

# Analiza mehaničkog ponašanja AFP-Halo zaštitne konstrukcije motornog vozila za utrke

---

**Babić, Leon**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2024**

*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:190:489206>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-04**



*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U RIJECI  
TEHNIČKI FAKULTET

Prijediplomski sveučilišni studij strojarstva

Završni rad

**ANALIZA MEHANIČKOG PONAŠANJA AFP-HALO ZAŠTITNE  
KONSTRUKCIJE MOTORNOG VOZILA ZA UTRKE**

Rijeka, rujan 2024.

Leon Babić

0035224817

SVEUČILIŠTE U RIJECI  
TEHNIČKI FAKULTET

Prijediplomski sveučilišni studij strojarstva

Završni rad

**ANALIZA MEHANIČKOG PONAŠANJA AFP-HALO ZAŠTITNE  
KONSTRUKCIJE MOTORNOG VOZILA ZA UTRKE**

Mentor: Prof. dr. sc. Marko Čanađija

Rijeka, rujan 2024.

Leon Babić

0035224817

Rijeka, 11.03.2024.

Zavod:                   Zavod za tehničku mehaniku  
Predmet:                Osnove primjene metode konačnih elemenata

## ZADATAK ZA ZAVRŠNI RAD

Pristupnik:            **Leon Babić (0035224817)**  
Studij:                Sveučilišni prijediplomski studij strojarstva (1010)

Zadatak:              **Analiza mehaničkog ponašanja AFP-Halo zaštitne konstrukcije motornog vozila za utrke / Structural Analysis of Additional Frontal Protection (AFP-Halo) for a Racing Car**

### Opis zadatka:

Potrebno je izraditi zaštitnu konstrukciju glave vozača motornog vozila namijenjenog za utrke, tzv. Halo. Pritom poštivati odredbe Federation Internationale de L'Automobile, norma FIA 8869-2018. Analizu provesti metodom konačnih elemenata koristeći dva pristupa. U prvoj analizi koristiti gredne konačne elemente i pritom odrediti sve potrebne dimenzije. Koristeći ove dimenzije, napraviti model sastavljen od površina i provjeriti naprezanja i deformacije na kritičnim mjestima. Materijal i rubne uvjete odabrati prema gore navedenoj normi.

Rad mora biti napisan prema Uputama za pisanja diplomskih / završnih radova koje su objavljene na mrežnim stranicama studija.

Zadatak uručen pristupniku:    20.03.2024.

Mentor:  
prof. dr. sc. Marko Čanađija

Predsjednik povjerenstva za  
završni ispit:  
izv. prof. dr. sc. Samir Žic

## **IZJAVA O AUTORSTVU ZAVRŠNOG RADA**

Izjavljujem da sam završni rad pod naslovom „Analiza mehaničkog ponašanja AFP-Halo zaštitne konstrukcije motornog vozila za utrke“ izradio potpuno samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i izvore navedene u popisu literature, pod mentorstvom prof. dr. sc. Marka Čanađije.

Leon Babić

*Zahvaljujem se svojoj obitelji i svim bližnjima koji su mi bili podrška i poticaj za vrijeme ovog studija.*

*Također se zahvaljujem i svojem mentoru prof. dr. sc. Marku Čanađiju, na izdvojenom vremenu i podijeljenom znanju.*

# SADRŽAJ

1. UVOD .....	2
2. SIGURNOST TRKAČIH VOZILA OTVORENOG TIPA .....	3
2.1. Pregled napretka sigurnosti kroz povijest .....	4
2.2. Razvoj AFP-Halo zaštitnog sustava .....	5
3. AFP-HALO SUSTAV ZAŠTITE VOZAČA .....	7
3.1. Geometrija AFP-Halo sustava .....	7
3.2. Opterećenja na testovima AFP-Halo konstrukcije .....	8
3.2.1. Kvizistatički test 1 .....	9
3.2.2. Kvizistatički test 2 .....	10
4. METODA KONAČNIH ELEMENATA .....	12
5. PRIPREMA MODELA ZA ANALIZU .....	13
5.1. Izrada geometrije modela .....	13
5.1.1. Model za analizu grednim konačnim elementima .....	14
5.1.2. Model za analizu površinskim konačnim elementima .....	15
5.2. Opis i definiranje ponašanja materijala .....	16
5.2.1. Dijagram naprezanje-deformacija za čelik 15CrMoV6 .....	16
5.3. Omreživanje modela .....	19
5.3.1. Omreživanje modela grednim konačnim elementima .....	20
5.3.2. Omreživanje modela pločastim konačnim elementima .....	22
5.4. Opterećenja i rubni uvjeti .....	23
5.5. Postavke analize .....	25
6. REZULTATI ANALIZE .....	28
6.1. Rezultati analize provedene grednim konačnim elementima .....	28
6.1. Rezultati analize provedene pločastim konačnim elementima .....	32
7. ZAKLJUČAK .....	37
8. LITERATURA .....	38
9. SAŽETAK .....	40
10. ABSTRACT .....	41

# 1. UVOD

Sigurnost je u svijetu automobilističkih utrka postala sve važnija krajem 20. stoljeća, a veliki su napredci postignuti u 21. stoljeću jer su trkaća vozila postajala sve brža što je donijelo i mogućnost jačih sudara s ozbiljnijim posljedicama. Neke od novijih tehnologija koje imaju za cilj poboljšanje sigurnosti su korištenje školjkaste šasije od čvrstih kompozitnih materijala, zaštitne ograde na rubovima staze koje apsorbiraju veliku količinu energije i tako ublažuju udarce, užad koja drži kotače za šasiju i sprječava odvajanje kotača ako dođe do nesreće i razni senzori koji prate stanje vozača za vrijeme utrka.

Jedno od takvih modernih rješenja za povećanje sigurnosti vozača je sustav dodatne prednje zaštite za glavu AFP-Halo uveden 2018. godine od strane Međunarodne automobilističke organizacije. AFP-Halo se pojavio kao reakcija na sve veću zabrinutost zbog manjka sigurnosti za vozače koji se natječu u utrkama vozila otvorenog tipa. Takva vozila nemaju krov ni vjetrobran pa su zbog toga vozačima glave izložene dolijetanju krhotina ili u sudarima i samo ih kaciga štiti. S ciljem osiguranja veće sigurnosti vozača propisana je norma FIA 8869-2018 obvezuje sva veća prvenstva motornih vozila otvorenog tipa na obavezno korištenje AFP-Halo sustava te koja opisuje zahtjeve koje dodatna prednja zaštita za glavu vozača mora ispuniti da bi se smatrala adekvatnom za korištenje.

Cilj ovog rada je izraditi model AFP-Halo konstrukcije i provesti mehaničku analizu koristeći metodu konačnih elemenata i vidjeti mogu li se simulacijom opterećenja modela rekreirati stvarni uvjeti testiranja. Cilj je također provesti tu analizu s dvije vrste konačnih elemenata i vidjeti kako se konstrukcija ponaša ovisno o tome kako je diskretizirana. Za provjeru rezultata koriste se zahtjevi dani u normi FIA 8869-2018. U analizi će se koristiti određena pojednostavljena na modelu ovisno o primijenjenom tipu konačnih elemenata. Rubni uvjeti su postavljeni na način da imitiraju stvarno testiranje koje se provodi na konstrukciji.



## 2. SIGURNOST TRKAČIH VOZILA OTVORENOG TIPA

Tijekom modernih automobilističkih utrka postižu se brzine veće od 300 km/h na pravicima staze, a u istom trenutku na stazi se može nalaziti preko dvadeset trkaćih vozila istovremeno. S obzirom da se za vrijeme utrke ne želi izgubiti ni stotinka vremena, vozači teže k maksimalnoj preciznosti i minimalnom gubitku brzine za vrijeme trajanja utrke. U potrazi za idealnim putanjama kroz zavoje, na uličnim utrkama, vozači dolaze na samo nekoliko centimetara od zaštitnih barijera što znači da nema prostora za pogreške jer u suprotnom dolazi do sudara. Još jedna radnja koja je visokog rizika je međusobno pretjecanje tijekom utrka jer tada su vozila udaljena samo desetak centimetara, a istovremeno vozeći velikim brzinama. Zbog spomenutih rizika vrlo je važno da se s razvojem tehnologije koja omogućava sve brža vozila ulaže i u razvoj sigurnosnih sustava u vozilima.

Trkaća vozila otvorenog tipa, zbog svog specifičnog dizajna u kojem je glava vozača izložena predstavljaju dodatan rizik za vozača, posebno je povećana vjerojatnost ozljede glave (Slika 2.1). Međunarodna automobilistička federacija ili Fédération Internationale de l'Automobile, skraćeno FIA, je organizacija koja je zadužena za reguliranje natjecanja trkaćih vozila otvorenog tipa, a neka od najpoznatijih prvenstava su Formula 1, Formula 2, IndyCar, Formula E i Super Formula. FIA za svako od natjecanja donosi tehničke pravilnike koji se odnose na vozila te opisuju njihove dimenzije i karakteristike kojih se konstruktori strogo moraju pridržavati. Pravilnicima su propisani i sigurnosni sustavi te testovi koji će biti provedeni na svakom sigurnosnom sustavu kako bi se osigurala tehnička ispravnost što je velike važnosti jer ispravni sigurnosni sustavi mogu spriječiti veće ozljede ili smrt vozača. [1]



Slika 2.1 Trkaće vozilo Formule 1 bez dodatne zaštite za glavu vozača AFP-Halo [2]

## 2.1. Pregled napretka sigurnosti kroz povijest

Danas je sigurnost u automobilističkim utrkama dovedena na vrlo visok nivo, međutim to nije uvijek bio slučaj. U počecima moto sporta, cilj je samo bio izgraditi najbrže moguće vozilo, a sigurnost je bila sporedna tema. Pravilnici nisu zahtijevali stroge sigurnosne sustave kao što je to danas slučaj. U nastavku je izdvojeno nekoliko sigurnosnih sustava čiji je cilj veća zaštita glave vozača.

Natjecanje Formule 1 službeno je započelo 1950. godine, a tek je 1952. godine uveden pravilnik koji zahtijeva upotrebu kaciga za vozače (Slika 2.2). Do tada su vozači nosili samo platnene kape s naočalama. Kacige su prvi korak u direktnoj zaštiti glave vozača od udaraca u dijelove vozila ili krhotina koje mogu doletjeti tijekom utrke. Kroz godine kacige su se razvijale tako da budu čvrste, a ujedno i lagane i vatrootporne. Iako kacige pružaju mnogo zaštite, po svojim karakteristikama su vrlo krute i tvrde pa da bi se dodatno ublažili udarci glavom u stranu bolida, 1996. uvedeni su nasloni za glavu čiji je cilj apsorbirati što više energije u slučaju sudara. Da se smanji naprezanje na vratu koje vozači proživljavaju tijekom sudara, od 2003. godine svi vozači moraju imati tzv. HANS uređaj, što je skraćeno za Head And Neck Support, odnosno podrška za glavu i vrat. Ovaj uređaj je vezan na kacigu vozača i time fiksira vrat i sprječava hiperekstenziju (Slika 2.3). [3, 4]



Slika 2.2 Kaciga korištena u Formuli 1 1970. godine [5]



Slika 2.3 Skica HANS uređaja za zaštitu vrata vozača [6]

1961. godine donesen je pravilnik koji zahtijeva implementiranje metalne cijevne konstrukcije na šasiju vozila. Ova konstrukcija pruža zaštitu za glavu vozača u slučaju prevrtanja vozila te ujedno predstavlja najvišu točku vozila i vidljiv je njen utjecaj na Slici 2.4. [4]



*Slika 2.4 Zaštitna konstrukcija iznad glave vozača sprječava da vozilo prignječi vozača [7]*

Prethodno navedene mjere su samo neki od čimbenika koji su povećali sigurnost u automobilističkim utrkama. To se može potvrditi padom broja smrtnih slučajeva u nesrećama na primjeru Formule 1. Od 1950. godine do 1980. godine zabilježen je 41 smrtni slučaj, a u još većem vremenskom intervalu, od 1980. do danas zabilježeno je 11 smrtnih slučajeva od kojih su se 4 slučaja dogodila na utrkama s povijesnim trkaćim vozilima koji imaju slabije sigurnosne standarde. [8]

## **2.2. Razvoj AFP-Halo zaštitnog sustava**

Iako je sigurnost znatno napredovala na svim područjima automobilističkih utrka, kod formula, odnosno trkaćih vozila otvorenog tipa, i dalje je bila prisutna činjenica da je glava vozača potpuno izložena i zaštićena samo kacigom. 2009. godine pokrenuta su istraživanja s ciljem pronalaska sigurnosnog rješenja koje bi dodatno štitilo glavu vozača. Ova su istraživanja potaknuta od strane FIA-e činjenicom da su se te godine dogodila dva incidenta u njihovim natjecanjima koja bi se mogla spriječiti adekvatnom zaštitom vozača. Felipe Massa zadobio teške ozljede glave zbog krhotine koja se odvojila s vozila ispred, a Henry Surtees je tragično preminuo u Formuli 2 kada ga je u glavu pogodio odvojeni kotač vozila. U početku, nije opće prihvaćena ideja da se uvede sigurnosni sustav prednje zaštite glave vozača jer se smatralo da se time narušava sam identitet

vozila otvorenog tipa, a i bilo je zabrinutosti da će vozačima biti ometeno vidno polje. Međutim nesreća iz 2014. u kojoj je smrtno stradao Jules Bianchi jer nije imao adekvatnu zaštitu glave potaknula je FIA-u da aktivno potraži rješenje za što veću sigurnost vozača. [9]

Eksperimentiralo se s prozirnim zatvorenim stilom zaštite u stilu pilotskih kabina u vojnim avionima. FIA je razvila verziju koju je nazvala Shield, u prijevodu štit, a slični sustav je razvio Red Bull Advanced Technologies pod imenom Aeroscreen čija je izvedba prikazana na Slici 2.5. Međutim na testovima se pokazalo da takvi sustavi iskrivljuju sliku i ometaju vidno polje vozača što zapravo umanjuje sigurnost, a i nisu bili zadovoljavajućih mehaničkih karakteristika. [9, 10]



*Slika 2.5 Testiranje Aeroscreen koncepta od strane Red Bull Advanced Technologies [10]*

Kao finalno rješenje, 2018. godine odabran je sigurnosni sustav AFP-Halo koji je imao najbolje mehaničke karakteristike, a ujedno nije ometao vidno polje vozača iako se jedan sustava spaja na šasiju direktno ispred vozača. AFP-Halo je mogao izdržati velika opterećenja što primarno omogućava adekvatnu zaštitu glave vozača od velikih krhotina i sudara u kojima je jedno vozilo na drugom. Sekundarna uloga sustava je zaštita vozača prilikom prevrtanja ukoliko dođe do loma glavne zaštitne konstrukcije za prevrtanje. [3, 9]

Iako se u početku smatrao estetski neprivlačnim, sustav se pokazao iznimno uspješnim i od 2018. postoji već desetak primjera u kojima je bio odlučujući faktor u sprječavanju ozljeda ili smrti vozača. [9]

### 3. AFP-HALO SUSTAV ZAŠTITE VOZAČA

Kao što je prethodno spomenuto Međunarodna automobilistička federacija FIA donosi pravilnike kojima regulira tehničke karakteristike trkaćih vozila. To uključuje i sve sigurnosne sustave pa je tako 2018. godine donesena norma FIA 8869-2018 koja obvezuje sve sudionike natjecanja da koriste AFP-Halo zaštitni sustav prikazan na Slici 3.1. Skraćenica AFP znači Additional Frontal Protection odnosno dodatna prednja zaštita. Normom FIA 8869-2018 definirana je geometrija Halo sustava i testovi koje cijela konstrukcija mora izdržati da bi bila podobna za korištenje. Namijenjena je proizvođačima koji žele konstruirati ovaj sigurnosni sustav i postati jedan od odobrenih dobavljača ovog sustava. Istaknuta prvenstva za koja je AFP-Halo opisan u ovoj normi su Formula 1, Formula 2 i Formula E. [11]



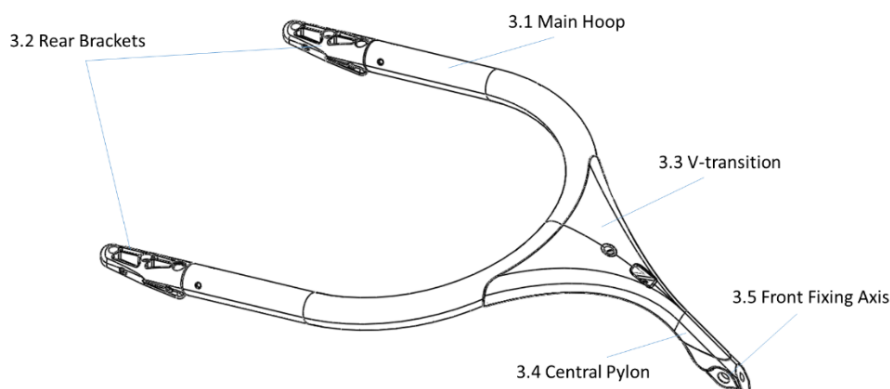
Slika 3.1 AFP-Halo na vozilu Formule 1 [12]

#### 3.1. Geometrija AFP-Halo sustava

AFP-Halo je zavarena konstrukcija koja se sastoji od sljedećih dijelova:

- Glavni obruč (3.1)
- Dva stražnja nosača (3.2)
- Prijelaz V-oblika (3.3)
- Središnji stup (3.4)
- Os za pričvršćenje sprijeda (3.5)

Brojevi u zagradama odgovaraju dijelovima na Slici 3.2.



