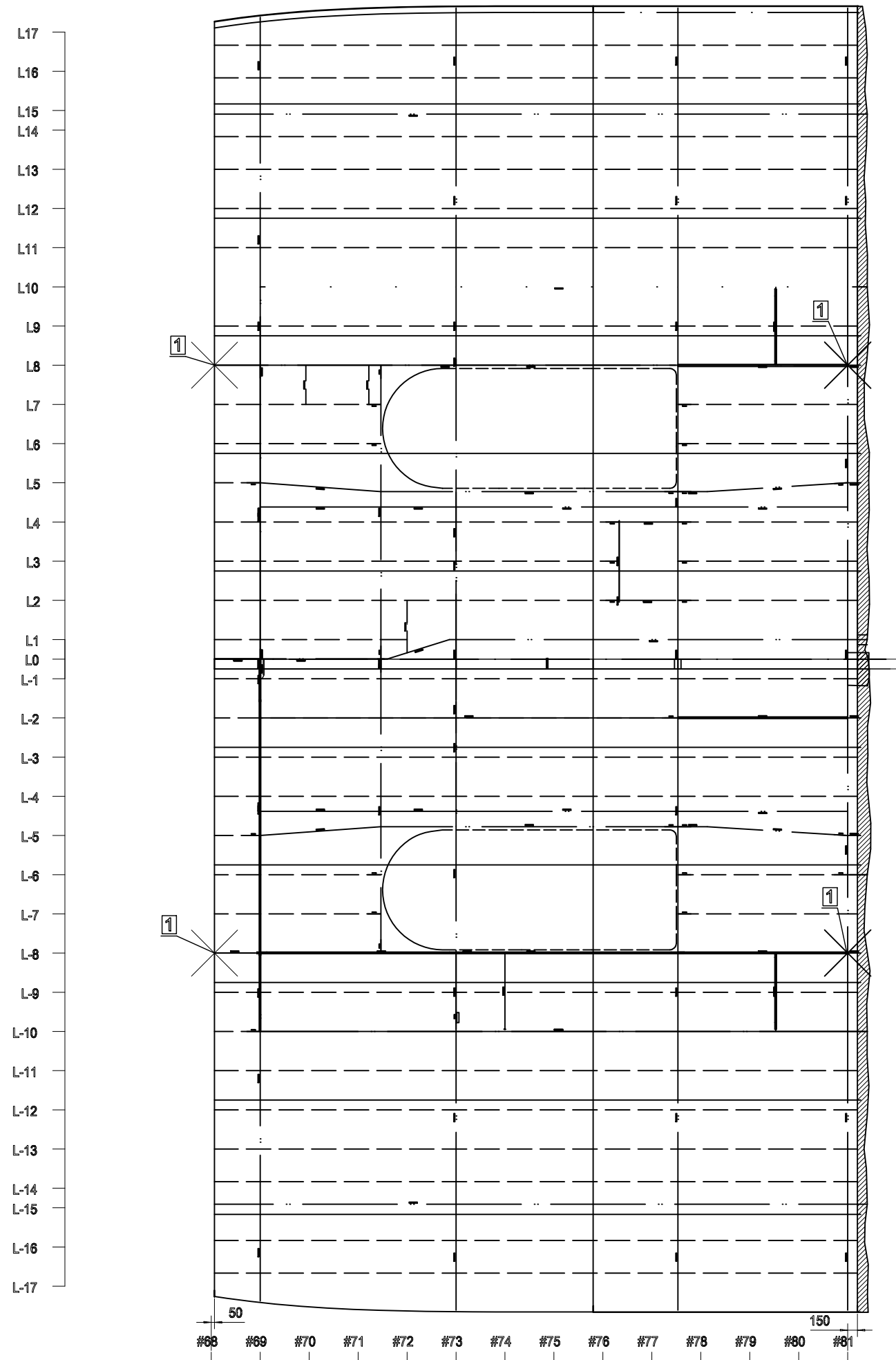
**Key words:** *transportation, rotation, finite element method, deformation, stress, static analysis, dynamic analysis*

