

# STRUKTURALNA I OPTIMIZACIJSKA ANALIZA KUKE ZA STROJ INDUSTRIJSKOG PROCESA PROIZVODNJE KRUHA METODOM KONAČNIH ELEMENATA

---

**Bulat, Tino**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2024**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Split / Sveučilište u Splitu**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:228:409720>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-05**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of University Department of Professional Studies](#)



UNIVERSITY OF SPLIT



**SVEUČILIŠTE U SPLITU**  
**SVEUČILIŠNI ODJEL ZA STRUČNE STUDIJE**

Stručni prijediplomski studij Konstrukcijsko strojarstvo

**TINO BULAT**

**ZAVRŠNI RAD**

**STRUKTURALNA I OPTIMIZACIJSKA ANALIZA  
KUKE ZA STROJ INDUSTRIJSKOG PROCESA  
PROIZVODNJE KRUHA METODOM KONAČNIH  
ELEMENTA**

Split, rujan 2024.

**SVEUČILIŠTE U SPLITU**  
**SVEUČILIŠNI ODJEL ZA STRUČNE STUDIJE**

Stručni prijediplomski studij Konstrukcijsko strojarstvo

**Predmet:** Proizvodni postupci I

**Z A V R Š N I R A D**

**Kandidat:** Tino Bulat

**Naslov rada:** Strukturalna i optimizacijska analiza kuke za stroj  
industrijskog procesa proizvodnje kruha metodom konačnih elemenata

**Mentor:** Slaven Šitić, v.pred.

**Komentor:** Prof. Urbano Ramos

Split, rujan 2024.

**REPUBLIKA HRVATSKA**  
**SVEUČILIŠTE U SPLITU**  
**Sveučilišni odjel za stručne studije**

**Studij:** Konstrukcijsko strojarstvo  
**Predmet:** Proizvodni postupci I  
**Nastavnik:** Slaven Šitić, v.pred.

**ZADATAK**

**Kandidat:** Tino Bulat

**Zadatak:** Strukturalna i optimizacijska analiza kuke za stroj industrijskog procesa proizvodnje kruha metodom konačnih elemenata

U radu je potrebno:

- Uvodno dati osvrt na problem kojim se ovaj završni rad bavi
- Općenito o metodi konačnih elemenata
- Opisati SolidWorks, program korišten za rješavanje problema završnog rada
- Nacrtati 3D model originalne kuke u stvarnim veličinama
- Testirati originalnu kuku na naprezanja (stress) i pomake (displacements) metodom konačnih elemenata s pomoću SolidWorks programa
- Redimenzionirati kuku na što jednostavniji način u svrhu poboljšanja
- Testirati poboljšanu kuku, te uvidjeti na razliku naprezanja i pomaka

## Sažetak

Cilj ovog završnog rada je na što jednostavniji način poboljšati kuku miješalice za industrijsku proizvodnju kruha kako bi se izbjegao lom.

Ovaj završni rad odrađen je u SolidWorks Simulation softveru, kroz kojeg se na nekoliko načina pokušala redimenzionirati kuka, koja je onda softverski testirana metodom konačnih elemenata s pomoću podataka prikupljenih tijekom analize koju je obavila tvrtka. Svrha testa je svođenje unutrašnjih naprezanja i pomaka na minimum.

Ključne riječi: kuka, lom, metoda konačnih elemenata

## **Summary (Structural and optimization analysis of a hook for a machine of industrial bread-making process using finite elements method)**

The main goal of this project is improvement of kneader used in the industrial bread-making process as simple as possible, to avoid breakage.

This project was done in SolidWorks Simulation software, in which kneader was redimensioned few times, and then was tested through software with finite elements method, using the data collected during the analysis performed by the company. The purpose of the test is to minimize internal stresses and displacements.

Key words: kneader, breakage, finite elements method

## SADRŽAJ

Sažetak .....	2
Summary (Structural and optimization analysis of a hook for a machine of industrial bread-making process using finite elements method) .....	2
1. Uvod.....	6
2. Metoda konačnih elemenata .....	7
2.1. Numeričke i analitičke metode .....	8
2.2. Konačni element .....	8
3. SolidWorks .....	9
3.1. Metoda konačnih elemenata u SolidWorks softveru .....	10
4. Metodologija analize naprezanja kuke s pomoću MKE .....	11
4.1. Priprema modela.....	11
4.2. Postavljanje simulacija i odabir materijala .....	12
5. Poboljšani model: dizajn i analiza s pomoću MKE .....	23
5.1. Uvod u poboljšani model, geometrijske promjene i optimizacija .....	23
5.2. Analiza poboljšanog modela s pomoću MKE .....	29
5.3. Evolucija rezultata i usporedba s prethodnim modelom .....	34
6. Zaključak.....	36
7. Literatura.....	37

**Popis slika**

Slika 2.1. – Geometrija različitih konačnih elemenata [1] .....	7
Slika 3.1. – Sučelje SolidWorks softvera i 3D model kugličnog ležaja [2] .....	9
Slika 3.2. – Model mosta i njegova naprežanja u SolidWorks Simulation dodatku [3] .....	10
Slika 4.1. – Puknute kuke .....	11
Slika 4.2. – 3D model kuke [5] .....	12
Slika 4.3. – Opcija „New Study“ na alatnoj traci [5] .....	13
Slika 4.4. – Prozorčić „Study“ [5] .....	13
Slika 4.5. – Materijali i njihova svojstva [5] .....	14
Slika 4.6. – Prozorčić „Mesh“ [5] .....	15
Slika 4.7. – Mrežni 3D model [5] .....	16
Slika 4.8. – Prozorčić „Fixture“ i opcija „Fixed Geometry“ [5] .....	17
Slika 4.9. – Fiksirana baza kuke [5] .....	18
Slika 4.10. – Prozorčić „Force/Torque“ [5] .....	19
Slika 4.11. – Spirala kuke opterećena momentom [5] .....	20
Slika 4.12. – Opcija „Run This Study“ [5] .....	20
Slika 4.13. – Rezultat simulacije naprežanja početnog modela [5] .....	21
Slika 4.14. – Rezultati simulacije pomaka početnog modela [5] .....	22
Slika 5.1. – Uklonjeni dijelovi kuke [5] .....	24
Slika 5.2. – Spoj na kojemu se primijenila opcija „Fillet“ [5] .....	25
Slika 5.3. – Zaobljenje spoja (opcija „Fillet“) [5] .....	26
Slika 5.4. – Početni i krajnji promjeri spirale osnovnog modela [5] .....	27
Slika 5.5. - Početni i krajnji promjeri spirale poboljšanog modela [5] .....	28
Slika 5.6. – Redimenzioniran 3D model kuke [5] .....	29
Slika 5.7. – Spirala redimenzionirane kuke opterećena momentom [5] .....	30
Slika 5.8. - Fiksirana baza redimenzionirane kuke [5] .....	31
Slika 5.9. – Mrežni redimenzioniran 3D model [5] .....	32

---

Slika 5.10. – Rezultati simulacije naprezanja poboljšanog modela [5] .....	33
Slika 5.11. - Rezultati simulacije pomaka poboljšanog modela [5].....	34



## 1. Uvod

Tijekom industrijskog procesa proizvodnje kruha, miješalica je ključna komponenta. Kuka je mehanička komponenta odgovorna za miješanje i gnječenje sastojaka. Međutim, često dolazi do pucanja ove komponente, što dovodi do velikih troškova, kako za proizvođača koji mora često mijenjati tu komponentu, tako i za kupca koji je pogođen troškovima vremena zastoja. Kako bismo razumjeli što uzrokuje kvar ove komponente, proučavanje njenog mehaničkog ponašanja postalo je privlačno, koristeći u tu svrhu alate za prikupljanje podataka u praktičnim testovima, kao i računalnu analizu tog performansa. U tu svrhu, jedna tvrtka koja se bavi proizvodnjom kruha osigurala je miješalicu i kuku kako bi se proveli testovi i analiza.

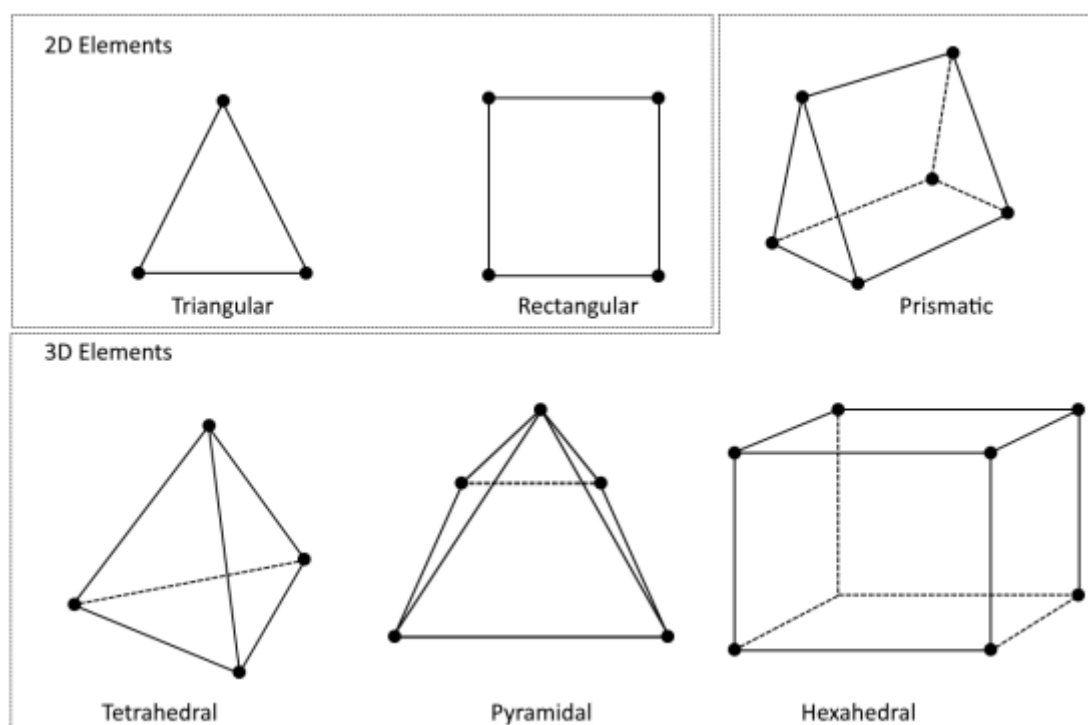
Računalna analiza izvršena je s pomoću SolidWorks Simulation softvera koji omogućuje analizu metodom konačnih elemenata. Podaci koji su korišteni tijekom analize i simulacije omogućila je tvrtka koja je osigurala kuku. Određenom opremom i sensorima za mjerenje naprezanja u materijalima tvrtka je došla do vrijednosti opterećenja do kojih dolazi tijekom eksploatacije. Uz te podatke i veličine moguće je, uz pomoć metode konačnih elemenata unutar SolidWorks softvera, odraditi računalnu analizu naprezanja i pomaka kuke koji su identični kao u stvarnosti.

## 2. Metoda konačnih elemenata

Metoda konačnih elemenata je numerička tehnika koja se upotrebljava kod rješavanja diferencijalnih jednadžbi, koje opisuju ponašanje materijala i struktura.. Ova metoda prisutna je kod svih grana inženjerstva, a i šire.

Metoda konačnih elemenata složene velike elemente raspodjeljuje na mnoštvo manjih, konačnih elemenata, koji se mogu pojaviti u različitim oblicima poput trokuta, kvadrata, kocki itd. Oni su zajedno povezani u točkama koje se nazivaju čvorovi. Za svaki od njih postavljaju se jednadžbe, a kasnije kombinacijom istih dobije se jednadžba cijele strukture. MKE koristi je za rješavanje problema statike, dinamike, toplinske vodljivosti i još mnogo područja, te je MKE danas jedna od najbitnijih metoda kada se radi o prirodnim znanostima.

Na slici 2.1. prikazani su mogući oblici konačnih elemenata.



Slika 2.1. – Geometrija različitih konačnih elemenata [1]

## 2.1. Numeričke i analitičke metode

Analitičke metode traže specifična rješenja uz pomoć matematičkih izraza te je uz pomoć njih moguće rješavati samo idealne i jednostavne probleme. S druge strane numeričke metode, poput metode konačnih elemenata, diferencijalne jednačbe pretvaraju u sustave algebarskih jednačbi koje je moguće riješiti uz pomoć računala.

## 2.2. Konačni element

Konačni element je ključni dio metode konačnih elemenata. To je mali dio kontinuuma, tj. mali geometrijski segment strukture, koji može biti u 2D prostoru pa bi to na primjer bio trokut ili kvadrat ili u 3D prostoru poput tetraedra i heksaedra.