Slika 3.2 Prikaz dijelova koji zajedno čine zavaernu konstrukciju AFP-Halo [11]

Glavni obruč je sastavljen od više zajedno zavarenih cijevi promjera 50 mm i debljine stijenke 4 mm. Cijevi su fiksirane na šasiju iza glave vozača preko dva stražnja nosača. S prednje strane vozača je konstrukcija montirana također na šasiju ispred glave vozača. Dijelovi konstrukcije 3.3, 3.4 i 3.5 se u nastavku spominju kao V-spojnica jer se modeliraju zajedno u svrhu pojednostavljenja problema. [11]

U normi je propisano da se za materijal konstrukcije može koristiti legura titana Ti6Al4V ili čelik 15CrMoV6 koji se koristi kao materijal prilikom analize u ovom radu. [11]

Dimenzije AFP-Halo konstrukcije po kojima se izrađuje model uzete su iz tehničkog pravilnika natjecanja Formule E za sezonu 2021.-2022. [13]

### 3.2. Opterećenja na testovima AFP-Halo konstrukcije

U normi FIA 8869-2018 opisani su testovi koji se provode na AFP-Halo konstrukciji. FIA je zaključila da konstrukcija odgovara traženim zahtjevima i smatra se dovoljno sigurnom, ako može podnijeti navedene testove. Kod ispitivanja sigurnosti AFP-Halo zaštitnog sustava koriste se dva kvazi-statička testa. Pod kvazistatičkim opterećenjem smatra se da se opterećenje primjenjuje dovoljno sporo do tražene vrijednosti da se dinamički efekti, odnosno inercija, mogu zanemariti.

Za oba testa, AFP-Halo je kruto povezan s bazom preko dva stražnja nosača, a sprijeda prikvačen tako da je omogućena rotacija oko jedne osi. Na oba testa opterećenje se primjenjuje pomoću kružnog bloka koji je promjera 150 mm i čije središte ne smije biti udaljeno više od 5 mm od zadanog položaja opterećenja. Opterećenje se nanosi putem jednog cilindra bez promjene smjera.

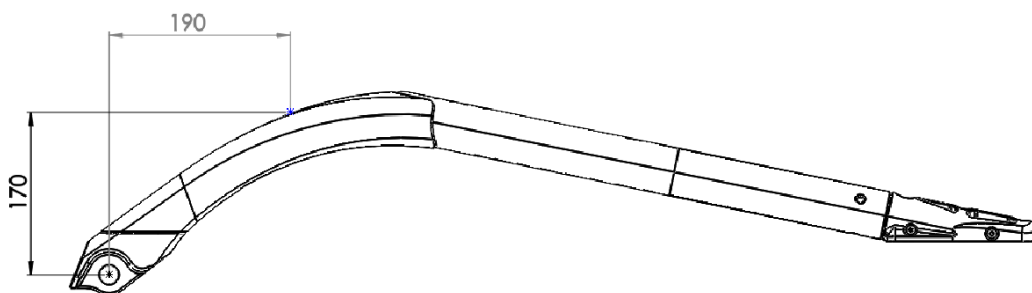
Bilo kakvi otkloni koji se pojave se mjere u smjeru u kojem je nanoseno opterećenje. Testovi se provode na konstrukciji stvarnih dimenzija izrađenoj prema normi FIA 8869-2018 i dodatnoj popratnoj dokumentaciji koja nije javna. [11]

### 3.2.1. Kvizistatički test 1

U prvom testu opterećenje na konstrukciju treba iznositi 116 kN vertikalno prema dolje i 46 kN horizontalno unatrag. Smjer je definiran prema smjeru u kojem trkaći bolid vozi prema naprijed. Ukupna sila koja se treba primijeniti  $F_{uk1}$  je nešto manja od 125 kN.

$$F_{uk1} = \sqrt{46^2 + 116^2} = 124,788 \text{ kN} \quad (3.1)$$

Mjesto opterećenja je definirano u odnosu na mjesto gdje se AFP-Halo spaja na šasiju s prednje strane te je prikazano na Slici 3.3 i 3.4.



Slika 3.3 Mjesto opterećenja za kvazistatički test 1 [11]

Kod realnog testiranja potrebno je ukupnu silu doseći u vremenu od 3 min i zadržati 5 sekundi. Nakon toga provjerava se jesu li zadovoljeni slijedeći zahtjevi:

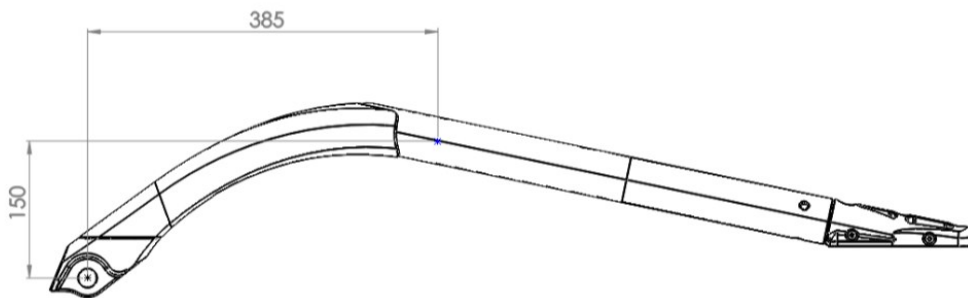
- Ne smije doći do strukturnog loma na bilo kojem mjestu konstrukcije
- Kada je dosegnuto maksimalno opterećenje, maksimalni pomak ne smije biti veći od 17,5 mm
- Nakon što je opterećenje otpušteno 1 minutu, trajna deformacija konstrukcije ne smije biti veća od 3 mm.



Slika 3.4 Provedba kvazistatičkog testa 1 [11]

### 3.2.2. Kvazistatički test 2

Na mjestu opterećenja prikazanom na Slici 3.5 i 3.6 mora se primijeniti ukupno opterećenje koje se sastoji od bočne sile prema unutrašnjosti konstrukcije i horizontalne sile unatrag, a čiji su iznosi u omjeru 1,12:1. Mjesto opterećenja je također definirano u odnosu na prednji spoj konstrukcije na šasiju. Test se provodi sve dok ne dođe do loma ili do maksimalnog otklona od 100 mm. Test mora biti proveden unutar 6 minuta. [11]

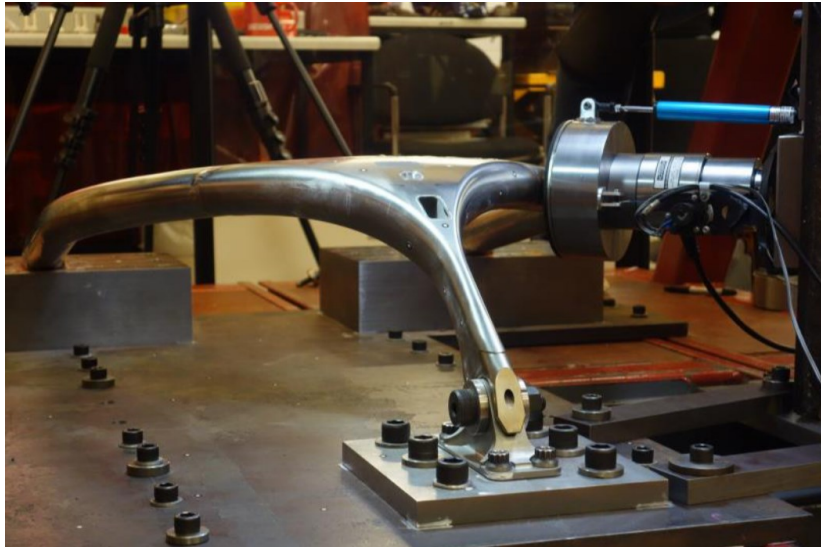


Slika 3.5 Mjesto opterećenja za kvazistatički test 2

Da bi konstrukcija zadovoljila na drugom testu moraju biti zadovoljeni slijedeći zahtjevi:

- Maksimalno postignuto opterećenje ne smije biti manje od 125 kN
- Ne smije biti nikakvog strukturnog loma pri opterećenju manjem od 125 kN
- Otklon ne smije biti veći od 45 mm prije nego je postignuto opterećenje od 125 kN

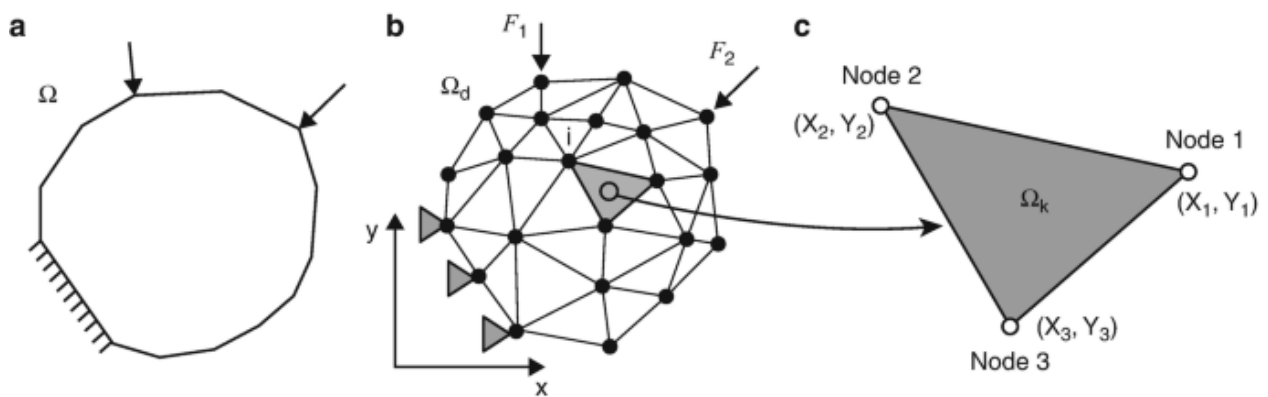




*Slika 3.6 Provedba kvazistatičkog testa 2 [11]*

## 4. METODA KONAČNIH ELEMENATA

Analiza koja će se provesti na modelu AFP-Halo konstrukcije koristit će metodu konačnih elemenata. To je numerička metoda koja se temelji na diskretizaciji konstrukcije na odgovarajući broj konačnih elemenata. Konačni elementi su međusobno povezani čvorovima i zajedno s njima čine sveukupnu mrežu konačnih elemenata. Metodom konačnih elemenata se stvarna konstrukcija koja je opisana s beskonačno mnogo varijabli transformira u diskretizirani model koji se sastoji od konačnog broja varijabli da bi se moglo dobiti približno ponašanje konstrukcije za zadane uvjete (Slika 4.1). MKE je korisna metoda jer se može primijeniti na konstrukciji bilo kakvog oblika te se na nju mogu proizvoljno postaviti opterećenja, rubni uvjeti i materijal. Rješenja koja se dobivaju ovom metodom su približna i ovise o gustoći mreže. Također je važno pravilno izabrati i primijeniti konačne elemente s obzirom na to da postoji više vrsta. Osnovni tipovi konačnih elemenata su linijski, plošni i volumni. Linijski, odnosno jednodimenzionalni elementi koriste se u analizi štapnih i grednih konstrukcija, plošni ili dvodimenzionalni elementi koriste se za tankostijene konstrukcije dok se volumni 3D elementi koriste u složenim konstrukcijama koje se ne mogu diskretizirati sa nekim od prethodno spomenutih elemenata. [14]



Slika 4.1 Primjer diskretizacije tijela na konačne elemente [15]

Softverski alat koji se koristi u ovom radu za provođenje analize je Simcenter Femap 2021.2 Student. Femap je zapravo softverski paket koji funkcionira kao preprocesor i postprocesor jer se njime pripremaju ulazni podaci za rješavanje problema metodom konačnih elemenata, a ujedno je omogućena i analiza rezultata. Za rješavanje problema Femap može koristiti nekoliko numeričkih rješavača, a za potrebe ovog rada izabran je rješavač Simcenter Nastran koji potrebne vrste analiza, a to su linearna statička analiza i nelinearna statička analiza. [14]

## 5. PRIPREMA MODELA ZA ANALIZU

Kako bi se dobro izvršila analiza, potrebno je prvo ispravno postaviti sve uvjete i parametre analize slijedeći navedene korake:

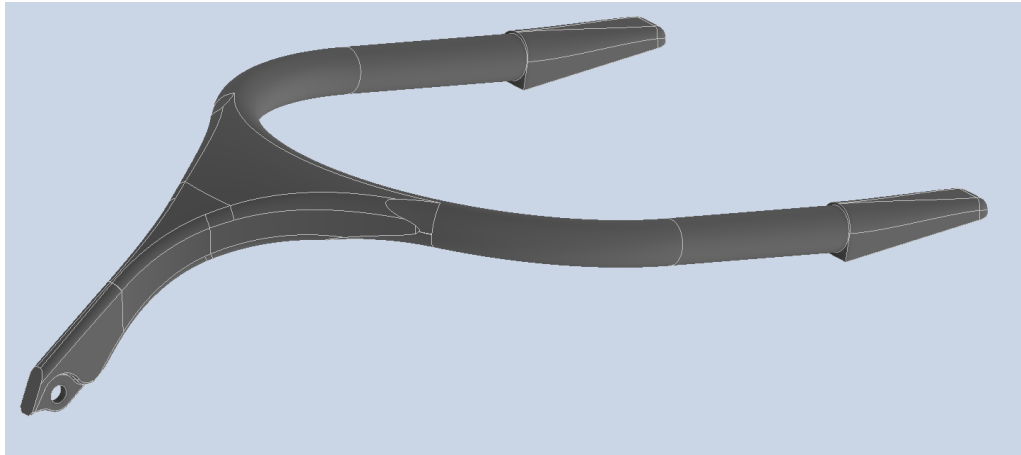
- Kreiranje osnovne pojednostavljene geometrije modela
- Definiranje karakteristika materijala
- Definiranje značajki konačnih elemenata
- Omreživanje modela
- Unos opterećenja i rubnih uvjeta
- Postavljanje i pokretanje proračuna

### 5.1. Izrada geometrije modela

Budući da je zadatak ovog rada provesti analizu na dva različita načina, s grednim konačnim elementima, a zatim i s pločastim konačnim elementima, potrebno je pažljivo pristupiti izradi geometrije konstrukcije koja će se analizirati, uzimajući u obzir tip konačnih elemenata koji se koristi u analizi. Pojedini konačni elementi imaju drugačije mogućnosti i zahtjeve pa se stoga model prilagođava i pojednostavljuje ovisno o tome koji se konačni elementi koriste. Potrebno je pripremiti dva modela, jedan za analizu s grednim konačnim elementima, a drugi za analizu s pločastim konačnim elementima. Modeli su izrađeni u CAD programu Autodesk Inventor Professional 2024, a onda su po potrebi doručeni u Femapu 2021.2 Student.

