

# Strukturalna analiza konstrukcije obalne valoelektrane

---

**Hergešić, Filip**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2024**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:549659>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-13**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Filip Hergešić**

Zagreb, 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentor:

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

Student:

Filip Hergešić

Zagreb, 2024.

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

Zahvaljujem se svom mentoru, Prof. dr. sc. Smiljku Rudanu na vremenu, trudu i prenesenom znanju uloženom u ovaj rad.

Zahvaljujem se Prof. dr. sc. Ivanu Čatipoviću na pomoći i savjetovanju.

Zahvaljujem se svojoj obitelji, prijateljima i kolegama na neizmjerne podršci.

Filip Hergešić



Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 – 04 / 24 – 06 / 01	
Ur.broj: 15 – 24 –	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Filip Hergešić**

JMBAG: **0035214600**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Strukturalna analiza konstrukcije obalne valoelektrane**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Structural analysis of an onshore wave power plant construction**

Opis zadatka:

Klimatske promjene i posljedice tih promjena jasno ukazuju na nužnost korištenja obnovljivih izvora energije. Jedan od prihvatljivih izvora energije je energija morskih valova, koja se elektro-mehaničkim sustavom koji nazivamo valoelektrana, pretvara u električnu energiju. U završnom radu potrebno je analizirati konstrukcijske značajke obalne valoelektrane, sukladno dostupnim tehničkim podacima.

U radu je potrebno:

1. Napraviti pregled i proučiti princip rada za različite izvedbe valoelektrana.
2. Analizirati dostupne podatke o elementima valoelektrane te dimenzionirati elemente konstrukcije koji će se analizirati.
3. Izraditi geometrijski model valoelektrane u svrhu kinematičke analize pokretnih dijelova konstrukcije.
4. Provesti pojednostavljeni proračun sila koje djeluju na uronjene dijelove valoelektrane.
5. Izraditi mrežu konačnih elemenata konstrukcije valoelektrane te provesti analizu čvrstoće. Po potrebi, konstrukciju je potrebno modificirati kako bi joj se smanjila masa ili se poboljšala na drugi način.

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

Zadatak zadan:

30. 11. 2023.

Datum predaje rada:

**1. rok:** 22. i 23. 2. 2024.  
**2. rok (izvanredni):** 11. 7. 2024.  
**3. rok:** 19. i 20. 9. 2024.

Predviđeni datumi obrane:

**1. rok:** 26. 2. – 1. 3. 2024.  
**2. rok (izvanredni):** 15. 7. 2024.  
**3. rok:** 23. 9. – 27. 9. 2024.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Smiljko Rudan

Predsjednik Povjerenstva:

Izv. prof. dr. sc. Ivan Čatipović

**SADRŽAJ**

POPIS TABLICA .....	II
POPIS DIJAGRAMA .....	III
POPIS SLIKA.....	IV
POPIS OZNAKA.....	V
SAŽETAK.....	VI
SUMMARY.....	VII
1. UVOD.....	1
2. TIPOVI VALOELEKTRANA.....	2
3. PROJEKT VALOELEKTRANE ZA JADRAN .....	5
3.1. Princip rada pretvornika.....	6
4. KINEMATIČKI MODEL VALOELEKTRANE.....	7
4.1. Opis modela .....	7
4.2. SOLIDWORKS .....	7
4.3. Prikaz modela.....	8
5. SILE VALA NA PLUTAČU .....	9
5.1. Ulazni podaci .....	9
5.2. Vertikalna komponenta .....	9
5.3. Horizontalna komponenta.....	10
6. NUMERIČKI MODEL VALOELEKTRANE .....	12
6.1. Metoda konačnih elemenata.....	12
6.2. Femap/NX NASTRAN.....	12
6.3. Priprema modela .....	12
6.3.1. Definiranje svojstva materijala i grednih konačnih elemenata .....	13
6.3.2. Mreža .....	15
6.3.3. Sile i rubni uvjeti.....	16
6.4. Analiza 3D modela.....	20
6.4.1. Mjerne jedinice .....	20
6.4.2. Ubacivanje Parasolid datoteke modela u Femap .....	20
6.4.3. Generiranje mreža konačnih elemenata .....	22
6.4.4. Rubni uvjeti.....	26
6.4.5. Opterećenja na plutači.....	29
7. ANALIZA REZULTATA.....	31
7.1. Rezultati početne analize .....	31
7.2. Rezultati analize punog modela .....	32
8. ZAKLJUČAK.....	35
LITERATURA .....	36

**POPIS TABLICA**

---

Tablica 1 Zadani ulazni podatci VANIS projekta.....	9
Tablica 2 Proračun brzine, ubrzanja i horizontalne sile vala.....	11
Tablica 3 Promjena mjernih jedinica.....	20
Tablica 4 Kriteriji izdrživosti aluminijske legure EN AW 6060 T6 [8] .....	31
Tablica 5 Pomaci i naprezanja u navedenim profilima .....	31
Tablica 6 Preračunate vrijednosti pomaka i naprezanja .....	33

---

**POPIS DIJAGRAMA**

Dijagram 1 Prikaz horizontalne sile po vremenu ..... 11



**POPIS SLIKA**

Slika 1 Shema obalnog oscilirajućeg vodenog stupa [4].....	3
Slika 2 Shema pučinskog oscilirajućeg vodenog stupa [4].....	3
Slika 3 Shema pučinskog točkastog upijača [4].....	4
Slika 4 Shema slična opisanom pretvorniku [5].....	5
Slika 5 3D prikaz stvorenog modela u sučelju SOLIDWORKS-u .....	8
Slika 6 Svojstva materijala Aluminijska u Femap/NX NASTRAN .....	13
Slika 7 Svojstvo BEAM elementa u Femap/NX NASTRAN.....	14
Slika 8 Prikaz poprečnog presjeka poluge u Femap/NX NASTRAN.....	14
Slika 9 Upisanih koordinata za prvu točku u Femap/NX NASTRAN.....	15
Slika 10 Upisane koordinate za drugu točku u Femap/NX NASTRAN .....	15
Slika 11 Određivanje veličine elemenata na krivulji u Femap/NX NASTRAN .....	15
Slika 12 Prozor za generiranje mreže konačnih elemenata u Femap/NX NASTRAN .....	16
Slika 13 Bočni prikaz postavljenog modela u Femap/NX NASTRAN .....	16
Slika 14 Određivanje vertikalne sile u Femap/NX NASTRAN.....	17
Slika 15 Upisivanje globalnog utjecaja sile teže u Femap/NX NASTRAN .....	17
Slika 16 Postavljanje svojstva DOF-SPRING elementa u Femap/NX NASTRAN .....	18
Slika 17 Određivanje rubnog uvjeta zgloba u Femap/NX NASTRAN .....	18
Slika 18 Određivanje rubnog uvjeta učvršćenja opruge u Femap/NX NASTRAN.....	19
Slika 19 Određivanje mjerila u Femap/NX NASTRAN.....	20
Slika 20 Prikaz unesenog CAD modela u sučelju Femap/NX NASTRAN .....	21
Slika 21 Svojstvo SOLID u Femap/NX NASTRAN .....	22
Slika 22 PLATE svojstvo plutače u Femap/NX NASTRAN .....	22
Slika 23 PLATE svojstvo poluge u Femap/NX NASTRAN.....	23
Slika 24 Određivanje veličine mreže konačnih elemenata u Femap/NX NASTRAN.....	23
Slika 25 Prikaz stvaranja mreže na SOLID elementima u Femap/NX NASTRAN .....	24
Slika 26 Prikaz stvaranja mreže PLATE elemenata poluge u Femap/NX NASTRAN .....	24
Slika 27 Prikaz stvaranje mreže PLATE elemenata plutače u Femap/NX NASTRAN.....	25
Slika 28 Prikaz generirane mreže konačnih elemenata na modelu u Femap/NX NASTRAN .....	25
Slika 29 Prikaz spajanja čvorova mreže u Femap/NX NASTRAN.....	26
Slika 30 Prikaz stvaranja RIGID elementa u Femap/NX NASTRAN.....	26
Slika 31 Prikaz stvaranja rubnog uvjeta za zglob u Femap/NX NASTRAN.....	27
Slika 32 Prikaz stvorenog RIGID elementa i rubnog uvjeta u Femap/NX NASTRAN .....	27
Slika 33 Prikaz opruge, RIGID elementa i rubnog uvjeta u Femap/NX NASTRAN.....	28
Slika 34 Prikaz unosa vertikalne sile na plutaču u Femap/NX NASTRAN .....	29
Slika 35 Prikaz unosa horizontalne sile na plutaču u Femap/NX NASTRAN .....	29
Slika 36 Prikaz unosa sile teže na tijelo modela u Femap/NX NASTRAN.....	30
Slika 37 Prikaz vektora svih sila u Femap/NX NASTRAN.....	30
Slika 38 Prikaz gradijenta pomaka modela u Femap/NX NASTRAN .....	32
Slika 39 Prikaz gradijenta naprezanja na modelu u Femap/NX NASTRAN.....	32
Slika 40 Gradijent naprezanja na zglobovima .....	33
Slika 41 Prikaz točke žarišta naprezanja na zglobovima .....	33
Slika 42 Prikaz žarišta naprezanja na poluzi .....	34

**POPIS OZNAKA**

<b>Oznaka</b>	<b>Jedinica</b>	<b>Opis</b>
$g$	$m/s^2$	Ubrzanje sile teže
$\rho$	$kg/m^3$	Gustoća fluida
$H$	m	Visina plutače
$D$	m	Promjer plutače
$h$	m	Visina vala
$T$	s	Period vala
$\omega$	$s^{-1}$	Kutna frekvencija vala
$C_d$	/	Koeficijent sile otpora
$C_i$	/	Koeficijent sile inercije
$a_x$	$m/s^2$	Horizontalno ubrzanje vala
$v_x$	m/s	Horizontalna brzina vala
$V$	$m^3$	Volumen plovka
$\Delta$	kg	Masa istisnine plovka
$\zeta_a$	m	Amplituda vala
$\omega$	rad/s	Kutna frekvencija vala
$t$	s	Vremenski razmak
$F$	N	Sila
$\sigma$	MPa	Naprezanje

---

**SAŽETAK**

Potruga za obnovljivim izvorima energije stavlja u razmatranje mogućnost iskorištavanja energije valova mora za proizvodnju električne energije putem valnih pretvarača energije. Poznavanjem karakteristika valova Jadranskoga mora, mogu se postaviti početni uvjeti za izradu mehanizma koji će pomake plutače na morskoj površini valovitoga mora pretvoriti u pomake linearnog magnetskog generatora struje. Provođenjem strukturne analize modela mehanizma pomoću metode konačnih elemenata (MKE) ispituju se uvjeti i zahtjevi koje spomenuti mehanizam mora zadovoljiti za proizvodnju električne energije.

Ključne riječi: *valni pretvarač energije, obnovljivi izvori energije, strukturna analiza, Jadransko more, metoda konačnih elemenata*

---

**SUMMARY**

The search for renewable energy sources takes into consideration the possibility of using the energy waves of the sea to produce electricity through wave energy converters. By knowing the characteristics of the waves of the Adriatic Sea, the initial conditions can be set for the creation of a mechanism that will convert the translations of an buoy on the sea surface of the wavy sea into the translations of an linear magnetic current generator. By carrying out a structural analysis of the mechanism model using the finite element method (FEM), the conditions and requirements that the mentioned mechanism must satisfy to produce electricity are examined.

*Keywords: wave energy converter, renewable energy sources, structural analysis, Adriatic Sea, finite element method*

## 1. UVOD

Suvremeni energetske trendovi usmjeravaju se prema proizvodnji energije iz obnovljivih izvora, među kojima su najpoznatije i najzastupljenije solarne elektrane i vjetroelektrane. Tijekom zadnjih 20 godina počeo se razmatrati još jedan obnovljivi izvor za proizvodnju električne energije.

„Plava energija“ ili energija morskih valova koristi neizmjernu kinetičku energiju kretanja mora kao obnovljivi izvor energije korištenjem pretvornika energije morskih valova (valoelektrana) za proizvodnju električne energije.

Činjenice da je 70% površine Zemlje morsko prostranstvo koje zauzima 361 milijun kilometara kvadratnih, predstavlja mnoge potencijalne lokacije diljem svijeta za iskorištavanje valne energije.[1] Uračunamo li k tome i minimalan utjecaj valoelektrana na okoliš u usporedbi s proizvodnjom iz drugih obnovljivih izvora energije, valna energija razmatra se kao vrlo povoljna opcija za proizvodnju energije te predstavlja začetak razvoja sustava valnih pretvarača energije.

Najranija istraživanja mogućih tehnologija iskorištavanja valne energije započeta su sedamdesetih godina 20. stoljeća, dok su suvremene tehnologije razvijene u različita rješenja koja su trenutno u fazama testiranja, ranih demonstracija i u nekim slučajevima demonstracija za komercijalnu upotrebu. Pretjerana raznolikost razmatranih i ispitivanih rješenja usporila je komercijalnu primjenu valnih pretvarača. Za ostvarenje komercijalne primjene, potrebno se koncentrirati na manji broj najisplativijih rješenja, da bi se resursi mogli usmjeriti prema izgradnji manjih serijskih postrojenja, koja će služiti kao model za povećanje stupnja iskoristivosti i smanjenje troškova izgradnje i održavanja komponenata postrojenja.

Time će se ostvariti puna komercijalna upotreba valoelektrana.[2]

U ovom radu razmatrat će se povoljnost izrade pretvarača valne energije na obali Jadrana, primjenom korištenjem plutače pokretati linearni generator električne energije, mehanizam prijenosa energije će biti potrebno dimenzionirati da izdrži naprezanja stvorena opterećenjem valova.

## 2. TIPOVI VALOELEKTRANA

Za razliku od ostalih obnovljivih izvora energija kod kojih su tehnologije pretvornika ustaljene i komercijalno dokazane, kod valoelektrana još uvijek nema takvih rješenja, nego se pojavljuju razni pristupi iskorištavanja valne energije koje se još uvijek razvijaju.

Pretvornici energije morskih valova su uređaji koji se dijele prema tipu tehnologije, lokaciji i načinu rada električnog generatora.