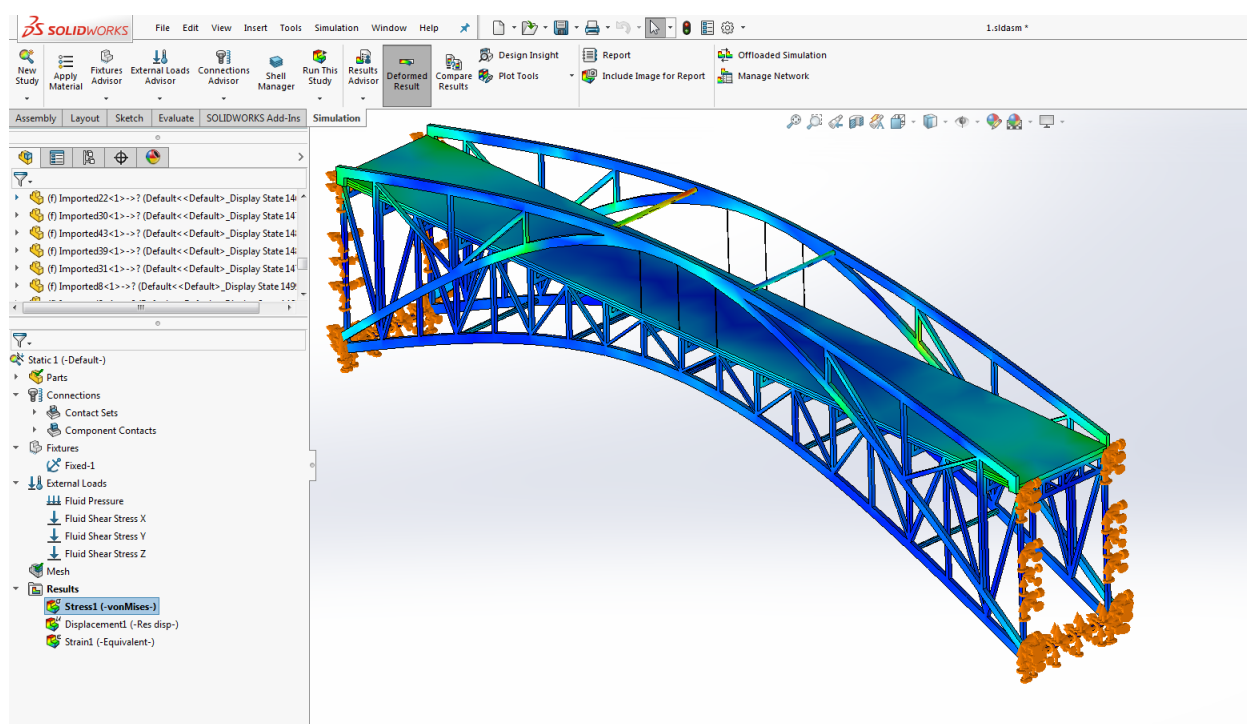
Unutar svakog elementa pomaci, naprezanja i ostale fizičke varijable se najčešće opisuju polinomima. Ovi polinomi samo daju približnu sliku ponašanja elementa u stvarnosti, jer je to rješenje uglavnom previše nepoznato ili složeno. Fizičke varijable računaju se u čvorovima (konačni elementi su definirani skupom čvorova. To su točke unutar ili na rubovima elementa), te se zatim aproksimiraju unutar cijelog elementa s pomoću tih vrijednosti. Ovo pomaže inženjerima da od većeg, složenog problema naprave više manjih, rješivih problema. Kombiniranjem njihovih rješenja dobiva se cjelovito rješenje za cijelu strukturu.



### 3.1. Metoda konačnih elemenata u SolidWorks softveru

Za rješenje problema ovog završnog rada koristila se metoda konačnih elemenata koja je unutar SolidWorks softvera poprilično razvijena. MKE je korisnicima dostupna kroz dodatak SolidWorks Simulation, koji im omogućava da na svojim modelima obavljaju složene radnje. Time dakle inženjeri mogu koristiti ovu opciju za toplinske, strukturne, analize zamora i drugo, te im ova metoda uveliko pomaže pri donošenju odluka zbog svojih preciznih rezultata.

Na slici 3.2. prikazan je dodatak SolidWorks Simulation te model mosta i naprezanja unutar istog.



Slika 3.2. – Model mosta i njegova naprezanja u SolidWorks Simulation dodatku [3]

## 4. Metodologija analize naprežanja kuke s pomoću MKE

Prije nego se krene izrađivati prototip poboljšane kuke, treba se odraditi analiza originalne. Koristeći SolidWorks softver, nacrtan je 3D model oštećene kuke u stvarnim veličinama, te je testirana metodom konačnih elemenata unutar softvera. Cilj je razumjeti ponašanje kuke pod opterećenjima klasičnima za ovu vrstu industrije, te utvrditi potencijalna kritična područja koja su dovela do oštećenja ili pukotine. Puknuća u kukama nisu povezana s njihovim dimenzijama, javljaju se i kod većih i kod manjih kuka. Stoga se smatralo važnijim proučiti utjecaj naprežanja koja djeluju na kuku, nego individualnu analizu nekoliko kuka.

Na slici 4.1. mogu se vidjeti primjeri kuka koje su pukle prilikom rada.



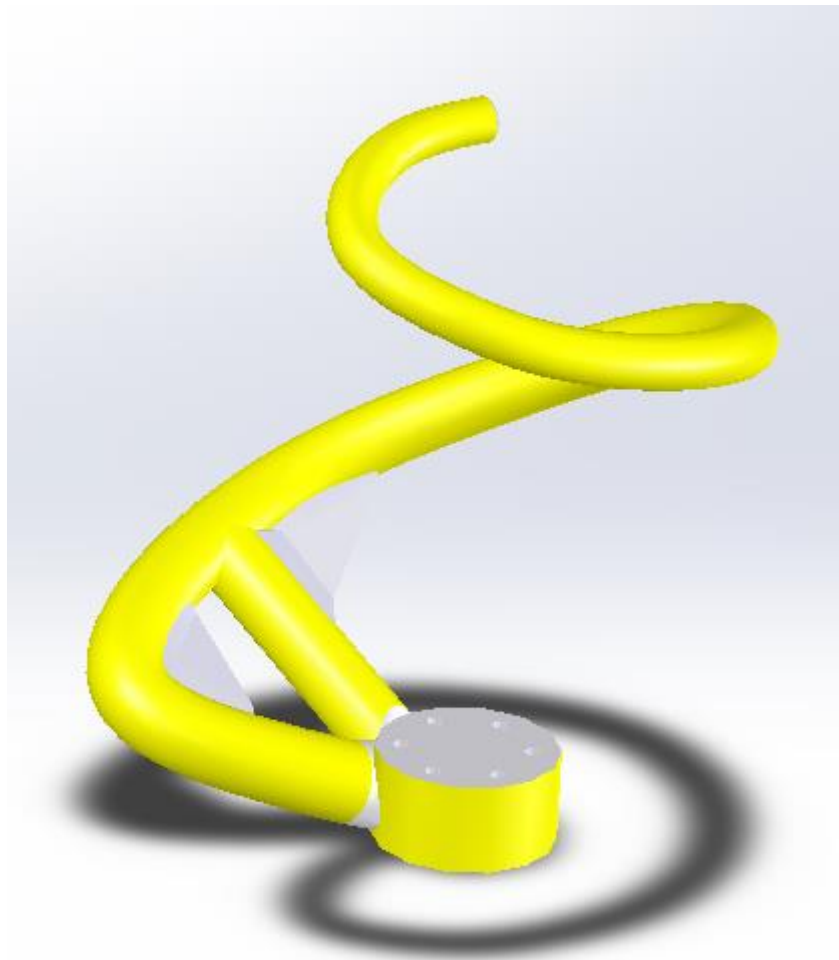
*Slika 4.1. – Puknute kuke*

### 4.1. Priprema modela

Za početak potrebno je izraditi 3D model kuke u SolidWorksu. Modeliranje se započinje kreiranjem baze kuke koristeći različite alate za skiciranje i oblikovanje (line, circle, extrude, revolve itd.). Taj dio je fiksiran za dio stroja koji je povezan s pogonom te zajedno obavljaju

kružne pokrete. Povezani su vijcima, stoga se na tom dijelu modela izrađuju provrti namijenjeni za njih. Drugi dio modela je spirala kuke kojoj se promjer postepeno smanjuje što je bliže kraju. Upravo ona je najbitnija komponenta ovog modela jer je opterećena na savijanje koje uzrokuje deformaciju. Tu se još nalaze i pomoćni dijelovi koji koriste za fiksiranje.

Na slici 4.2. prikazan je 3D model kuke.

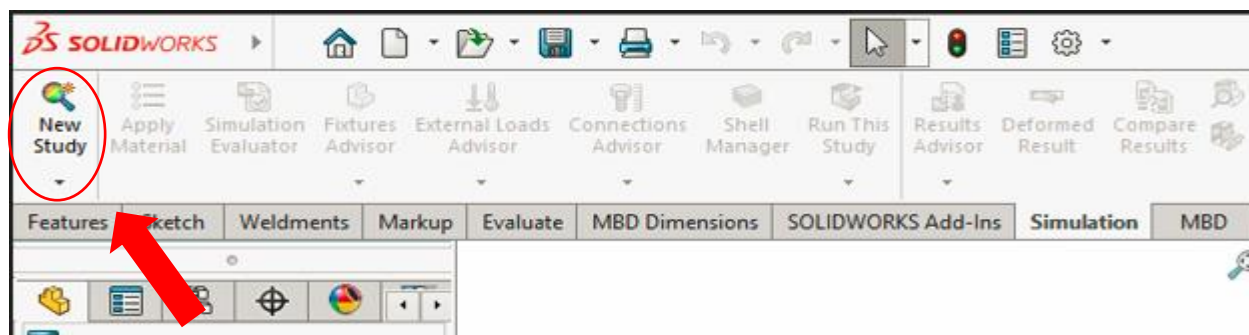


*Slika 4.2. – 3D model kuke [5]*

## **4.2. Postavljanje simulacija i odabir materijala**

Nakon što je 3D model kuke gotov, u softveru se odabire opcija „New Study“ na alatnoj traci koja se koristi za pokretanje nove analize ili simulacije, u kojoj se definiraju potrebni parametri kako bi simulacija bila što realnija.

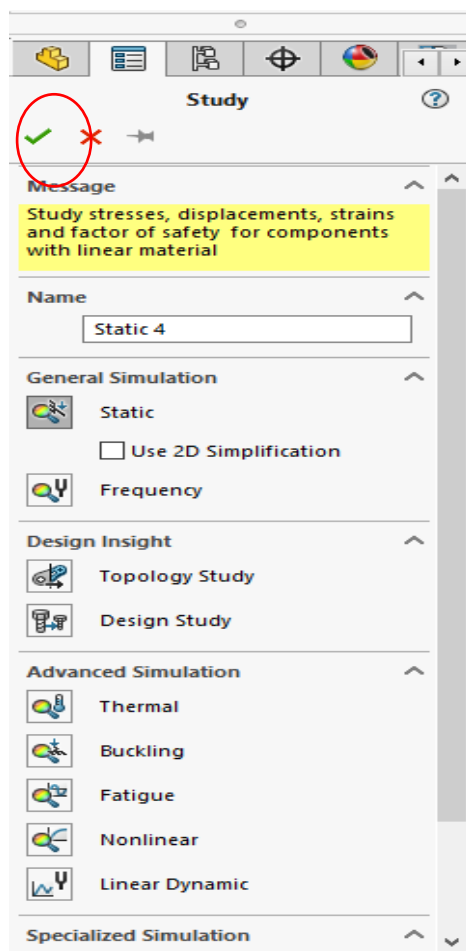
Na slici 4.3. prikazana je opcija „New Study“.



Slika 4.3. – Opcija „New Study“ na alatnoj traci [5]

Klikom na ikonu otvara se prozorčić „Study“ gdje se početak simulacije pokreće klikom na zelenu kvačicu u gornjem lijevom kutu.

Na slici 4.4. prikazan je prozorčić „Study“.