Koristeći crteže iz tehničkih regulacija Formule E izrađen je pojednostavljeni model AFP-Halo konstrukcije kao jedan part jer se radi o zavarenoj konstrukciji, a za potrebe rada se analizira samo kompletna konstrukcija (Slika 5.1). Model je izrađen aproksimativno jer nisu javno dostupne sve dimenzije, a koristi se za daljnje modeliranje kao pomoć kod određivanja određenih presjeka. [13]

Model je pojednostavljen i nisu uzeti u obzir brojni utori za senzore i kamere koji se nalaze u V-spojnicima. Također su pojednostavljeni i stražnji nosači te će se oslonci na tim mjestima modelirati kao nastavak glavnog obruča. Ova su pojednostavljenja uvedena zbog ograničenja koja su uzrokovana korištenjem grednih i pločastih elemenata.

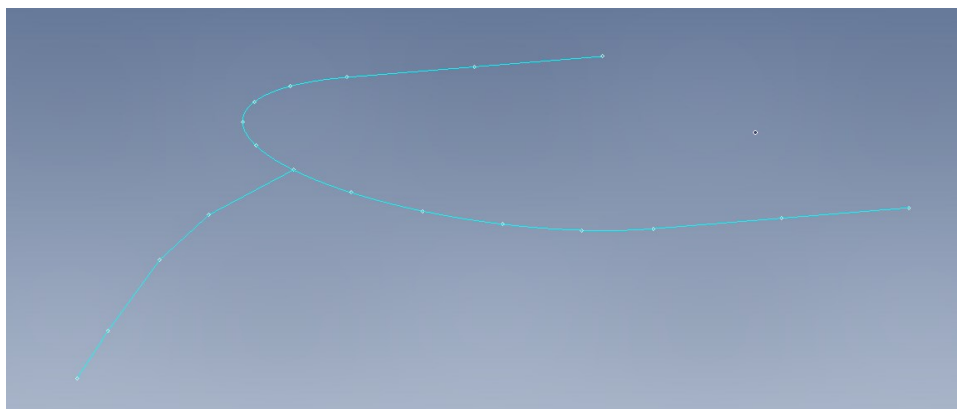


Slika 5.1 CAD model AFP-Halo konstrukcije

### 5.1.1. Model za analizu grednim konačnim elementima

S obzirom na to da su gredni konačni elementi jednodimenzionalni oni se primjenjuju na linije u Femapu. Zbog toga je cilj napraviti model koji sadržava samo točke i linije. Zbog korištenja grednih elemenata uvedena su određena pojednostavljenja. Nisu posebno modelirani stražnji oslonci AFP-Halo konstrukcije nego je samo produžen glavni obruč do ravnine u kojoj bi se stražnji oslonci montirali na šasiju. Na taj način se osigurava isto mjesto oslonca. S prednje strane konstrukcije je zamišljeno da gredni element počinje u točki koja inače predstavlja središte provrta kroz koji prolazi osovina na koju se cijela konstrukcija oslanja.

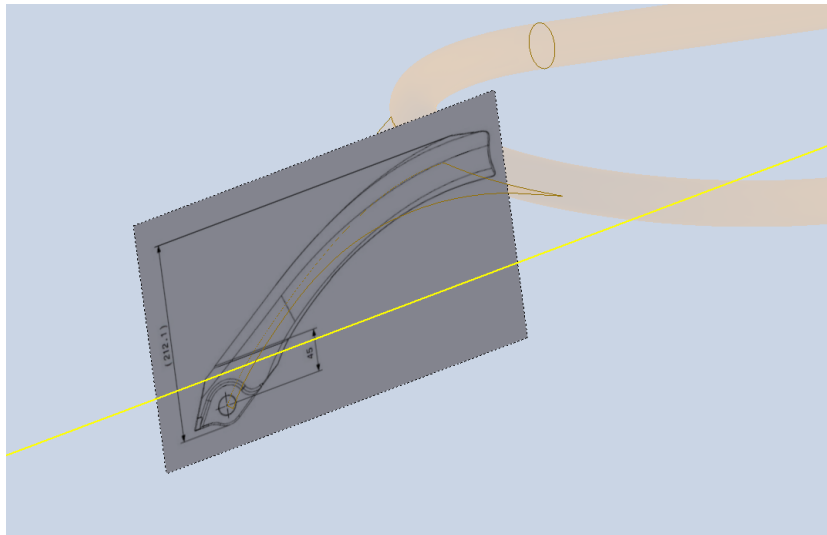
Za početak je u Autodesku Inventoru modeliran samo glavni obruč koji je dodatno produžen kako je prethodno spomenuto te je uvezen u Femap u .step formatu. Budući da je glavni obruč cijevna konstrukcija s naredbom *Geometry – Curve – Centerline* u Femapu se dobiva krivulja kroz središte cijevi. Sada se još kreiraju 4 točke koje aproksimiraju središnju liniju bočnog poprečnog presjeka V-spojnice. Koordinate tih točaka su približne i dobivene pomoću potpunog CAD modela cijele konstrukcije. Na slici 5.2 prikazan je gotov linijski model u Femapu.



Slika 5.2 Linijski model za analizu grednim elementima

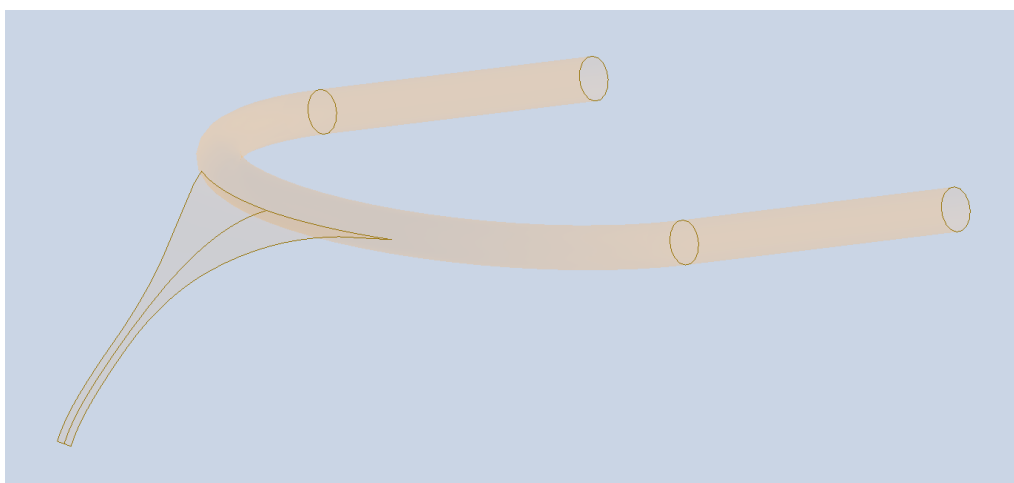
### 5.1.2. Model za analizu površinskim konačnim elementima

Površinski elementi su dvodimenzionalni te, kako im samo ime govori, oni se primjenjuju na površine. Zbog toga je za analizu s ovakvim tipom konačnih elemenata potrebno izraditi model od površina za što je također korišten Autodesk Inventor i dimenzije iz tehničkog pravilnika Formule E. S obzirom da nema navedenih svih dimenzija korištena je tehnika ubacivanje crteža u *Sketch* i prema tome aproksimativna izrada značajki što je prikazano na Slici 5.3.



Slika 5.3 Ubacivanje slike u Sketch za lakšu aproksimaciju oblika i dimenzija

Ovakav model izrađen samo od površina, Slika 5.4, se direktno ubacuje u Femap u .step formatu. Model je napravljen na način da su točke koje predstavljaju središta kružnica na stražnjem dijelu modela na istom mjestu kao i točke koje su bile oslonci umjesto stražnjih nosača u grednom modelu. S prednje strane oslonac je sad modeliran ko jedna dužina koja predstavlja os provrta za prednje fiksiranje konstrukcije.



Slika 5.4 Površinski model AFP-Halo

## 5.2. Opis i definiranje ponašanja materijala

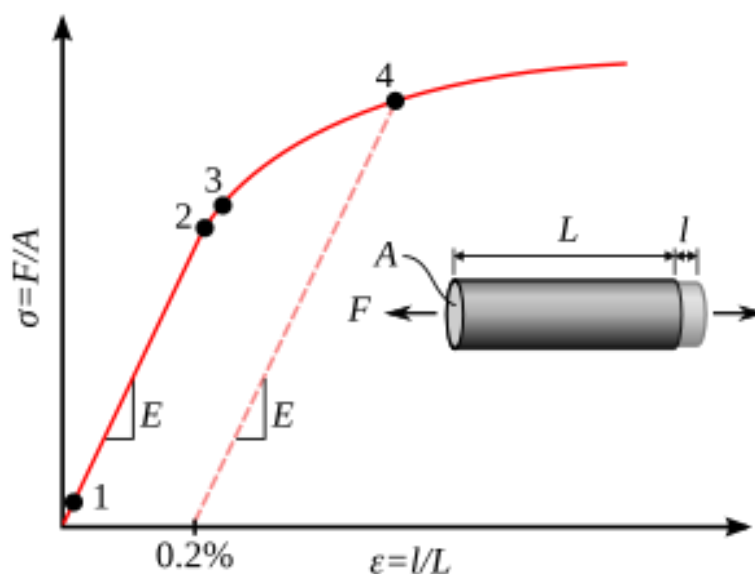
Materijal koji je izabran za odrađivanje analize u ovom radu je niskougljični legirani čelik 15CrMoV6. Glavni legirni elementi su krom, molibden i vanadij. Ovaj čelik je izvrstan za izradu AFP-Halo konstrukcije jer posjeduje dobru kombinaciju žilavosti, čvrstoće i zavarljivosti. Karakteristike materijala ostaju vrlo slične čak i nakon zavarivanja pa je stoga vrlo podoban za izradu zavarenih konstrukcija kao što je i AFP-Halo. Visoka čvrstoća i dobra žilavost su također važne karakteristike jer omogućuju konstrukciji da pretrpi velika opterećenja bez loma. Važne karakteristike materijala koje će se dalje koristiti u radu za definiranje materijala u modelu i provjeru analize dane su u Tablici 5.1. [16, 17]

Tablica 5.1 Karakteristike materijala 15CrMoV6

Čelik	Modul elastičnosti E [MPa]	Gustoća $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Poissonov faktor $\nu$	Granica elastičnosti [MPa]	Vlačna čvrstoća $\sigma_M$ [MPa]
15CrMoV6	$210 \cdot 10^3$	7800	0,3	930	1080-1280

### 5.2.1. Dijagram naprezanje-deformacija za čelik 15CrMoV6

Dijagram naprezanje-deformacija opisuje ponašanje materijala pod opterećenjem, odnosno dovodi u vezu vrijednosti naprezanja  $\sigma$  i deformacije  $\epsilon$ . Dijagram se zasebno izrađuje za svaki pojedini materijal prema rezultatima vlačnog ispitivanja na kidalici kako je prikazano na Slici 5.5. Uz izradu dijagrama računaju se vrijednosti modula elastičnosti, Poissonovog faktora, granice elastičnosti i vlačne čvrstoće. [18, 19]



Slika 5.5 Općeniti dijagram naprezanje-deformacija [18]

Svaki se dijagram dijeli na dva područja, elastično i plastično. Ponašanje materijala u elastičnom dijelu opisana je Hookeovim zakonom koji govori da su naprezanja i deformacije u linearnom odnosu, a na dijagramu se takva veza očituje kao pravac. Nagib tog pravca naziva se modul elastičnosti. Granica elastičnosti je najveće naprezanje kod kojeg je se materijal i dalje ponaša elastično. Daljnjim porastom naprezanja ulazi se u područje plastičnih deformacija koje su trajne za razliku od elastičnih. [19]

Kada se pri rješavanju problema javljaju naprezanja veća od granice elastičnosti govori se o materijalnoj nelinearnosti što znači da se treba provesti nelinearna analiza. Za izvršenje nelinearne analize u Femapu potrebno je definirati linearne i nelinearne karakteristike materijala. Zbog svoje jednostavnosti, ali i dovoljno dobre preciznosti za provođenje analize u ovom radu se koristi elasto-plastični model ponašanja materijala. Naziva se još i bilinearni model jer aproksimira odnos naprezanja i deformacija kao linearan u elastičnom, ali i u plastičnom području. U Femapu je stoga potrebno definirati modul elastičnosti, koji opisuje nagib pravca u elastičnom području, modul plastičnosti, koji opisuje nagib pravca u plastičnom području, Poissonov faktor i granicu elastičnosti. [20]

Modul plastičnosti  $H$  je izračunat kao nagib pravca opisanog s dvije točke. Prva točka je granica elastičnosti čija se deformacija računa po Hookeovom zakonu, a druga točka je vlačna čvrstoća, koja predstavlja najveće naprezanje koje materijal može dostići prije loma. Za čelik 15CrMoV6 pucanje se otprilike događa na deformaciji 0,1. [17, 20]

$$\varepsilon_E = \frac{\sigma_E}{E} = \frac{930 \cdot 10^6 \text{ Pa}}{210 \cdot 10^9 \text{ Pa}} = 0,00443 \quad 5.1)$$

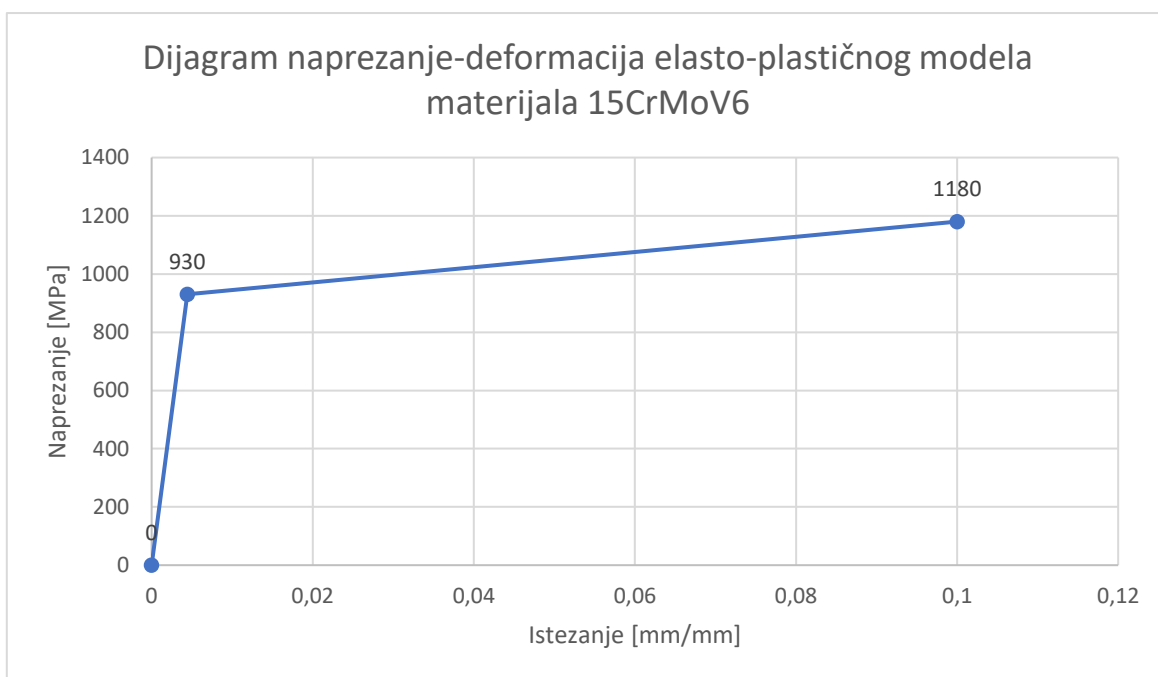
Gdje je:

- $\varepsilon_E$  – deformacija pri naprezanju vrijednosti granice elastičnosti
- $\sigma_E$  – granica elastičnosti