Najpoznatija su sljedeća 4 tipa tehnologije pretvornika:

- Točkasti upijač ili plutača (Point Absorber)
- Oscilirajući vodeni stup (Oscillating Water Column)
- Preljevanje valova (Wave Overtopping)
- Prigušivač (Attenuator )

Prema lokaciji dijele se na:

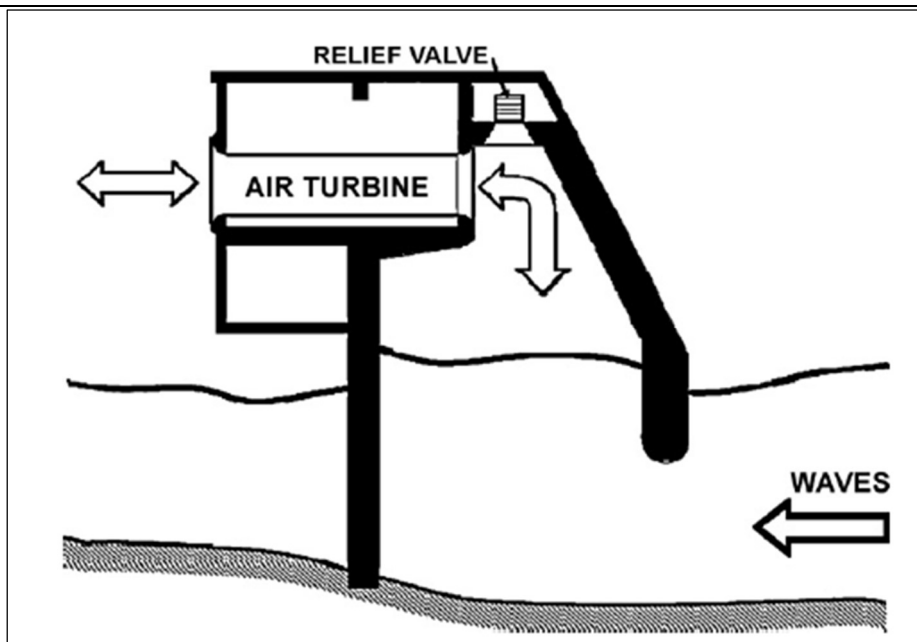
- Pučinski
- Obalni

Prema tipu električnog generatora razlikuju se:

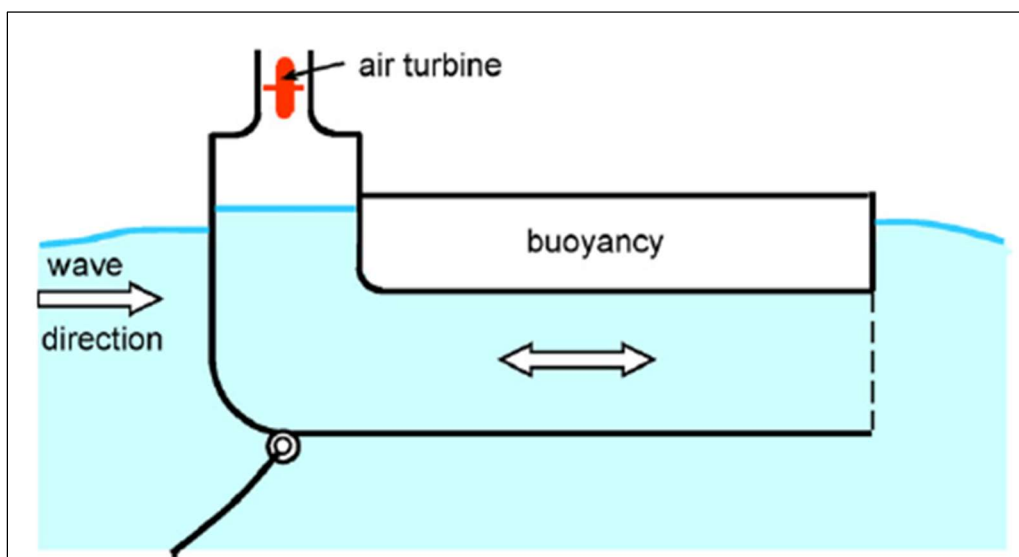
- Rotacioni generator
- Linearni generator.

Komercijalni uspjeh jedino su ostvarili točkasti upijač i oscilirajući vodeni stup. Tehnologije preljevanja valova i prigušivača napuštene su zbog velikih troškova održavanja. Zaključuje se da isključivo obalni pretvornici imaju komercijalnu primjenu zbog prihvatljive cijene izgradnje i troškova održavanja.

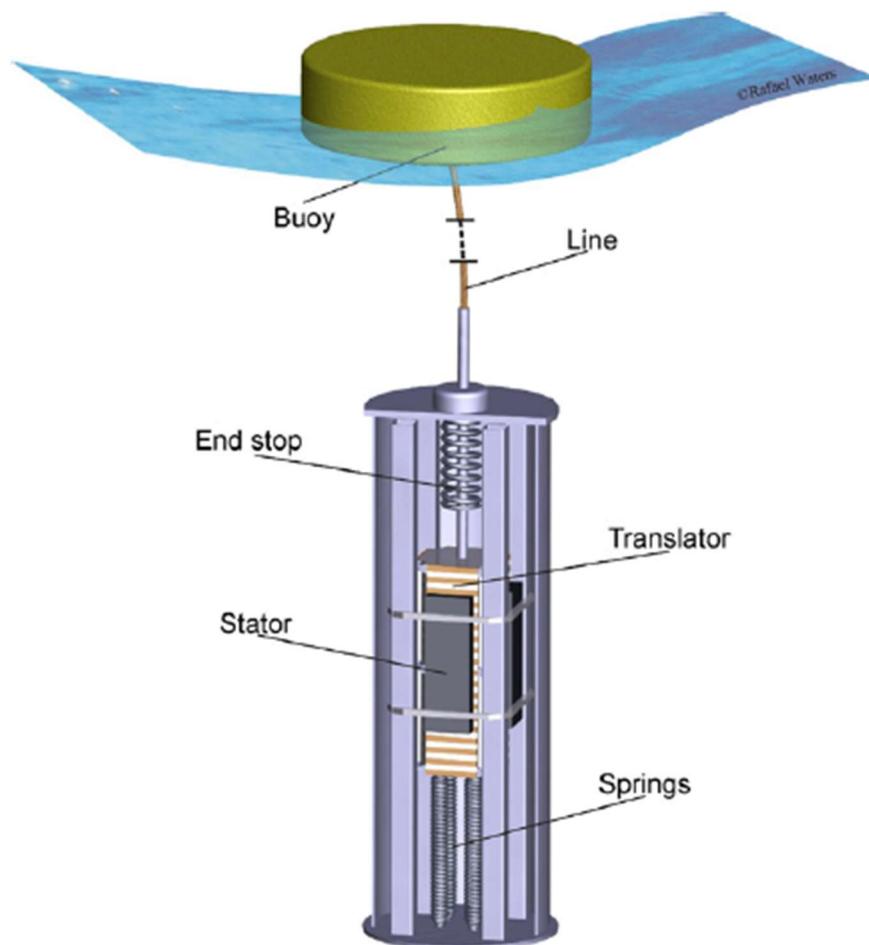
Pučinski pretvarači sidre se na dno otvorenog mora, ali nije im pridružena kategorizacija u skupini plovnih objekata. Istovremeno njihova lokacija stvara izazov pristupačnosti i održavanja objekta. Obalne elektrane su po propisima kategorizirane kao obalne građevine. Lokacije za izgradnju obalnih valoelektrana su lukobrani, industrijska obala i molovi. Obalne valoelektrane mogu serijski imati veći broj pretvarača te zbog pristupačnosti imaju mogućnost modularnog proširenja i lakšeg održavanja. [3]



Slika 1 Shema obalnog oscilirajućeg vodenog stupa [4]



Slika 2 Shema pučinskog oscilirajućeg vodenog stupa [4]



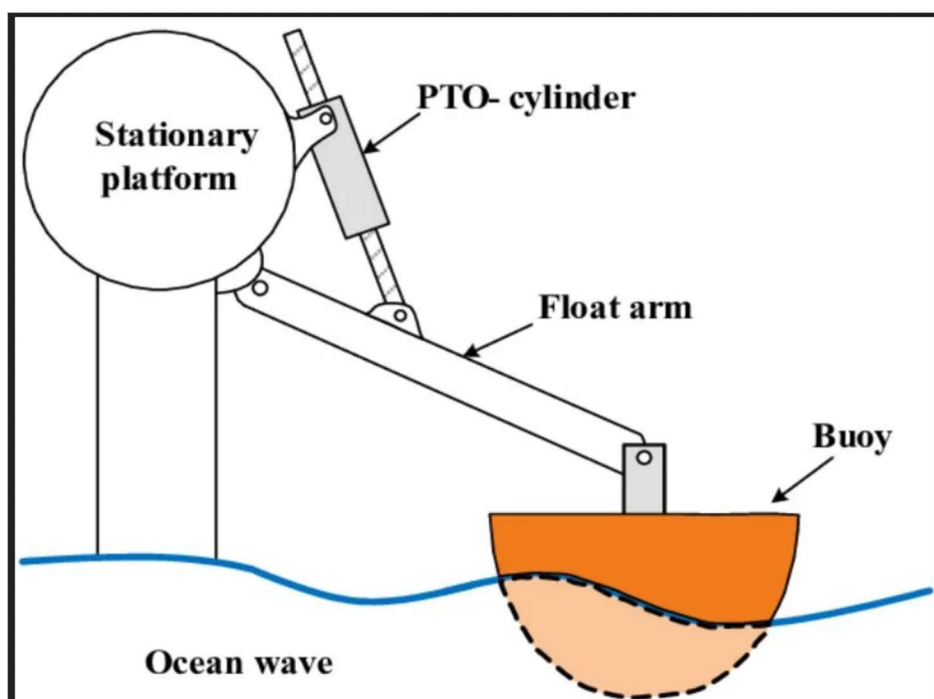
Slika 3 Shema pučinskog točkastog upijača [4]



### 3. PROJEKT VALOELEKTRANE ZA JADRAN

Na globalnoj razini Jadransko more nije vrlo bogato valnom energijom, no hrvatska obala kao jedna od najrazvedenijih obala u Europi i svijetu sadrži potencijal za iskorištavanje valne energije.

Kao početna točka ovog završnog rada postavljen je VANIS pretvornik, kategoriziran kao obalni točkasti upijač, koji uparuje plutaču i linearni generator istosmjernog napona u sustav proizvodnje električne energije. [3]



Slika 4 Shema slična opisanom pretvorniku [5]

### 3.1. Princip rada pretvornika

Pretvornik se sastoji od sljedećih komponenti:

- Plutača
- Prijenosnik snage
- Linearni generator električne energije
- Elektro-ormarić.

Prijenosnik snage sastoji se od spojnog štapa, poluge, dvije koloture i užeta. Štap je učvršćen na plutaču i ležajem na prednji duži krak poluge. Zadnji kraći krak poluge je preko dvije koloture spojen užetom na translator linearnog generatora. Krakovi poluge su razdijeljeni osloncem na kojem se nalazi ležaj. Nailaskom vala, sila uzgona podiže plutaču koja kroz prijenos mehanizma podiže translator. Odlaskom vala gravitacija spušta plutaču i s time spušta translator. Na taj način okomito se kretanje plutače translata u jednoliko i linearno kretanje generatora. Uzimajući u obzir da je jedino plutača u dodiru s morem, dok su svi ostali dijelovi pretvornika na obali, omogućen je jednostavan pristup elektor ormariću radi održavanja.

Pilot pretvornik ima opseg kretanja prednjeg kraka poluge  $\pm 45$  cm za visinu vala najviše 90 cm. Zadnji krak poluge ima opseg kretanja  $\pm 30$  cm, a cjelokupna dužina poluge je 2 metra.

Za izvedbu pretvornika korišteni su sljedeći materijali: aluminijske cijevi, PP, PE i ABS plastika, INOX čelik i drvo.

U odnosu na druge obalne pretvornike ovog tipa koji najčešće imaju hidraulični sustav i rotacioni generator kao prijenosnik snage, VANIS pretvornik koristi jednostavniji princip poluge kao prijenosnik snage.

Tijekom ispitivanja principa rada na morskoj obali (slika), dokazana je izvodljivost i ispravnost inženjerskog koncepta pretvornika i linearnog generatora.

---

## 4. KINEMATIČKI MODEL VALOELEKTRANE

### 4.1. Opis modela

Model se sastoji od: plutače i prijenosnika snage koji povezuje plutaču i linearni generator, slika 6.

Plutača je promjera 2 metra i visine 1 metra. Sastoji se od dva dijela. Gornji dio plutače je šuplji cilindar koji je sa gornje strane zatvoren diskom promjera 2 metra. Donji dio ima oblik polovice šupljeg torusa, visine i radijusa 0,5 metra, koji je s donje strane je zatvoren diskom promjera 1 metar. Debljina svih stijenki plutače je 5 milimetara. [3]

Prijenosnik snage sastoji se od jarbola, poluge, stalka, koloture i metalnog užeta. Jarbol se sastavlja od 4 trokutna nosača, visine je 0,5 metara i učvršćuje se na plutaču. Poluga je duljine od 4 do 5 metara, prednji dio koji je usmjeren prema moru dugačak je od 3 do 4 metra, dok je stražnji dio, koji je preko koloture i užeta spojen na pretvarač, dugačak 1 metar. Stalak se sastoji od dva nosača osovine i same osovine oko koje se poluga rotira.

Mehanizam je napravljen od aluminijske legure.