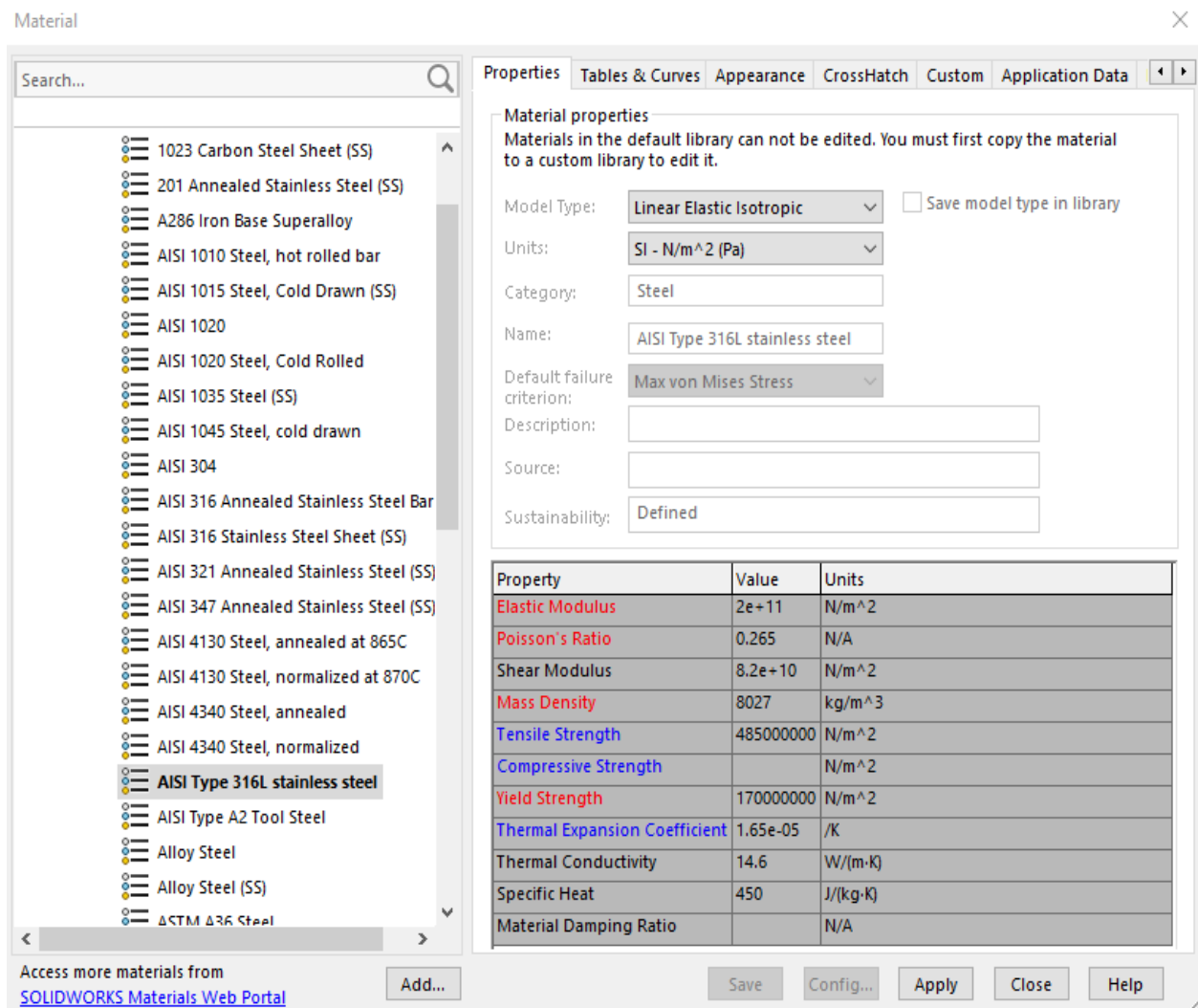
Slika 4.4. – Prozorčić „Study“ [5]

Pokretanjem simulacije slijedi odabir materijala za model. Izabrani materijal je AISI Type 316L nehrđajući čelik koji je zbog svoje otpornosti na koroziju, biokompatibilnosti te dobre žilavosti



i čvrstoće idealan za izradu kuka za miješalice ovog tipa, a također je često prisutan, uz prehrambenu, u kemijskoj i farmaceutskoj industriji.

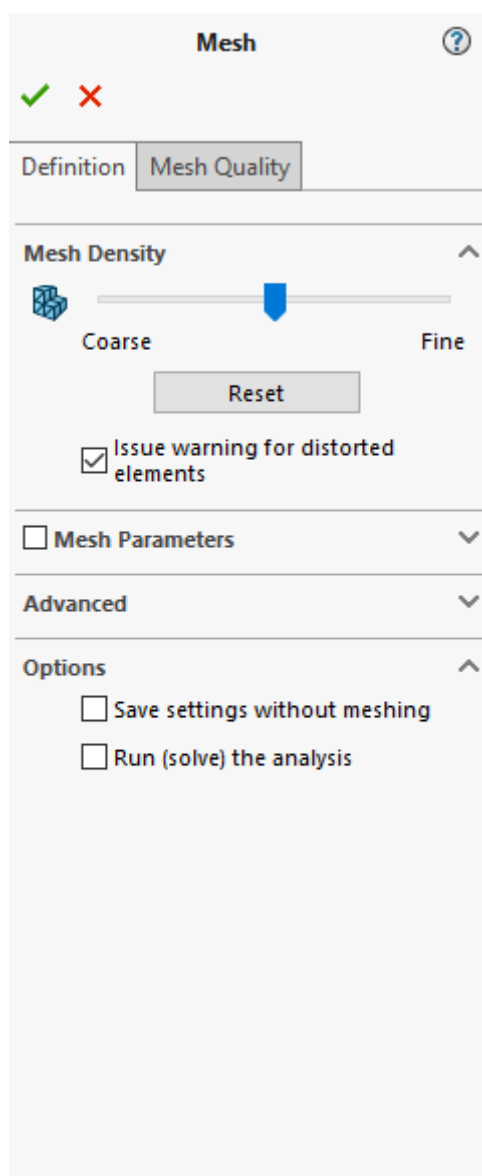
Na slici 4.5. prikazana je opcija odabira materijala, te njihova najvažnija svojstva.



Slika 4.5. – Materijali i njihova svojstva [5]

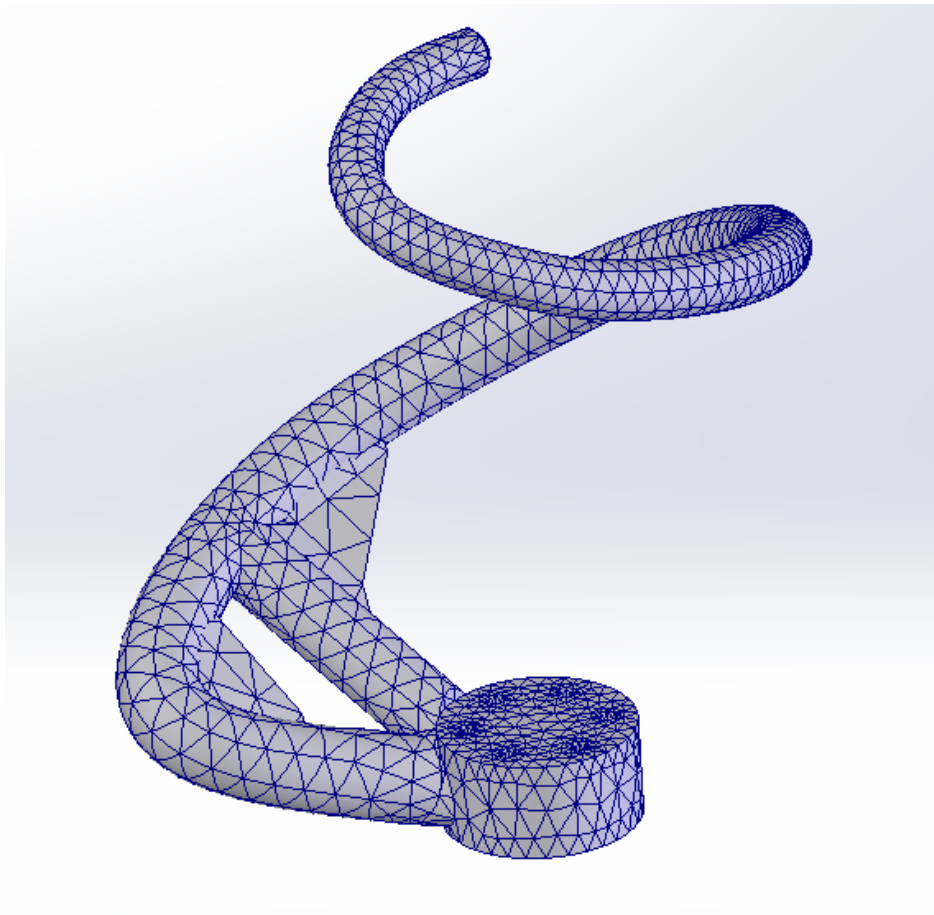
Nakon odabire materijala koristi se opcija „Mesh“ koja CAD model pretvara u mrežni model kako bi se provjerila deformacija ili čvrstoća komponente pod različitim opterećenjima.

Na slici 4.6. prikazan je prozorčić „Mesh“.



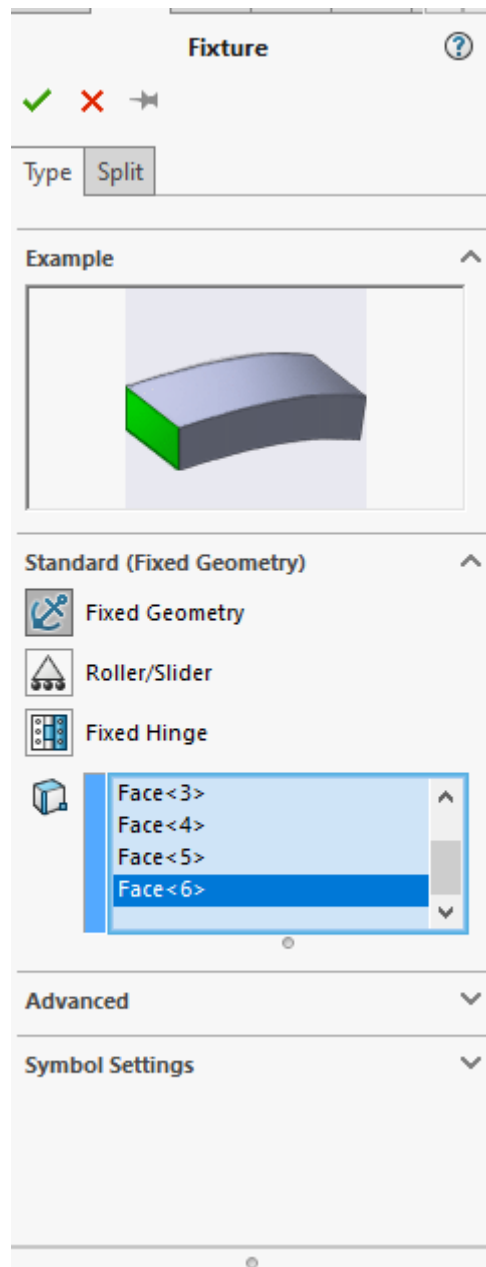
Slika 4.6. – Prozorčić „Mesh“ [5]

U prozorčiću mesh moguće je pomicanjem klizača odabrati željenu gustoću mreže, od opcije „Grubo (Coarse)“ za manju gustoću mreže do opcije „Fino (Fine)“ za veću gustoću mreže. U ovom slučaju odabire se srednja gustoća. Klikom na zelenu kvačicu prihvaća se postavljena gustoća mreže koja je zatim vidljiva na 3D modelu što je prikazano na slici 4.7.

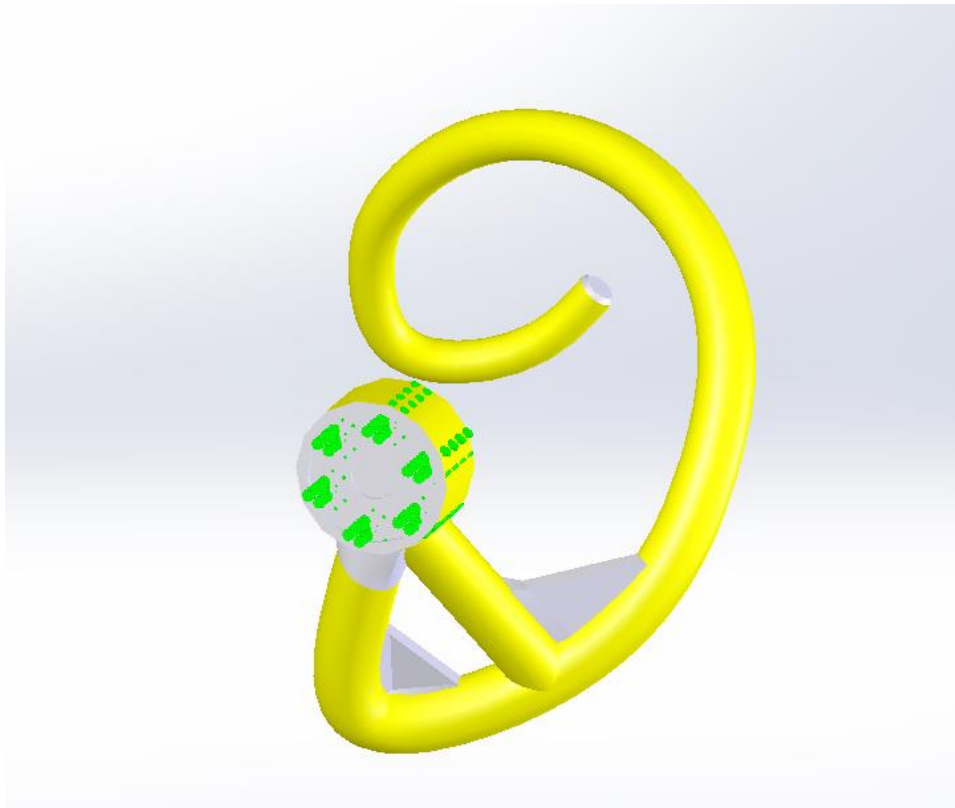


*Slika 4.7. – Mrežni 3D model [5]*

Kako bi simulacija bila što uspješnija, kuka se mora opteretiti na realan način. Opcijom „Fixture“ te u njoj klikom na „Fixed Geometry“ (slika 4.8.) fiksiraju se rupe u bazi kuke koje su namijenjene za vijke, što je vidljivo na slici 4.9.