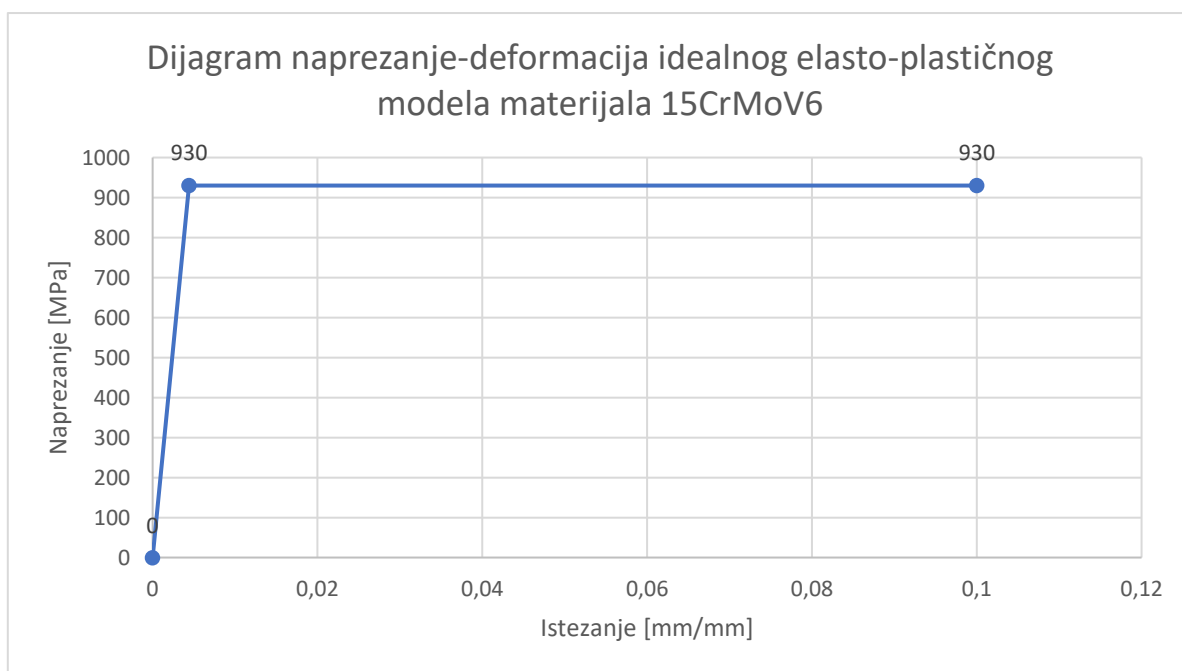
$$H = \frac{1180 \cdot 10^6 - 930 \cdot 10^6}{0,1 - 0,00443} = 2,62 \cdot 10^9 \quad 5.2)$$

Zajedno s podacima iz Tablice 5.1, kreiran je dijagram naprezanje-istezanje prikazan na Slici 5.6 kojim će se opisati ponašanje čelika 15CrMoV6 u Femapu kao bilinearno. Ovakav model

materijala će se koristiti u nelinearnoj analizi s pločastim konačnim elementima jer opisivanje grednih konačnih elemenata ovakvim bilinearnim modelom nije podržano. Gredni elementi se mogu opisati idealnim elasto-plastičnim modelom što znači da modul plastičnosti  $H$  iznosi nula, odnosno kada naprezanje naraste do granice elastičnosti neće se više povećavati, ali deformacija će i dalje rasti. Na grafu se to očituje na način da je pravac koji opisuje plastično područje horizontalan što se može vidjeti na Slici 5.7. [20, 21]



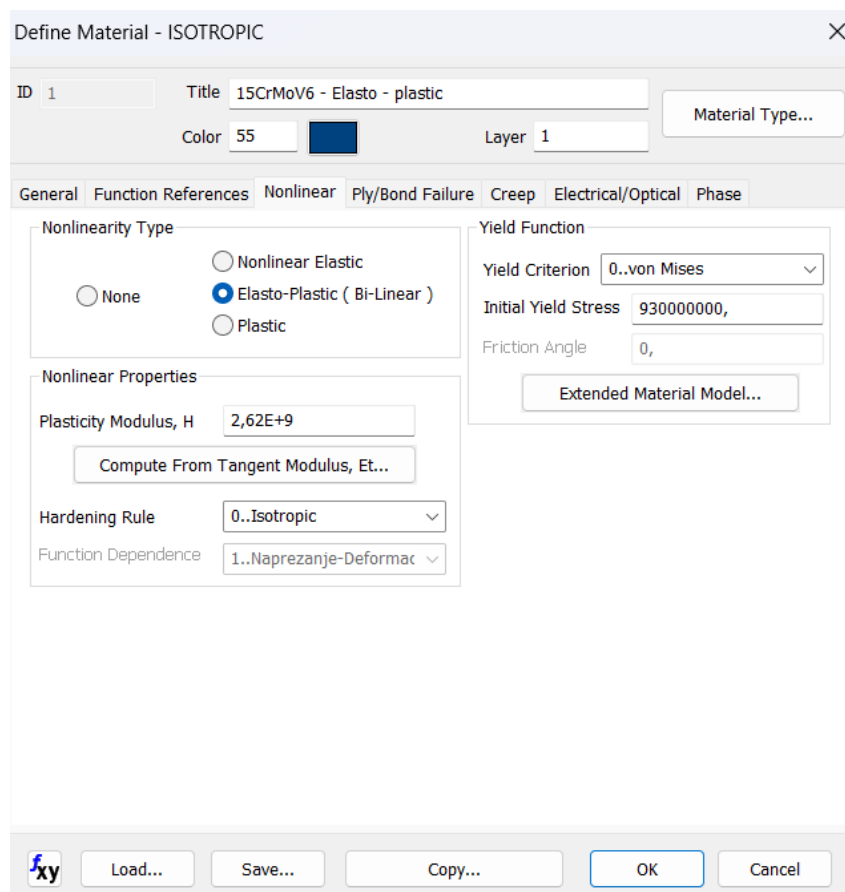
Slika 5.6 Dijagram naprezanje-deformacija kojim se opisuje materijal u analizi s plošnim konačnim elementima



Slika 5.7 Dijagram naprezanje-deformacija kojim se opisuje materijal u analizi s grednim konačnim elementima



U Femapu se materijal definira naredbom *Model – Material*, a osim unosa vrijednosti modula elastičnosti i Poissonovog faktora u kartici *General*, u kartici *Nonlinear* se odabire model *Elasto-Plastic (Bi-linear)* i zatim se upisuju vrijednosti modula plastičnosti granice elastičnosti kao što je prikazano na Slici 7.4. Na toj je slici prikazan unos vrijednosti za definiranje materijala kod analize s pločastim konačnim elementima dok se za gredne elemente modul plastičnosti ostavlja na vrijednosti 0.



Slika 5.8 Prozor za definiranje nelinearnosti materijala u programu Femap

### 5.3. Omreživanje modela

Nakon definiranja materijala u Femapu, slijedeći korak je diskretizacija modela, odnosno stvaranje mreže konačnih elemenata. Da bi se mogla stvoriti mreža konačnih elemenata potrebno je definirati značajke konačnih elemenata koji će se koristiti u analizi, u Femapu se za definiciju značajki koristi naredba *Model – Property*, a zatim se klikom na *Elem/Property Type* odabire tip konačnog elementa čija se značajka želi definirati. Kod definiranja svake od značajki potrebno je odabrati prethodno definirani materijal.

### 5.3.1. Omreživanje modela grednim konačnim elementima

Od mogućih vrsta grednih elemenata u analizi će se koristiti CBEAM gredni elementi jer omogućuju definiranje promjenjivog poprečnog presjeka što je važno za diskretizaciju V-spojnice. Korištenjem Autodesk Inventora i CAD modela cijele konstrukcije prikazanog na Slici 6.1. određeno je pet poprečnih presjeka, dakle V-spojnica je podijeljena na 4 konačna elementa, a u svakom od presjeka se nalazi čvor. Jedan je poprečni presjek napravljen na udaljenosti 190 mm od prednjeg oslonca jer se na tom mjestu treba definirati opterećenje za kvazistatički test 1.

Za svaki poprečni presjek izmjerene su dimenzije širine i visine koje su prikazane u Tablici 5.2 koje su onda upisane u Femap. S obzirom na to da su svi poprečni presjeci različitih dimenzija potrebno je uključiti opciju *Tapered beam* koja omogućuje definiciju početnog i krajnjeg presjeka elementa. Prvi element V-spojnice je čisto pravokutan pa je zadan kao *Rectangular Bar*, dok su ostala tri definirana kao *Trapezoidal Bar* jer imaju poprečni presjek oblika trapeza.

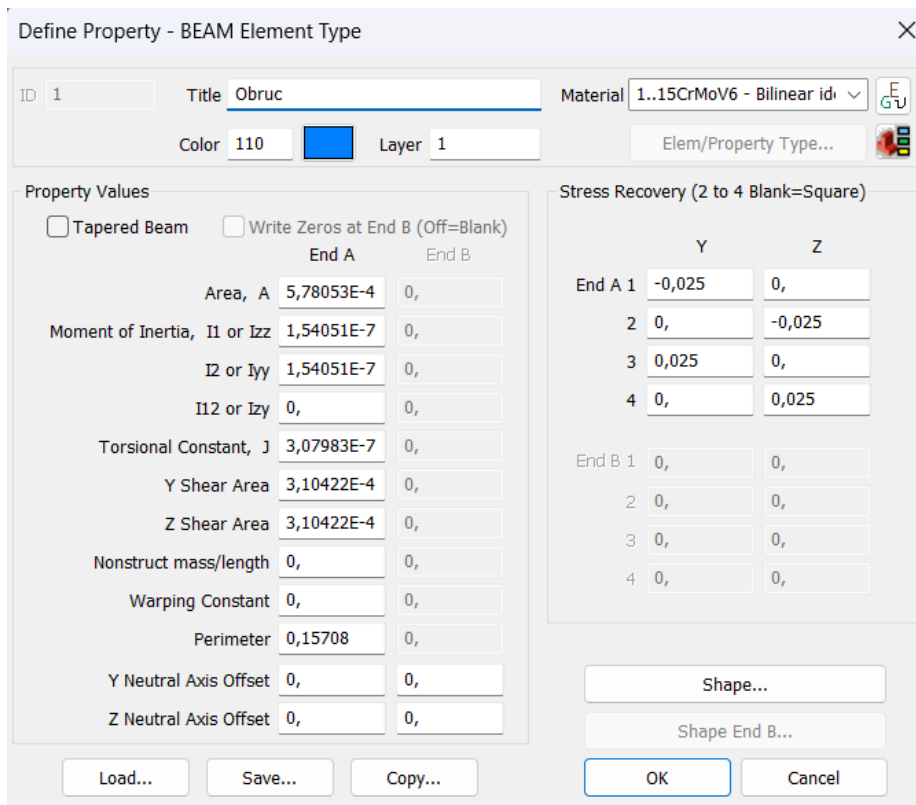
Tablica 5.2 Dimenzije presjeka V-spojnice

Oblik presjeka	Visina [mm]	Širina na vrhu [mm]	Širina na dnu [mm]
Pravokutnik	58	22	-
Pravokutnik	60,7	22	-
Trapez	48,25	22	34
Trapez	49	75	95
Trapez	49,85	280	295

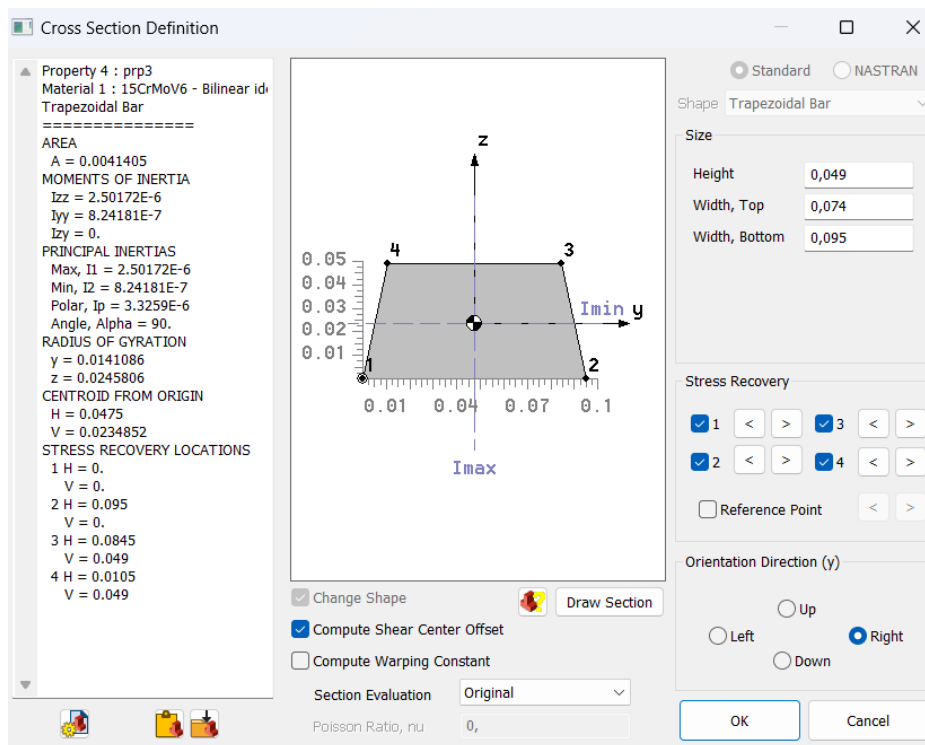
Značajka koja opisuje glavni obruč je definirana kao *Circular Tube* odnosno kružna cijev poprečnog presjeka 50 mm i debljine stijenke 4 mm.

Naredbom *Mesh – Mesh Control – Size on Curve* na svakoj se dužini koja aproksimira oblik V-spojnice postavlja broj elemenata na 1. Istom naredbom se na zakrivljeni dio glavnog obruča postavlja 12 elemenata, a na svaki od ravnih dijelova po 3. Zatim se svaka značajka konačnog elementa primjenjuje naredbom *Mesh – Geometry – Curve* na njoj predviđeno mjesto da bi se formirala mreža. Ukupno se mreža sastoji od 22 gredna elementa i 23 čvora. Glavni obruč bi se mogao diskretizirati i s manje elemenata i rezultati naprezanja se ne bi znatno promijenili, ali se s

većim brojem čvorova i elemenata može bolje vizualizirati deformirani oblik. Također ovakvom podjelom se na glavnom obruču dobiva čvor na mjestu koje je otprilike na mjestu gdje se treba primijeniti opterećenje za kvazistatički test 2.



Slika 5.9 Prozor za definiranje značajki



Slika 5.10 Prozor za definiranje dimenzija poprečnog presjeka

### 5.3.2. Omreživanje modela pločastim konačnim elementima

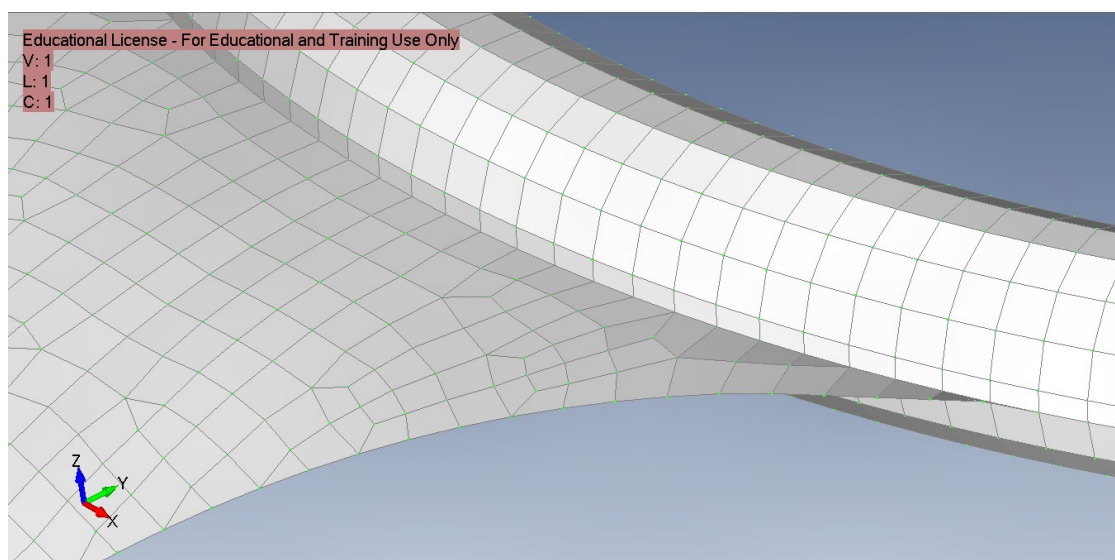
U Femap je uvezen prethodno izrađen model od površina prikazan na slici te je korišten *Meshing Toolbox* za uređivanje krivulja na uvezenoj geometriji.