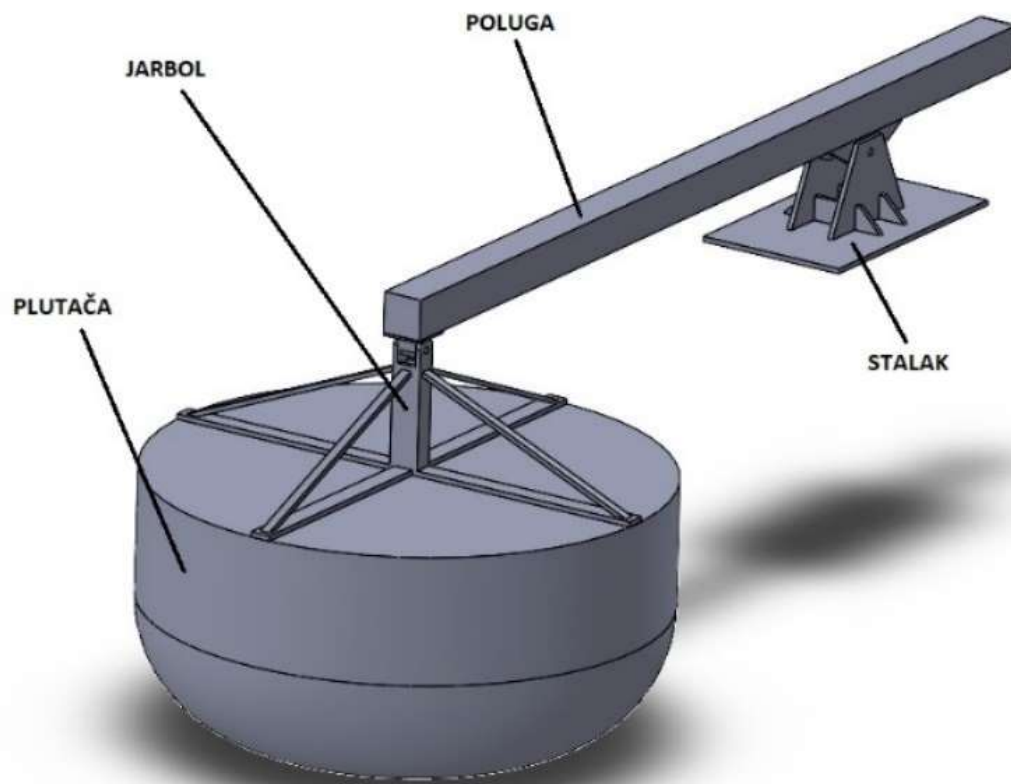
### 4.2. SOLIDWORKS

SOLIDWORKS je CAD (Computer assisted design) programski paket koji omogućuje generiranje trodimenzionalnih modela. Izrada modela obično počinje izradom dvodimenzionalne skice na proizvoljnoj ravnini, u prostoru. Skica se sastoji od geometrijskih značajki kao što su točke, linije, lukovi i splineovi. Nacrtanoj skici određuju se dimenzije kako bi se definirala veličina i položaj geometrije unutar ravnine. Geometrijskim značajkama se mogu odrediti međusobni odnosi kao što su jednakost, paralelnost, okomitost i koncentričnost. Dimenzije u skici mogu se kontrolirati nezavisno ili odnosima između geometrijskih značajki unutar ili izvan skice.

Kada je skica u potpunosti definirana moguće razvući ili rotirati u prostoru kao bi se tragom njenog kretanja generirao trodimenzionalni objekt.

Objekti se mogu pohraniti kao dijelovi (Part) koji se mogu spajati s drugim dijelovima u mehanizme (Assembly). Slično kako se u skicama mogu pridodati odnosi geometrijskim značajkama, tako se mogu dijelovima pridodavati odnosi unutar mehanizma.

### 4.3. Prikaz modela



Slika 5 3D prikaz stvorenog modela u sučelju SOLIDWORKS-u

## 5. SILE VALA NA PLUTAČU

### 5.1. Ulazni podaci

Da bi se mogla ispitati naprezanja u modelu pretvarača, potrebno je odrediti opterećenja koja djeluju na plutaču. Budući da opterećenje stvaraju valovi, sila kojom more utječe na plutaču može se razdvojiti na vertikalnu i horizontalnu komponentu. Izračun sila u ovome radu proveden je prema ulaznim podacima valova Jadranskoga mora koji su zadani u VANIS projektu.

**Tablica 1 Zadani ulazni podaci VANIS projekta**

Oznaka	Značajka	Vrijednost
$\rho$	Gustoća, kg/m <sup>3</sup>	1025,87
$g$	Ubrzanje gravitacije, m/s <sup>2</sup>	9,80665
$H$	Visina plutače, m	1
$D$	Promjer plutače, m	2
$h$	Visina vala, m	2
$T$	Period vala, s	5
$Cd$	Koeficijent sila otpora, /	1
$Ci$	Koeficijent sila inercije, /	2

### 5.2. Vertikalna komponenta

Vertikalna komponenta računa se sljedećom izrazom [5]:

$$F_{\text{vertikalna}} = \rho * g * V = 26338 \text{ N} \quad (5.1)$$

Gdje je:

$V$  – volumen plovka, m<sup>3</sup>

koji se računa sljedećim izrazom:

$$V = H * \frac{D^2 * \pi}{4} = 2.618 \text{ m}^3 \quad (5.2)$$

### 5.3. Horizontalna komponenta

Horizontalna komponenta računa se sljedećim izrazom [5]:

$$F_{\text{horizontalna}} = \frac{1}{2} * \rho * C_d * D * H * |v_x| * v_x + C_i * \Delta * a_x = 8222 \text{ N} \quad (5.3)$$

Gdje je:

$v_x$  – brzina čestica vala, m/s

$a_x$  – ubrzanje čestice vala, m/s<sup>2</sup>

$\Delta$  – masa istisnine plutače, kg

Masa istisnine plutače, brzina i ubrzanje čestica vala određuju se sljedećim izrazima:

$$\Delta = \rho * V = 2686 \text{ kg} \quad (5.4)$$

$$v_x = \zeta_a * \omega * e^{kz} * \cos(kx - \omega t) \quad (5.5)$$

$$a_x = \zeta_a * \omega^2 * e^{kz} * \sin(kx - \omega t) \quad (5.6)$$

Gdje je :

$\omega$  – kutna frekvencija vala, s<sup>-1</sup>

$\zeta_a$  – amplituda vala, m

$$\omega = \frac{2 * \pi}{T} = 1.2566 \text{ rad/s} \quad (5.7)$$

$$\zeta_a = \frac{h}{2} = 1 \text{ m} \quad (5.8)$$

Uzimajući u obzir,  $x = 0$ ;  $z = 0$ , formule za brzinu (5.5) i ubrzanje (5.6) postaju:

$$v_x = \zeta_a * \omega * \cos(-\omega t) \quad (5.9)$$

$$a_x = \zeta_a * \omega^2 * \sin(-\omega t) \quad (5.10)$$

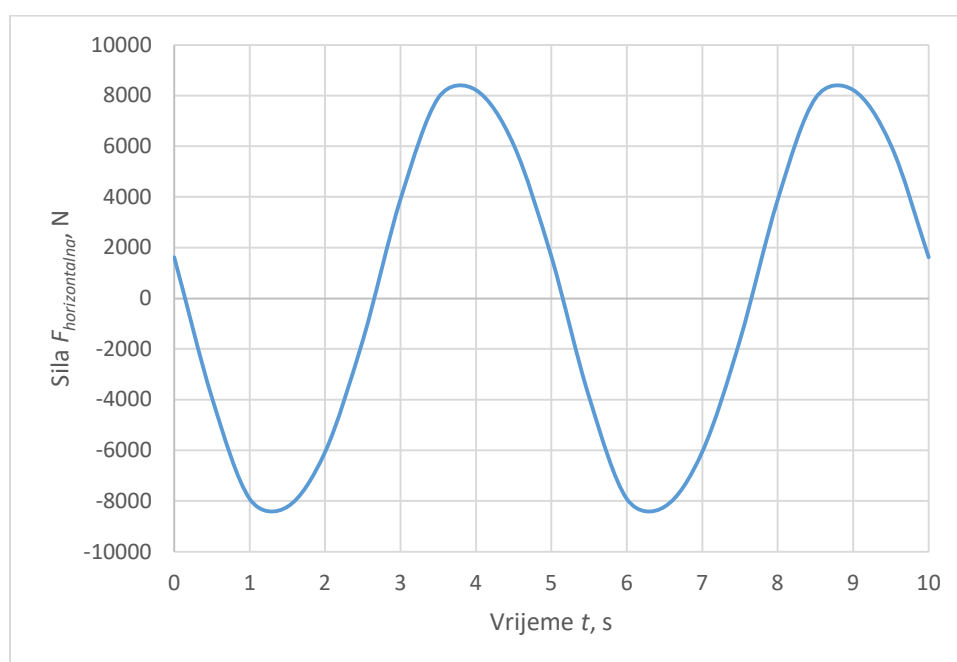
Za pronalaženje maksimalne horizontalne sile proveden je proračun u trajanju 2 puna perioda sa korakom  $t$  jednakom jednoj desetini perioda:

$$t = \frac{T}{10} = 0,5 \text{ s} \quad (5.11)$$

Vrijednosti sile brzine, ubrzanja i sile po vremenu su dane u sljedećoj tablici:

Tablica 2 Proračun brzine, ubrzanja i horizontalne sile vala

$t, s$	$v_x, m/s$	$a_x, m/s^2$	$F_{horizontalna}, N$
0	1.26	0.00	1620
0.5	1.02	-0.93	-3925
1	0.39	-1.50	-7912
1.5	-0.39	-1.50	-8222
2	-1.02	-0.93	-6046
2.5	-1.26	0.00	-1620
3	-1.02	0.93	3925
3.5	-0.39	1.50	7912
4	0.39	1.50	8222
4.5	1.02	0.93	6046
5	1.26	0.00	1620
5.5	1.02	-0.93	-3925
6	0.39	-1.50	-7912
6.5	-0.39	-1.50	-8222
7	-1.02	-0.93	-6046
7.5	-1.26	0.00	-1620
8	-1.02	0.93	3925
8.5	-0.39	1.50	7912
9	0.39	1.50	8222
9.5	1.02	0.93	6046
10	1.26	0.00	1620



Dijagram 1 Prikaz horizontalne sile po vremenu

---

## 6. NUMERIČKI MODEL VALOELEKTRANE

### 6.1. Metoda konačnih elemenata

Metoda konačnih elemenata (MKE) je numerička metoda koja opisuje ponašanje fizičkih sustava rješavanjem parcijalnih diferencijalnih jednačbi. Koristi se za modeliranje i analizu deformacija, napreznja struktura. Metoda koristi pristup diskretizacije ili podjele kompliciranih modela na manje i jednostavnije elemente povezane čvorovima. Ponašanje svakog zasebnog elementa se aproksimira matematičkim jednačbama te se povećanjem broja elemenata povećava preciznost aproksimacije. Prednosti metode konačnih elemenata su, naspram tradicionalnih numeričkih metoda, modeliranje složenih oblika, svojstava materijala i opterećenja te pruža precizne rezultate za probleme s kompleksnom geometrijom. [7]

### 6.2. Femap/NX NASTRAN

Femap/NX NASTRAN (Finite Element Modeling And Postprocessing) je inženjerski programski paket korišten za izradu modela konačnih elemenata te analizu modela metodom konačnih elemenata. Omogućuju preciznu i učinkovitu simulaciju i analizu napreznja i deformacije u različitim materijalima i konstrukcijama. Femap/NX nastran pruža pristupačno korisničko sučelje za stvaranje modeli i vizualizaciju rezultata te također pruža integraciju za SOLIDWORKS programski paket, gdje omogućava unošenje stvorene geometrije direktno u svoje sučelje.

### 6.3. Priprema modela

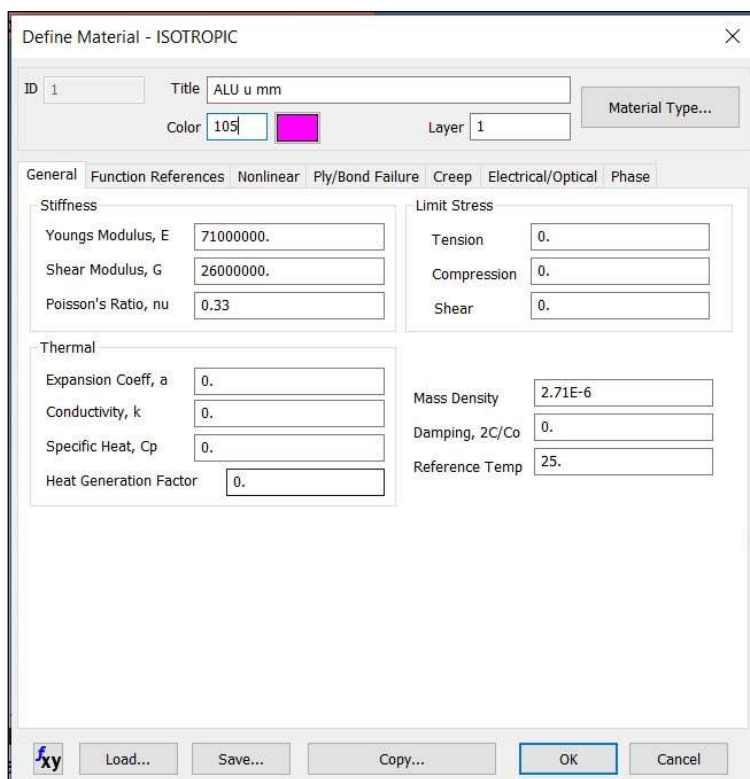
Za lakše određivanje profila poluge, prije nego što se stvori 3D model, prvo će se na jednodimenzionalnom modelu, sačinjenog od BEAM elementa, ispitati više profila.



### 6.3.1. Definiranje svojstva materijala i grednih konačnih elemenata

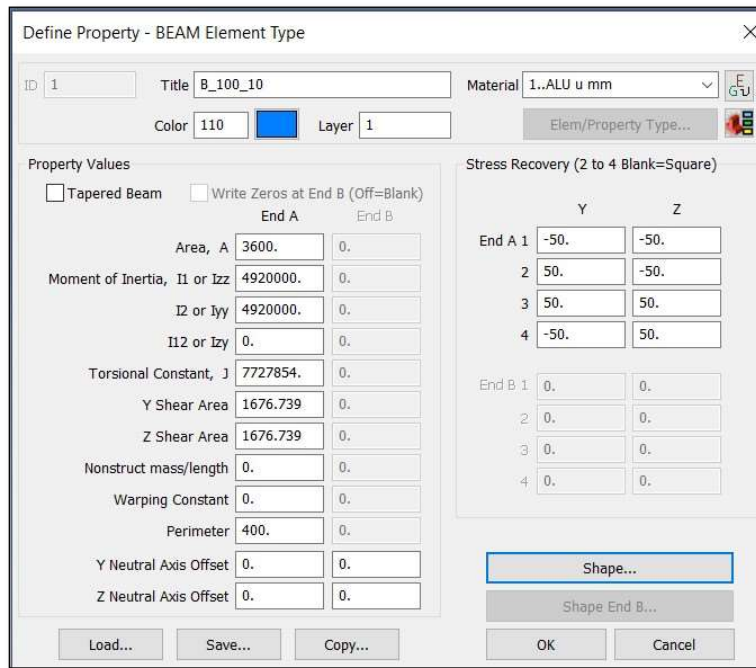
Prije postavljanja mreže elemenata potrebno je odrediti svojstva materijala i samih elemenata.

Materijal se određuje naredbom, *Model – Material*.