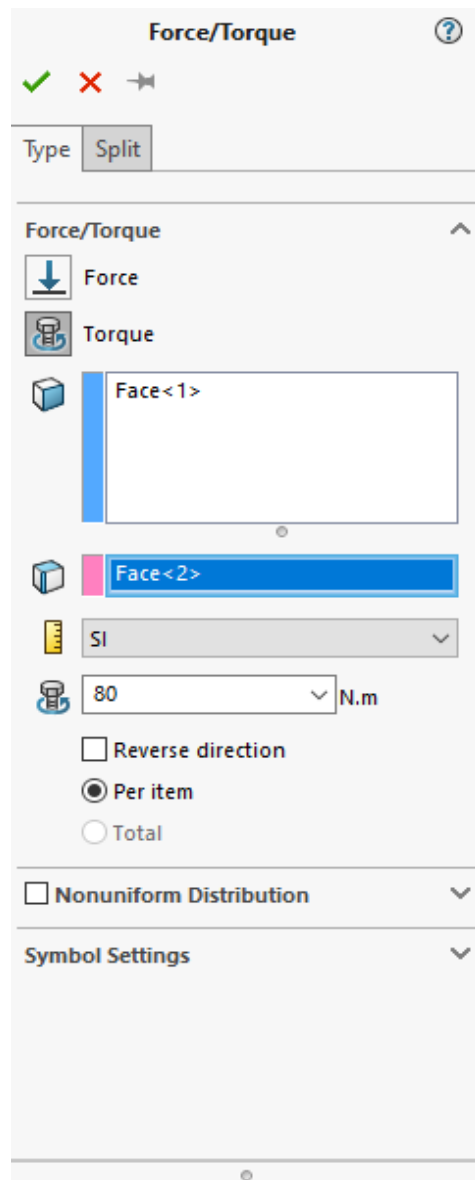


Slika 4.8. – Prozorčić „Fixture“ i opcija „Fixed Geometry“ [5]

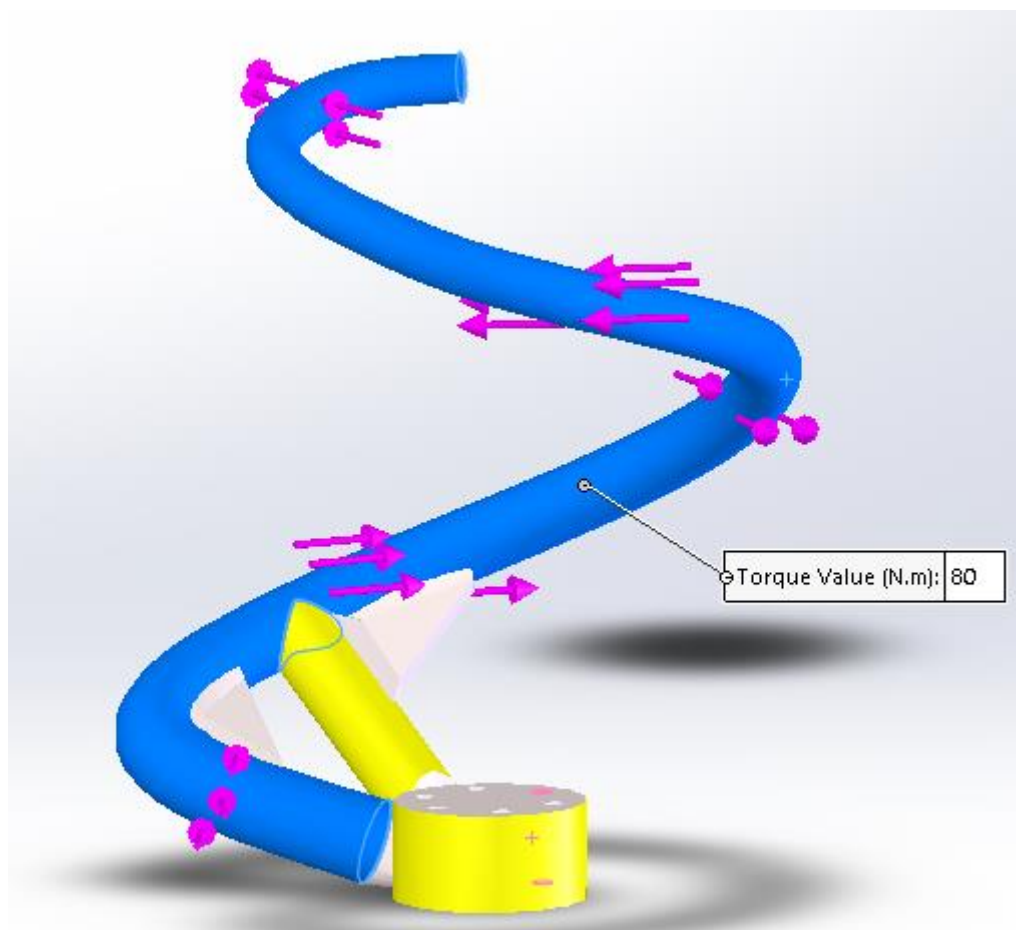


*Slika 4.9. – Fiksirana baza kuke [5]*

Kada je kuka u potpunosti fiksirana, može se opteretiti. Istraživanjem koje je obavila tvrtka, tijekom rada miješalice kuka je opterećena na moment u iznosu od 80 Nm. Na nju se taj moment može postaviti opcijom „Force/Torque“ u kojoj se zatim izabire sila u obliku momenta (opcija „Torque“) kao što je prikazano na slici 4.10. Za mjesto djelovanja momenta odabire se samo spirala kuke („Face<1>“), dok se za smjer djelovanja odabire bilo koja okrugla podloga okomita na smjer spirale, što je u ovom slučaju dno baze kuke („Face<2>“) gdje se nalaze i provrti za vijke, što je vidljivo na slici 4.11.



Slika 4.10. – Prozorčić „Force/Torque“ [5]



Slika 4.11. – Spirala kuke opterećena momentom [5]

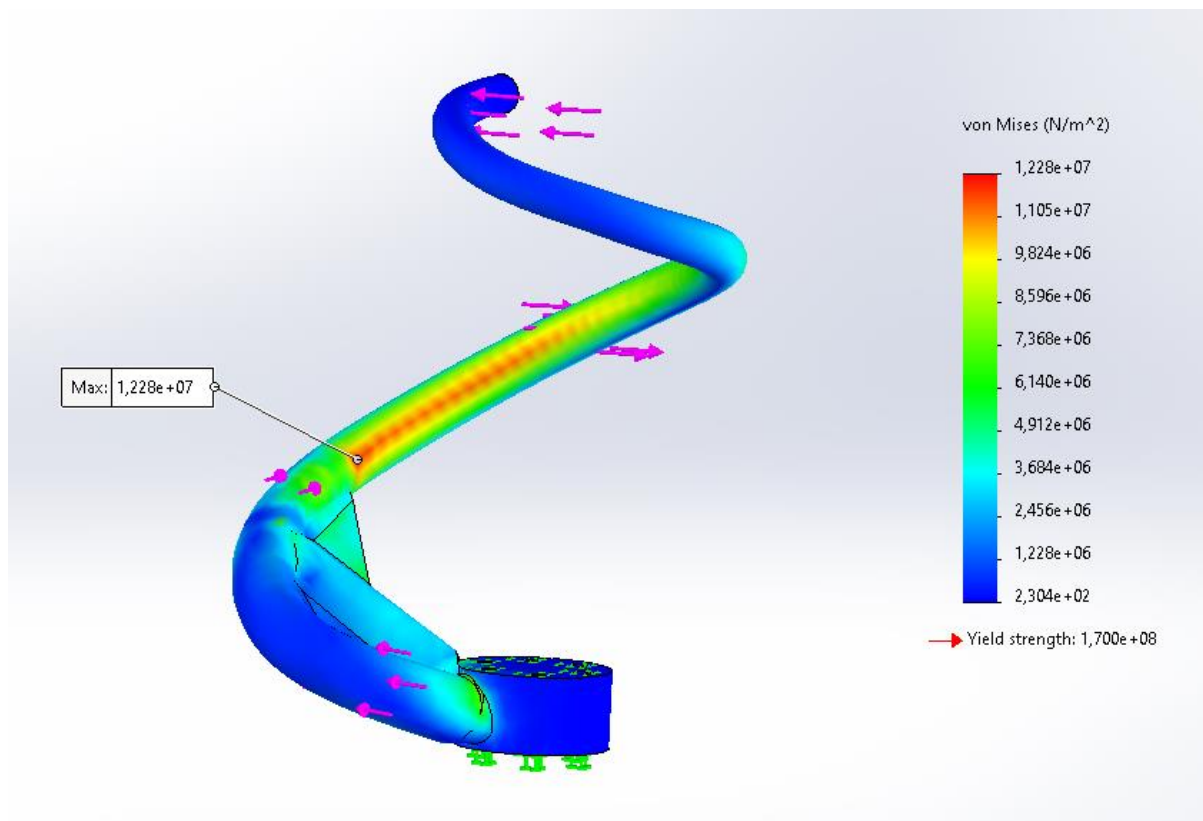
Opterećivanjem kuke momentom priprema simulacije je gotova te je sve spremno za početak simuliranja. Klikom na opciju „Run This Study“ na alatnoj traci koja je prikazana na slici 4.12. program započinje simulaciju te izračunava naprezanja i pomake koji se javljaju tijekom industrijskog procesa.



Slika 4.12. – Opcija „Run This Study“ [5]

Na slici 4.13. vidljiv je rezultat simulacije, koji prikazuje gdje su naprezanja veća, odnosno manja te tablica na kojoj su isti prikazani s broječanim vrijednostima, a ispod tablice vidljiva je granica tečenja materijala. Maksimalno naprezanje ne prelazi granicu tečenja, ali i takvo je u

eksploataciji dovelo do pucanja kuke, stoga bi ga bilo potrebno, ako je moguće, još malo smanjiti.

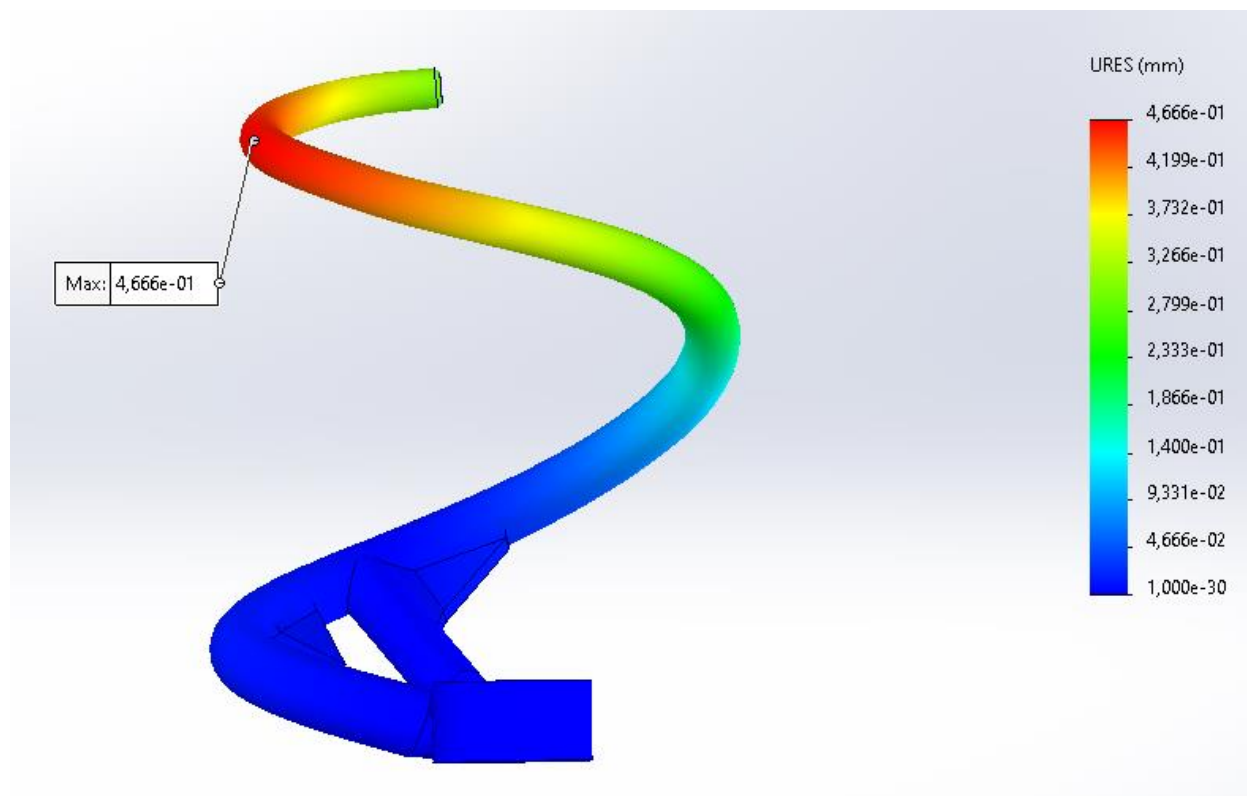


Slika 4.13. – Rezultat simulacije naprezanja početnog modela [5]

Kao što je vidljivo na slici, tablica je označena kao „von Mises ( $\text{N/m}^2$ )“ što je vrsta ekvivalentnog naprezanja koji se koristi za određivanje kada će materijal početi plastično teći, odnosno trajno se deformirati. „Von Mises“ naprezanje omogućava inženjerima da procjene sigurnost konstrukcije pod različitim opterećenjima. Ekvivalentno naprezanje opisuje ukupno naprezanje u nekom materijalu kada na njega djeluje više različitih sila. Složeno stanje naprezanja moguće je svesti u jedno jednostavnije stanje naprezanja, a to je ekvivalentno naprezanje. U SolidWorks-u se ovo ekvivalentno naprezanje prikazuje u rezultatima analize naprezanja unutar modula za konačne elemente. Vizualizacija tih naprezanja pomaže inženjerima u prepoznavanju potencijalnih problema, kako bi, ako je potrebno, mogli promijeniti dizajn i osigurati funkcionalnost i sigurnost proizvoda. U praksi, ako je u nekom dijelu „Von Mises“ naprezanje veći od granice tečenja materijala, taj dio će se trajno deformirati.