Kod definiranja značajki konačnih elemenata odabrani su PLATE elementi te su kreirani pločasti elementi dviju različitih značajki, jedna s debljinom 4 mm jer je to debljina stijenke cijevi i jedna s debljinom 50 mm što je aproksimirana srednja debljina V-spojnice.

Na površine koje predstavljaju glavni obruč postavljena je veličina konačnih elemenata na 0,01 naredbom *Model – Mesh - Mesh Control - Size on Surface*, a naredbom *Mesh – Geometry – Curve* primijenjeni su kvadratni pločasti elementi debljine 4 mm. Na analogan način je na V-spojnicu postavljena mreža iste veličine, ali su primijenjeni pločasti elementi debljine 50 mm.

Iako su elementi postavljeni na jednaku veličinu bilo je potrebno ručno spojiti odgovarajuće čvorove između glavnog obruča i V-spojnice naredbom *Custom-tools – Meshing – Move merge nodes*. Potom je još bilo potrebno spojiti čvorove koji se poklapaju naredbom *Tools - Check coincident nodes – Merge coincident*. (Slika 5.11)

Sveukupno je dobiveno 2980 elemenata povezanih s 3016 čvorova.



Slika 5.11 Mjesto na kojem je bilo potrebno spojiti čvorove

## 5.4. Opterećenja i rubni uvjeti

Na oba modela se postavljaju jednaki rubni uvjeti na ista mjesta samo na drugačiji način s obzirom na to da jedan model koristi linijske, a drugi površinske konačne elemente. Kod modela s grednim elementima, oslonci se primjenjuju točke naredbom *Model – Constraint – Point*, dok se kod modela s površinskim elementima oslonci primjenjuju na krivulje, dakle naredba je *Model – Constraint – Curve*. Sva tri oslonca su definirana u istom setu.

Stražnja dva nosača definiraju se kao uklještenja odnosno *Fixed* oslonci. Za prednji oslonac se ručno odaberu sve translacije i rotacije koje su onemogućene, što za ovaj oslonac znači da se samo rotacija oko x-osi modela ostavlja kao moguća zbog dizajna konstrukcije koji omogućava takvo gibanje.

Za definiranje opterećenja koriste se dva seta opterećenja, jedan za opterećenje opisano kvazistatičkim testom 1, a drugi za opterećenje opisano kvazistatičkim testom 2. Za test 1 koristi se sila izračunata jednadžbom 3.1, a zadana je kao zbroj dviju sila. Za test 2 definira se proizvoljna sila  $F_{uk2}$  veća od 125 kN kao zbroj dviju sila u zadanom smjeru i omjeru 1:1.12. Vrijednosti tih sila su:

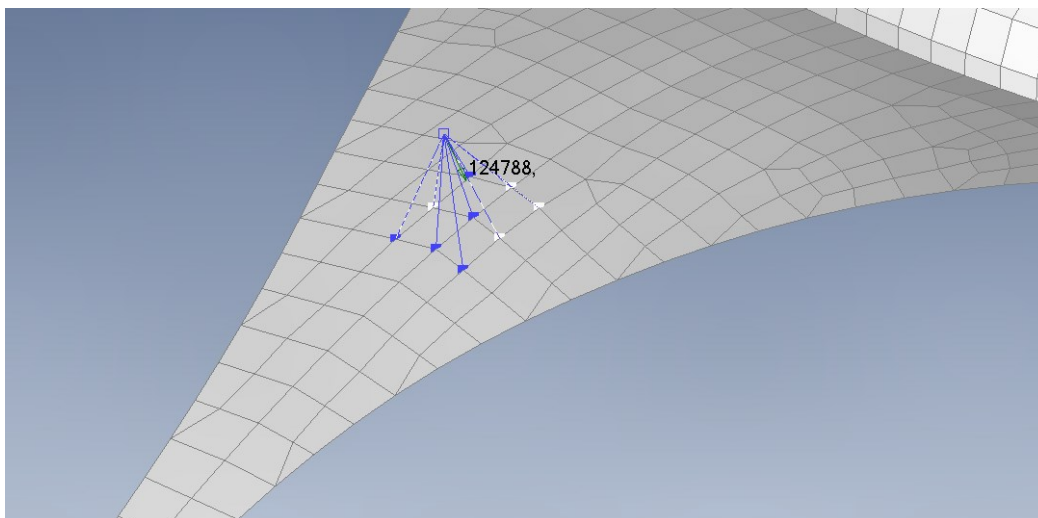
- 112 kN s bočne strane prema unutra
- 100 kN prema unatrag

$$F_{uk2} = \sqrt{112^2 + 100^2} = 150,147 \text{ kN} \quad (5.3)$$

U oba su modela vrijednosti opterećenja jednaka. Kod modela s grednim elementima, opterećenja su postavljena u čvorove koji su prethodno definirani na način da se otprilike nalaze na mjestu gdje sila treba biti primijenjena. Nije moguće definirati opterećenje na točnom mjestu zbog aproksimacije oblika konstrukcije linijama.

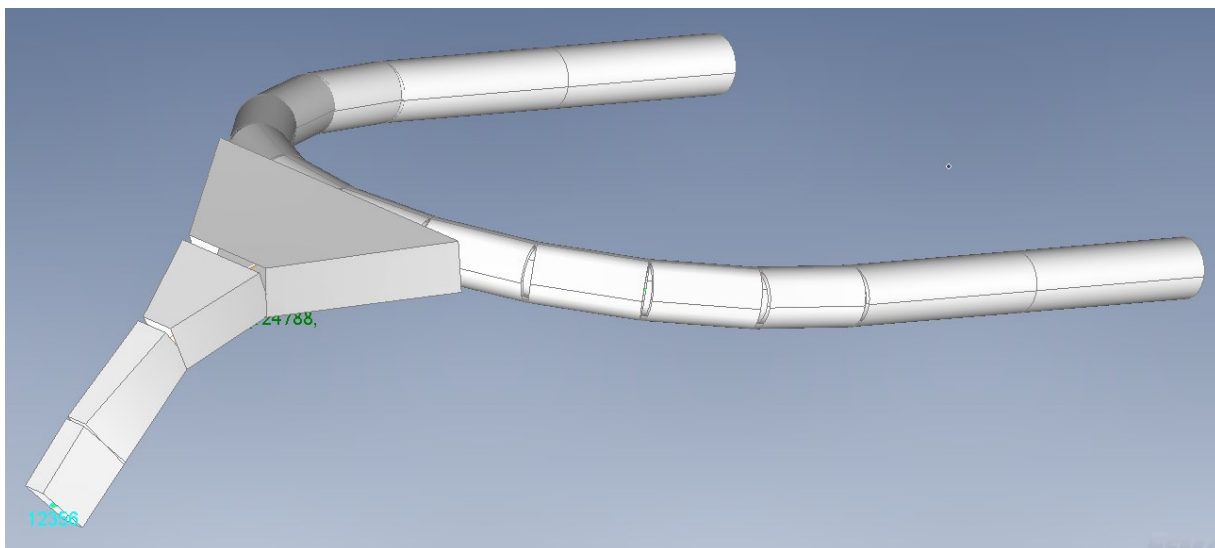
Za postavljanje opterećenja u modelu s pločastim konačnim elementima definirana su dva RBE3 kruta elementa točno na koordinatama zadanim u normi FIA 8869-2018. Zatim su ti elementi spojeni sa nekoliko čvorova u svojoj blizini. Time se omogućava da se opterećenje, koje se zadaje u RBE3 čvoru, dijeli jednoliko na sve čvorovi na koje je povezan taj RBE3 čvor, što se može vidjeti na Slici 5.12. Tako se ujedno i dobiva realniji oblik opterećenja jer se u stvarnosti test vrši

s valjkom promjera 150 mm koji ne dira konstrukciju samo u jednoj točki kod primjene opterećenja.

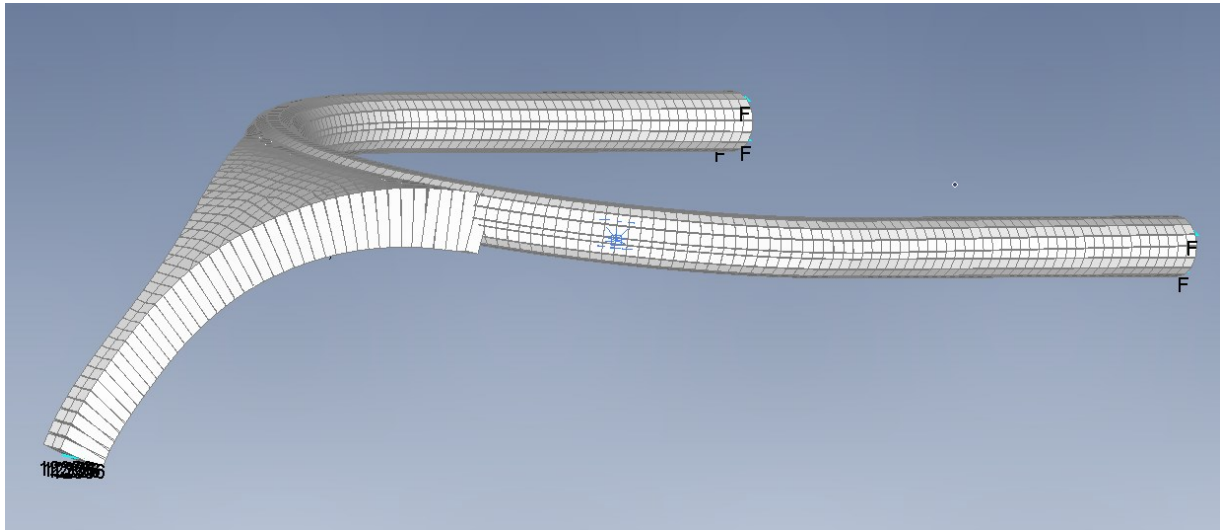


Slika 5.12 RBE3 element predstavlja mjesto opterećenja

Na Slikama 5.13 i 5.14 su prikazani omreženi modeli s definiranim silama i osloncima i uključenom opcijom za vizualizaciju presjeka.



Slika 5.13 Model definiran s grednim konačnim elementima



Slika 5.14 Model definiran s pločastim konačnim elementima

Na svakom modelu je definiran još jedan dodatan load set na mjestu opterećenja istom kao i u testu 1 koji služi kao pomoćni slučaj koji simulira rasterećenje te je zbog toga definiran sa silom manjom od 0,01 N.

### 5.5. Postavke analize

Kao što je prije spomenuto očekuju se velika naprezanja i prelazak materijala u nelinearno područje što odmah stvara zahtjev za korištenjem nelinearne analize. U Femapu se analiza postavlja naredbom *Model – Analysis – New*. Tada se kao tip analize odabire *Nonlinear static*, odnosno nelinearna statička analiza, koja u svom proračunu uzima u obzir materijalnu nelinearnost. Kao rješavač analize se odabire Simcenter Nastran. Postavljene su dvije analize, jedna za svaki test, s tim da su oslonci u obje analize jednaki, samo se mijenja set opterećenja. U oba modela su analize postavljene na jednak način. [21]

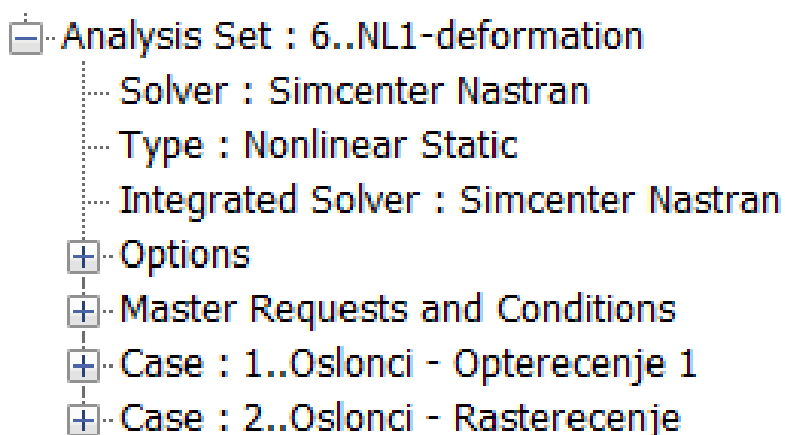
U prvoj analizi se traži provjera plastične deformacije, pa se stoga u postavkama te analize definiraju dva slučaja, *Case*, od kojih je prvi onaj s opterećenjem testa 1 prema normi, a drugi je pomoćni slučaj koji simulira rasterećenje. Za drugi test su sve postavke jednake samo se opterećenje mijenja u ono koje odgovara testu 2.

U postavkama obje analize se u prozoru Bulk data options isključuje LGDISP opcija koja uzima u obzir geometrijsku nelinearnost, odnosno velike pomake što znači da sila s vremenom mijenja smjer jer se geometrija konstrukcije mijenja. Iako će doći do dosta velikih pomaka, ova opcija se

isključuje jer je u normi zadano da se opterećenje cilindrom primjenjuje na istom pravcu tijekom vremena izvođenja testova.

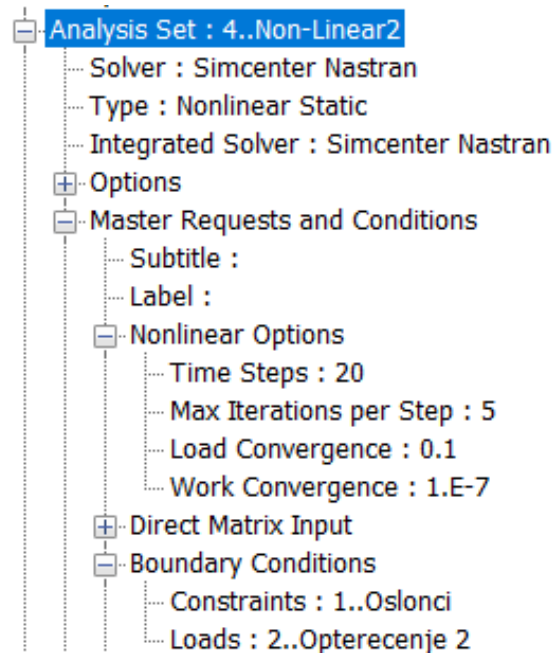
Za svaki pojedini slučaj analize se u prozoru *Nonlinear Analysis* postavlja broj inkremenata na 20, a broj iteracija po koraku na 5. To znači da se problem rješava u koracima, maksimalna vrijednost opterećenja se podijeli na 20 dijelova te se postepeno rješava kako se izvodi proračun u svakom koraku s ograničenjem na 5 iteracija po koraku. Ako se prijeđe to ograničenje, analiza staje jer se ne može naći rješenje. U istom prozoru se *Output Control* postavlja na YES zato jer se tako dobivaju rješenja svakog koraka analize.

Analiza se pokreće klikom na gumb *Analyze*, a okvirni prikaz postavki dan je na Slikama 5.15 i 5.16.