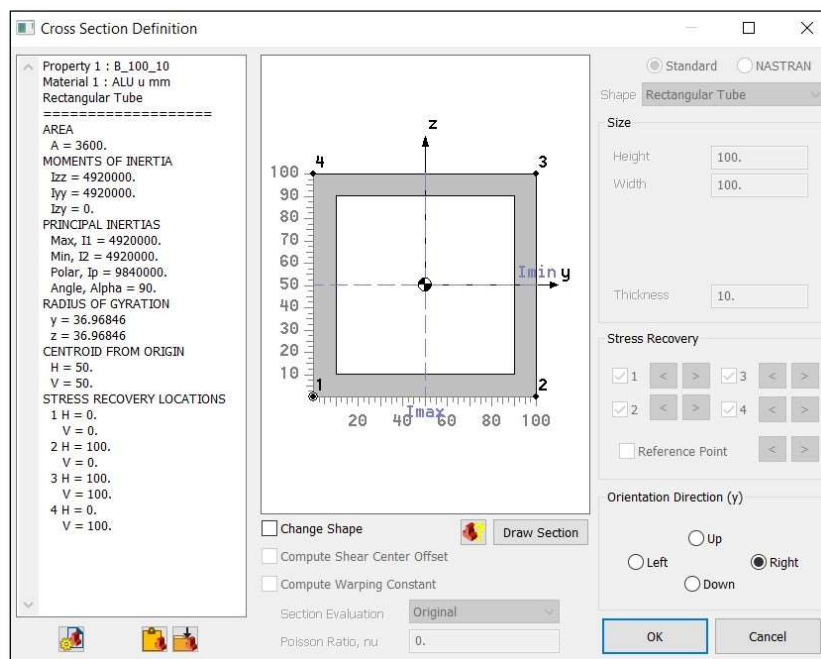


**Slika 6 Svojstva materijala Aluminija u Femap/NX NASTRAN**

Dok se BEAM svojstvo, kojim se definira poprečni presjek grede, određuje naredbom Model – Property. Početan presjek poluge će biti kvadratna cijev dimezija 100x100x10mm.



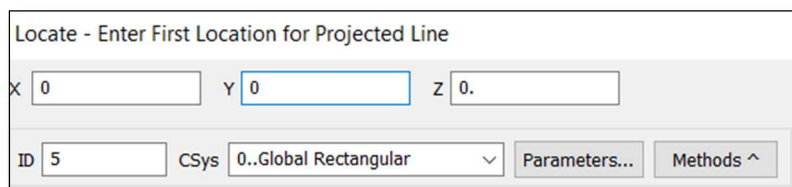
Slika 7 Svojstvo BEAM elementa u Femap/NX NASTRAN



Slika 8 Prikaz poprečnog presjeka poluge u Femap/NX NASTRAN

### 6.3.2. Mreža

Proces kreiranja mreže konačnih elemenata kreće od stvaranja linije koja se koristi kao referentna geometrija pojednostavljenog modela. Naredbom, *Geometry – Curve – Line – Project Points*, generira se ravna linija između dvije točke, čije se koordinate ručno upisuju.

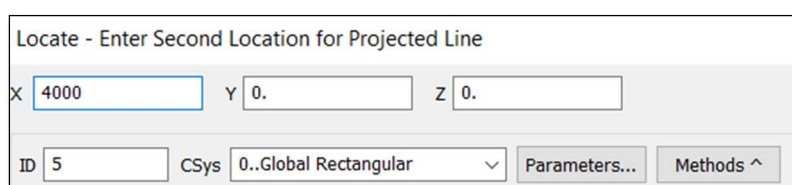


Locate - Enter First Location for Projected Line

X 0 Y 0 Z 0.

ID 5 CSys 0..Global Rectangular Parameters... Methods ^

Slika 9 Upisanih koordinata za prvu točku u Femap/NX NASTRAN



Locate - Enter Second Location for Projected Line

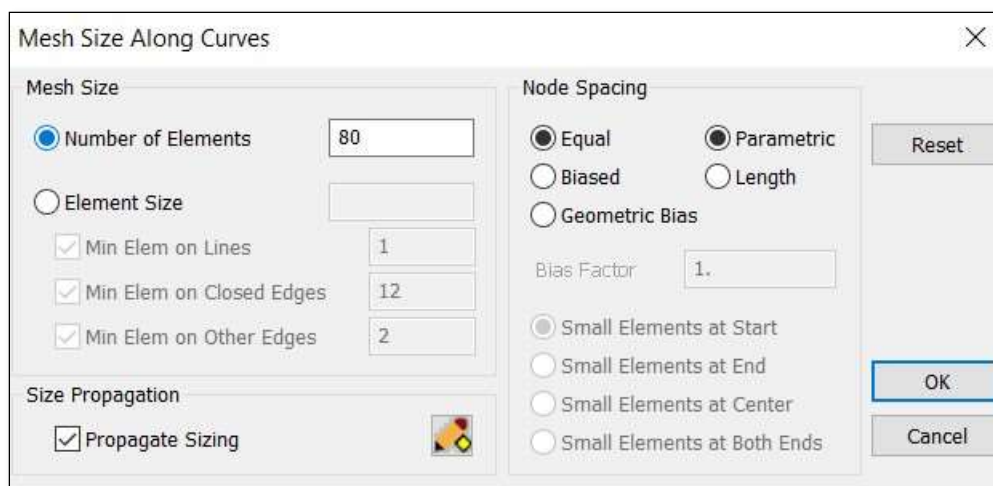
X 4000 Y 0. Z 0.

ID 5 CSys 0..Global Rectangular Parameters... Methods ^

Slika 10 Upisane koordinate za drugu točku u Femap/NX NASTRAN

Generirana linija dugačka je 4000 milimetara i kreće se u smjeru osi „x“.

Generiranje mreže se sastoji od izvođenja dvaju naredbe. Prvom naredbom, *Mesh – Mesh Control – Size along Curve*, proizvoljno se određuje broj ili veličina elemenata koji će se drugom naredbom generirati na liniji.



Mesh Size Along Curves

Mesh Size

Number of Elements 80

Element Size

Min Elem on Lines 1

Min Elem on Closed Edges 12

Min Elem on Other Edges 2

Size Propagation

Propagate Sizing

Node Spacing

Equal  Parametric

Biased  Length

Geometric Bias

Bias Factor 1.

Small Elements at Start

Small Elements at End

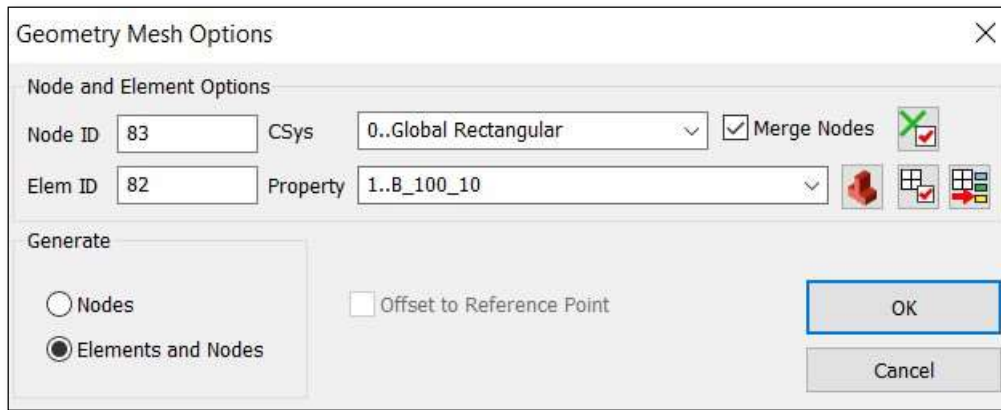
Small Elements at Center

Small Elements at Both Ends

Reset OK Cancel

Slika 11 Određivanje veličine elemenata na krivulji u Femap/NX NASTRAN

Druga naredba, *Mesh – Geometry – Curve*, služi za stvaranje elemenata.

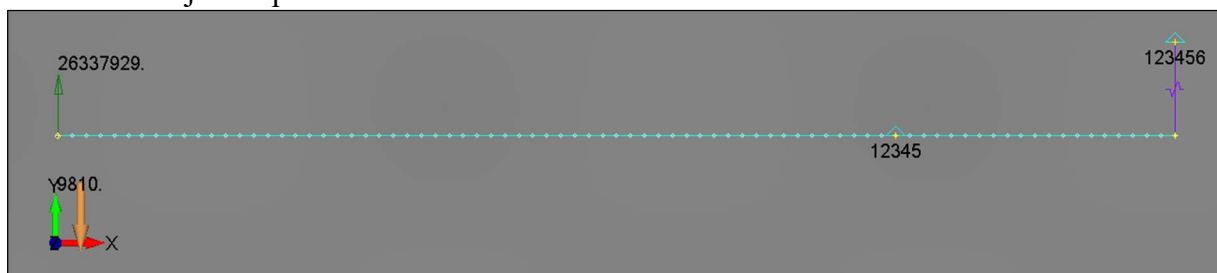


**Slika 12 Prozor za generiranje mreže konačnih elemenata u Femap/NX NASTRAN**

U prozoru je potrebno pod stavkom *Property* odabrati željeno svojstvo BEAM elementa. Stvaranjem BEAM elementa generirano je jednodimenzionalno tijelo. Sljedeći korak je postavljanje rubnih uvjeta i sila na mrežu elemenata.

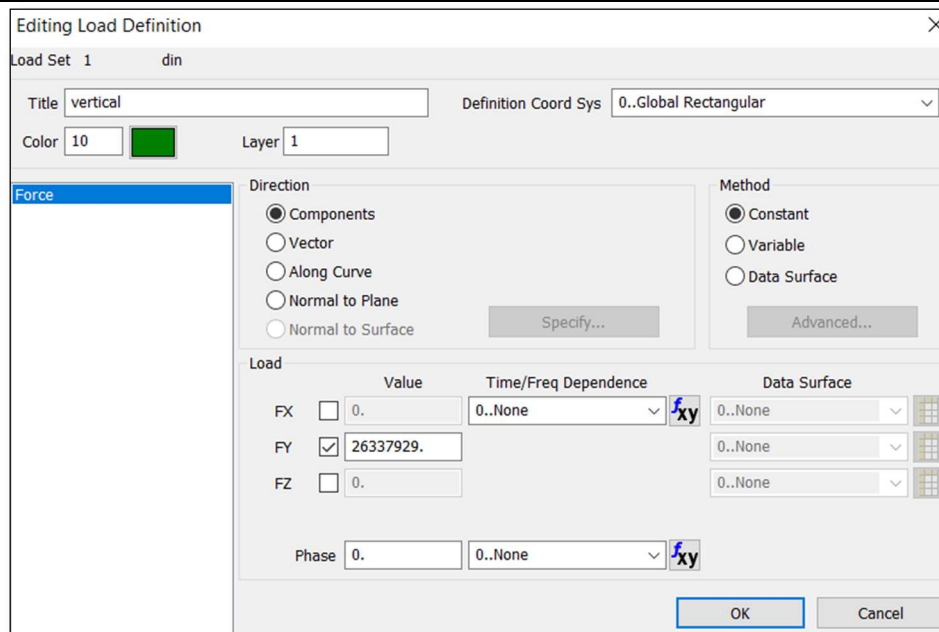
### 6.3.3. Sile i rubni uvjeti

Sile i rubni uvjeti su prikazani su na slici:

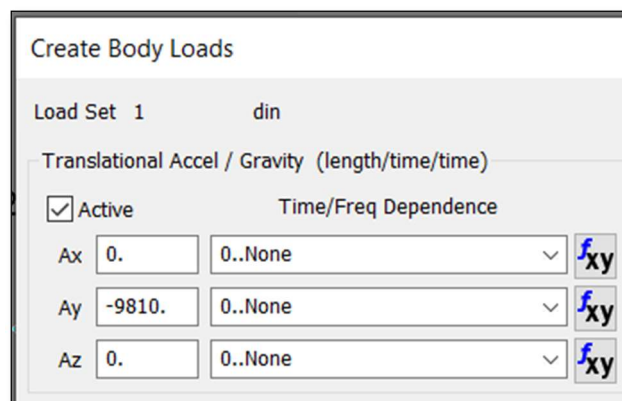


**Slika 13 Bočni prikaz postavljenog modela u Femap/NX NASTRAN**

Vertikalna sila, izračunata u jednadžbi (5.1), postavljena je, naredbom *Model – Load – Nodal*, na čvor lijevog kraja modela, a naredbom, *Model – Load – Body*, postavljen je utjecaj sile teže na cijeli model.



Slika 14 Određivanje vertikalne sile u Femap/NX NASTRAN



Slika 15 Upisivanje globalnog utjecaja sile teže u Femap/NX NASTRAN

Na kraju suprotnom od djelovanja sile je, usmjerena po „y“ osi, postavljena opruga korištenjem *DOF SPRING* svojstva. Krutost opruge se određuje izrazom:

$$k = \frac{F}{L} \quad (6.1)$$

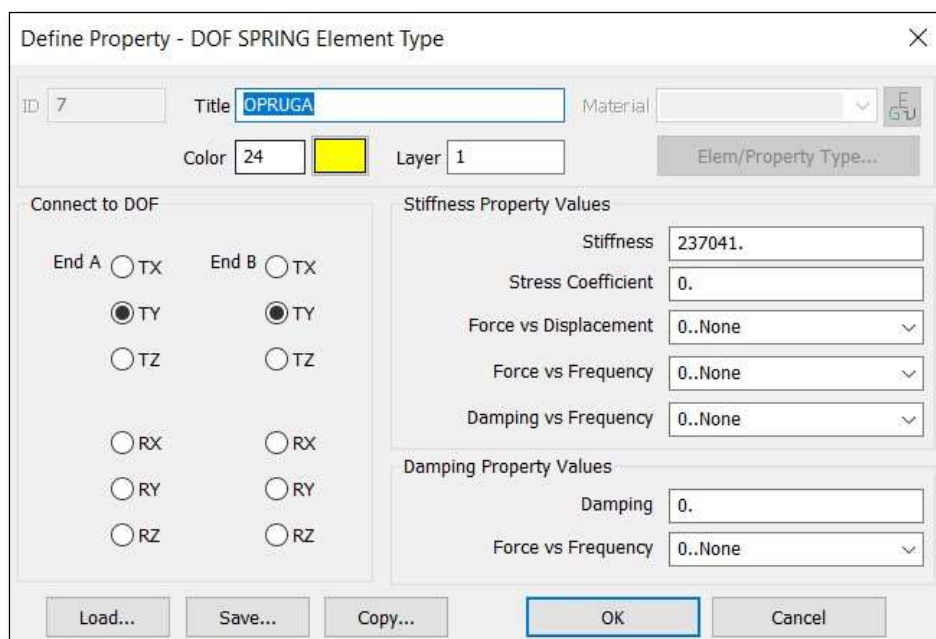
Gdje je:

$F$  – sila na oprugu, mN

$k$  – faktor krutosti opruge, mN/mm

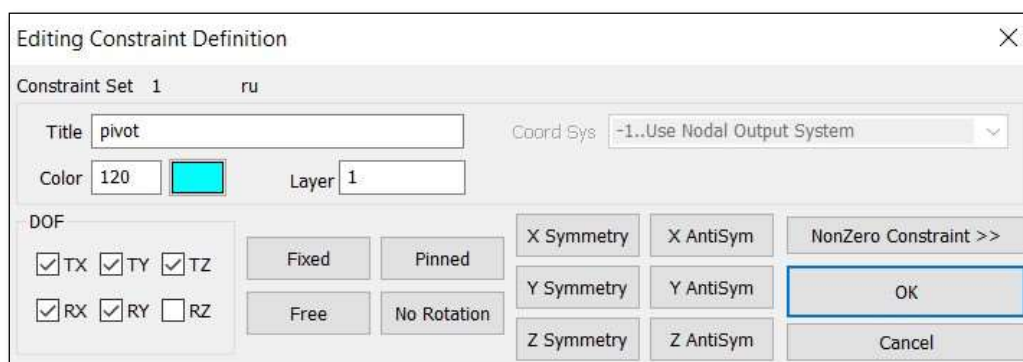
$L$  – duljina dozvoljenog pomaka generatora, mm

Sukladno pravilu jednakosti momenata, omjer duljina poluga recipročan je omjeru veličina sila koje djeluju na njih. Ako je krak poluge na koji je spojena plutača duljine 3000 milimetara, a sila na plutači iznosi 26337929 mN, tada sila koja djeluje na oprugu, čiji je krak duljine 1000 milimetara, mora biti trostruko veća, što znači da iznosi 79013787 mN. Prema formuli (6.1) krutost opruge iznosi 237041 mN/mm. Slika 16



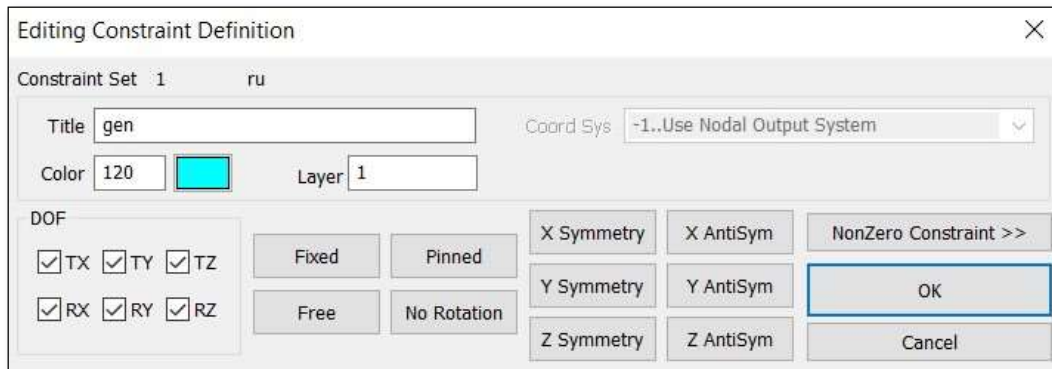
**Slika 16 Postavljanje svojstva DOF-SPRING elementa u Femap/NX NASTRAN**

Za postavljanje rubnih uvjeta na čvorove koristi se naredba *Model – Constraint – Nodal*. Na čvor udaljen 3000 milimetara od mjesta djelovanja vertikalne sile postavljen je rubni uvjet opisan, slika 17:



**Slika 17 Određivanje rubnog uvjeta zgloba u Femap/NX NASTRAN**

Dok je dio poluge na koji je spojena opruga ograničen rubnim uvjetom, slika 18.



**Slika 18** Određivanje rubnog uvjeta učvršćenja opruge u Femap/NX NASTRAN

## 6.4. Analiza 3D modela

### 6.4.1. Mjerne jedinice

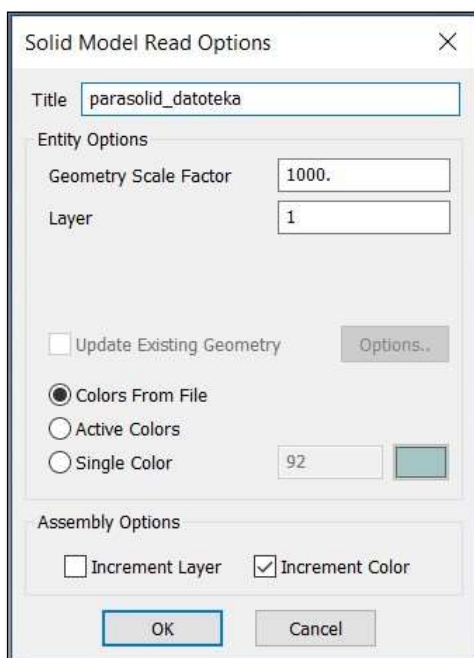
U analizi 3D modela mjera duljina biti će, umjesto u metrima, definirana u milimetrima. Tako da će sve veličine koje ovise o duljini biti prikazane na sljedeći način, tablica 3

Tablica 3 Promjena mjernih jedinica

Značajka, Oznaka	U metrima	U milimetrima
Gravitacija, $g$	9,81	9810
Sila, $F$	N	mN
Naprezanje, $\sigma$	Pa	$10^3$ Pa
Gustoća, $\rho$	$\text{kg/m}^3$	$\text{kg/mm}^3$
Modul elastičnosti, $E$	GPa	$10^{-3}$ GPa

### 6.4.2. Ubacivanje Parasolid datoteke modela u Femap

Naredbom, *File – Import – Geometry*, datoteka, pohranjena u *Parasolid* formatu, se unosi direktno u sučelje Femap-a. Prilikom unosa javlja se prozor koji zahtjeva unos imena datoteke i mjerilo modela. U Solidworksu je model dimenzioniran u milimetrima, pa se unose sljedeći podatci, slika 19.



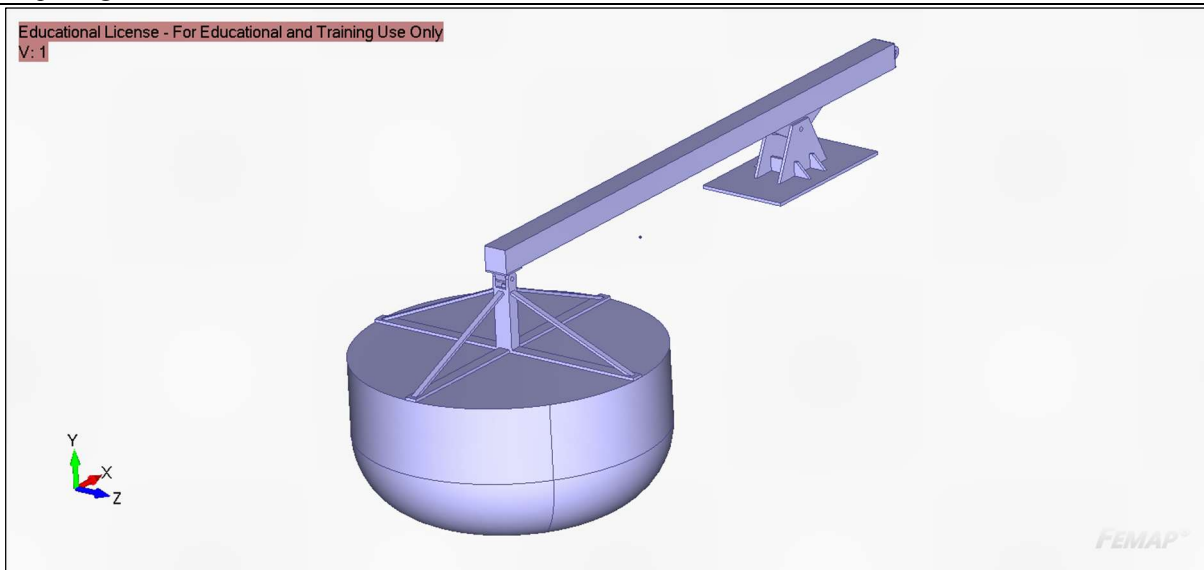
Slika 19 Određivanje mjerila u Femap/NX NASTRAN

Odabirom opcije „OK“ model se prikazuje u sučelju Femapa, slika 20:



Educational License - For Educational and Training Use Only

V. 1



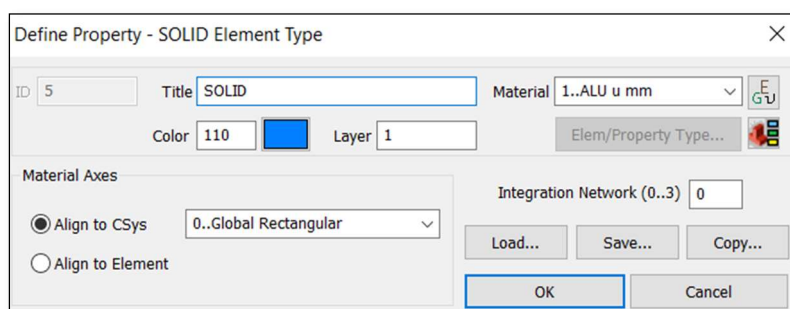
**Slika 20 Prikaz unesenog CAD modela u sučelju Femap/NX NASTRAN**

### 6.4.3. Generiranje mreža konačnih elemenata

Prije nego što je moguće generirati mrežu konačnih elemenata potrebno je odrediti materijal i svojstva konačnih elemenata. Materijal je isti kao u poglavlju 6.3.1. (slika 7), dok će se, zbog trodimenzionalnosti modela, za konačne elemente koristiti drugačija svojstva.

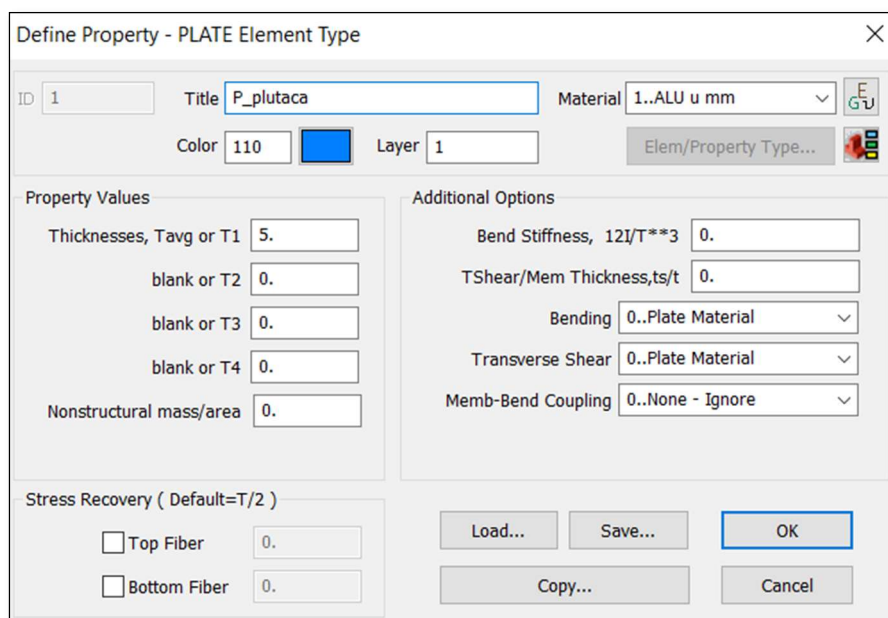
Mreža konačnih elemenata će biti sastavljena od *PLATE* elemenata (plutača i poluga) i *SOLID* elemenata (jarbol, držači osovina, stalak).

Svojstvo *SOLID* elemenata jednako je za sve dijelove načinjene od njih tako da se određuje na kao što je prikazano, slika 21:

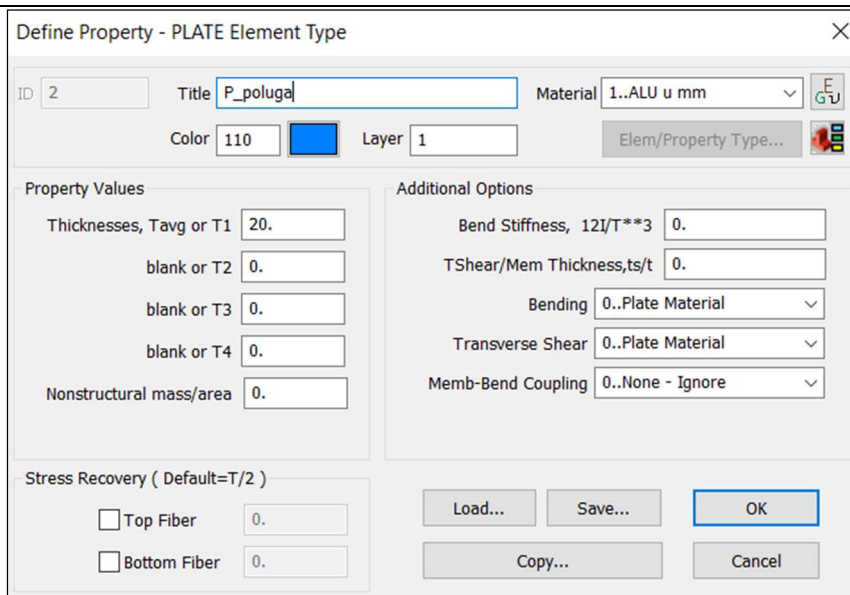


Slika 21 Svojstvo SOLID u Femap/NX NASTRAN

Debljine stijenki plutače i poluge su različite, te je potrebno stvoriti dva različita *PLATE* svojstva. Debljina *PLATE* elemenata plutače iznosi 5 mm (slika 22), a debljina *PLATE* elemenata poluge iznosi 20 mm (slika 23).