# **Prilog 1**

*Razmještaj uški*

ROOF TOP VIEW

T02



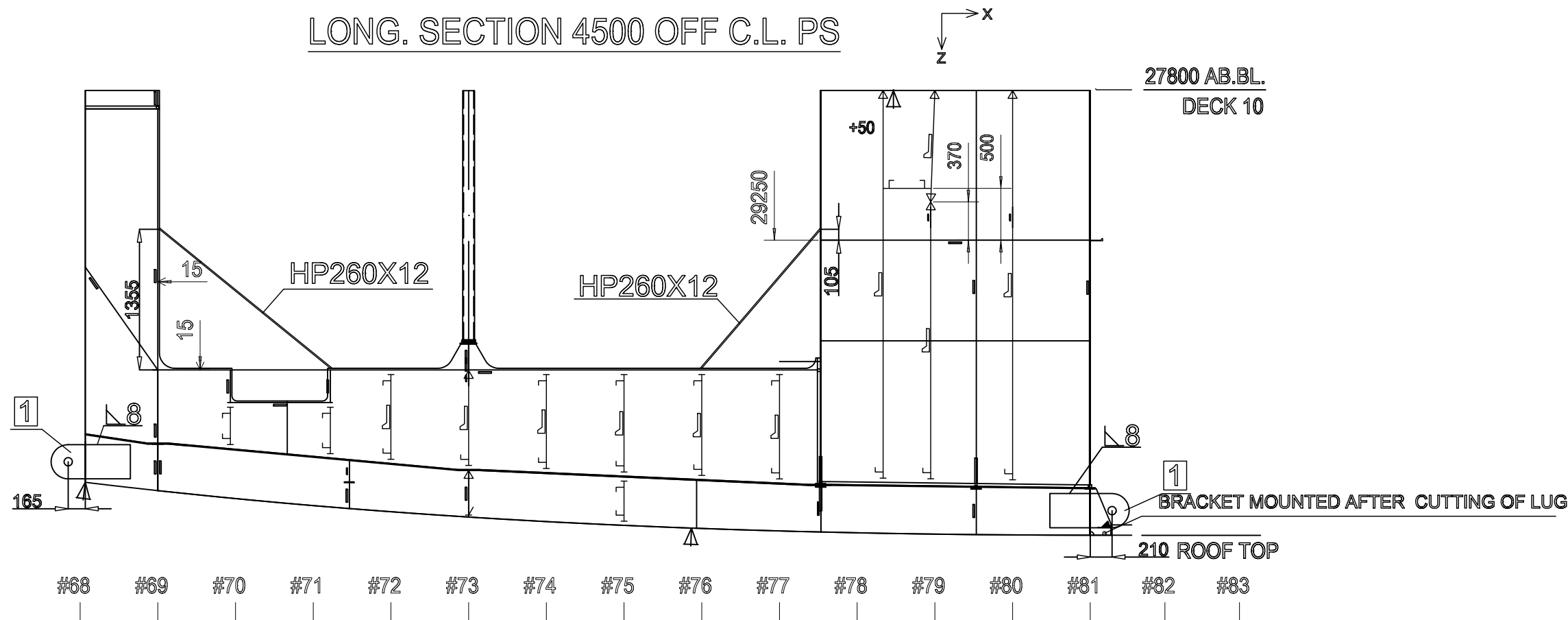
POS.	NAME	PCS.	DRAWING
1	LIFTING LUG TYPE "C"	4	

NOTE:

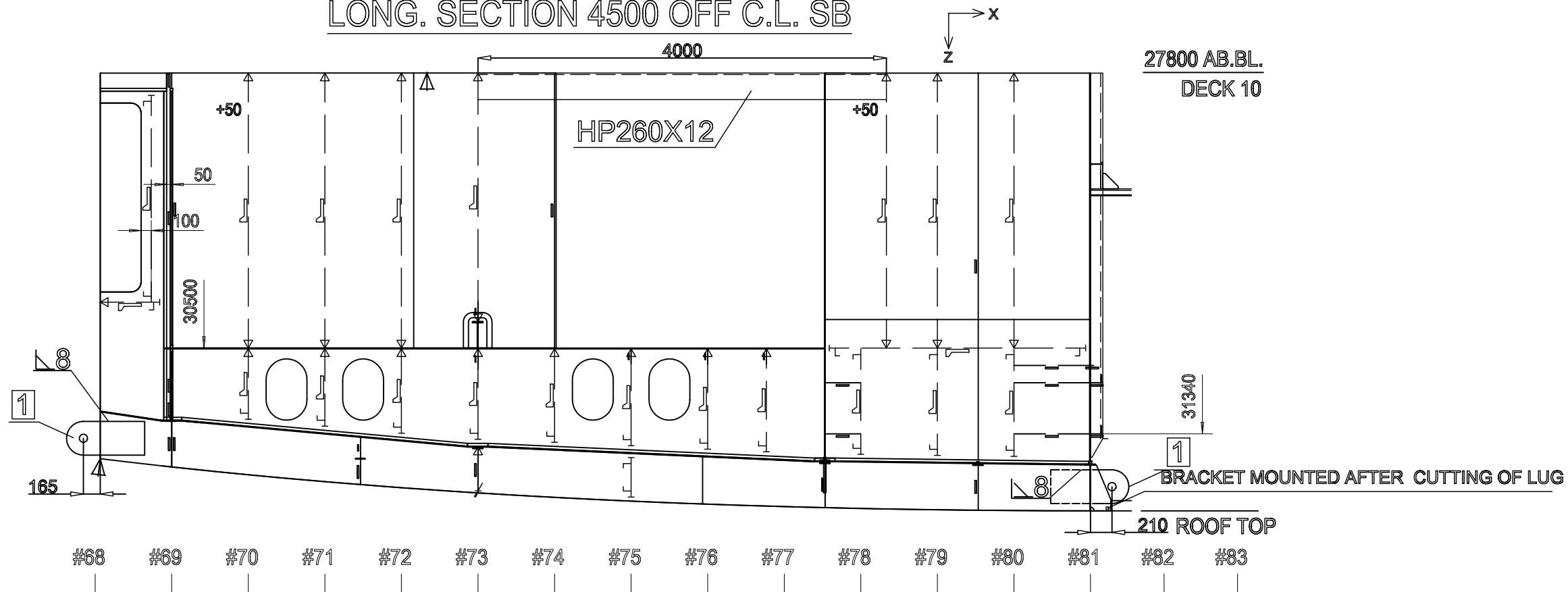
- HP260X12 TEMPORARY STIFFENER - ASSEMBLY ON SITE

GRADNJA:	734	<b>SCENIC</b>	BR.NACRTA										REV.
NAZIV NACRTA:	ROOF FR.68-81		2 2 6 0 6 3 9 0 0 0 1 2										
KONSTRUIRAO:	AL	OPIS IZMJENE:	BR.SKICE										REV.
		ADDED LUGS	2 2 6 0 6 3 9 0 1 1										
		ADDED STIFFENERS											
		PREGLEDAO:	DB	DATUM: 15.4.2022			LIST: 1		LISTOVA: 7				