Slika 5.15 Postavke nelinearne analize za test 1





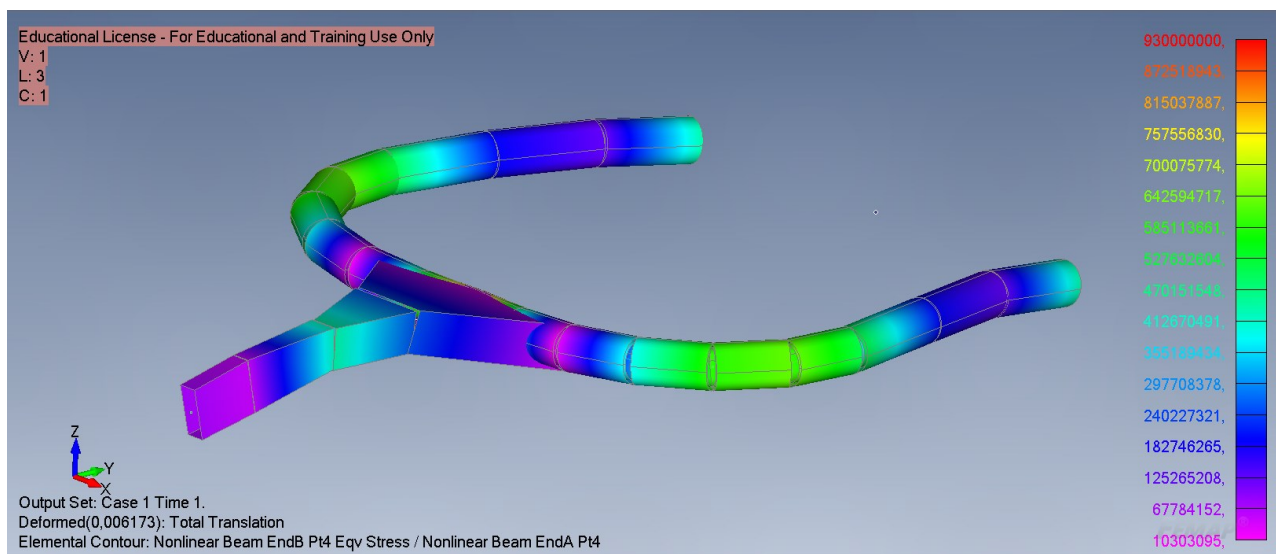
Slika 5.16 Postavke nelinearne analize za test 2

## 6. REZULTATI ANALIZE

Nakon pokretanja analize potrebno je pravilno interpretirati dobivene rezultate, kritički promisliti o pouzdanosti dobivenih rezultata i usporediti ih s kontrolnim vrijednostima što su u ovom slučaju zahtjevi opisani u normi FIA 8869-2018.

### 6.1. Rezultati analize provedene grednim konačnim elementima

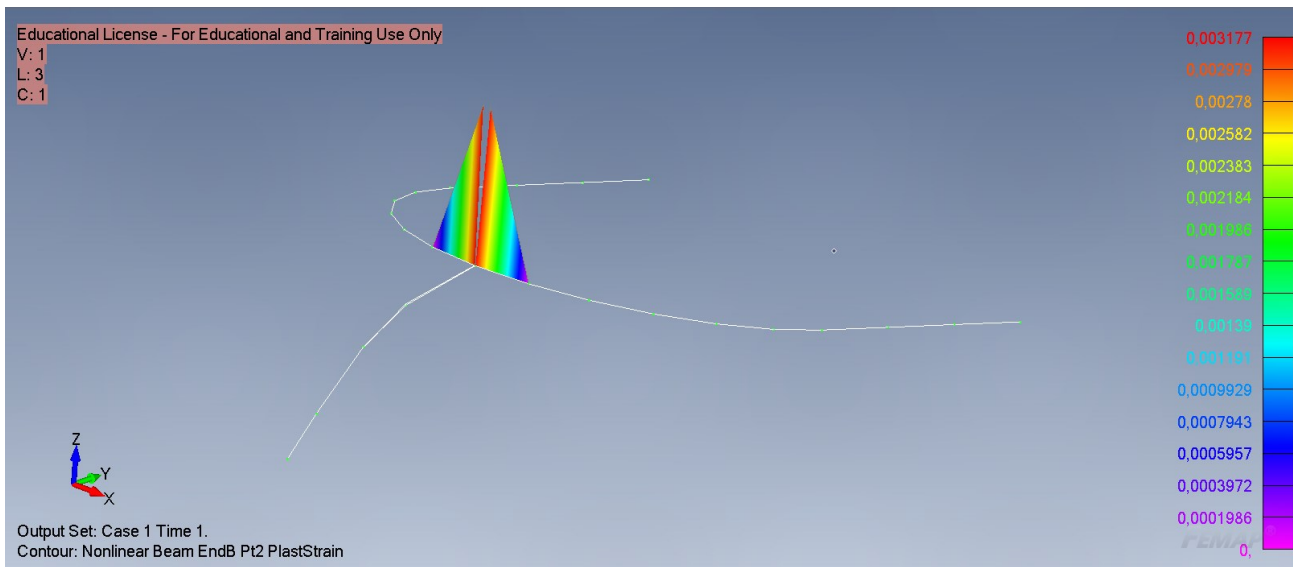
Provođenjem simulacije prvog kvazistatičkog testa, analiza je provedena u potpunosti i materijal je izdržao maksimalno opterećenje 125 kN bez loma što je prvi zahtjev ovog testa u normi. Slijedeća vrijednost koja treba biti zadovoljena je da je ukupni pomak konstrukcije u trenutku maksimalnog opterećenja manji od 17,5 mm, a pregledom rezultata dobiveni maksimalni pomak iznosi 6,173 mm. Pregledom deformiranog oblika konstrukcije pod opterećenjem može se zaključiti da je dobiven očekivan oblik s obzirom na opterećenje i rubne uvjete. Na Slici 6.1 je prikazan deformirani oblik konstrukcije s pomacima uvećanim 15 puta i bojama koje označavaju dobiveno naprezanje.



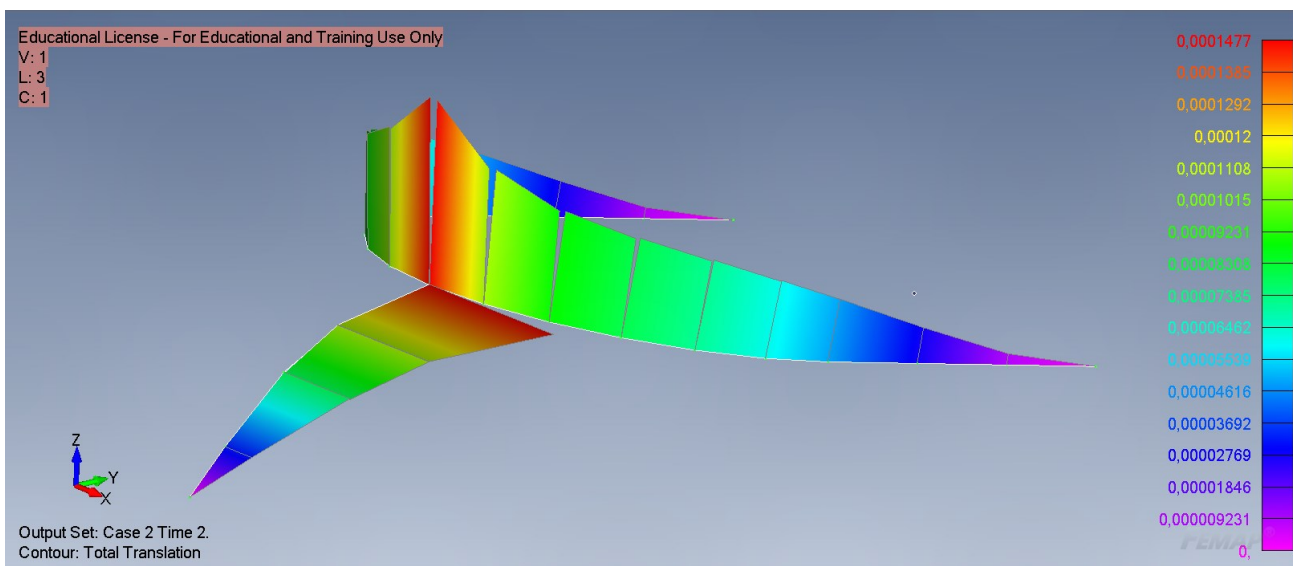
Slika 6.1 Deformirani oblik i maksimalna naprezanja modela s grednim elementima, test 1

Maksimalno dobiveno naprezanje iznosi 930 MPa što je jednako vrijednosti granice elastičnosti. S obzirom na to da je u ovom modelu materijal definiran kao idealno elasto-plastičan, naprezanje ne može biti veće od vrijednosti granice elastičnosti (Slika 6.1). Materijal je ušao u područje plastične deformacije na 90% ukupnog opterećenja. Maksimalna dobivena plastična deformacija iznosi 0,312% i javlja se na mjestima gdje je maksimalno naprezanje 930 MPa (Slika 6.2). Ukupni najveći pomak konstrukcije nakon rasterećenja, odnosno trajni pomak je 0,148 mm što znači da

konstrukcija zadovoljava i u ovom pogledu jer je traženo da pomak zbog plastične deformacije bude manji od 3 mm. (Slika 6.3)



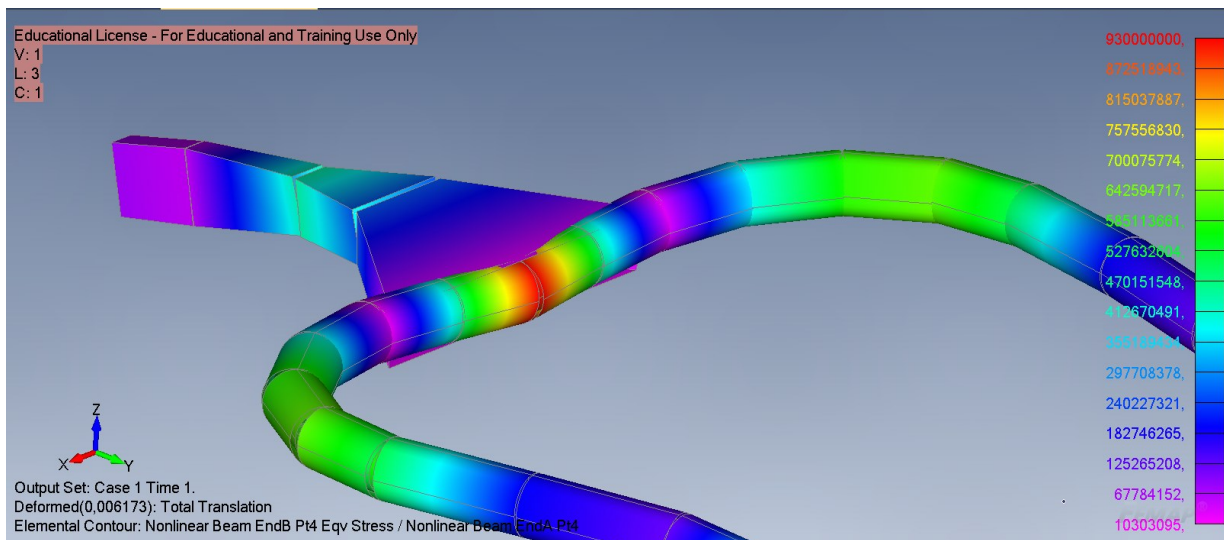
Slika 6.2 Mjesto pojave plastičnih deformacija na modelu s grednim elementima, test 1



Slika 6.3 Prikaz pomaka nakon rasterećenja konstrukcije

Maksimalno naprezanje se javlja u čvoru u kojem se spajaju V-spojnicica i glavni obruč. To se događa u ovom pojednostavljenom modelu s grednim elementima jer se svo opterećenje koje je nanoseno na V-spojnicicu prenosi na jedan čvor dok bi se u stvarnosti opterećenje ravnomjernije raspodijelilo po gornjem obruču (Slika 6.4). Zbog toga se može pretpostaviti da bi se u stvarnosti javila manja maksimalna naprezanja, ali treba uzeti u obzir da je ovo pojednostavljeni model u

kojem su poprečni presjeci V-spojnice potpuno ispunjeni dok u stvarnosti postoji nekoliko utora koji oslabljuju konstrukciju. Još jedan od faktora koji utječe na rezultate je i aproksimirano ponašanje materijala. U stvarnosti naprezanja i dalje rastu preko granice razvlačenja, a potom i deformacije ubrzano rastu što bi moglo rezultirati i većim ukupnim pomakom.



Slika 6.4 Koncentracija naprezanja na modelu s grednim elementima, test 1

Provođenjem drugog kvazistatičkog testa dolazi do greške prilikom proračuna, međutim u ovom slučaju to znači da se konstrukcija slomila prije nego je na nju naneseo potpuno zadano opterećenje. Konstrukcija je pukla na 70,47% zadanog opterećenja pa je potrebno provjeriti je li konstrukcija izdržala opterećenje od 125 kN prije pucanja kako je traženo u normi.

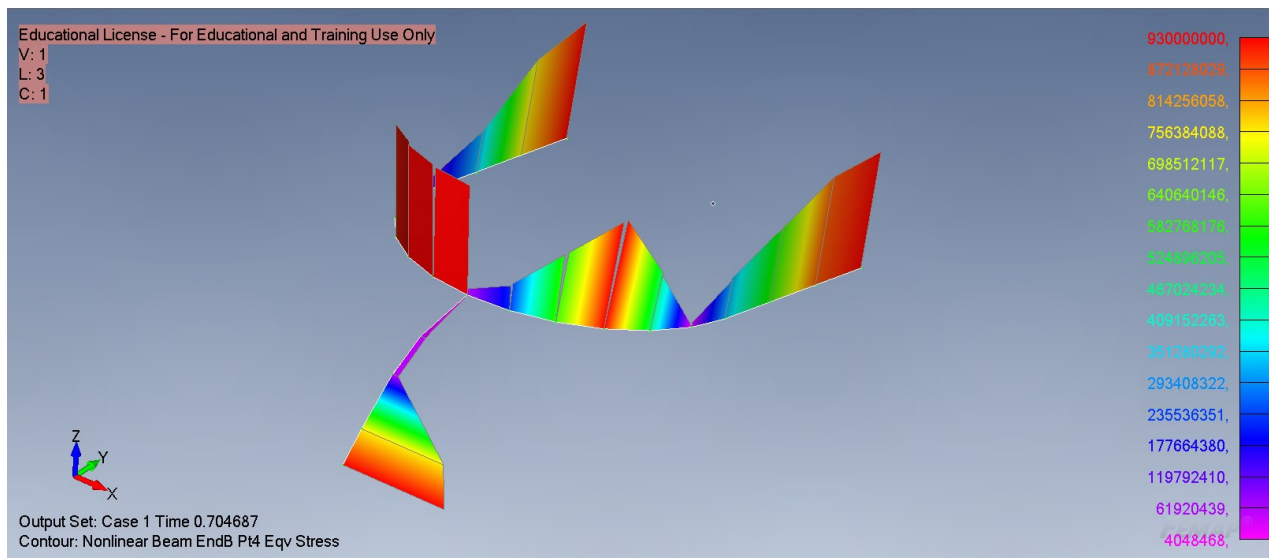
$$0,7047 \cdot F_{uk2} > 125 \text{ kN}$$

$$0,7047 \cdot 150,147 \text{ kN} > 125 \text{ kN}$$

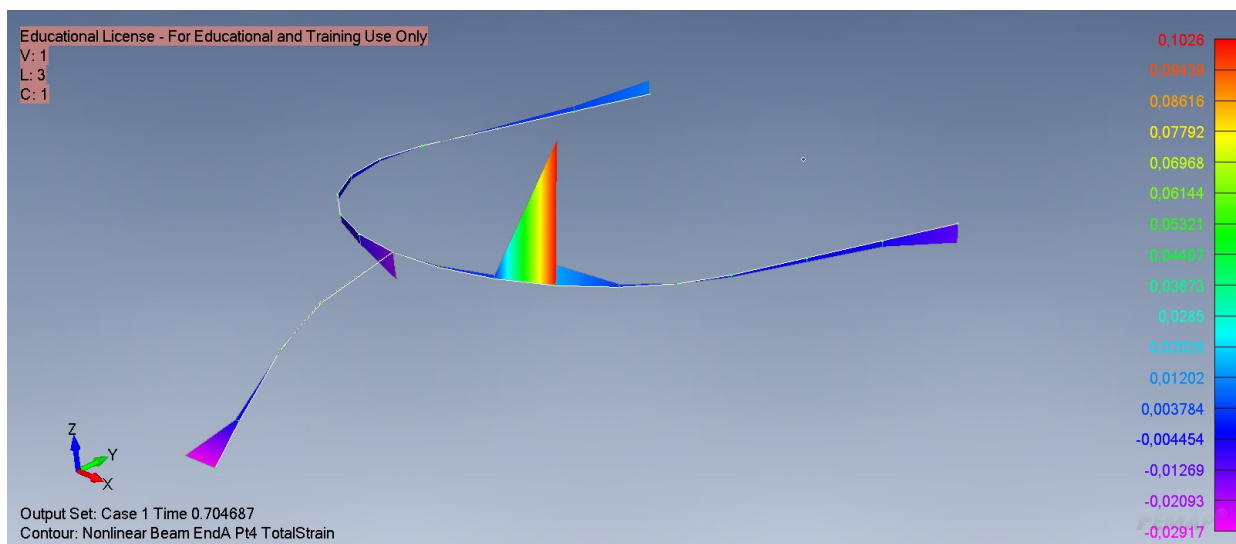
$$105,81 \text{ kN} < 125 \text{ kN}$$

Uvjet nije zadovoljen jer je konstrukcija pukla pri opterećenju 105,81 kN. Daljnjom analizom rezultata može se vidjeti da se plastična naprezanja javljaju na samo 45% zadanog opterećenja, što dovodi do velikih deformacija. Maksimalno naprezanje i dalje iznosi 930 MPa i ne može biti veće zbog pojednostavljene definicije materijala pa tako neće doći do pucanja zbog naprezanja većeg od vlačne čvrstoće (Slika 6.5). Analizom rezultata može se iščitati sa Slike 6.6 da je ukupna deformacija prije pucanja 10,26%, a budući da je to iznad 10% materijal 15CrMoV6 puca. [17]