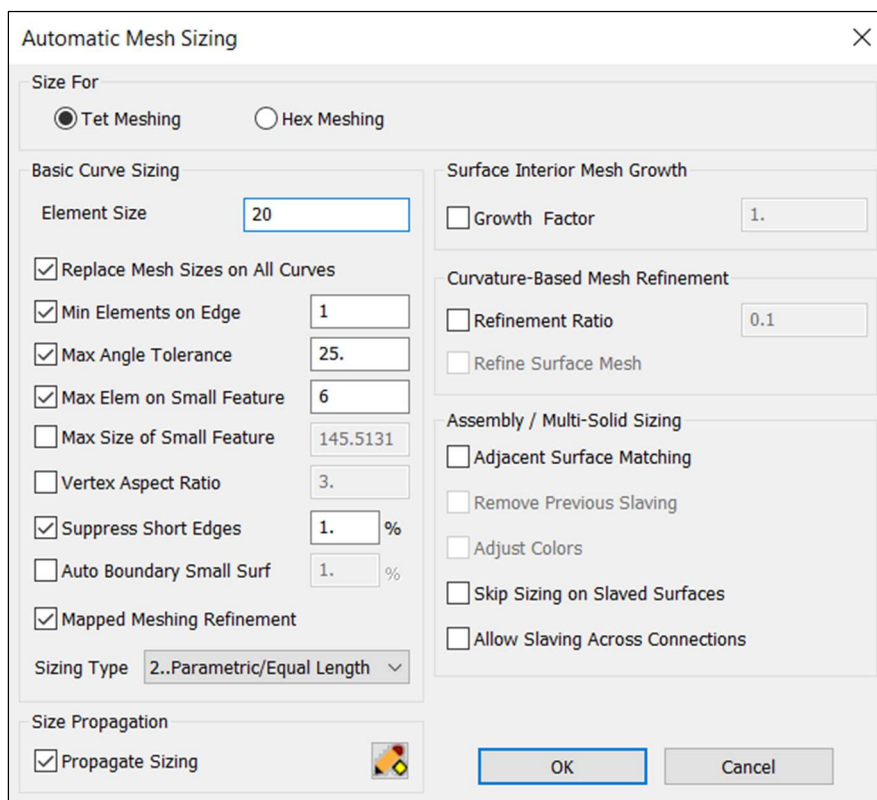


Slika 22 PLATE svojstvo plutače u Femap/NX NASTRAN



**Slika 23 PLATE svojstvo poluge u Femap/NX NASTRAN**

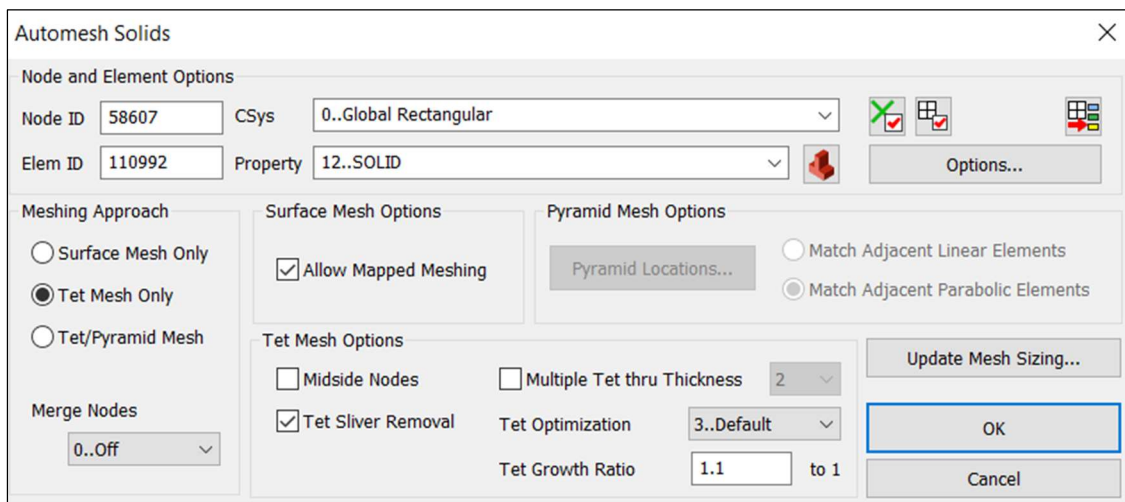
Sa postavljenim materijalom i svojstvima elemenata moguće je započeti generiranje mreže konačnih elemenata. Naredbom, *Mesh – Mesh Control – Size on Solid*, određuje se veličina konačnih elemenata, slika 24.



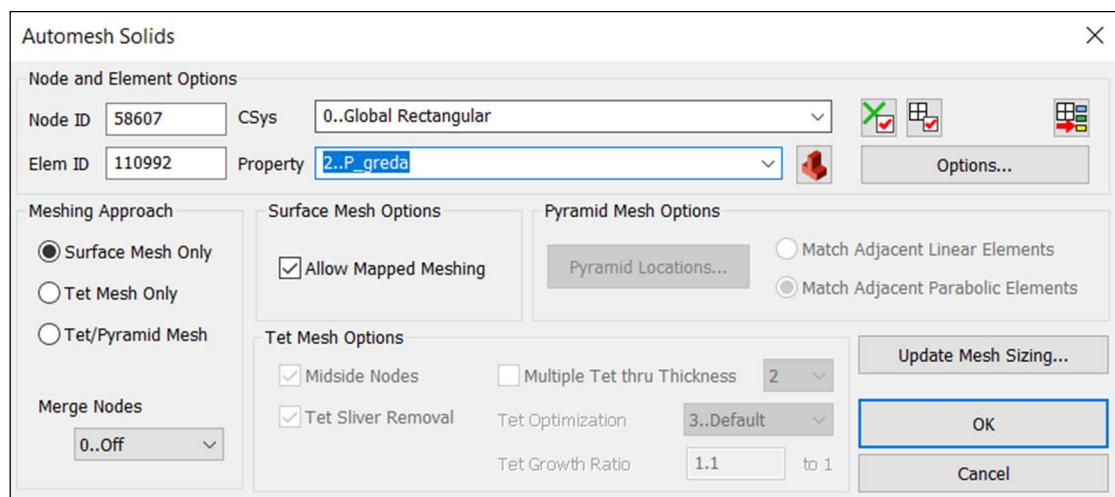
**Slika 24 Određivanje veličine mreže konačnih elemenata u Femap/NX NASTRAN**

Naredbom, *Mesh – Geometry – Solids*, generiraju se konačni elementi ovisno o odabranom svojstvu. Model će biti opisan tetraedarskim konačnim elementima (*Tet Mesh*), a svojstva se

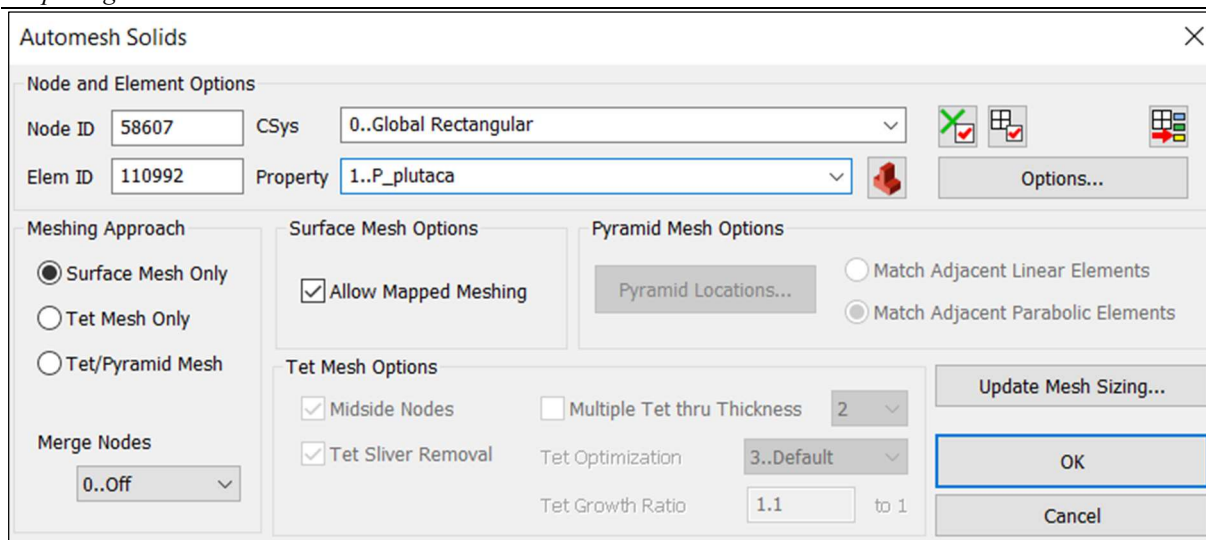
određuju ovisno o dijelu modela za koji generiramo konačne elemente. Za svaki pojedini dio modela generirana je jedinstvena mreža elemenata. Za jarbol i stalak korišteni su SOLID elementi (slika 25), a za polugu (slika 26) i plutaču (slika 27) korišteni su PLATE elementi.



Slika 25 Prikaz stvaranja mreže na SOLID elementima u Femap/NX NASTRAN



Slika 26 Prikaz stvaranja mreže PLATE elemenata poluge u Femap/NX NASTRAN



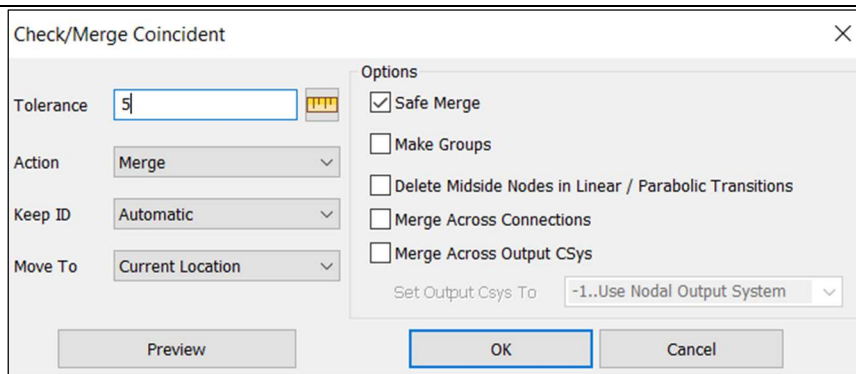
**Slika 27 Prikaz stvaranje mreže PLATE elemenata plutace u Femap/NX NASTRAN**



**Slika 28 Prikaz generirane mreže konačnih elemenata na modelu u Femap/NX NASTRAN**

Iako na slici mreža izgleda cjelovita, zbog različitih svojstava konačnih elemenata, čvorovi na mjestima gdje se preklapaju dijelovi modela iako dijele iste lokacije nisu povezani, pa je za pravilno umrežavanje svih čvorova potrebno upotrijebiti naredbu: *Check – Coincident Nodes*, slika 29.

Odabirom prikazanih opcija se čvorovi koji dijele lokaciju sa drugim čvorovima umrežavaju te se s time generira kvalitetna mreža.

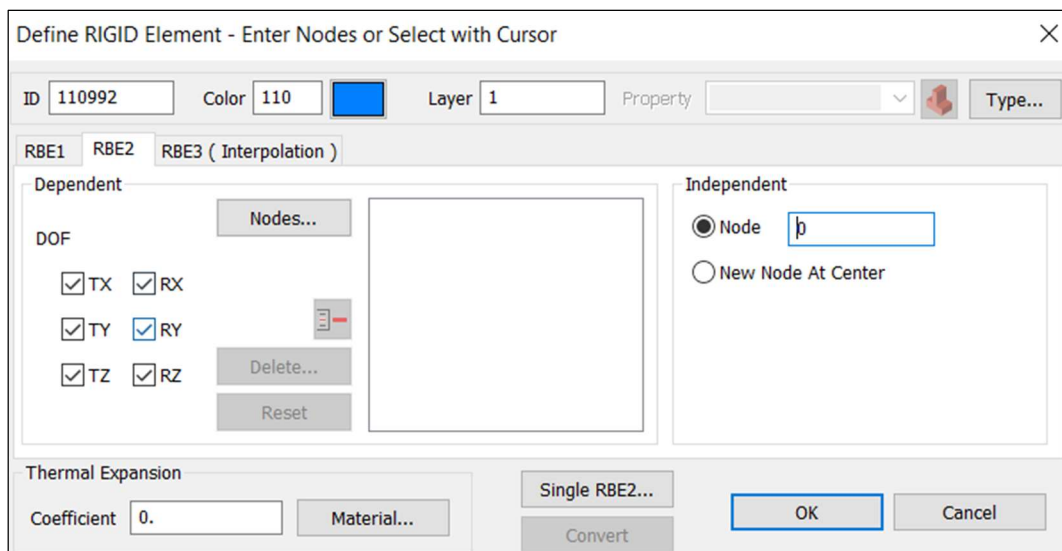


Slika 29 Prikaz spajanja čvorova mreže u Femap/NX NASTRAN

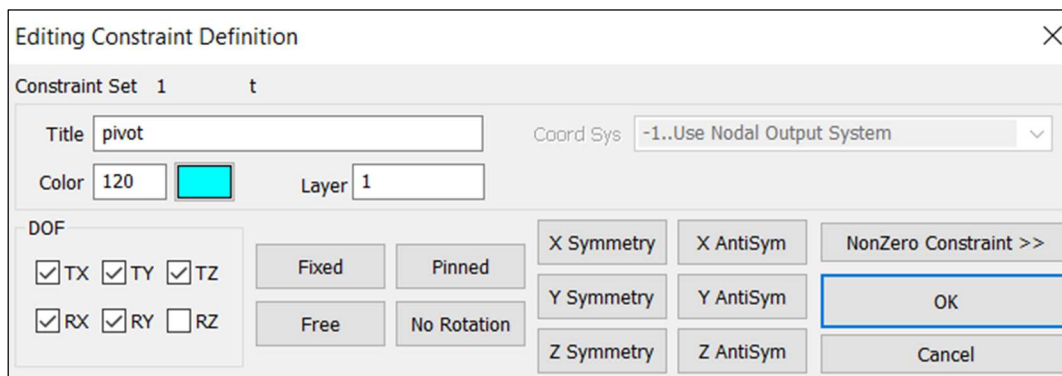
#### 6.4.4. Rubni uvjeti

Kao što je vidljivo na slici 28, stalak, njegova osovina i zglob na strani generatora nisu uključeni u mrežu konačnih elemenata. Izostavljeni su kako bi se na njih mogli kreirati takozvani *RIGID* elementi (*RBE*), slika 30. Korištenjem *RIGID* elemenata stvoriti će se čvorovi na koje će se postaviti rubni uvjeti, slika 31.

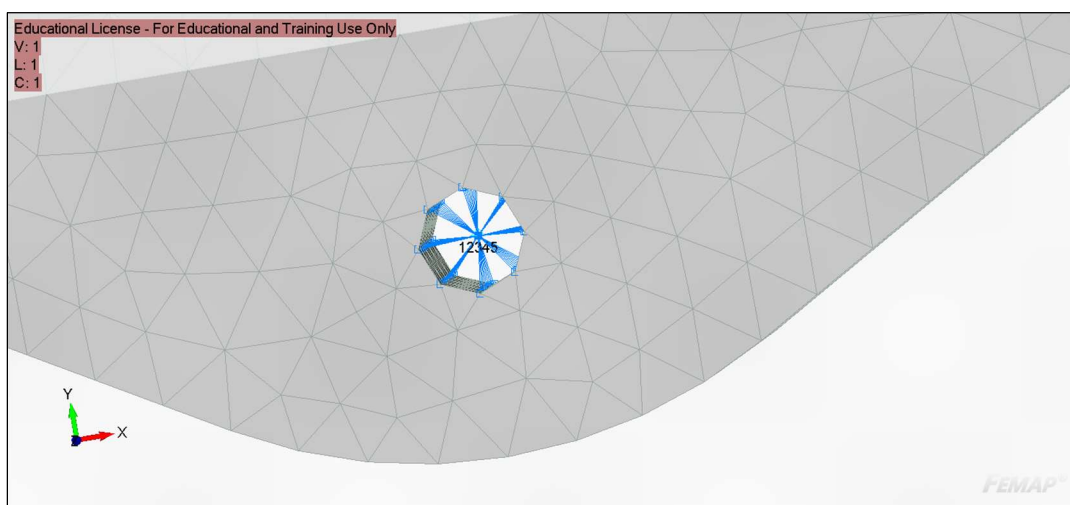
Kreiranjem *RIGID* elemenata, naredbom *Model – Element*, na lokaciji osovine stalka stvoren je čvor na koji je postavljen rubni uvjet koji omogućava rotaciju samo oko „z“ osi.



Slika 30 Prikaz stvaranja RIGID elementa u Femap/NX NASTRAN



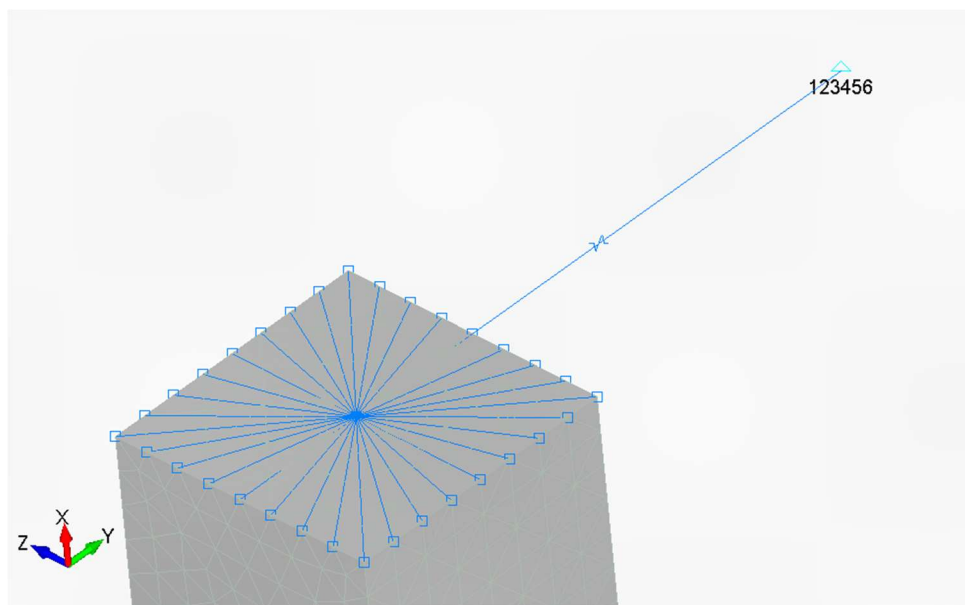
Slika 31 Prikaz stvaranja rubnog uvjeta za zglob u Femap/NX NASTRAN



Slika 32 Prikaz stvorenog RIGID elementa i rubnog uvjeta u Femap/NX NASTRAN



Ponavljanjem naredbe, *Model – Element*, kreiran je još jedan RIGID element na kraju poluge koji je spojen sa linearnim generatorom. Kreira se ista opruga kao i u poglavlju 6.3.3., koja se spaja na čvor RIGID elementa te se drugi kraj na suprotni kraj opruge postavlja rubni uvjet koji onemogućuje sve translacijske i rotacione pomake, slika 33.

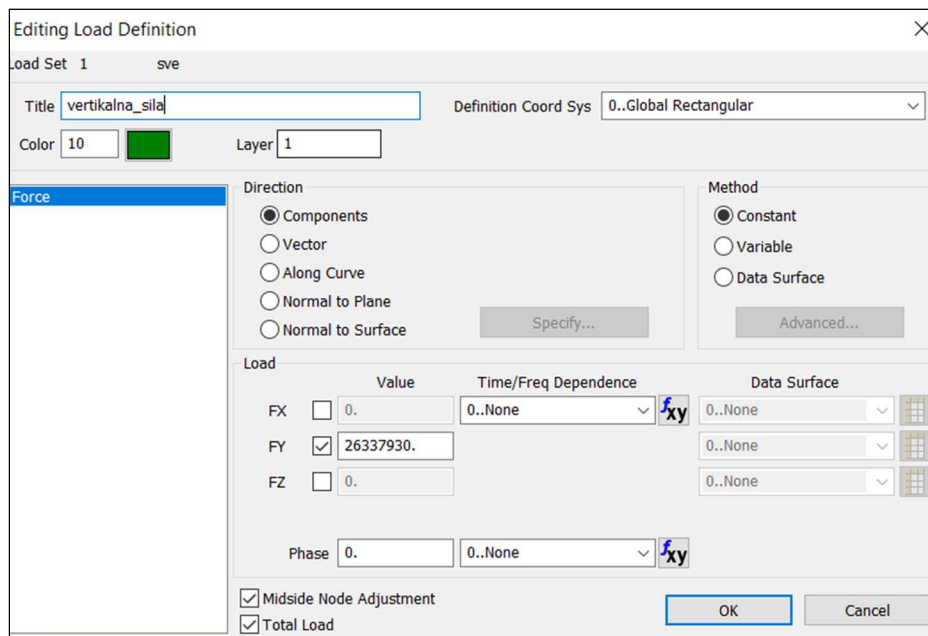


**Slika 33 Prikaz opruge, RIGID elementa i rubnog uvjeta u Femap/NX NASTRAN**

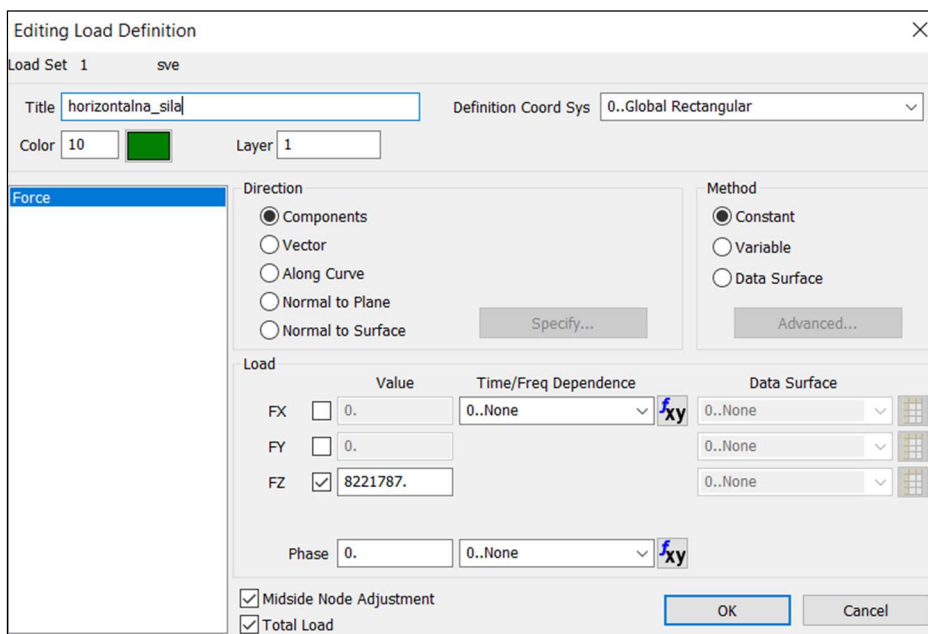


### 6.4.5. Opterećenja na plutači

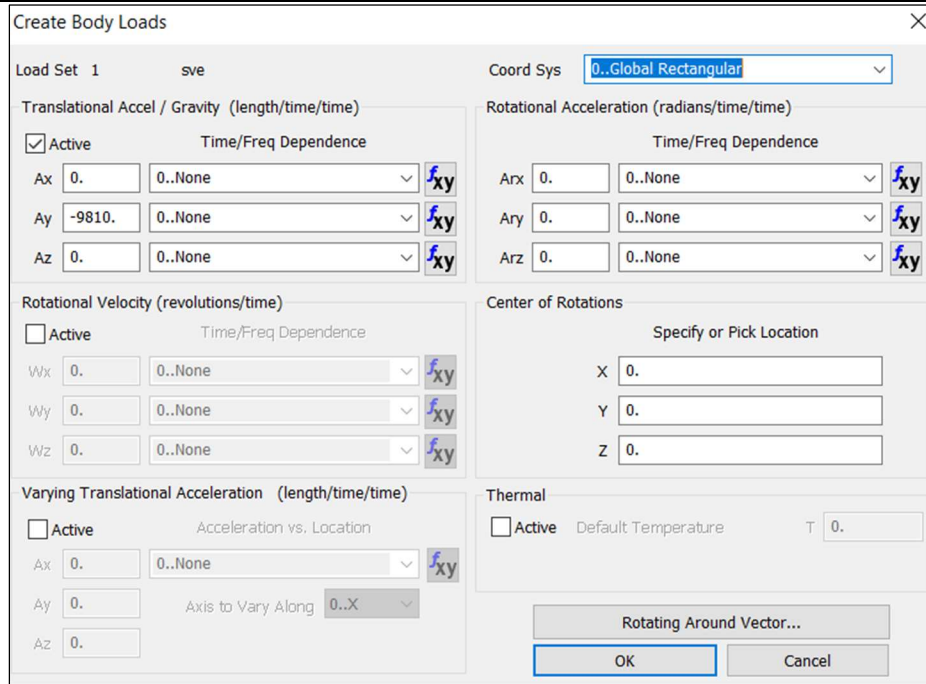
Na mrežu konačnih elemenata, naredbom *Model – Load – Body*, postavlja se utjecaj gravitacije, slika 36, a naredbom *Model – Load – On Surface*, postavljaju se vertikalna (slika 34) i horizontalna sila (slika 35) iz jednadžbi (5.1) i (5.3):



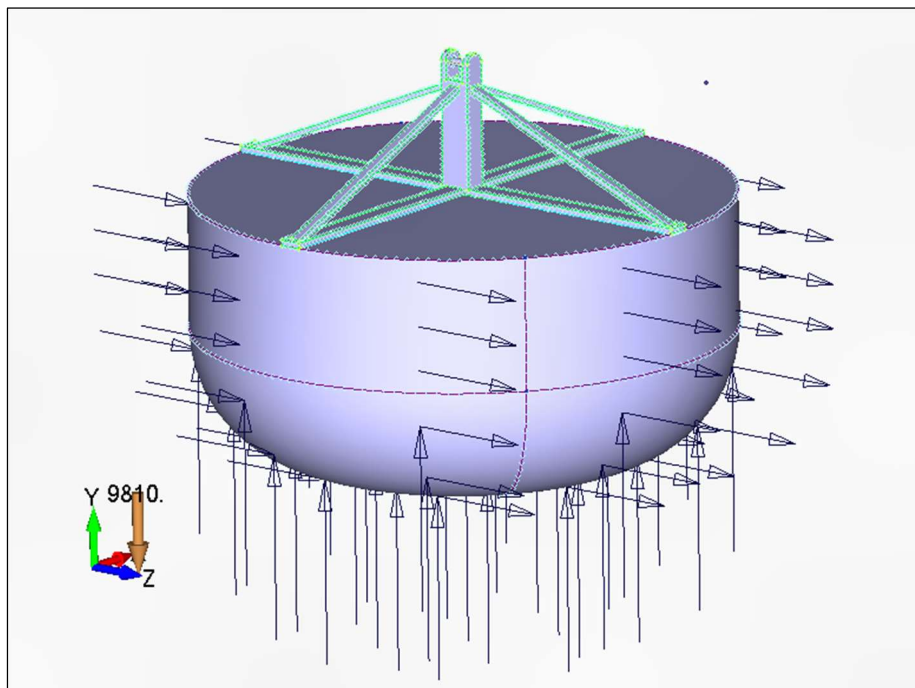
Slika 34 Prikaz unosa vertikalne sile na plutaču u Femap/NX NASTRAN



Slika 35 Prikaz unosa horizontalne sile na plutaču u Femap/NX NASTRAN



Slika 36 Prikaz unosa sile teže na tijelo modela u Femap/NX NASTRAN



Slika 37 Prikaz vektora svih sila u Femap/NX NASTRAN

## 7. ANALIZA REZULTATA

### 7.1. Rezultati početne analize

Svrha početne analize je bilo preliminarno dimenzioniranje nosača mehanizma valnog pretvarača. Primjenom BEAM elemenata su na pojednostavljenom modelu ispitane razne aluminijske kvadratne cijevi.