Na slici 4.14. prikazan je rezultat simulacije u kojem su, uoči djelovanja momenta, vidljivi pomaci. Pomaci kod ovakvih dijelova i u ovakvim okolnostima eksploatacije također imaju bitnu ulogu. Na slici je vidljivo mjesto gdje dolazi do najvećeg pomaka, te je vidljivo da se pomaci uglavnom dešavaju na gornjoj polovici spirale.



Slika 4.14. – Rezultati simulacije pomaka početnog modela [5]

U rezultatima simulacije za pomak, kao i kod one za naprezanja, s desne strane vidljiva je tablica s rezultatima, od najvećeg pomaka koji se nalazi na vrhu tablice, do onih manjih koji su niže. Poviše tablice piše „URES (mm)“ što se može shvatiti kao ukupan pomak. Ovaj parametar prikazuje ukupnu udaljenost koju je neka točka prešla tijekom simulacije.

Do loma kuke i prilikom ovih relativno malih naprezanja dolazi na mjestima spojeva uslijed grešaka u materijalu, zamora i koncentracije naprezanja. To se dešava i zbog problema sa zavarima na mjestima spojeva, čija simulacija na 3D modelu i testiranje metodom konačnih elemenata na žalost još uvijek nije dostupna. Zbog toga je cilj poboljšati 3D model kuke kako bi se na tim područjima smanjili pomaci i naprezanja.

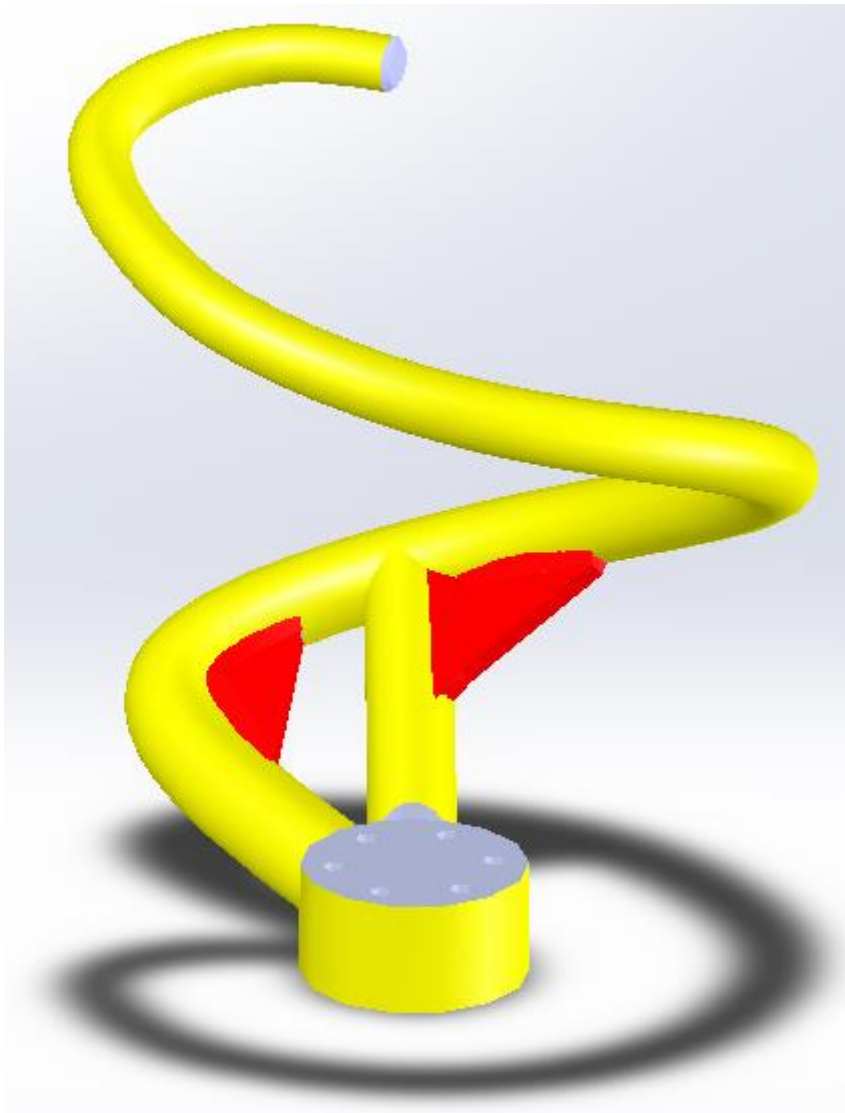
## **5. Poboljšani model: dizajn i analiza s pomoću MKE**

Nakon početne analize prvotnog modela, utvrđene su određene slabosti i područja kojima trebaju poboljšanja. U rezultatima analize također je vidljivo da se najveća naprezanja nalaze na spojevima gdje su spojevi. Cilj ovog dijela rada je prikazati poboljšanja kroz novi, poboljšani model analiziran s pomoću metode konačnih elemenata.

U nastavku rada opisan je proces razvoja i dizajna poboljšanog modela kuke, uključujući sve promjene napravljene kako bi se postigla što veća učinkovitost, naprezanje smanjilo što je više moguće te drugi potrebni parametri. Na kraju će se prikazati dobiveni rezultati analize poboljšanog modela te usporediti s rezultatima početnog.

### **5.1. Uvod u poboljšani model, geometrijske promjene i optimizacija**

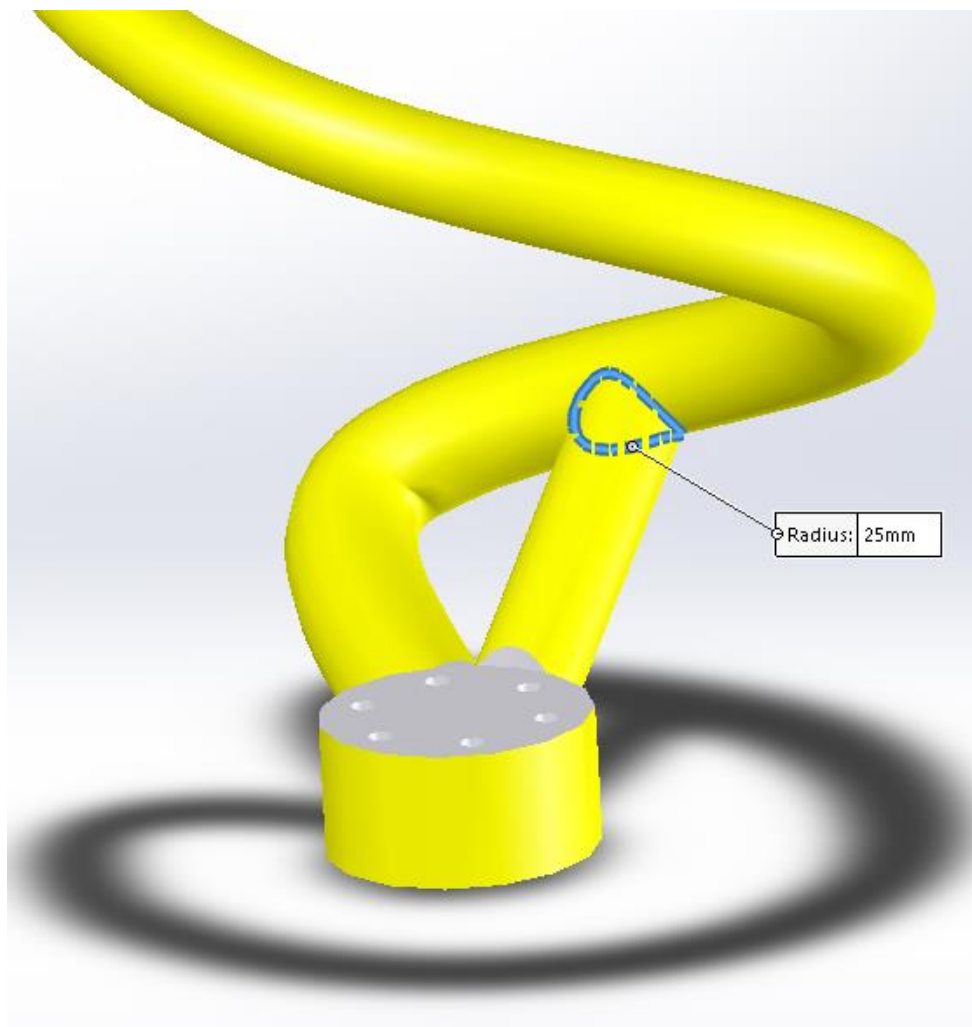
Poboljšanje modela pokušat će se odraditi što je jednostavnije moguće. Proces kreiranja modela identičan je kao prije, a koristit će se isti alati za skiciranje i oblikovanje. Baza poboljšane kuke ostat će nepromijenjena, ona ovisi o dimenzijama prirubnice kuja se spaja s pogonskim mehanizmom miješalice te ne igra nikakvu značajnu ulogu kod analize naprezanja. Ono što će se mijenjati je spirala kuke. Najuočljiviji detalj na redimenzioniranoj spirali je taj da se na ovoj, za razliku od prvotne, ne nalaze dva potporna dijela koja su spajala i pridržavala kako samu spiralu, tako i spiralu i ravni „krak“ kuke (dio koji spaja spiralu i bazu u jednom djelu). Dijelovi koji su uklonjeni su prikazani na slici 5.1. te su označeni crvenom bojom.



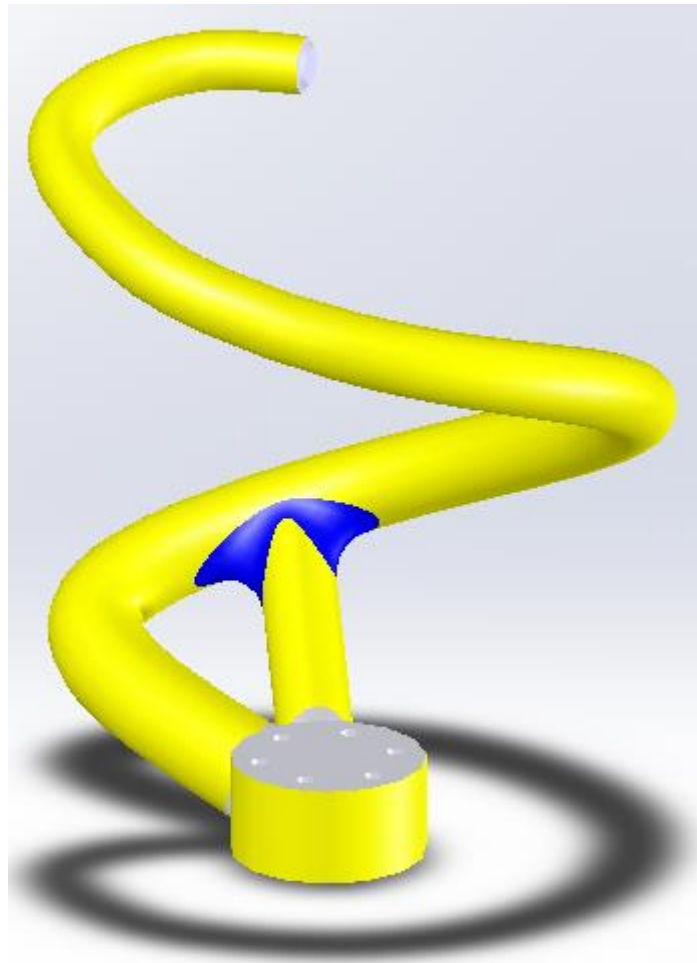
*Slika 5.1. – Uklonjeni dijelovi kuke [5]*

Umjesto potpornih dijelova, na mjestu gdje se ravni „krak“ kuke koji spaja bazu sa spiralom, koristeći opciju „Fillet“ zaobljeni su rubovi pod radijusom od 25 mm, što je pomoglo u estetskom izgledu spirale, ali samim time, što je najvažnije, smanjilo koncentraciju naprezanja i pojednostavnilo proizvodnju.