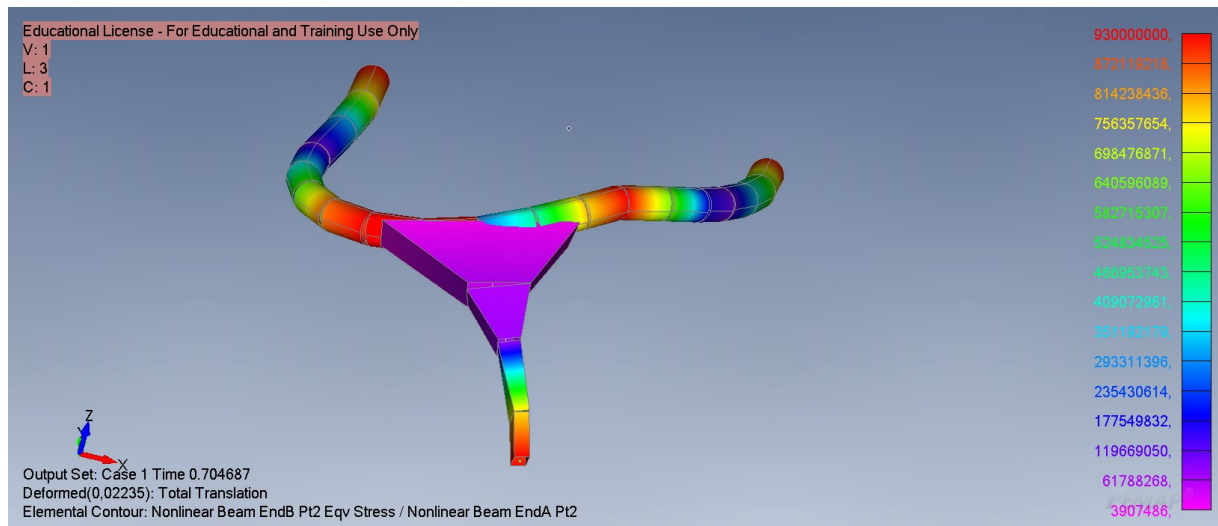
Netom prije pucanja maksimalni pomak je iznosio 22,35 mm što jest manje od traženih 45 mm, ali je konstrukcija pukla prije nego je postignuto opterećenje 125 kN pa se stoga može zaključiti da ovakav model s grednim konačnim elementima ne zadovoljava sve tražene uvjete. (Slika 6.7)



Slika 6.5 Maksimalno naprezanje modela s grednim elementima, test 2



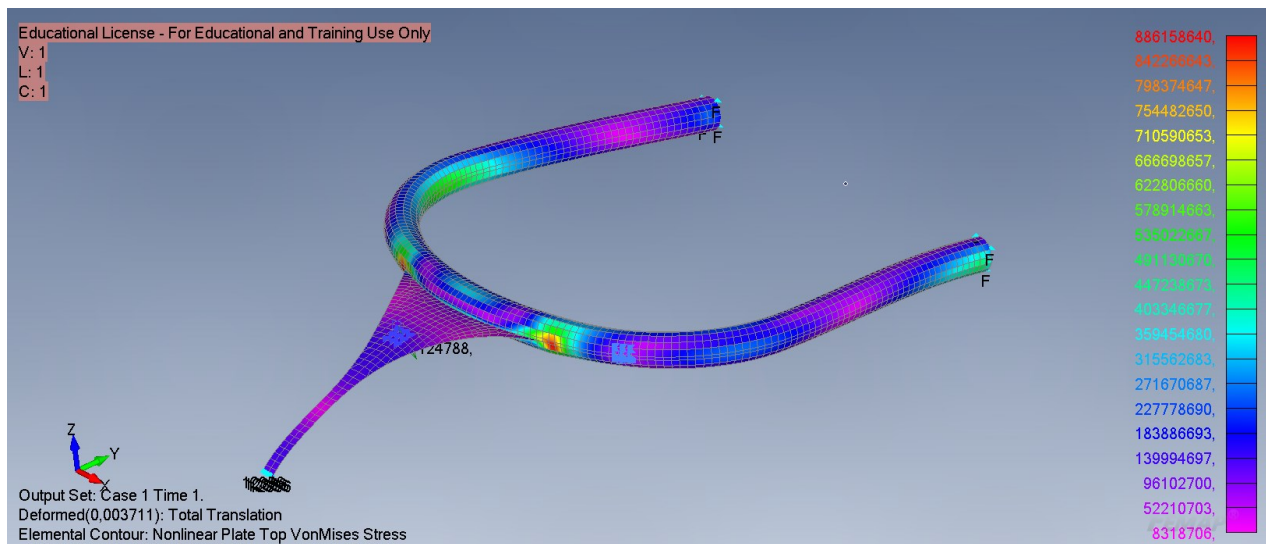
Slika 6.6 Ukupna deformacija modela s grednim elementima, test 2



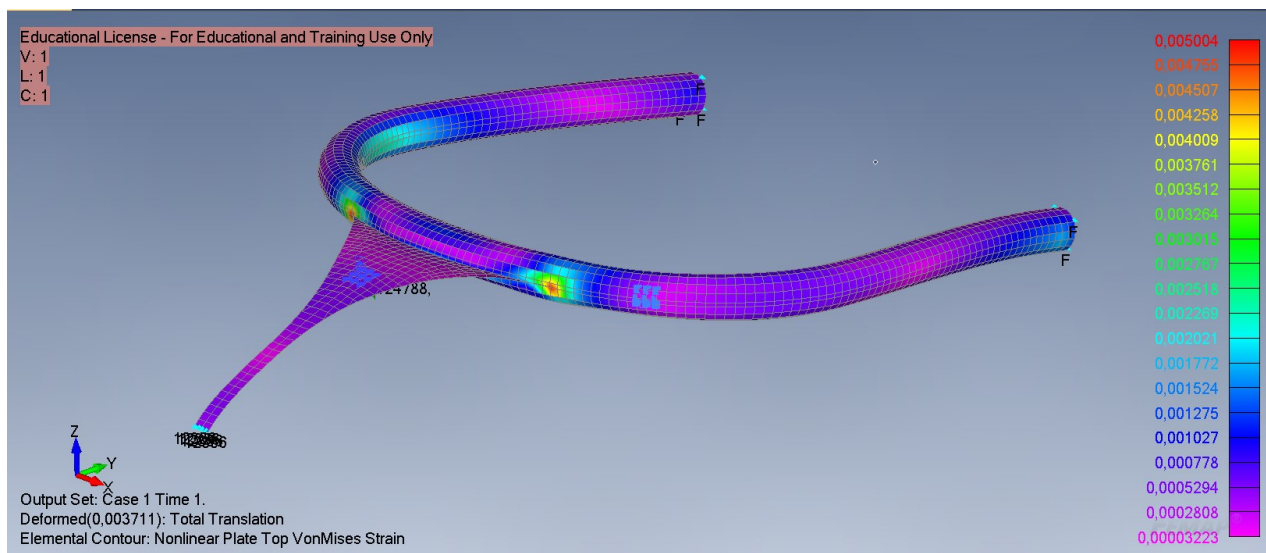
Slika 6.7 Prikaz pomaka modela s grednim elementima prije pucanja, test 2

## 6.1. Rezultati analize provedene pločastim konačnim elementima

Za prvi test dobiven je deformirani oblik sličan kao i u analizi s grednim elementima, ali s kod pločastih bolje može vidjeti gdje se glavni obruč i na koji način deformira. Konstrukcija je izdržala puno opterećenje bez loma. Maksimalno dobiveno naprezanje je 886,16 MPa, što je manje od granice elastičnosti i zaključuje se da je tijekom ove analize konstrukcija ostala u elastičnom području (Slika 6.8). To znači da nema trajne deformacije i te je automatski zadovoljen uvjet koji traži plastičnu deformaciju manju od 3 mm. Maksimalna ukupna deformacija iznosi 0,5% što je prikazano na Slici 6.9. Sukladno s manjim naprezanjem dobiven je i manji najveći pomak koji iznosi 3,711 mm tako da su svi zahtjevi testa 1 ispunjeni.



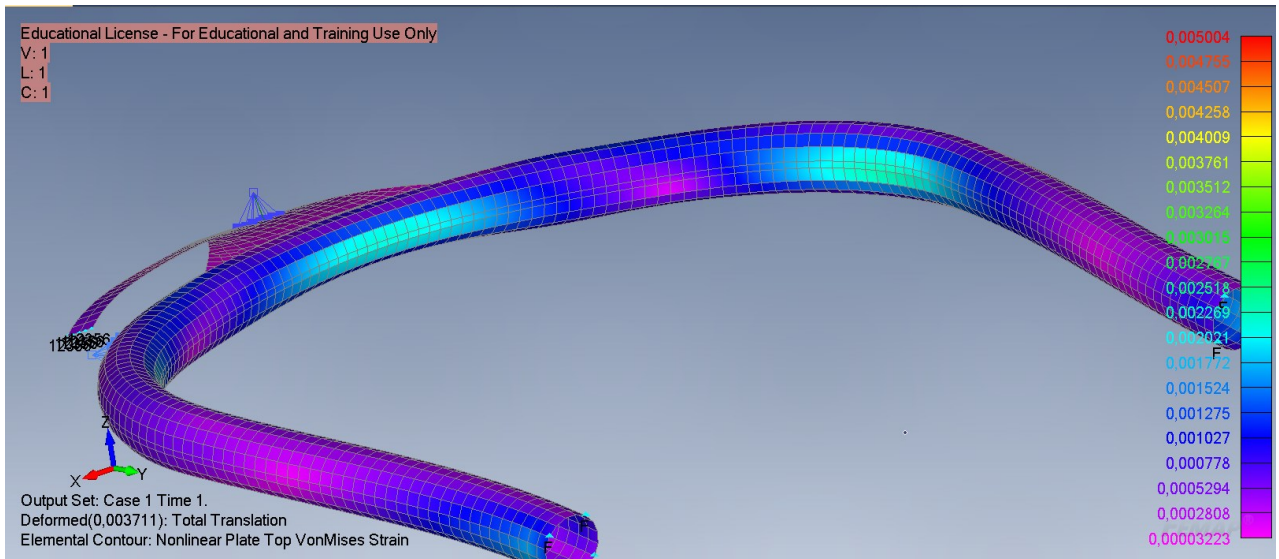
Slika 6.8 Deformirani oblik i maksimalna naprezanja modela s pločastim elementima, test 1



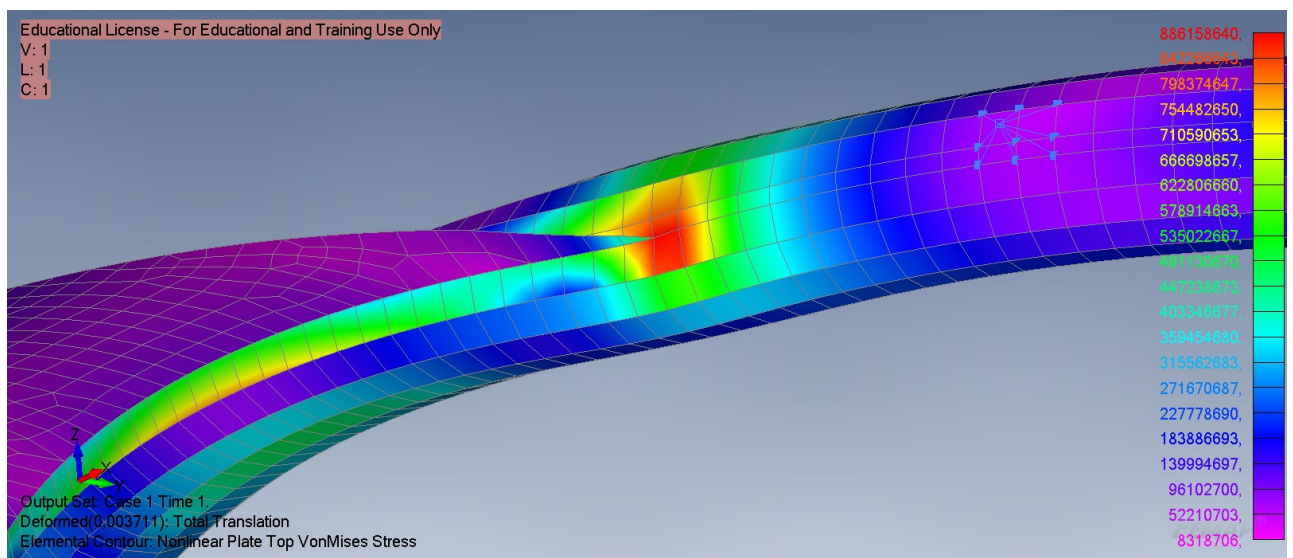
Slika 6.9 Ukupne deformacije modela s pločastim elementima, test 1

Očigledno je da je ovakav model čvršći i stabilniji. To se može objasniti boljom raspodjelom opterećenja jer je sada spoj V-spojnice i glavnog obruča modeliran kao cijeli niz čvorova i elemenata (Slika 6.10). Međutim u ovakvom modelu se odmah može primijetiti problem na rubovima V-spojnice gdje zbog oblika površine, ne mogu svi konačni elementi biti četverokutni pa neki prelaze u trokutaste. Na mjestima gdje se rubovi V-spojnice povezuju na glavni obruč, stvara se koncentracija naprezanja što je prikazano na slici 6.11. Još jedna nepovoljna stvar je činjenica da se na V-spojnici koriste pločasti elementi debljine 50 mm što je dosta velika debljina

s obzirom na ostatak dimenzija pa se stoga na području V-spojnice javljaju relativno mala naprezanja.