LONG. SECTION 4500 OFF C.L. PS

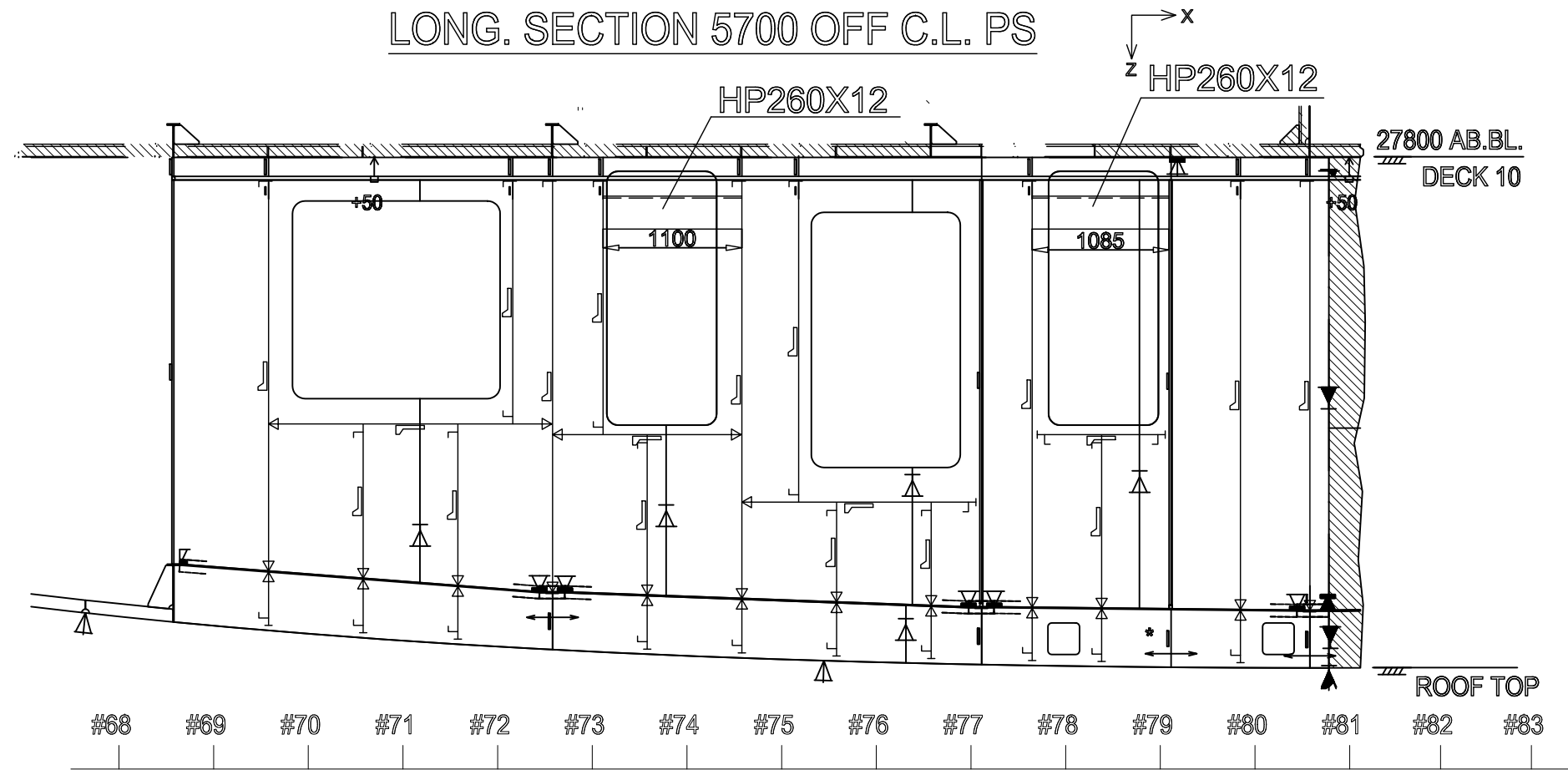


LONG. SECTION 4500 OFF C.L. SB

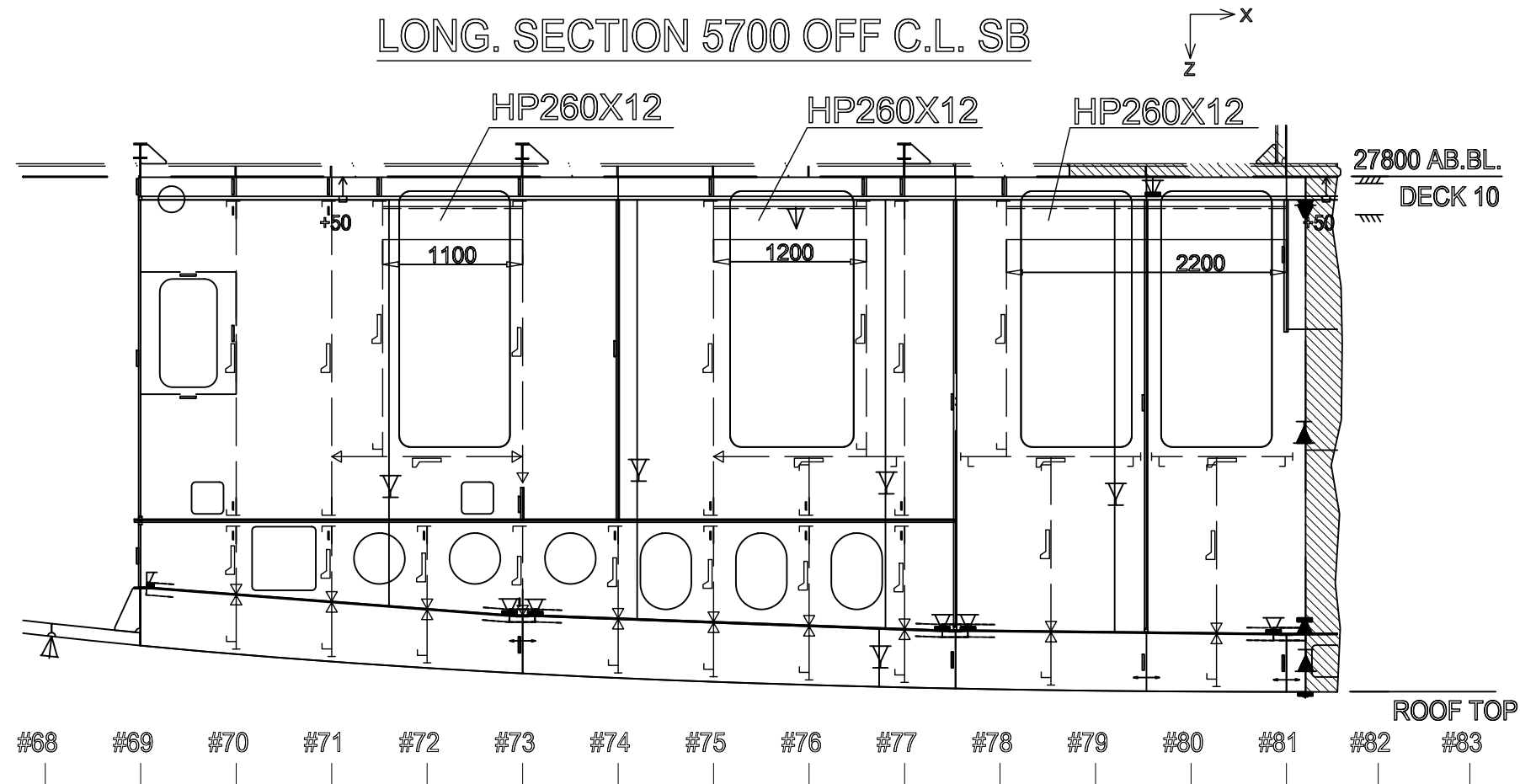


GRADNJA:	734	<b>SCENIC<sup>®</sup></b>	BR.NACRTA										REV.
NAZIV NACRTA:	ROOF FR.68-81		2 2 6 0 6 3 9 0 0 0 1 2										2
KONSTRUIRAO:	AL	OPIS IZMJENE: ADDED LUGS ADDED STIFFENERS	BR.SKICE										REV.
		PREGLEDAO: DB	2 2 6 0 6 3 9 0 1 1										
			DATUM: 15.4.2022			LIST: 2			LISTOVA: 7				