Na slici 5.2. prikazan je spoj na kuki koji je kasnije fino zaobljen koristeći opciju „Fillet“, te je vidljiv iznos radijusa, a na slici 5.3. plavom bojom prikazano je zaobljenje spoja nakon korištenja iste opcije.



*Slika 5.2. – Spoj na kojemu se primijenila opcija „Fillet“ [5]*

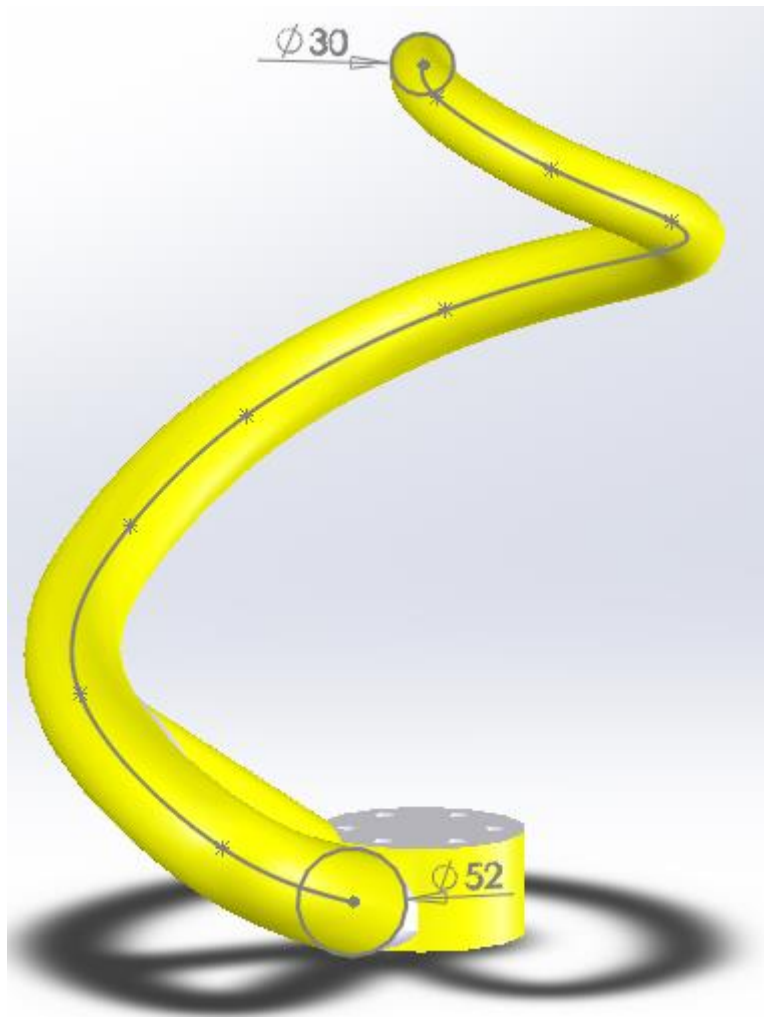


Slika 5.3. – Zaobljenje spoja (opcija „Fillet“) [5]

Osim toga, spirala je podebljana što joj povećava čvrstoću, otpornost na habanje, smanjuje trošenje itd. Deblja spirala je manje podložna savijanju, deformaciji ili lomljenju pod opterećenjem, što rezultira boljim performansama i duljim vijekom trajanja spirale. Na dnu spirale, na mjestu gdje se dodiruje s bazom kuke, podebljanje iznosi 7 mm, te se postepeno smanjuje do vrha, odnosno kraja spirale, gdje je u odnosu na prvobitni oblik, kraj spirale deblji za 5 mm. Na slici 5.4. prikazani su promjeri početka i kraja početne spirale s njenom središnjom linijom. Spirala poboljšane kuke vidljiva je na slici 5.5. na kojoj su također prikazane promjene početnog (52 mm) i krajnjeg (30 mm) promjera spirale s njenom središnjom linijom.

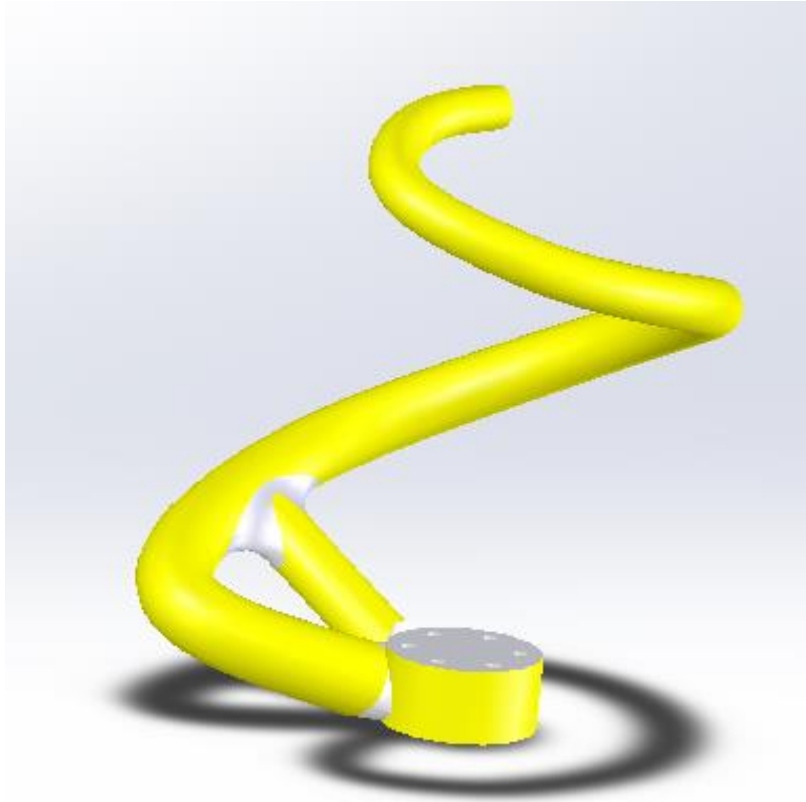


Slika 5.4. – Početni i krajnji promjeri spirale osnovnog modela [5]



*Slika 5.5. - Početni i krajnji promjeri spirale poboljšanog modela [5]*

Materijal koji se koristi kod ovog modela je AISI Type 316L nehrđajući čelik, isti kao i u prvom slučaju. Krajnji izgled 3D modela poboljšane kuke prikazan je na slici 5.6.

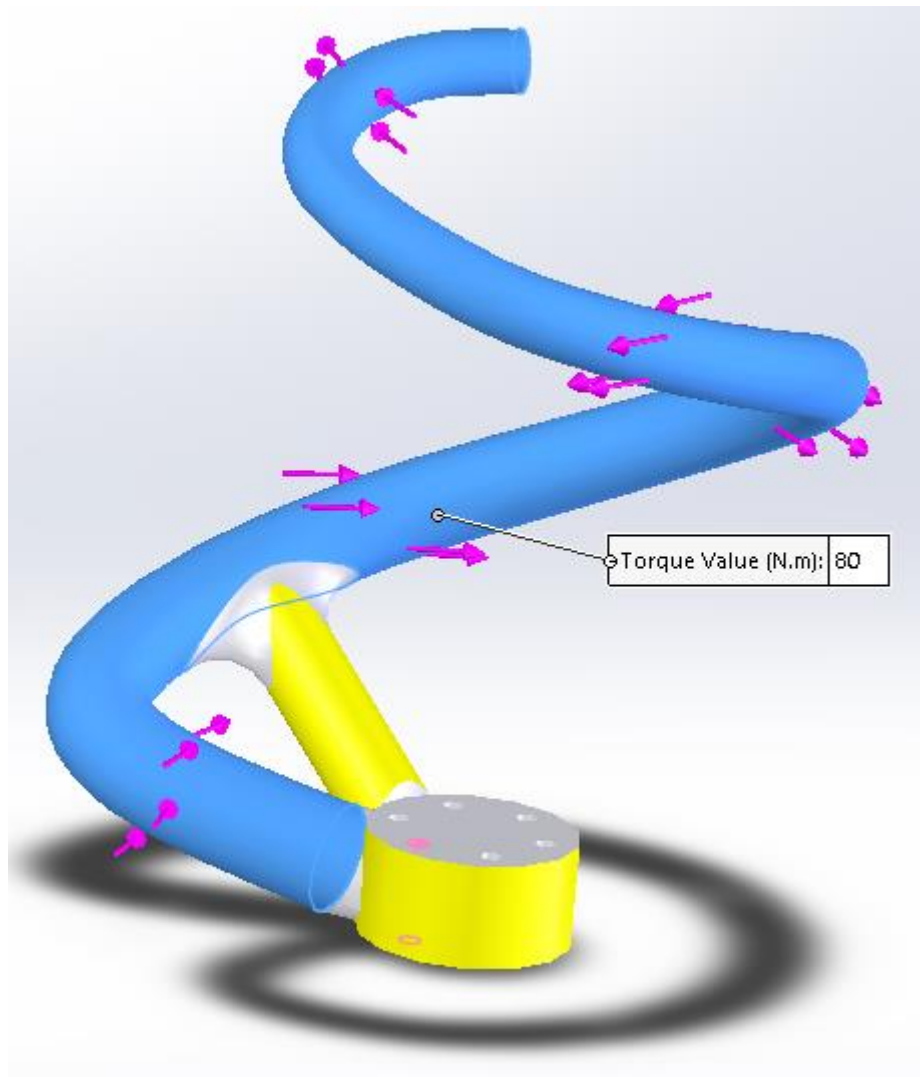


*Slika 5.6. – Redimenzioniran 3D model kuke [5]*

## **5.2. Analiza poboljšanog modela s pomoću MKE**

Nakon završenog dimenzioniranja modela, slijedi isti postupak kao i s prvim modelom, prvo se započinje „New Study“. Na spiralu se zatim, koristeći opciju „Force/Torque“, postavlja sila u obliku momenta jednakog iznosa,  $80 \text{ Nm}$  kao što je prikazano na slici 5.7.

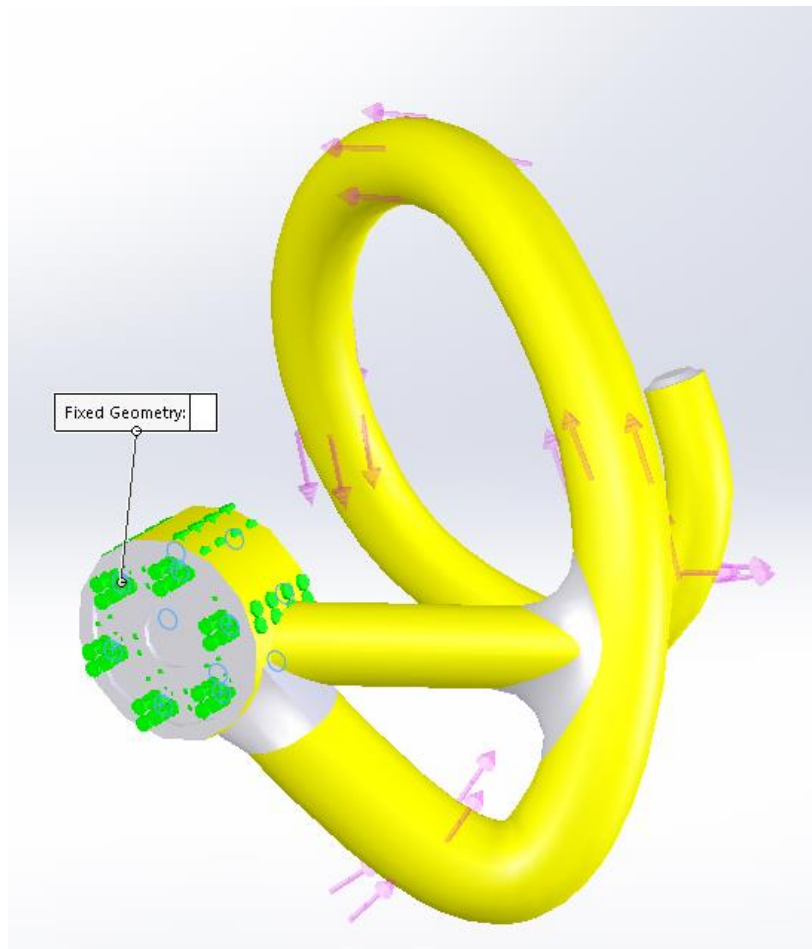




*Slika 5.7. – Spirala redimenzionirane kuke opterećena momentom [5]*

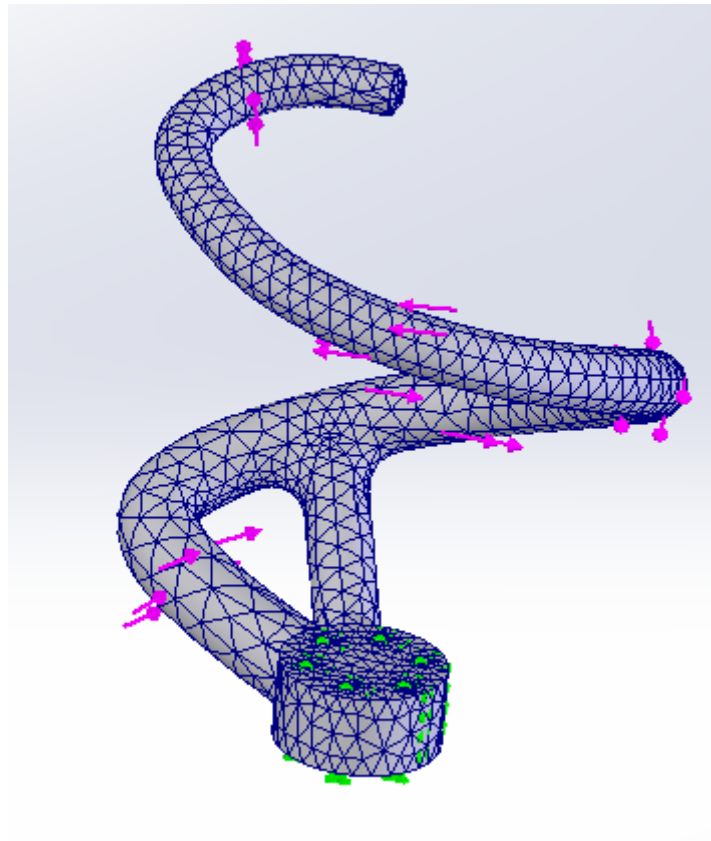
3D model se mora ponašati kao u stvarnosti, zato se fiksiraju rupe koje su namijenjene za vijke, a za to se koristi opcija „Fixture“.