Kriteriji čvrstoće i izdržljivosti cijevi su svojstva odabrane aluminijske legure EN AW 6060 T6 opisana u sljedećoj tablici:

**Tablica 4 Kriteriji izdrživosti aluminijske legure EN AW 6060 T6 [8]**

Vlačna čvrstoća, MPa	Smična čvrstoća, MPa
170	130

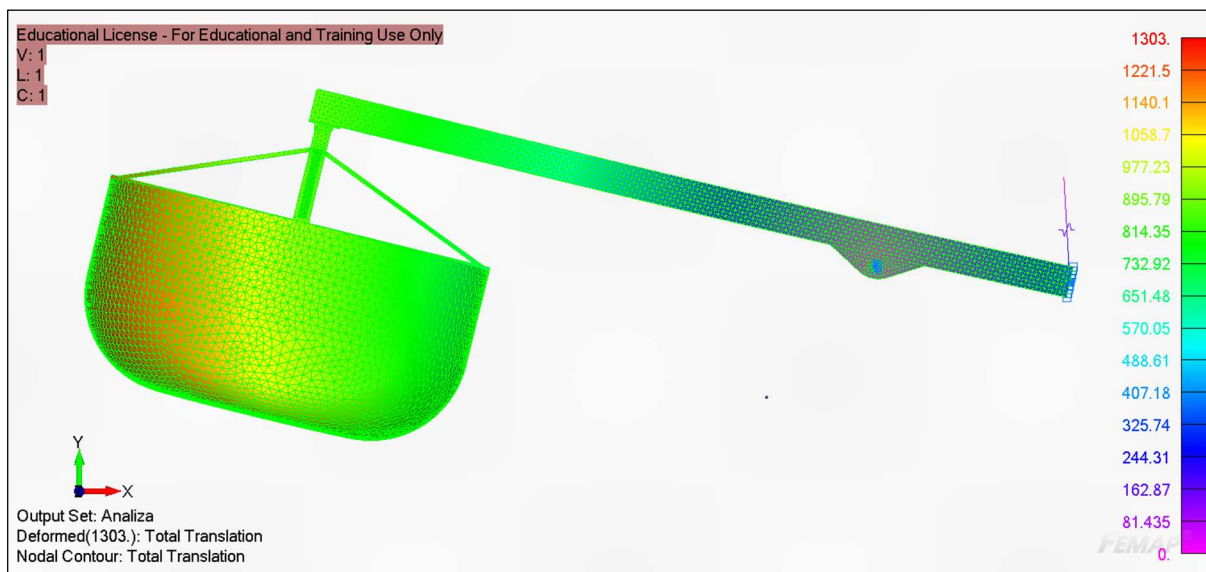
**Tablica 5 Pomaci i naprezanja u navedenim profilima**

Profil, mm	Pomak plutače, m	Naprezanje, MPa
100x100x10	1,903	798
100x100x15	1,696	619
120x120x20	1,369	398
140x140x20	1,175	230
150x150x20	1,135	194
160x160x20	1,104	166

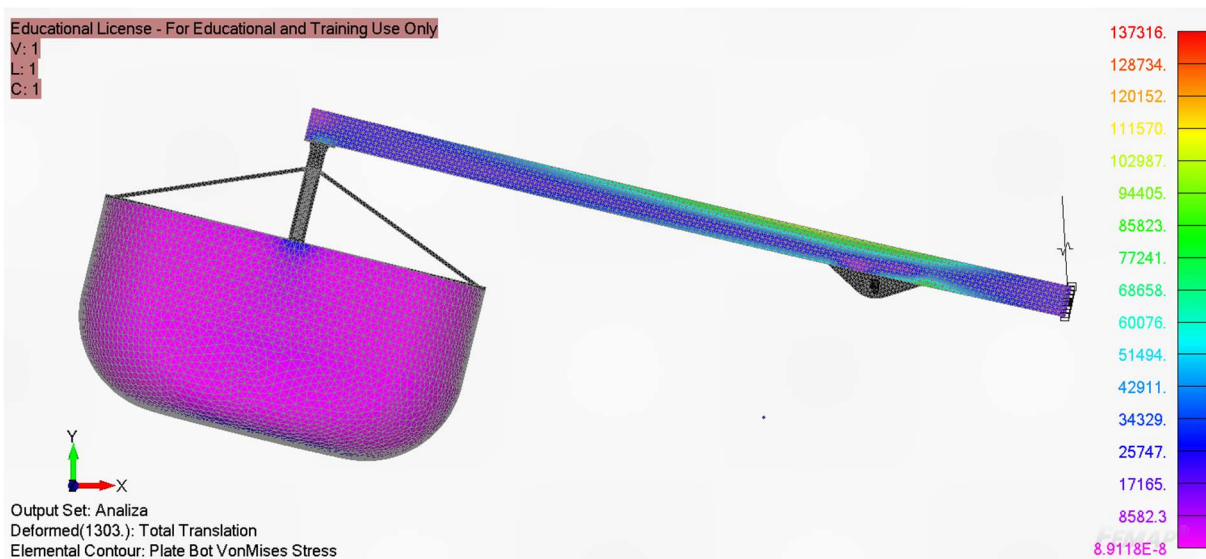
Na temelju rezultata prikazanih u tablici odabran je profil dimenzija 160x160x20mm.

## 7.2. Rezultati analize punog modela

Analiza opterećenja vala pokazala je da se plutača uslijed djelovanja vala pomaknula prema gore (slika 38) te su se zbog krutosti opruge stvorila tlačna naprezanja na gornjoj strani poluge profila 160x160x20mm (slika 39).



Slika 38 Prikaz gradijenta pomaka modela u Femap/NX NASTRAN



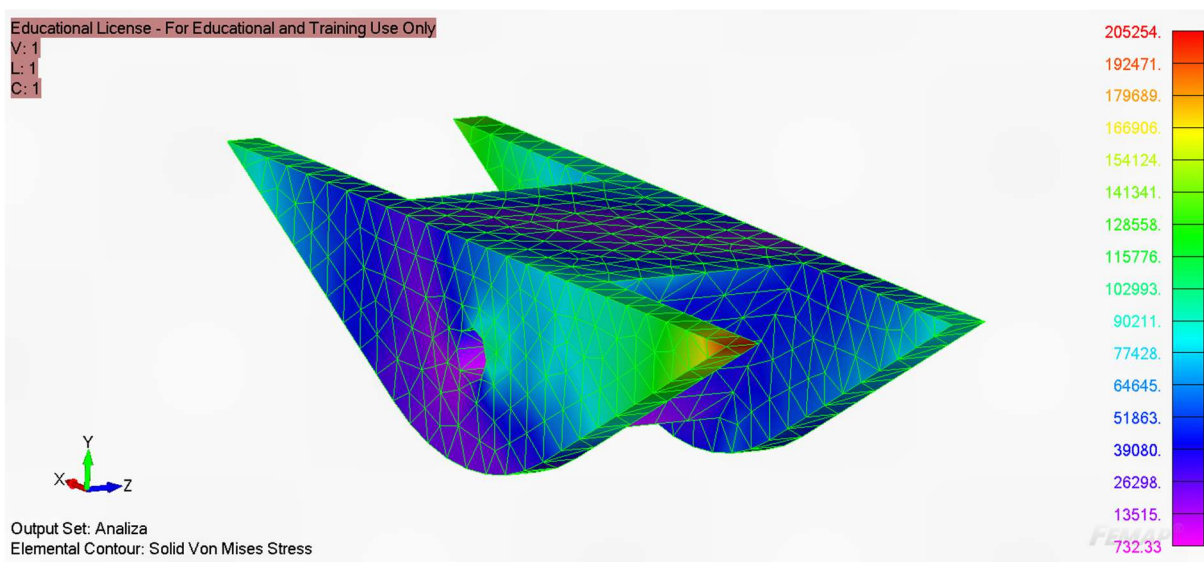
Slika 39 Prikaz gradijenta naprezanja na modelu u Femap/NX NASTRAN

Vrijednosti prikazanih pomaka (slika 39) izražene su u milimetrima, a vrijednosti prikazanih naprezanja (slika 40) u kPa. Kada se spomenute vrijednosti preračunaju u metre i MPa njihove vrijednosti iznose kako je prikazano u tablici 5:

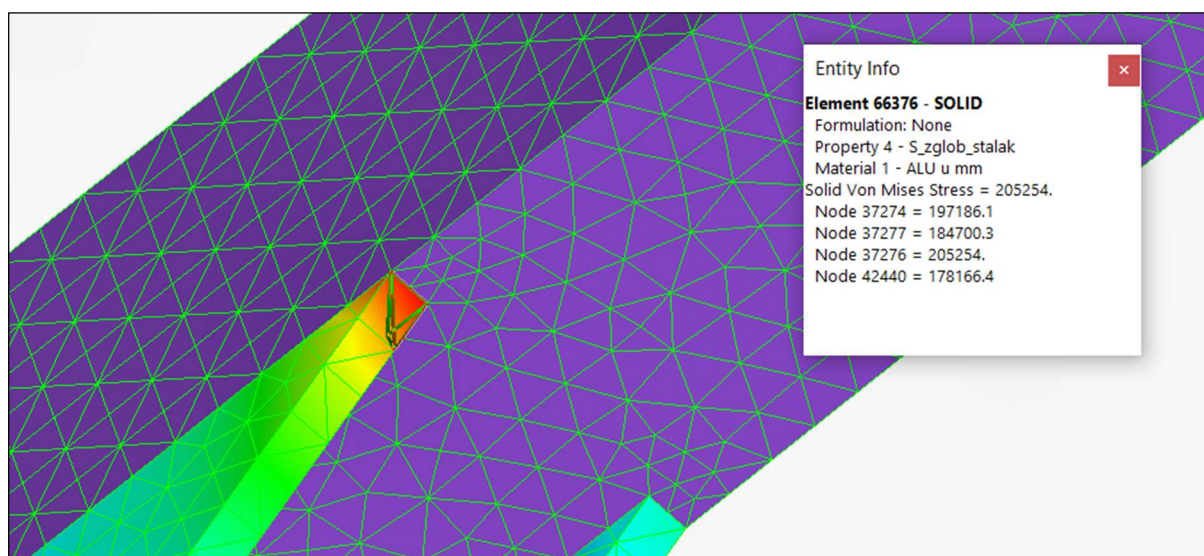
Tablica 6 Preračunate vrijednosti pomaka i napreznja

Značajka	Vrijednost
Pomak, m	1,303
Napreznje, MPa	137,316

Daljnjom analizom podataka ustanovljeno je da se na spoju zgloba stalka i poluge javlja žarište napreznja koje iznosi 205 MPa (slika 41), što prelazi elastičnu izdržljivost izabrane legure aluminija. Žarište se nalazi na samom zglobu (slika 40). Taj problem može se riješiti na način da se geometrija stalka izmjeni da bi se spriječilo gomilanje napreznja. Dok su napreznja poluge na toj lokaciji 126 MPa, što je unutar granice izdržljivosti materijala, slika 42.

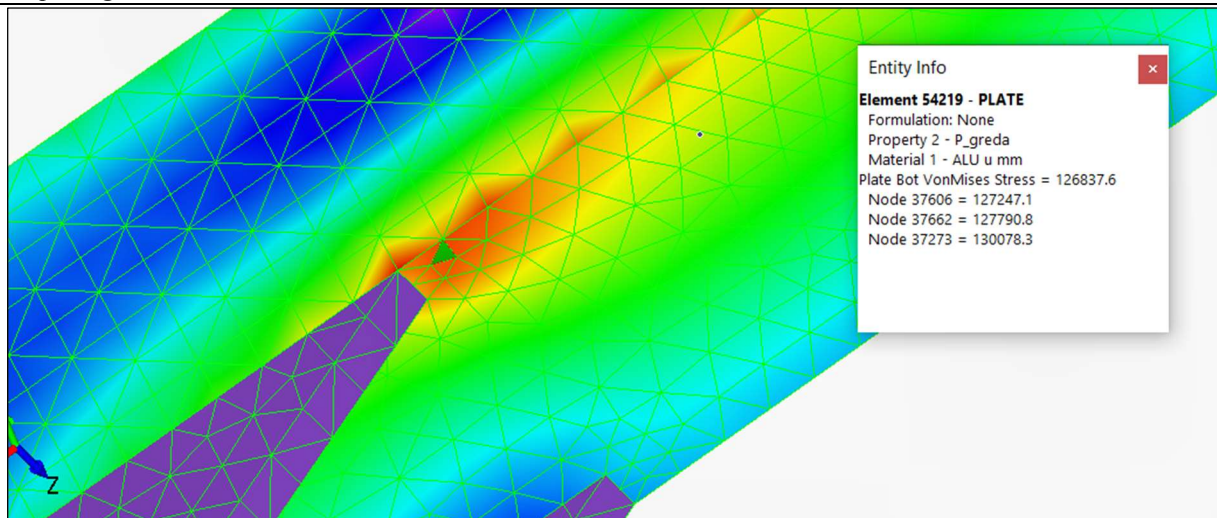


Slika 40 Gradijent napreznja na zglobu stalka



Slika 41 Prikaz točke žarišta napreznja na zglobu stalka





Slika 42 Prikaz žarišta naprezanja na poluzi

---

## 8. ZAKLJUČAK

Tehnologija pretvarača valne energije, iako u ranoj fazi razvoja, sadrži ogroman potencijal za daljnji razvoj i preuzimanje većeg udjela sektora za proizvodnju električne energije iz obnovljivih izvora. Unatoč poteškoćama u razvoju valoelektrana, broj raznolikih ispitanih rješenja svjedoči o ogromnoj količini scenarija za iskorištavanje valne energije.

Idući korak razvoja takvih tehnologija je pokretanje većih postrojenja valoelektrana te pronalazjenja načina da se smanje troškovi održavanja takvih sustava.

U ovom radu ispitivala se specifična izvedba obalnog točkastog pretvarača. Strukturnom analizom u programskom paketu FEMAP/NX-Nastran, dokazano je da predloženi sustav sa svim svojim značajkama može izdržati uvjete Jadranskog mora.

Naime, tijekom analize ustanovljeno je da su opterećenja jako velika te je bilo potrebno dimenzionirati nosač koji je po svojim dimenzijama nije praktičan za proizvodnju i upotrebu.

Prijedlog za daljnju razradu mehanizma bio bi promjena veličine i oblika plutače, da bi se povećala opterećenja kojima val djeluje na mehanizam. Time bi se posljedično povećala i naprezanja u samom mehanizmu, što bi zahtijevalo pojačanje nosača i time veće iskorištavanje sile.

---

**LITERATURA**

- [ 1 ] *Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje.* <https://enciklopedija.hr/clanak/more>  
Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2013. – 2024., 19.9.2024.
- [ 2 ] *IRENA Ocean Energy Technology Brief 4,* [www.irena.org](http://www.irena.org) Lipanj 2014., 10.9.2024
- [ 3 ] Škoro, V.: *Razvoj pretvornika energije morskih valova u električnu energiju korištenjem linearnog generatora i plutajuće,* zbornik radova, 8. Dani inženjera elektrotehnike , Zadar, 2015.
- [ 4 ] Falcao, A.: *Wave energy utilization: A review of the technologies,* Technical University of Lisbon, 2009.
- [ 5 ] *Oceans of Info: Dual Platform Tests Wave Energy Converter Tech,*  
<https://eepower.com/news/oceans-of-info-dual-platform-tests-wave-energy-converter-tech/#>,  
22.7.2024. 19.9.2024
- [ 6 ] Prpić-Oršić, J.; Čorić, V.: *Pomorstvenost plovnih objekata;* Zigo; Rijeka, 2006.
- [ 7 ] Journee, J.M.J; Massie, W.W.: *Offshore hydromechanics,* Delf University of Technology, 2001.
- [ 8 ] Zaimović-Uzunović, N.: *Metoda konačnih elemenata,* Univerzitet u Zenici, 2013.
- [ 9 ] *EN-AW 6060 Data sheet,*  
[https://www.alumerogroup.eu/fileadmin/user\\_upload/downloads/folder/technologien/ALUMERO\\_Legierungen\\_EN-AW-6060\\_EN.pdf](https://www.alumerogroup.eu/fileadmin/user_upload/downloads/folder/technologien/ALUMERO_Legierungen_EN-AW-6060_EN.pdf), Srpanj 2020., 2.9.2024.