LONG. SECTION 5700 OFF C.L. PS



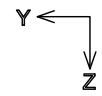
LONG. SECTION 5700 OFF C.L. SB



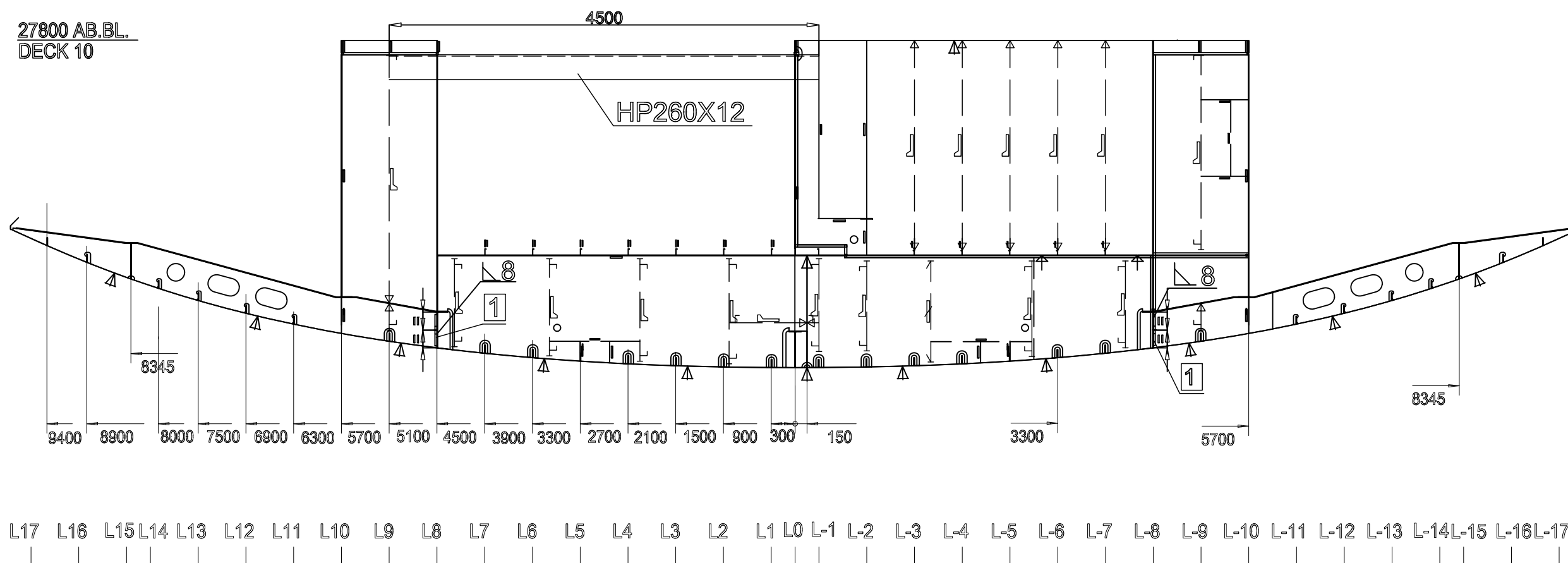
GRADNJA:	734	<b>SCENIC°</b>	BR.NACRTA										REV.	
NAZIV NACRTA:	ROOF FR.68-81		2 2 6 0 6 3 9 0 0 0 1 2										REV.	
KONSTRUIRAO:	AL	PREGLEDAO:	DB	BR.SKICE										REV.
				2 2 6 0 6 3 9 0 1 1										
			DATUM: 15.4.2022			LIST: 3			LISTOVA: 7					



# FRAME 69



27800 AB.BL.  
DECK 10

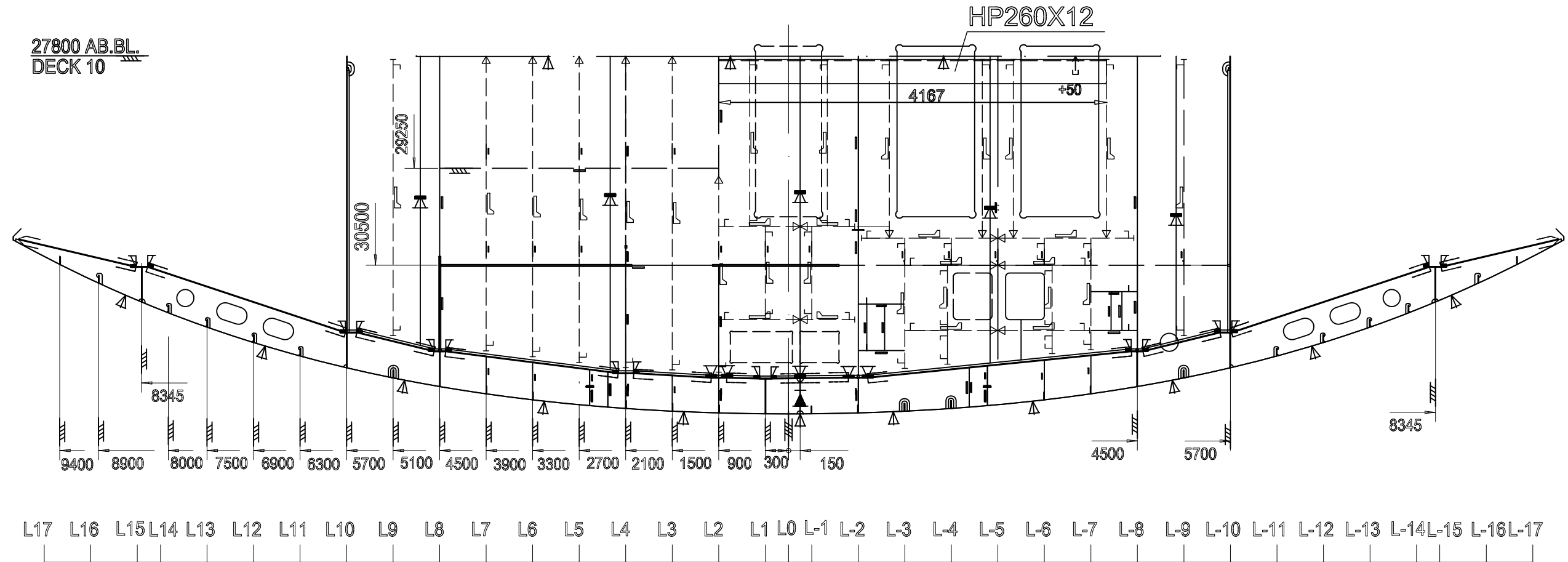


GRADNJA:	734	SCENIC°	BR.NACRTA	REV.
			2 2 6 0 6 3 9 0 0 0 1 2	2
NAZIV NACRTA:	ROOF FR.68-81	OPIS IZMJENE: ADDED LUGS ADDED STIFFENERS	BR.SKICE	REV.
			2 2 6 0 6 3 9 0 1 1	1
KONSTRUIRAO: AL		PREGLEDAO: DB	DATUM: 15.4.2022	LIST: 4 LISTOVA: 7

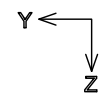
# FRAME 78-350



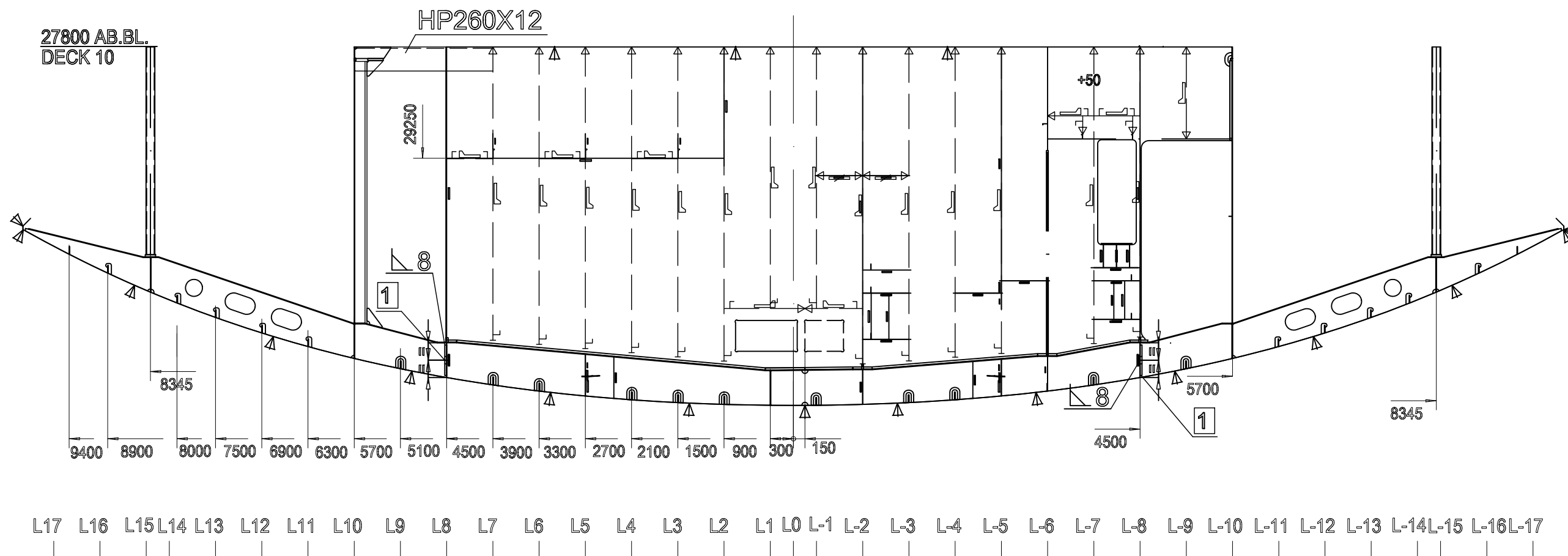
27800 AB.BL.  
DECK 10



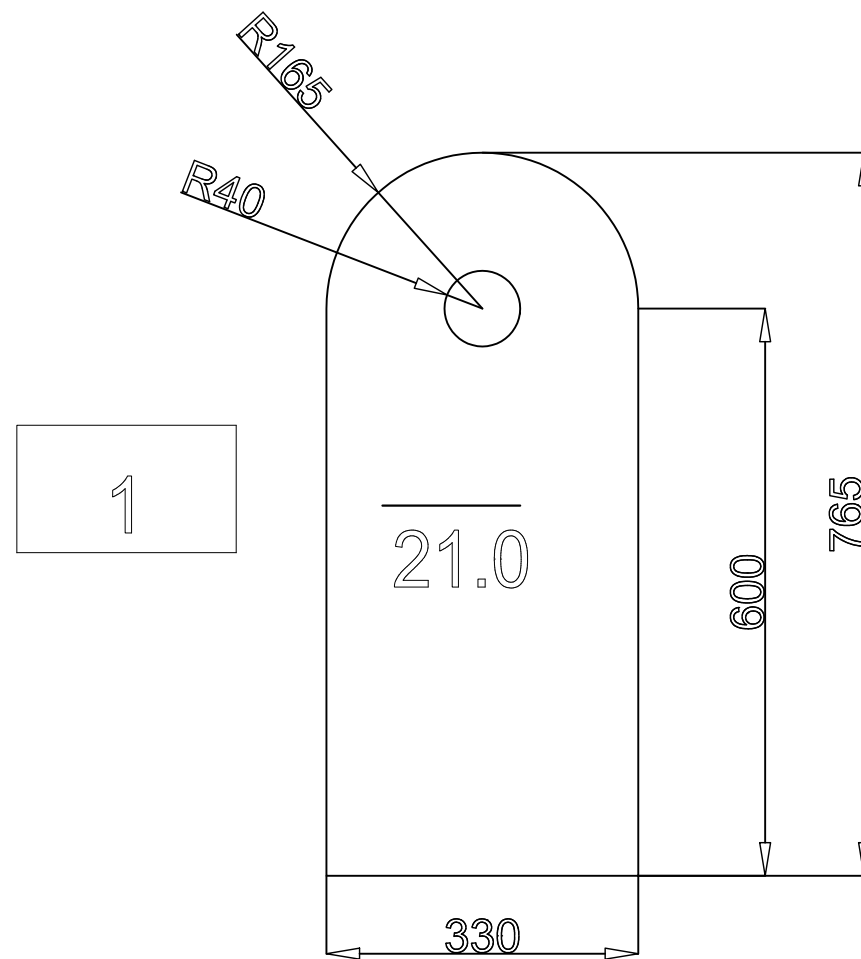
GRADNJA:	734	<b>SCENIC°</b>	BR.NACRTA										REV.		
NAZIV NACRTA:	ROOF FR.68-81		OPIS IZMJENE: ADDED LUGS ADDED STIFFENERS	2	2	6	0	6	3	9	0	0	0	1	2
KONSTRUIRAO: AL	PREGLEDAO: DB	DATUM: 15.4.2022	BR.SKICE							LIST: 5		LISTOVA: 7			
			2	2	6	0	6	3	9	0	1	1			



# FRAME 81



GRADNJA:	734	<b>SCENIC°</b>	BR.NACRTA										REV.		
NAZIV NACRTA:	ROOF FR.68-81		2	2	6	0	6	3	9	0	0	0	1	2	REV.
KONSTRUIRAO:	AL	OPIS IZMJENE:		BR.SKICE										REV.	
		ADDED LUGS		2	2	6	0	6	3	9	0	1	1		
		ADDED STIFFENERS		DATUM: 15.4.2022										LIST: 6	LISTOVA: 7
		PREGLEDAO: DB													



GRADNJA:	734	<b>SCENIC°</b>	BR.NACRTA										REV.
NAZIV NACRTA:	ROOF FR.68-81		2 2 6 0 6 3 9 0 0 0 1 2										REV.
KONSTRUIRAO:	AL	OPIS IZMJENE:	BR.SKICE										REV.
		ADDED LUGS ADDED STIFFENERS	2 2 6 0 6 3 9 0 1 1										
		PREGLEDAO: DB	DATUM: 15.4.2022			LIST: 7			LISTOVA: 7				