Na slici 5.8. prikazan je model s fiksiranom bazom preko rupa namijenjenim za vijke.



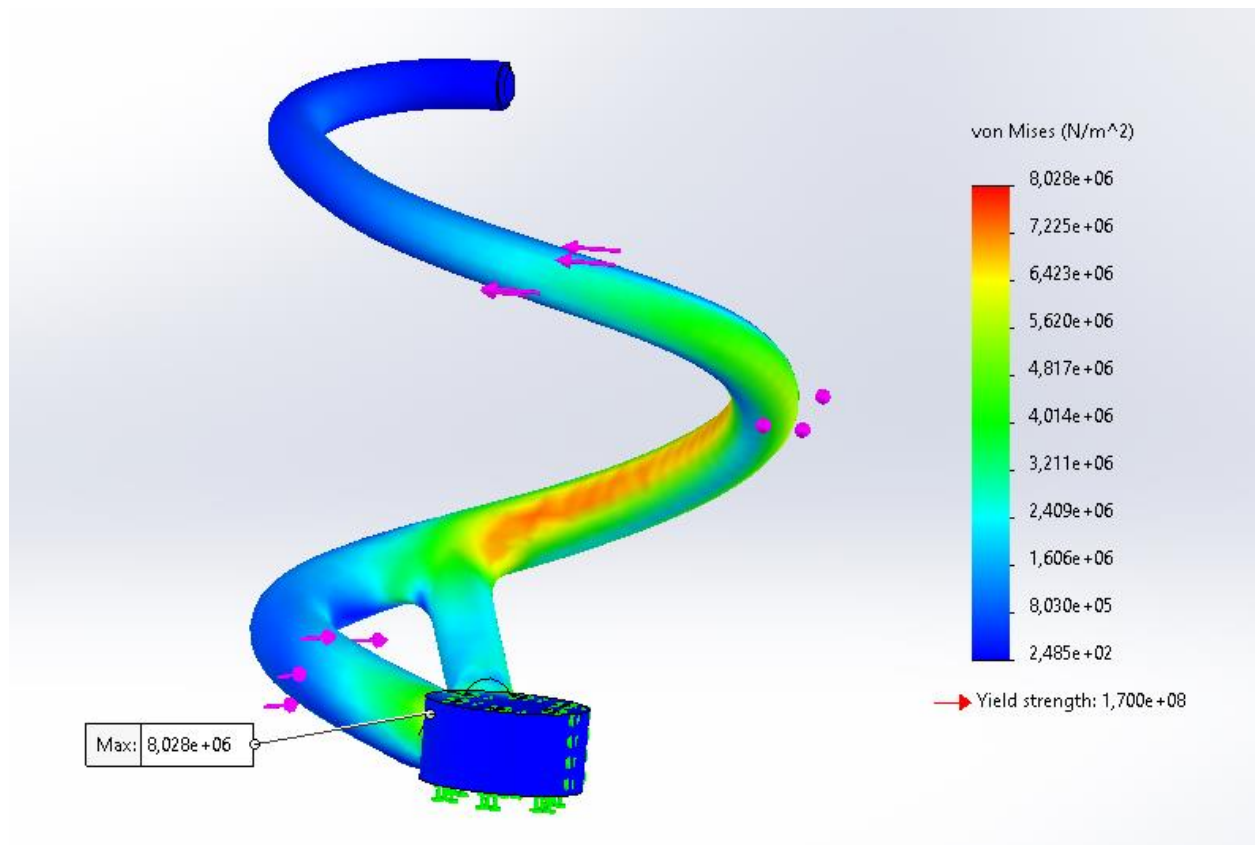
*Slika 5.8. - Fiksirana baza redimenzionirane kuke [5]*

Kako bi metoda konačnih elemenata bila uspješna, kreira se mrežni model prikazan na slici 5.9. koristeći opciju „Mesh“.



*Slika 5.9. – Mrežni redimenzioniran 3D model [5]*

Na kraju opcijom „Run This Study“ pokreće se analiza simulacije novog modela kuke te se dobivaju rezultati prikazani tablično, te su vidljivi u spektru boja na samoj kuki, kao u prijašnjem slučaju. Rezultati simulacije prikazani su na slici 5.10.

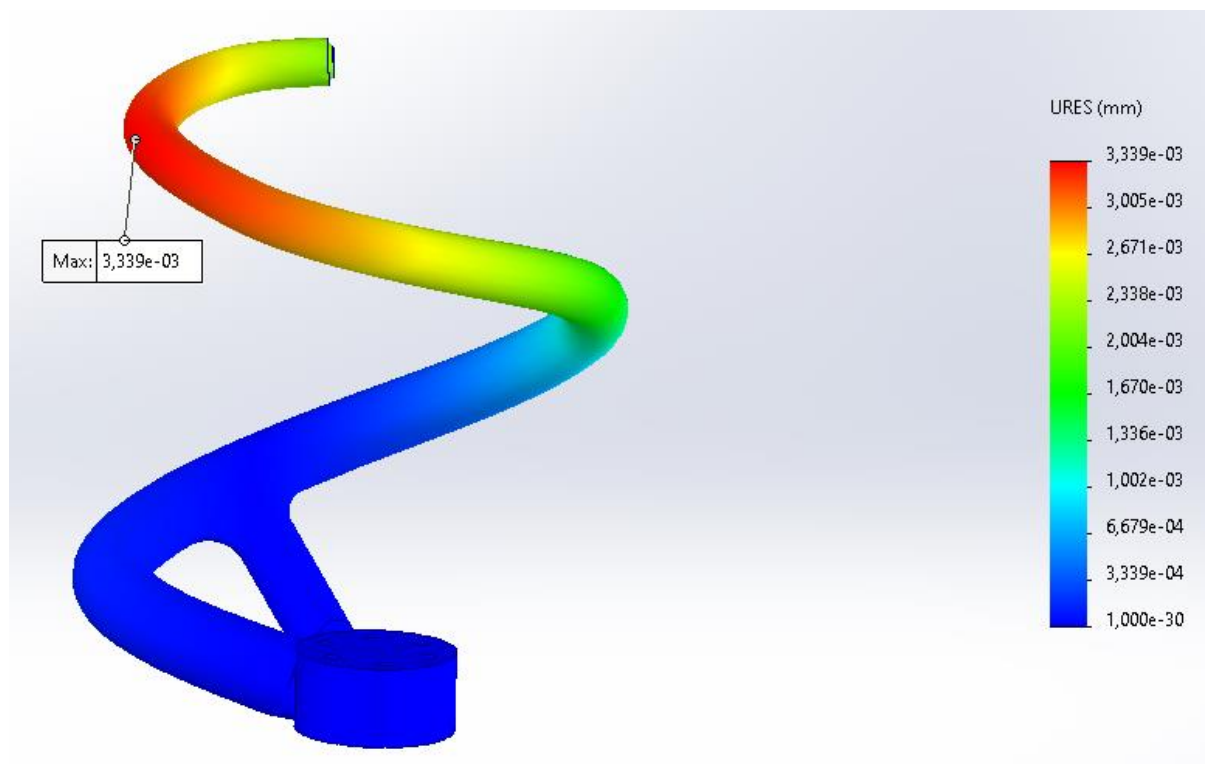


Slika 5.10. – Rezultati simulacije naprezanja poboljšanog modela [5]

Na slici je vidljivo kao i u prijašnjem slučaju mjesto gdje se nalazi najveće naprezanje, te su bojama prikazani veća i manja naprezanja. Granica tečenja je i u ovom slučaju znatno je veća od naprezanja.

Isto tako možemo vidjeti i rezultate koji prikazuju pomake koji se dešavaju tijekom simulacije, te gdje su veći odnosno manji.

Rezultati simulacije pomaka prikazani su na slici 5.11.



Slika 5.11. - Rezultati simulacije pomaka poboljšanog modela [5]

### 5.3. Evolucija rezultata i usporedba s prethodnim modelom

Oba 3D modela rađena su jednakim principom, koristili su se isti alati za izradu, materijal, dimenzije baze (samim time i rupa za vijke) nisu mijenjane, priprema za simulaciju je identična kao i moment na koji su opterećene. Promjene su rađene na spirali kuke, promijenjene su dimenzije promjera spirale te su neki dijelovi uklonjeni.

Cilj ove usporedbe je bio smanjiti maksimalna naprezanja i pomake, kako bi se osigurala bolja otpornost kuke pri određenim uvjetima eksploatacije.

Analizom simulacije prvog modela s pomoću MKE maksimalno naprezanje iznosi  $1,228e+0,7 \text{ N/m}^2$  (slika 4.13.), što bi u megapaskalima to naprezanje iznosilo  $12,28 \text{ MPa}$ . Granica tečenja materijala AISI Type 316L nehrđajućeg čelika iznosi  $170 \text{ MPa}$  ( $1,700e+0,8 \text{ N/m}^2$ ) što je puno veće od maksimalnog naprezanja u prvom slučaju, ali uslijed zamora materijala zbog cikličkog opterećenja, koncentracija naprezanja i grešaka u materijalu svejedno je došlo do puknuća kuke na mjestima zavarenih spojeva, gdje su ustvari najveći problemi. Kod analize poboljšanog modela rezultat maksimalnog naprezanja iznosi  $8,028e+0,6 \text{ N/m}^2$  ili  $8,028 \text{ MPa}$  (slika 5.5.) što

je također mnogo manje naprezanje od granice tečenja materijala ( $170 \text{ MPa}$ ) ali je i manje od maksimalnog naprezanja početnog modela.

Što se tiče pomaka, simulacijom uz pomoć metode konačnih elemenata su također dobivene neke brojke. Kod osnovnog modela vidljivo je da je maksimalan pomak označen najcrvenijom bojom, i on iznosi  $4,666 \times 10^{-1} \text{ mm}$ , što bi bilo  $0,4666 \text{ mm}$ , što je jako niska vrijednost, ali kod ovakvih modela može igrati veliku ulogu pa je uvijek dobro tu vrijednost i smanjiti, ukoliko je moguće.

Kod drugog 3D modela, istom simulacijom dobiven je rezultat maksimalnog pomaka od  $3,339 \times 10^{-3} \text{ mm}$ , odnosno  $0,003339 \text{ mm}$ , što je poprilično manje nego u prvom slučaju.

Cilj je bio smanjiti maksimalne pomake na minimum, i to je uspješno odrađeno promjenama na kuki. Maksimalni pomak od  $0,00339 \text{ mm}$  mnogo je manji nego onaj od  $0,4666 \text{ mm}$ , te to može u određenim okolnostima igrati veliku ulogu, ali s obzirom na to da su maksimalna naprezanja u oba slučaja znatno manja nego granica tečenja materijala, ovi pomaci se mogu smatrati zanemarivima.

Povećanim promjerom te finijim zaobljenjima na spojevima smanjeni su maksimalno naprezanje i pomaci. Ove promjene su, iako sitne, dovele do boljeg performansa modela u vidu raspodjele opterećenja, smanjujući koncentraciju naprezanja na spojevima i poboljšanog vijeka trajanja. Finije obrađeni i zaobljeni zavareni spojevi smanjuju naglu promjenu smjera silnica. Ovo pokazuje važnost optimizacije dizajna, čak i kroz manje promjene, stoga bi se drugi model trebao koristiti u praksi.