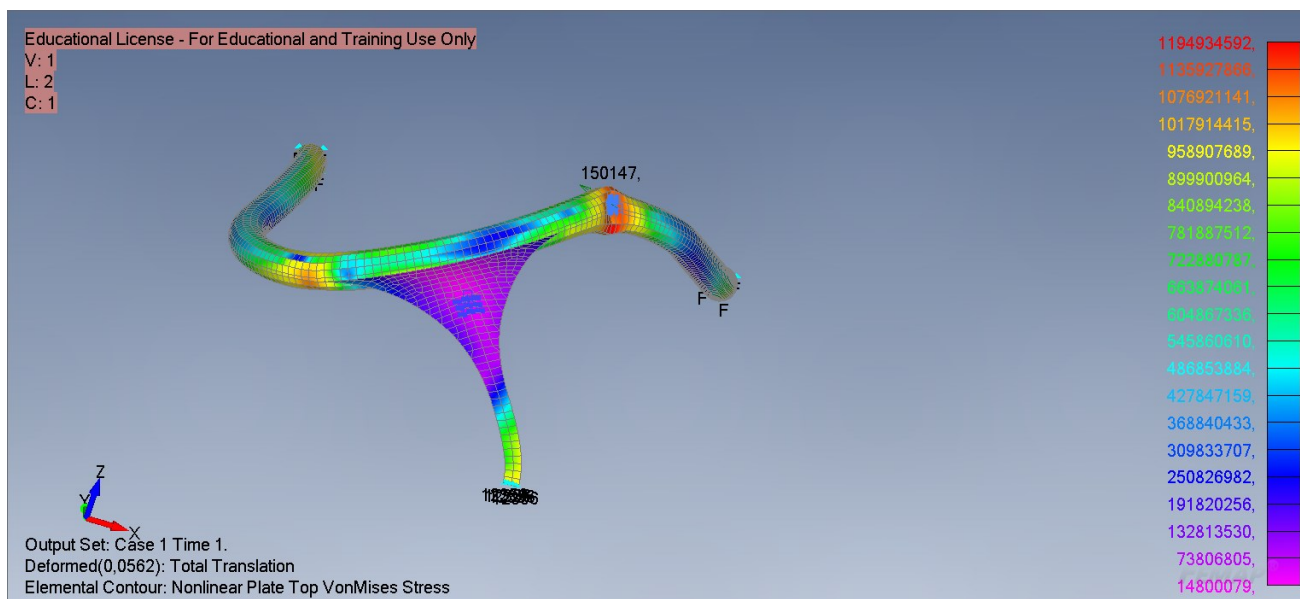
Slika 6.10 Raspored deformacija na stražnjoj strani obruča, test 1



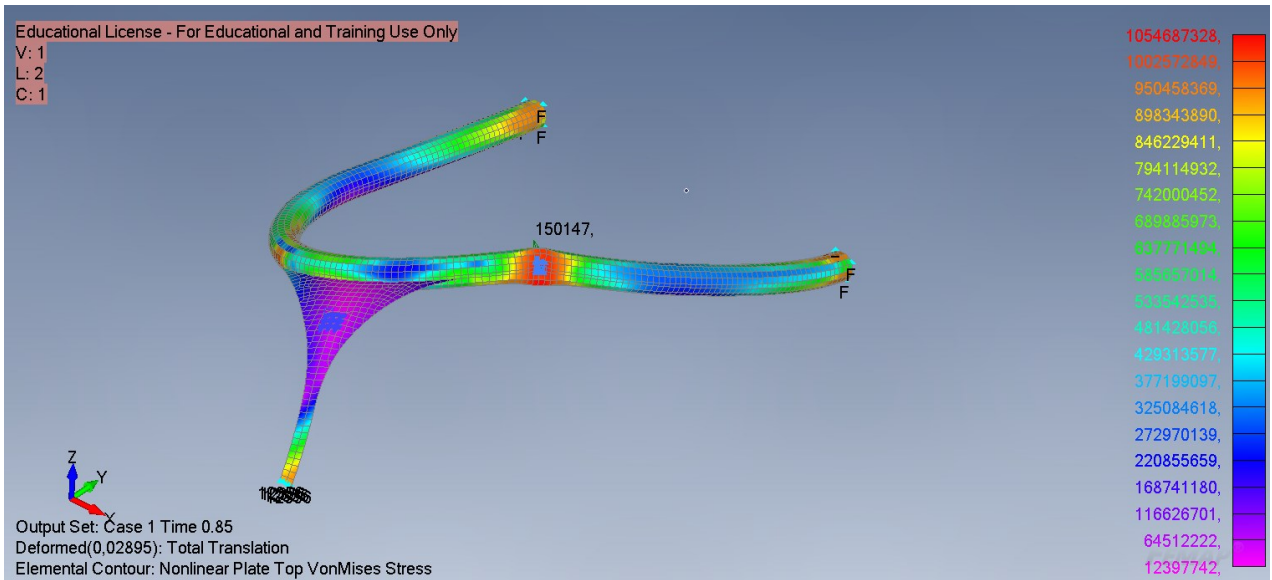
Slika 6.11 Koncentracija naprezanja na modelu s pločastim elementima, test 1



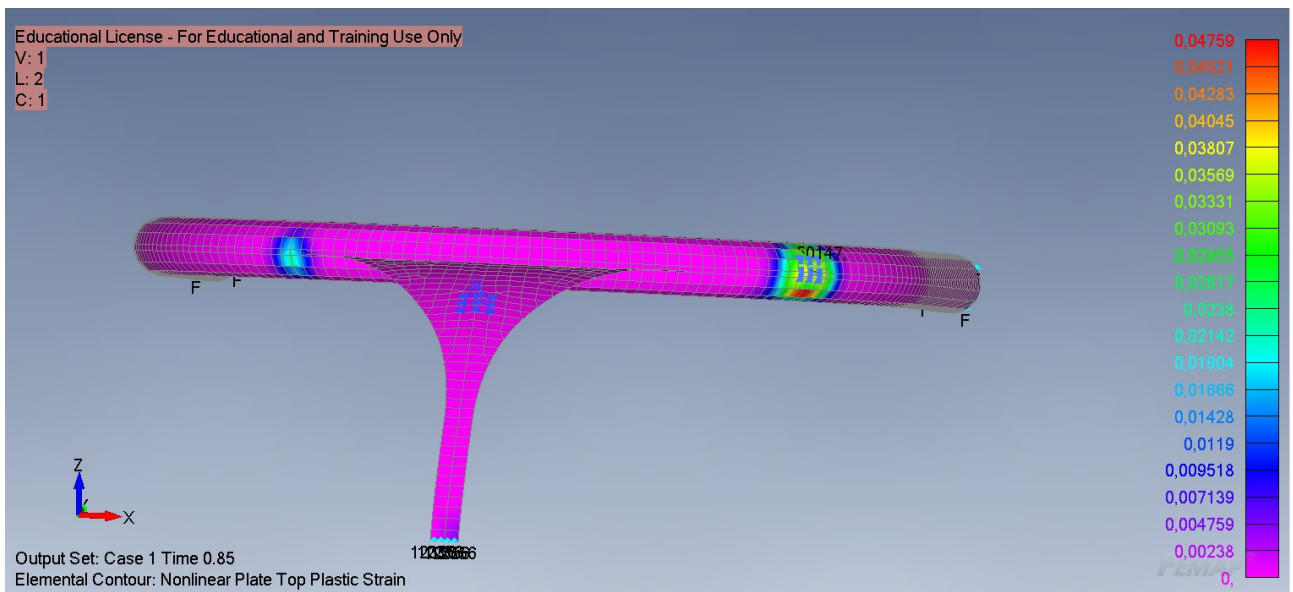
Za razliku od modela s grednim elementima, model s pločastim elementima može podnijeti potpuno zadano opterećenje od 150 kN bez pucanja (Slika 6.12). Na 85% maksimalnog opterećenja, što iznosi 127,62 kN javlja se maksimalno naprežanje od 1066,16 MPa i maksimalni pomak 28,95 mm kao što je vidljivo iz slike 6.13. Naprežanje sada raste i iznad granice elastičnosti, ulazi se u plastično područje, jer pločasti elementi podržavaju račun s elasto-plastičnim materijalom koji ima određeni modul plastičnosti. Naprežanje ipak ostaje ispod vlačne čvrstoće, a plastične deformacije iznose 4,76% tako da konstrukcija nije pukla prije 125 kN i prolazi test 2 (Slika 6.13). Maksimalni pomak na 125 kN je također manji od 45 mm. Na maksimalnom opterećenju konstrukcija se pomaknula i preko 56 mm jer se ulaskom u plastično područje deformacije ubrzano rastu u odnosu naprežanje zbog manjeg nagiba modula plastičnosti, a naprežanje je došlo do 1212,02 MPa što je vrlo blizu vlačne čvrstoće i točke pucanja. Može se također primijetiti da se najveće deformacije i naprežanja nalaze na sličnim mjestima i kod analize s pločastim i kod analize s grednim elementima što ukazuje na to da razlike dolaze zbog same različitosti konačnih elemenata i njihovih mogućnosti.



Slika 6.12 Maksimalna naprežanja i deformirani oblik modela s pločastim elementima pod punim opterećenjem, test 2



Slika 6.13 Maksimalna naprezanja i deformirani oblik modela s pločastim elementima pod najvećim traženim, test 2



Slika 6.14 Pojava plastičnih deformacija na modelu s pločastim elementima, test 2

## 7. ZAKLJUČAK

Nakon što su provedene po dvije analize za svaki od modela može se zaključiti da se dobiva slično ponašanje konstrukcije pod opterećenjem. Model s pločastim konačnim elementima se pokazuje kao čvršći jer se generalno dobivaju rezultati s nešto manjim naprezanjima, pomacima i deformacijama. Ujedno se mora primijetiti da model s grednim elementima ne zadovoljava kvazistatički test 2 i puca pod opterećenjem manjim nego je traženo. Kod modela s pločastim konačnim elementima ostvaruje se bolja i realnija raspodjela naprezanja, a isto tako je dostupno korištenje dijagrama naprezanje-istezanje koji je bliži stvarnom što omogućuje tom modelu da zadovolji zahtjeve oba kvazistatička testa.

Mora se u obzir uzeti da su i u jednom i u drugom modelu napravljene aproksimacije poput dijagrama naprezanje-istezanje, određivanja poprečnih presjeka kod grednih elemenata i debljine V-spojnice kod pločastih konačnih elemenata. Sama geometrija je također pojednostavljena i razlikuje se između modela jer se jedan temelji na linijskim elementima, a drugi na površinskim.

Metoda konačnih elemenata je vrlo raznovrsna i korisna numerička metoda pa između ostalog omogućuje i rješavanje materijalno nelinearnih problema uz kvazistatičko povećanje opterećenja poput ovog testa mehaničkog ponašanja AFP-Halo konstrukcije.

S obzirom na kompleksnost konstrukcije i njezinu važnost iz sigurnosnog aspekta, za pripremu realne konstrukcije na testiranje po normi FIA 8869-2018 potrebna je detaljnija simulacija, s manje pojednostavljenja i aproksimacija. Usprkos tome čak se i s jednostavnijom pripremom mogu dobiti rezultati slični očekivanima.

## 8. LITERATURA

- [1] S interneta, <https://www.fia.com/organisation>, 31.08.2024.
- [2] S interneta, <https://www.roadandtrack.com/motorsports/news/a32713/mercedes-amg-f1-w08/>, 31.08.2024.
- [3] S interneta, <https://www.autosport.com/f1/news/history-of-safety-devices-in-formula-1-the-halo-barriers-more-4982360/4982360/>, 31.08.2024.
- [4] S interneta, <https://f1chronicle.com/the-history-of-formula-1-safety-devices-f1-history/>, 31.08.2024.
- [5] S interneta, <https://www.mclaren.com/racing/team/driver-helmets-through-ages/>, 31.08.2024.
- [6] S interneta, <https://sportsmatik.com/sports-corner/sports-equipage-detail/formula-1-hans-collar>, 31.08.2024.
- [7] S interneta, <https://www.mirror.co.uk/sport/formula-1/felipe-massa-escapes-unhurt-after-3887093>, 31.08.2024.
- [8] S interneta, [https://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_Formula\\_One\\_fatalities](https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_Formula_One_fatalities), 31.08.2024.
- [9] S interneta, [https://en.wikipedia.org/wiki/Halo\\_\(safety\\_device\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Halo_(safety_device)), 31.08.2024.
- [10] S interneta, <https://www.autosport.com/indycar/news/indycar-to-introduce-red-bull-produced-aeroscreen-for-2020-season-4987913/4987913/>, 31.08.2024.
- [11] S interneta, [https://www.fia.com/sites/default/files/fia\\_standard\\_8869-2018\\_afp\\_v1\\_0.pdf](https://www.fia.com/sites/default/files/fia_standard_8869-2018_afp_v1_0.pdf), 15.04.2024
- [12] S interneta, [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Halo\\_%28Formula\\_1%29.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Halo_%28Formula_1%29.jpg), 31.08.2024.
- [13] S interneta, [https://www.fia.com/sites/default/files/2021-2022\\_formula\\_e\\_techregs\\_yearbook2022\\_v00.pdf](https://www.fia.com/sites/default/files/2021-2022_formula_e_techregs_yearbook2022_v00.pdf), 15.04.2024
- [14] Čanađija, M.: “Osnove primjene MKE - Uvod“, s interneta, <https://moodle.srce.hr/2023-2024/course/view.php?id=170550> 10.04.2024.
- [15] S interneta, [https://link.springer.com/referenceworkentry/10.1007/978-3-642-20617-7\\_16699](https://link.springer.com/referenceworkentry/10.1007/978-3-642-20617-7_16699), 03.09.2024.
- [16] Mondal, C., Podder, B., Ramesh Kumar, K. *et al.* Constitutive Description of Tensile Flow Behavior of Cold Flow-Formed AFNOR 15CDV6 Steel at Different Deformation Levels. *J. of Materi Eng and Perform* 23, 3586–3599 (2014).
- [17] S interneta, <https://virgamet.com/14crm69-12crm69-15cdv6-15hmf-15crm69-1510-alloy-steel> 04.09.2024.
- [18] S interneta, [https://hr.wikipedia.org/wiki/Dijagram\\_naprezanja](https://hr.wikipedia.org/wiki/Dijagram_naprezanja), 01.09.2024.

[19] S interneta, <https://www.simscale.com/docs/simwiki/fea-finite-element-analysis/what-is-a-stress-strain-curve/> 05.09.2024.

[20] S interneta, <https://enterfea.com/4-main-nonlinear-material-models-nx-nastran-version/>,  
10.07.2024.

[21] S interneta,  
[file:///C:/PROGRA~1/Siemens/FEMAP2~1.2ST/nastranhelp/pdf/basic\\_nonlinear.pdf](file:///C:/PROGRA~1/Siemens/FEMAP2~1.2ST/nastranhelp/pdf/basic_nonlinear.pdf),  
28.08.2024.

## 9. SAŽETAK

U završnom radu „Analiza mehaničkog ponašanja AFP-Halo zaštitne konstrukcije motornog vozila za utrke“ odrađena je simulacija testiranja AFP-Halo zaštite s motornih vozila za utrke otvorenog tipa. Korištena je metoda konačnih elemenata u softveru Simcenter Femap. Rubni uvjeti i opterećenja zadani su prema normi FIA 8869-2018 po kojoj se i provjeravaju dobiveni rezultati analize. Aproksimativno je izrađen model konstrukcije koji se koristi kao polazište za pripremu analize. Analiza je provedena s dva pristupa, sa grednim konačnim elementima i sa pločastim konačnim elementima. U radu je opisana kompletna priprema analize, a to obuhvaća definiranje ponašanja materijala, definiranje značajki konačnih elemenata, omreživanje modela i zadavanje opterećenja i rubnih uvjeta. Obuhvaćene su i postavke koje su ključne u provođenju materijalno nelinearne analize. Na posljetku su prikazani i komentirani rezultati analize.

Ključne riječi: metoda konačnih elemenata, mke, nelinearna analiza, Femap

## 10. ABSTRACT

In this final paper titled „Structural Analysis of Additional Frontal Protection (AFP-Halo) for a Racing Car“ a simulation of testing conditions on AFP-Halo protection from open-wheel racing vehicles was done. Finite element method along with software Simcenter Femap was used. Boundary conditions and loads are set as they are defined in FIA 8869-2018 standard through which the results of the analysis are also checked. An approximate model of the structure was made as a starting point for preparing the analysis. The analysis was conducted using two approaches, beam finite elements and plate finite elements. Complete preparation of the analysis is described in this paper including defining material behaviour, defining finite element properties, meshing the model, setting loads and constraints. The settings vital for conducting materially nonlinear analysis are also covered. At the end, results of the analysis are presented and discussed.

Key words: finite element method, fem, nonlinear analysis, Femap