## 6. Zaključak

U ovom radu analizirana je kuka koja se koristi u stroju za industrijski proces proizvodnje kruha, s ciljem da se poboljša i pojednostavi njen dizajn te smanji rizik od puknuća. Nakon što je prvotni model pukao tijekom eksploatacije, provedena je strukturalna i optimizacijska analiza naprezanja s pomoću metode konačnih elemenata (MKE) koristeći jedan od trenutno najrazvijenijih CAD softvera SolidWorks, kako bi se identificirala kritična područja i razvila kvalitetnija i bolja konstrukcija.

Rezultati analize simulacije početnog modela kuke pokazali su rezultate maksimalne koncentracije naprezanja ( $12,28 \text{ MPa}$ ) znatno manje od granice tečenja materijala ( $170 \text{ MPa}$ ), ali svejedno je kuka tijekom uporabe pukla na mjestima zavara, zbog faktora kao što su zamor i greške materijala, te cikličko opterećenje. Rezultati analize također su pokazali da maksimalan pomak tijekom eksploatacije iznosi  $0,4666 \text{ mm}$  za ovaj model. Ovaj podatak prikazuje ukupnu udaljenost koju je neka točka prešla tijekom simulacije. Na temelju tih rezultata, izrađen je redimenzioniran model kuke, uklonjeni su nepotrebni dijelovi, podebljana je sprala kuke te su spojevi finije obrađeni i zaobljeni kako bi se smanjila koncentracija naprezanja.

Analizom poboljšanog modela kuke dobiveni su rezultati s manjom maksimalnom koncentracijom naprezanja koja iznosi  $8,028 \text{ MPa}$ , te s maksimalnim pomakom od  $0,00339 \text{ mm}$ , što je bio i cilj. Iako su promjene male, direktno su utjecale na povećanje vijeka trajanja i pouzdanosti, smanjujući mogućnost njenog ponovnog puknuća tijekom uporabe.

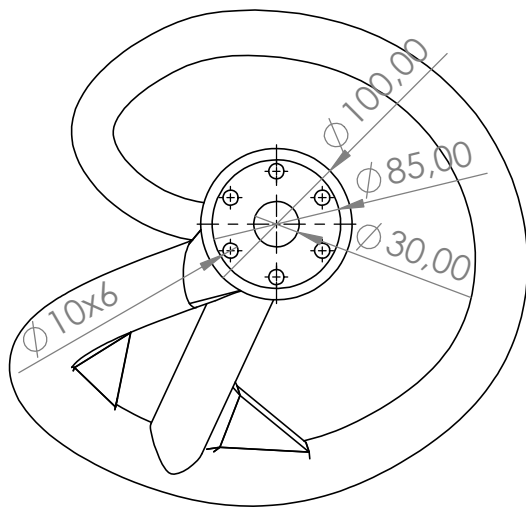
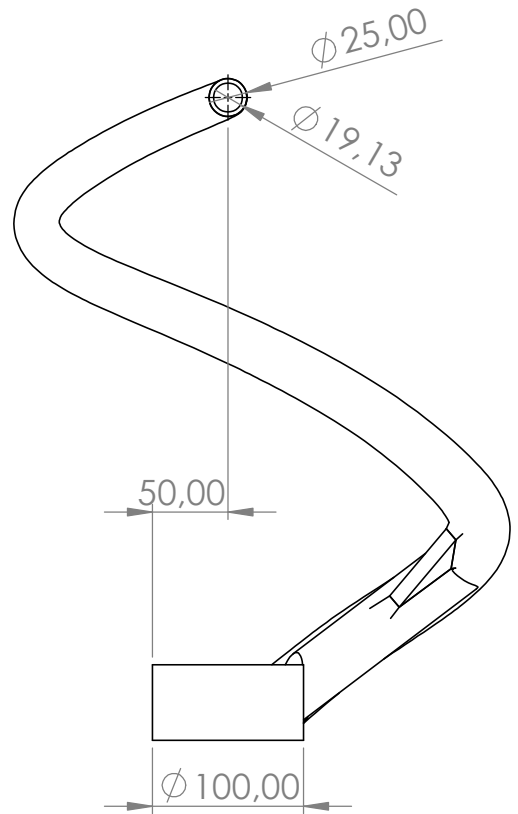
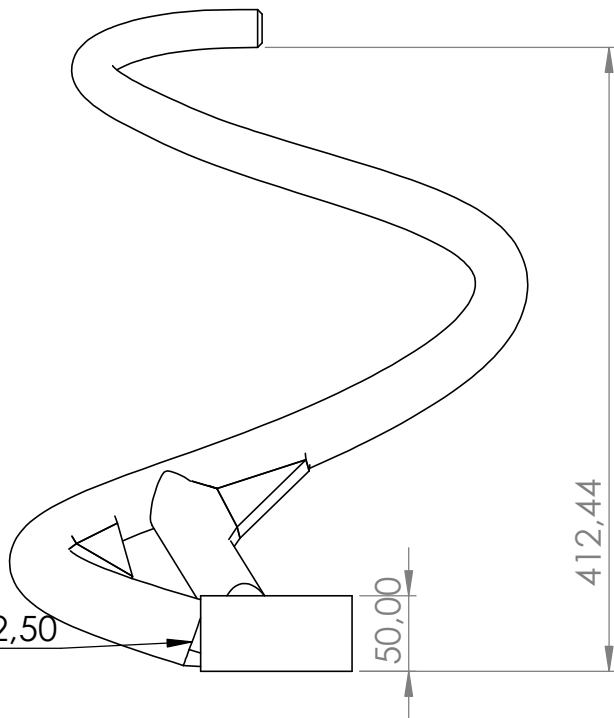
Redizajn kuke osim što je ispunio ciljeve smanjenja maksimalnog naprezanja, prikazao je i značaj metode konačnih elemenata kao alata za optimizaciju industrijskih komponenti. Kroz ovaj rad pokazano je da je pažljivom analizom i ciljanim promjenama moguće značajno povećati sigurnost i efikasnost industrijske opreme.

Međutim, važno je napomenuti da bi se daljnjim testiranjima kuke u stvarnim uvjetima dobio još precizniji uvid u performanse poboljšanog modela. Za buduće radove preporučuje se testiranje kuke u različitim uvjetima rada kako bi se dodatno poboljšala njena otpornost i izdržljivost.

## 7. Literatura

1. Comsol, multiphysics cyclopedia [online]. Dostupno na:  
<https://www.comsol.com/multiphysics/finite-element-method> (pristup ostvaren 10.05.2024)
2. Fiverr, internetsko tržište za freelance usluge [online]. dostupno na:  
<https://www.fiverr.com/kartyshankar/design-3d-models-in-solidworks> (pristup ostvaren 17.05.2024.)
3. Yasin Capar, Finite Element & Volume Analysis Engineer [online]. Dostupno na:  
<https://yasincapar.com/portfolio/cae/solidworks-simulation/2/> (pristup ostvaren 17.05.2024.)
4. Wikipedia, the free encyclopedia [online]. Dostupno na:  
<https://en.wikipedia.org/wiki/SolidWorks> (pristup ostvaren 22.6.2024.)
5. Program SolidWorks<sup>R</sup> – Student Edition [online]. Dostupno na:  
<https://www.solidworks.com/product/students> (pristup ostvaren 20.02.2024.)





UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:  
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS  
SURFACE FINISH:  
TOLERANCES:  
LINEAR:  
ANGULAR:

FINISH:

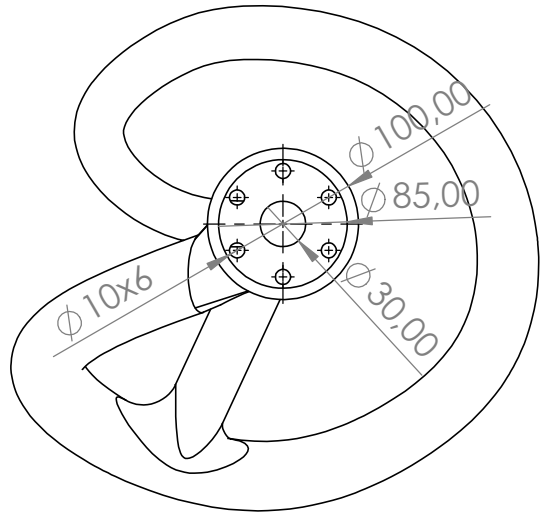
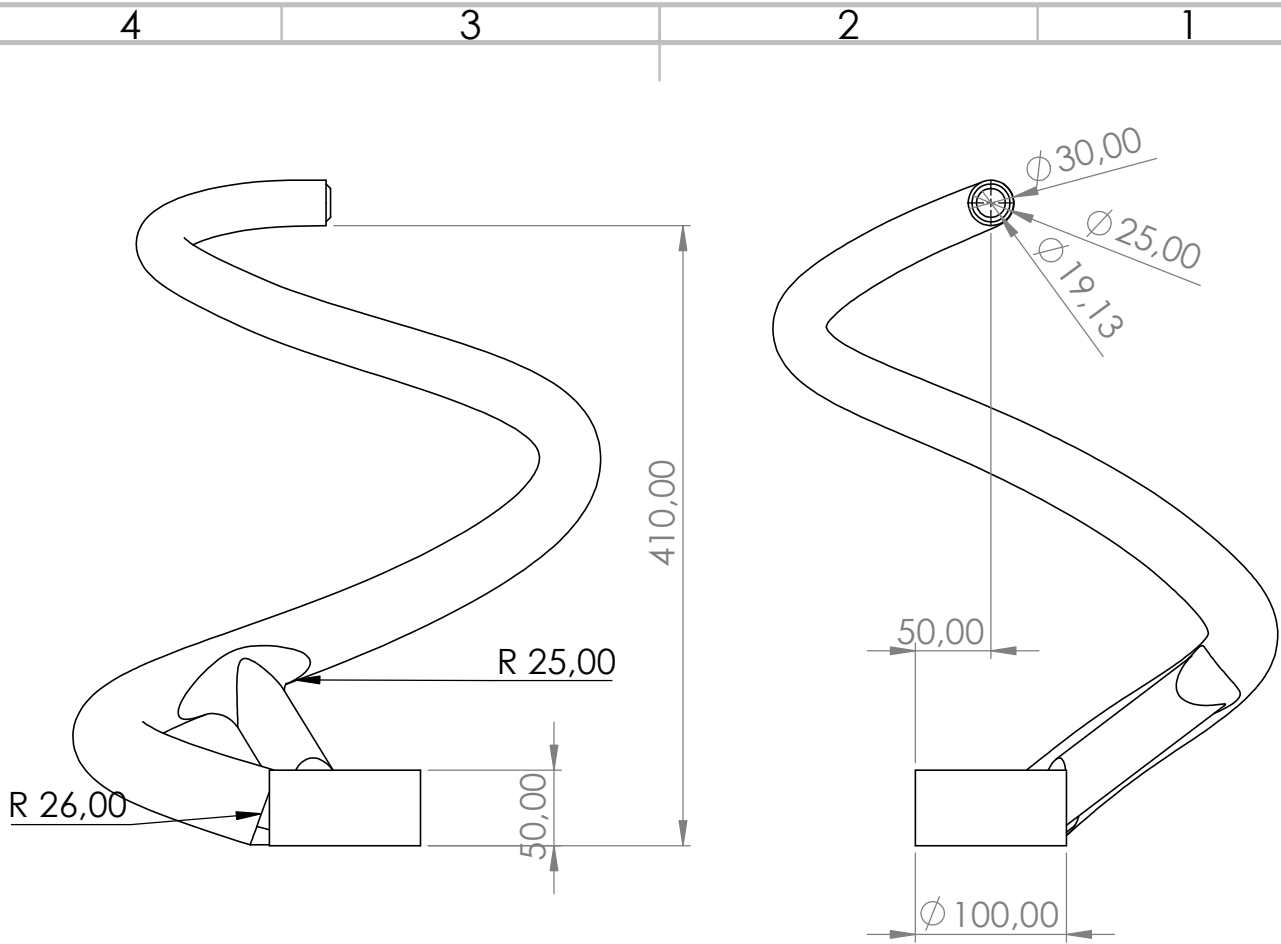
DEBURR AND  
BREAK SHARP  
EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

	NAME	SIGNATURE	DATE	
DRAWN				
CHK'D				
APPV'D				
MFG				
Q.A				
MATERIAL:			AISI Type 316L	
			nehřďajúcí čelík	
WEIGHT:				

TITLE:			
DWG NO.		Osnovni model	A4
SCALE: 1:5		SHEET 1 OF 1	



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:  
 DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS  
 SURFACE FINISH:  
 TOLERANCES:  
 LINEAR:  
 ANGULAR:

FINISH:  
  
 DEBURR AND  
 BREAK SHARP  
 EDGES

DO NOT SCALE DRAWING      REVISION

	NAME	SIGNATURE	DATE
DRAWN			
CHK'D			
APPV'D			
MFG			
Q.A			

TITLE:  
  
 DWG NO.      Poboľšani model      A4  
 SCALE:1:5      SHEET 1 OF 1

MATERIAL:  
 AISI type 316L  
 nehrđajući čelik  
 WEIGHT: