

# Rekonstrukcija i optimizacija nosača automobilskeg motora s obzirom na mogućnost izrade aditivnim tehnologijama

---

Podgornik, Stella

Master's thesis / Diplomski 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:190:979709>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-12-24**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Sveučilišni diplomski studij strojarstva

Diplomski rad

**REKONSTRUKCIJA I OPTIMIZACIJA NOSAČA  
AUTOMOBILSKOG MOTORA S OBZIROM NA MOGUĆNOST  
IZRADE ADITIVNIM TEHNOLOGIJAMA**

Rijeka, rujan 2024.

Stella Podgornik

0069079890

SVEUČILIŠTE U RIJECI

**TEHNIČKI FAKULTET**

Sveučilišni diplomski studij strojarstva

Diplomski rad

**REKONSTRUKCIJA I OPTIMIZACIJA NOSAČA  
AUTOMOBILSKOG MOTORA S OBZIROM NA MOGUĆNOST  
IZRADE ADITIVNIM TEHNOLOGIJAMA**

Mentor: Prof. dr. sc. Robert Basan

Rijeka, rujan 2024.

Stella Podgornik

0069079890

Rijeka, 15. ožujka 2023.

Zavod: **Zavod za konstruiranje u strojarstvu**  
Predmet: **CAE u razvoju proizvoda**  
Grana: **2.11.01 opće strojarstvo (konstrukcije)**

## ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Pristupnik: **Stella Podgornik (0069079890)**  
Studij: **Sveučilišni diplomski studij strojarstva**  
Modul: **Konstruiranje i mehatronika**

Zadatak: **Rekonstrukcija i optimizacija nosača automobilskog motora s obzirom na mogućnost izrade aditivnim tehnologijama / Reconstruction and optimization of the car engine mount with regard to the possibility of its manufacturing with additive technologies**

### Opis zadatka:

Primjenom principa i alata povratnog inženjerstva, rekonstruirati postojeći nosač automobilskog motora i izraditi njegov računalni model. Odrediti relevantna opterećenja nosača tijekom rada i provesti statičke numeričke analize te verifikaciju razvijenih modela. Kritički analizirati stanje tehnike, znanja i računalnih alata u području metoda optimizacije topologije te njihovom primjenom putem odgovarajućeg softvera provesti optimizaciju nosača i utvrditi mogućnosti za unaprijeđenje njegove konstrukcije s obzirom na mogućnost njene proizvodnje aditivnim tehnologijama. Usporediti rezultate detaljnih numeričkih analiza originalnog i optimiranog oblika nosača.

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

*Stella Podgornik*

Zadatak uručen pristupniku: 15. ožujka 2023.

Mentor:



Prof. dr. sc. Robert Basan

Predsjednik povjerenstva za  
diplomski ispit:



Izv. prof. dr. sc. Igor Bonefačić



## IZJAVA

Izjavljujem da sam diplomski rad prema zadanoj temi, pod naslovom „Rekonstrukcija i optimizacija nosača automobilskog motora s obzirom na mogućnost izrade aditivnim tehnologijama“, napravila samostalno prema stečenom znanju tijekom studiranja, navedenoj literaturi te uz stručno vodstvo mentora prof. dr. sc. Roberta Basana.

Rijeka, rujan 2024.

Stella Podgornik



---

## **ZAHVALA**

Zahvaljujem se svome mentoru prof. dr. sc. Robertu Basanu na stručnom vodstvu, strpljenju i pomoći prilikom izrade ovog diplomskog rada. Veliko hvala mojoj obitelji i prijateljima što su mi bili podrška kroz cijelo moje školovanje, a posebno hvala Marku na korisnim savjetima i diskusijama o radu.

# Sadržaj

1. UVOD .....	1
2. POVRATNO INŽENJERSTVO .....	2
2.1. O povratnom inženjerstvu .....	2
2.2. Primjena povratnog inženjerstva .....	3
2.3. Proces povratnog inženjerstva .....	4
3. 3D SKENIRANJE.....	7
3.1. Općenito.....	7
3.2. Vrste 3D skenera.....	7
3.3. Proces povratnog inženjerstva .....	9
4. IZRADA 3D MODELA NOSAČA AUTOMOBILSKOG MOTORA .....	10
4.1. Definiranje skeniranih dijelova .....	10
4.2. Priprema za 3D skeniranje.....	11
4.3. 3D skeniranje nosača motora.....	13
4.4. Obrada podataka .....	20
4.5. Izrada 3D modela.....	25
5. FEM ANALIZA .....	32
5.1. Općenito.....	32
5.2. Sustav nosača automobila.....	33
5.3. Svojstva materijala .....	38
5.4. Rubni uvjeti .....	41
5.5. Podešavanje mreže konačnih elemenata.....	43
5.6. Analiza dobivenih podataka .....	47
5.6.1. Faktor sigurnosti.....	48
5.6.2. Naprezanje prema von Misesu .....	49
5.6.3. Pomaci.....	51
6. OPTIMIZACIJA .....	52
6.1. Optimizacija strukture .....	52

6.2.	Optimizacija topologije .....	54
6.3.	Optimizacija u programu Fusion 360 .....	55
6.3.1.	Odabir geometrije.....	56
6.3.2.	Definiranje materijala.....	57
6.3.3.	Kriterij optimizacije .....	59
6.3.4.	Rubni uvjeti .....	59
6.3.5.	Definiranje i postavljanje mreže .....	60
6.4.	Evaluacija dobivenih rezultata.....	62
6.4.1.	Rezultati optimizacije.....	62
6.4.2.	Druga iteracija .....	64
6.4.3.	Modeli rješenja optimizacije .....	66
7.	ANALIZIRANJE OPTIMIZIRANIH MODELA .....	67
7.1.	CAD modeli.....	67
7.1.1.	Model 1, 70% mase .....	67
7.1.2.	Model 2, 75% mase .....	71
7.2.	FEM analiza modela optimiranih modela .....	74
7.3.	Usporedba rezultata .....	77
7.3.1.	Model 1 .....	77
7.3.2.	Model 2 .....	80
7.3.3.	Odabir optimiziranog modela.....	82
8.	IZRADA ADITIVNIM TEHNOLOGIJAMA.....	84
8.1.	O aditivnim tehnologijama .....	84
8.2.	3D tisak metala .....	85
8.3.	3D tisak pokaznog primjera.....	87
9.	ZAKLJUČAK .....	91
	LITERATURA .....	93
	POPIS OZNAKA .....	97
	POPIS KRATICA.....	98

POPIS SLIKA .....	99
POPIS TABLICA .....	103
SAŽETAK I KLJUČNE RIJEČI.....	104
ABSTRACT AND KEY WORDS .....	105

## 1. UVOD

Tema ovog diplomskog rada jest rekonstrukcija i optimizacija nosača automobilskog motora uz uzimanje u obzir mogućnosti izrade aditivnim tehnologijama. Rekonstrukcija se vrši na stvarnome nosaču automobilskog motora marke Opel. Detaljan odabir nosača, njegove značajke, sklopovi, te prikaz u okviru cijelog sustava motora, prikazani su u dijelovima rada.

Za dobivanje računalnog modela primijenjene su metode i alati povratnog inženjerstva uz pomoć tehnologije 3D skeniranja. Proces povratnog inženjerstva i njegove metode definirani su te prikazani kroz realan slučaj rekonstrukcije nosača, kao i postupak 3D skeniranja. Koriste se i programi sa specijaliziranim alatima (*Geomagic Control X* i *Geomagic Design X*) kako bi računalni model što točnije odgovarao stvarnome modelu.

U okviru statičke numeričke analize, određena su opterećenja i uvjeti (pretpostavke) koje najbolje opisuju stvarni slučaj originalnog nosača i njegovu okolinu, kako bi se dobilo relevantna naprezanja i pomake za daljnje usporedbe. Statička numerička analiza provedena je metodom konačnih elemenata koja je prethodno definirana, a svi korišteni parametri i pretpostavke su pojašnjeni. Statička numerička analiza odrađena je u programskom paketu *Autodesk Inventor*, dok se za potrebe optimizacije koristi *Autodeskov* program *Fusion 360*.

Sa svrhom poboljšavanja stvarnog nosača provedena je optimizacija topologije na računalnom modelu nosača, a prethodno je opisan proces optimizacije kako bi se korištena optimizacije topologije stavila u kontekst rada. Na optimiranim modelima izvršena je statička numerička analiza, kako bi usporedile relevantne vrijednosti originalnog i optimiranih modela, te shodno tome potvrdilo novi model nosača.

Validacijom novog optimiziranog modela definira se njegov način izrade aditivnim tehnologijama, gdje su navedene tehnologije pojašnjene i odabrane, čime završava tema ovoga rada. U okviru rada 3D tiskan je primjerak optimiranog modela, kako bi se vizualno moglo usporediti originalni i optimirani nosač automobilskog motora.

## 2. POVRATNO INŽENJERSTVO

### 2.1. O povratnom inženjerstvu

Povratno inženjerstvo je proces koji uključuje rastavljanje i proučavanje nekog proizvoda, sustava ili softvera, sa svrhom boljeg razumijevanja njegovih temeljnih principa i funkcionalnosti. Može služiti kao baza novim inovacijama, no isto tako može biti dobra analiza već postojećeg proizvoda sa svrhom poboljšanja i unaprjeđenja. Nastalo je kao posljedica ljudske znatiželjnosti i domišljatosti. Još od najranijih dana ljudi su počeli rastavljati stvari iz čiste znatiželje i zanimacije, što je ponavljanjem tih postupaka, odnosno iskustvom i proučavanjem, dovelo do nekih zaključaka i učenja novih stvari [1]. Upravo na toj želji za razumijevanjem leži sama srž povratnog inženjerstva.

Kako bi se detaljno analizirala neka gotova konstrukcija, gotov proizvod razlučuje se na njegove osnovne elemente, a zatim se analizira njihova međusobnu zavisnost koja može biti funkcionalna, radna ili konstrukcijska [2]. S obzirom da se kreće od gotovog proizvoda, cilj povratnog inženjerstva je zapravo doći do početne točke, što se razlikuje od tradicionalne tehnike u inženjerstvu. Postoje dvije tehnike rješavanja problema u inženjerstvu, a to su rješavanje problema unaprijed (engl. *forward problem-solving*) i rješavanje problema unatrag (engl. *backward problem-solving*), na čemu se temelje inženjerstvo unaprijed (engl. *forward engineering*) i povratno inženjerstvo (engl. *reverse engineering*) [3]. Kod inženjerstva unaprijed, koristi se tradicionalna tehnika rješavanja problema unaprijed u kojoj se polazi od neke ideje i velike razine apstrakcije, koja daljnjim rješavanjem problema postaje sve više fizički sklop i sustav, sve do gotovog proizvoda. S druge strane, postoje situacije kada je od nekog konkretnog proizvoda, sustava ili samog dijela, potrebno dobiti određene tehničke podatke poput sklopnog crteža, popisa dijelova i materijala ili nekih drugih inženjerskih podataka. U takvim situacijama se koristi tehnika rješavanja problema unatrag, odnosno provodi se proces povratnog inženjerstva [3].

Hipotetski, povratnim inženjerstvom moguće je unatrag doći do svakog pojedinog nacrtu proizvoda, njegovih elemenata i njihovih međusobnih odnosa, pa tako i izraditi kopiju tog proizvoda ili spomenute informacije iskoristiti za unaprjeđenje postojećeg modela (izrada novog prototipa). To može dovesti do etičkih, a ponekad i legalnih problema, ovisno o namjerama s kojima se ulazi u proces povratnog inženjerstva. Važno je da se povratno inženjerstvo ne koristi u ilegalne svrhe, prema definiranim zakonima za svaku pojedinu državu.

## 2.2. Primjena povratnog inženjerstva

Povratno inženjerstvo pronalazi široku primjenu kako u općenitijim područjima poput mehanike, elektrotehnike, računarstva, programiranja, arhitekture, medicine i biologije tako i u određenim industrijama poput zrakoplovne, automobilske, kemijske ili industrije nakita.

Svako od ovih područja ima različite svrhe korištenja povratnog inženjerstva. U medicini i biologiji, povratno inženjerstvo koristi se za istraživanje i razvoj medicinskih pomagala, od rekonstrukcije 3D anatomskih struktura pa sve do kirurških alata, personaliziranih ili funkcionalnih implantata (kralježnica, kuk, koljeno) [4]. Koristi se i u ortopediji za prilagodbu obuće i ortopedskih pomagala, u dentalnoj medicini za razvoj i izradu zubne protetike te u inženjeringu tkiva [3]. Kod računalnog inženjerstva koristi se za shvaćanje ili pojednostavljenje složenih algoritama ili komponenti, što je moguće iskoristiti kod programiranja, kako bi se poboljšao neki kod drugim izvornim kodom, ali i kod kibernetičke sigurnosti, za raščlanjivanje zlonamjernog koda [3]. Povratnim inženjerstvom moguće je dobiti i kemijski sastav željenih tvari, što se koristi u kemijskoj industriji [2].

U strojarstvu, povratno inženjerstvo može imati svoju ulogu u proizvodnji, održavanju te prilikom konstruiranja. Kod konstruiranja proizvoda ono može poslužiti kao izvor informacija temeljen na fizičkom modelu. Primjer ovog slučaja su industrije koje prilikom konstruiranja najprije rade fizičke modele od gline, drva ili pjene, a onda na osnovu tog fizičkog modela izrađuju CAD odnosno računalne modele [3]. Ovaj princip koristi se u automobilskoj industriji, gdje je lakše neku promjenu modela raditi na postojećoj konstrukciji. Kako novi proizvodi postaju sve složeniji, povratnim inženjerstvom moguće je takav složeni fizički model jednostavno analizirati i obraditi, te dobiti CAD model koji će se koristiti u svrhe daljnje proizvodnje.

U proizvodnji povratno inženjerstvo je važno, jer smanjuje vrijeme ciklusa razvoja proizvoda. S obzirom na konkurentnost tržišta, proizvođačima je bitan brzi razvoj proizvoda te što bolje tehnike i tehnologije koje imaju mogućnost smanjenja vremena proizvodnje, a upravo tome može poslužiti povratno inženjerstvo. Njime je moguće brzo izraditi model potrebnih alata ili kalupa za daljnju proizvodnju.

Kod održavanja također postoje brojne situacije u kojima je povratno inženjerstvo od velike pomoći. Jedna od tih situacija je da se originalni dio nekog sklopa odnosno proizvoda ošteti te se mora zamijeniti, pri čemu je rezervni dio nedostupan ili se više ne proizvodi. Također, moguća je situacija u kojoj je nužno popraviti nešto na postrojenju ili provjeriti funkcionalnost nekog dijela sustava, ali za to ne postoji (ili je izgubljena) projektna dokumentacija, sklopni ili tehnički nacrti.



Osim navedenog, povratno inženjerstvo se u strojarstvu može koristiti za kontrolu kvalitete, analiziranje dobrih i loših svojstava nekog proizvoda, te poboljšavanje performansi i značajki. Ukoliko postoji neki dio za koji je bitna velika točnost, moguće je usporediti proizvedeni dio s njegovim CAD modelom i u programu usporediti njihova odstupanja. Kada je riječ o analiziranju svojstava, moguće je na temelju nekog proizvoda, nakon dugotrajne upotrebe, analizirati koje značajke su mu lošije (npr. prekomjerno trošenje), a koje su bolje, kako bi se poboljšala ukupna svojstva proizvoda. Analizu dobrih i loših svojstva proizvoda korištenjem povratnog inženjerstva, moguće je primijeniti i na konkurentnim proizvodima, kako bi se poboljšala svojstva vlastitog proizvoda.

### **2.3. Proces povratnog inženjerstva**

Proces povratnog inženjerstva uključuje namjerno rastavljanje proizvoda na njegove manje dijelove, komponente ili strukture, te samo analiziranje proizvoda. Glavne svrhe rastavljanja proizvoda su [1]:

1. Provođenje tehničke i troškovne analize - Tehničko analiziranje uključuje dobivanje geometrije, orijentacije, rasporeda elemenata i njihovog međudnosa, materijala, te informacija o proizvodnji, obradi i montaži, dok troškovna analiza uključuje određivanje svih troškova od sirovina, obrade materijala, rada strojeva, rada ljudi, konstruiranja, održavanja, energije, pa sve do recikliranja.
2. Stjecanje znanja i iskustva - Rastavljanje proizvoda se radi kako bi se stekla određena iskustva i naučilo što neki proizvod čini dobrim i funkcionalnim ili kako bi se shvatilo koje su mane nekog proizvoda te zašto isti više ne funkcionira. Stečeno znanje kasnije je moguće evidentirati u nekoj bazi podataka.
3. Dobivanje vrijednosti za usporedbu - Usporedba proizvoda se može raditi kako bi se vidjelo kakav je neki proizvod u odnosu na druge, te koliko je konkurentan na tržištu. Ovakav princip može se primijeniti u nekoj industriji, ali i u drugim područjima poput povijesti gdje je moguće usporediti sam napredak neke civilizacije.

S obzirom da je povratno inženjerstvo složen proces i uključuje raščlanjivanje proizvoda na jednostavnije dijelove, proces je moguće i poželjno podijeliti na niz definiranih koraka. Ovakav metodički pristup olakšava cijeli proces i omogućuje bolje razumijevanje temeljnih mehanizma i funkcionalnosti. Točan postupak i broj koraka može varirati, ovisno o autoru ili samom procesu, ali općeniti postupak može sadržavati neke od idućih koraka [2,5]:

1. Priprema – Ovo je početna faza u kojoj se definiraju ciljevi povratnog inženjerstva, identificira se objekt koji će se proučavati te u koje svrhe.
2. Prikupljanje informacija (istraživanje) – Prije ikakvih izmjena i rastavljanja, moguće je izraditi dokumentaciju predmeta u pogledu snimanja fotografija, izrada shema i sl. Moguće je i odraditi preliminarna mjerenja nekih ključnih dimenzija ili udaljenosti pojedinačnih komponenti u sklopu.
3. Rastavljanje – Nakon pripreme, rastavljaju se sklopovi do pojedinačne komponente. Svaki dio je moguće postepeno označiti ili pohraniti redosljed rastavljanja kako bi se olakšalo sastavljanje. U ovom koraku moguće je koristiti i dodatni alat ili tehnike za uklanjanje spojnih elemenata.
4. Analiziranje i procjena – Kada se rastavi, svaku komponentu treba ispitati. Ovo uključuje vizualni pregled, mjerenje svih dijelova, funkcijsku analizu i analizu materijala. Navedeno se radi kako bi se shvatila struktura proučavanog objekta te funkcijska povezanost svih elemenata. Tijekom analize moguće je koristiti tehnike poput 3D skeniranja, CAD modeliranja i programa za simulacije kako bi se dobio ciljani objekt u virtualnom okruženju.
5. Sastavljanje – U ovom koraku, rastavljeni dijelovi, ponovno se sastavljaju oni redosljedom kako su bili i rastavljeni. Sastavljeni proizvod trebao bi odgovarati početnom proizvodu svojim izgledom, funkcijama i svojstvima.
6. Dokumentacija – Nakon završenog praktičnog dijela povratnog inženjerstva, poželjno je svu dokumentaciju, fotografije, nacрте, analize, metode i ishode, pohraniti izvještajem, kako bi se kasnije mogla iskoristiti kao referenca za daljnja istraživanja ili unaprjeđenja proizvoda. Osim izvještaja, poželjno je sistematično pohraniti 3D skenove, CAD modele, razne softverske simulacije i sl.
7. Rekonstruiranje – Na temelju prethodno odrađene dokumentacije i potrebne analize, u zadnjem koraku moguće je nastaviti konstruiranje proizvoda s ciljem modifikacije nekih njegovih komponenata ili optimizacije određenih značajki. Osim poboljšavanja određenih značajki ili izgleda, moguće je i raditi na novom proizvodu korištenjem prikupljenih informacija tokom povratnog inženjerstva.

U povratnom inženjerstvu koriste se razne tehnike koje omogućavaju prikaz stvarnog predmeta u virtualnom okruženju te manipuliranje istim. Neke od tih tehnika su 3D (ili 2D) skeniranje, mjerenje koordinatnim mjernim uređajem (engl. CMM), CT skeniranje, magnetska rezonancija (MRI), digitalna mikroskopija itd. Osim navedenog, koriste se i programi za CAD

modeliranje ili neki specijalizirani softverski alati za obradu snimljenih podataka. U idućem poglavlju objasnit će se nešto više o postupku i tehnikama 3D skeniranja, kao i o softveru i alatima potrebnim za daljnju obradu i korištenje tih snimljenih podataka, budući da su navedene tehnike i alati korišteni u ovom diplomskom radu.

### **3. 3D SKENIRANJE**

#### **3.1. Općenito**

Napretkom inženjerstva i 3D modeliranja, pojavila se tehnologija 3D skeniranja, kao veza između fizičkog modela i digitalnog 3D (CAD) modeliranja. Uz pomoć raznih softvera za 3D skeniranje i obradu dobivenih podataka, 3D skeniranje je postalo moćan alat u više industrija jer brzo daje točne dimenzije, virtualnu sliku te mogućnost analiziranja fizičkog modela [6]. Tehnologija 3D skeniranja često se koristi u povratnom inženjerstvu, jer smanjuje vrijeme mjerenja i kontrole, kao i dobivanja točnog CAD modela što smanjuje vrijeme modeliranja i pospješuje analiziranje i konstruiranje proizvoda ili razvoj prototipa. Sve je to moguće zbog naprednih softvera za brzo mjerenje, pohranu i analizu podataka [6].

3D skener je uređaj koji se koristi za skeniranje fizičke geometrije nekog predmeta u sve tri dimenzije [3]. Skeniranjem, 3D skener stvara oblak točaka čime definira geometriju svake plohe u virtualnom obliku. Takav oblik podataka moguće je koristiti samo za 3D ispis, ali moguće je i dodatno obraditi podatke kako bi se dobilo kvalitetnije CAD modele za analizu. Na tržištu je prisutno više vrsti 3D skenera čiji se rad temelji na različitim tehnologijama, stoga će se u idućem potpoglavlju spomenuti neke od njih.

#### **3.2. Vrste 3D skenera**

Osnovna podjela 3D skenera je na kontaktne i beskontaktne skenere. Kontaktne 3D skeneri imaju isti princip rada kao i strojevi za koordinatno mjerenje (CMM uređaji). Princip rada je takav da kontaktne sonde (slika 3.1.) automatski prelaze preko fizičkih površina čime dodiruju različite točke predmeta [3]. Prelaskom preko ključnih točaka, snimaju se koordinate tih točaka i pohranjuju kako bi se izradio 3D prikaz modela. Važno je napomenuti kako je potrebno održavati kontaktni pritisak između sonde i predmeta, kako bi se mjerni vrh sonde savio i time detektirao točku. Mane kontaktnih skenera su što mogu biti sporiji u odnosu na beskontaktne, te problem s kontaktnim pritiskom ukoliko su predmeti izrađeni od mekih ili osjetljivih materijala.



*Slika 3.1 Kontaktna sonda [7]*

Pod drugu vrstu 3D skenera spadaju beskontaktni skeneri. Za razliku od kontaktnih 3D skenera, beskontaktni mogu prikupiti podatke bez fizičkog dodira sa predmetom. Ovisno o tehnologiji na kojoj se temelje, razlikuje se i njihov način rada. Prema načinu rada, beskontaktni skeneri mogu biti laserski ili optički [3]. Laserski 3D skeneri (slika 3.2) koriste laserske zrake pomoću kojih mjere udaljenost do objekta, jedni tako da računaju vrijeme potrebno da se zraka reflektira (*Time of Flight* skeneri), dok drugi kamerom hvataju reflektirane zrake i računaju udaljenost zraka triangulacijom (triangulacijski skeneri), čime kreiraju detaljne 3D modele [8].

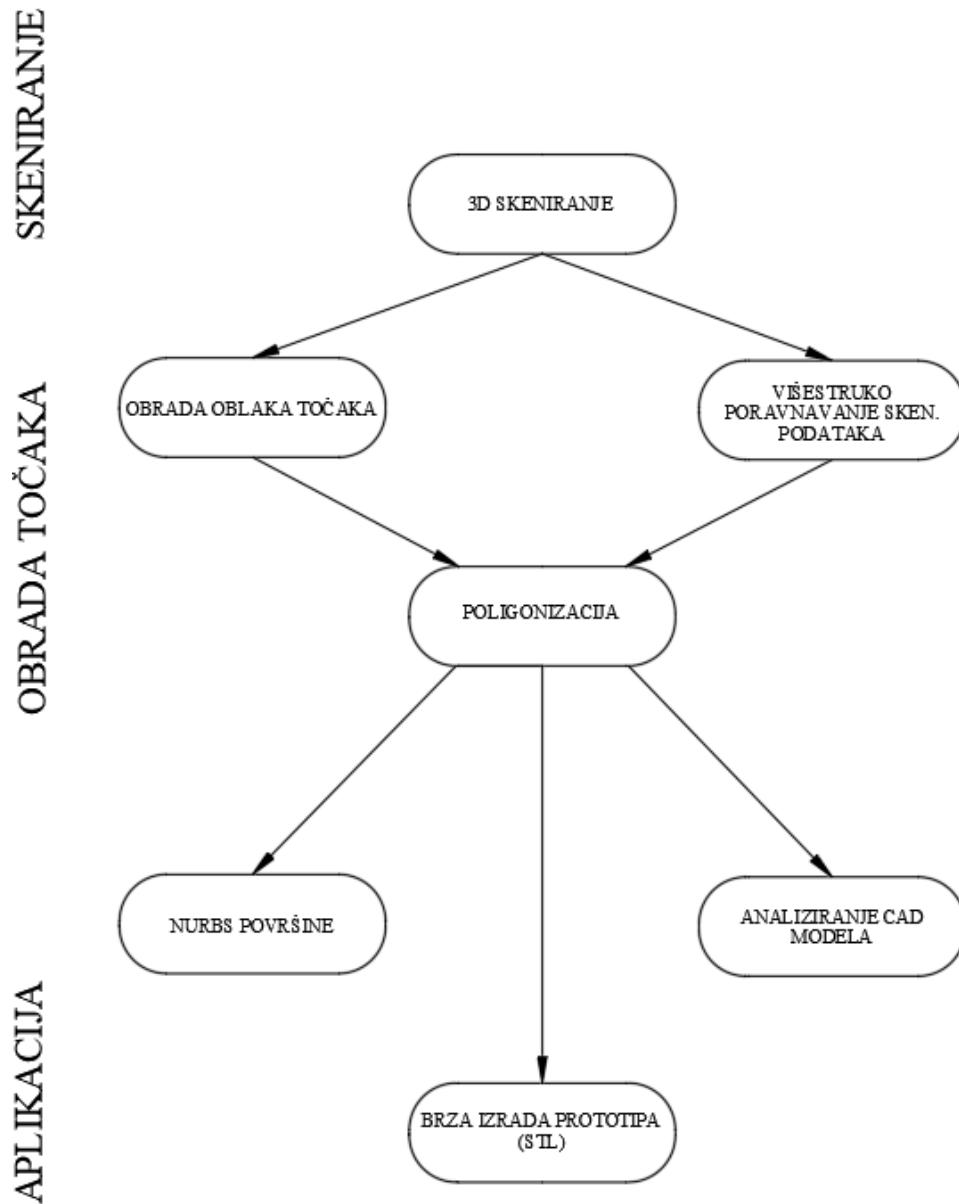


*Slika 3.2 Laserski 3D skener [9]*

Optički, odnosno strukturirani svjetlosni skeneri, projiciraju uzorak svjetla na površinu predmeta. Kako se uzorak rastegne ili deformira po površini predmeta, njegovom analizom softver generira model predmeta. Svjetlo koje se projicira može biti bijelo ili plavo.

### 3.3. Proces povratnog inženjerstva

Proces povratnog inženjerstva korištenjem 3D skeniranja sastoji se od 3 faze: skeniranja objekta, obrade dobivenih podataka, aplikacija odnosno manipulacija dobivenim modelom [3]. Navedeni proces moguće je i prikazati dijagramom tijeka na slici 3.3.



Slika 3.3 Dijagram tijeka povratnog inženjerstva uz 3D skeniranje[3]

Cijeli proces povratnog inženjerstva korištenjem tehnologije 3D skeniranja bit će primijenjen te u potrebnom opsegu prikazan i opisan u idućem poglavlju kroz rekonstrukciju nosača automobilskeg motora.

## 4. IZRADA 3D MODELA NOSAČA AUTOMOBILSKOG MOTORA

### 4.1. Definiranje skeniranih dijelova

Kako je spomenuto u prethodnome poglavlju, ovaj rad se bazira na rekonstrukciji nosača u svrhu njegove optimizacije. Odabrani nosač je nosač automobilskog motora marke Opel i prikazan je na slici 4.1.



*Slika 4.1 Nosač automobilskog motora*

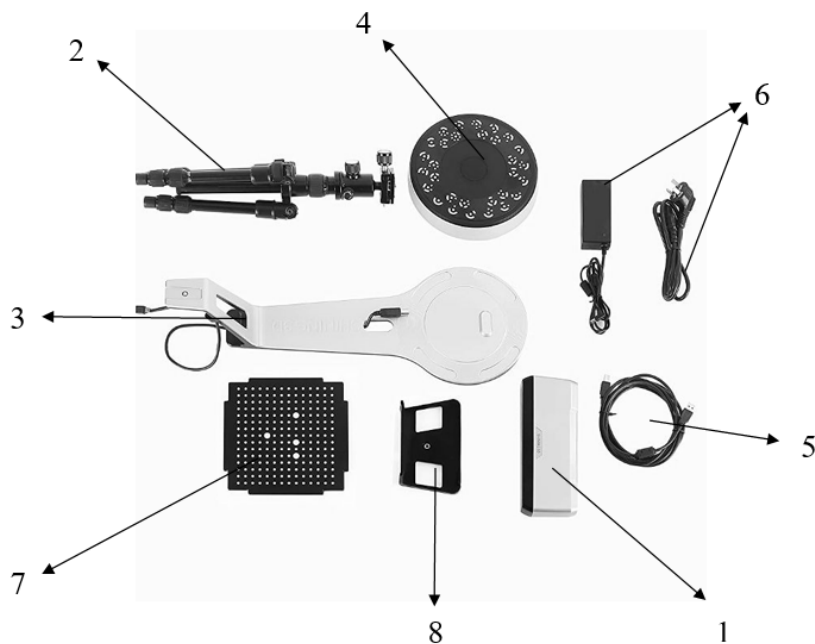
Nosač se sastoji od 3 dijela: metalnog dijela (baze) (1), gume (2) i čahure (3), od kojih su najvažniji metalni i gumeni dio. Metalni dio nosača ima ulogu nosivog elementa i na njemu se nalazi sva težina motora (i njegovih dijelova sustava), a uglavnom može biti od aluminija ili čelika. U ovom slučaju metalni dio izrađen je od lijevane slitine aluminija. Gumeni dio služi za izoliranje,

odnosno prigušivanje vibracija, čime doprinosi tišem radu motora i sprječava prenošenje vibracija na druge dijelove automobila. Čahura omogućava spajanje nosača sa motorom preko vijka, te smanjuje habanje gume prilikom rada motora (vibracije). Navedeni dijelovi zajedno čine nosač motora, točnije nosač i guma napravljeni su kao nerastavljivi spoj. Guma je tvornički uprešana i ne može se izvaditi iz metalnog dijela (kućišta) bez razaranja, stoga rastavljanje navedenih dijelova povratnim inženjerstvom nije opcija te će se nosač promatrati kao jedna cjelina.

#### 4.2. Priprema za 3D skeniranje

Kod rekonstrukcije nosača, važno je kvalitetno i sistematski krenuti, tako da sve kasnije dorade i manipulacije budu što jednostavnije i brže. Prvi korak je izrada dobrog 3D modela, prema realnom predmetu, kako bi se na njemu mogle raditi razne analize, optimizacije, a kasnije i preinake konstrukcije. S obzirom da je riječ o lijevanom nosaču složenije geometrije, koju nije tako lako precizno izmjeriti konvencionalnim alatima (metar, pomično mjerilo i sl.) i već je navedeno da rastavljanje dijelova nosača nije moguće bez njegovog razaranja, najbolja opcija za dobivanje točnijeg modela je 3D skeniranje.

3D skeniranje odrađeno je stolnim skenerom Shining 3D, model EinScan SP, kojeg je moguće vidjeti na slici 4.2 sa pripadajućim dijelovima.



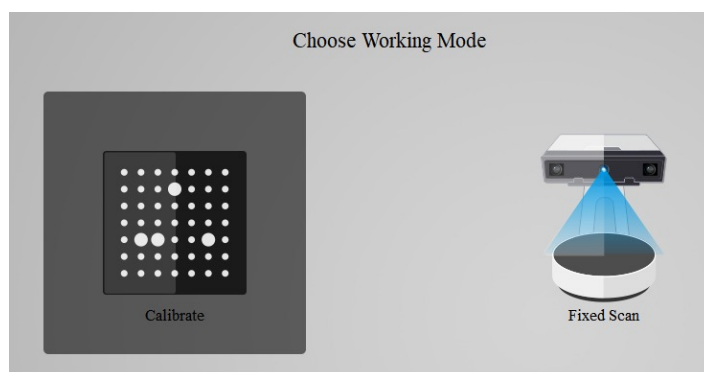
Slika 4.2 Dijelovi skenera [11]



Skener se sastoji od glave skenera (1) koju je moguće staviti na tripod (2) ili postolje (3), rotacijskog stola (4), USB kabela (5) koji povezuje rotacijski stol i glavu skenera, te kabela (i adaptera) za napajanje (6) cijelog skenera. Osim toga, sa skenerom se dobije i ploča (7) kojom se skener na početku kalibrira skupa sa postoljem (8) za kalibracijsku ploču (7) [11].

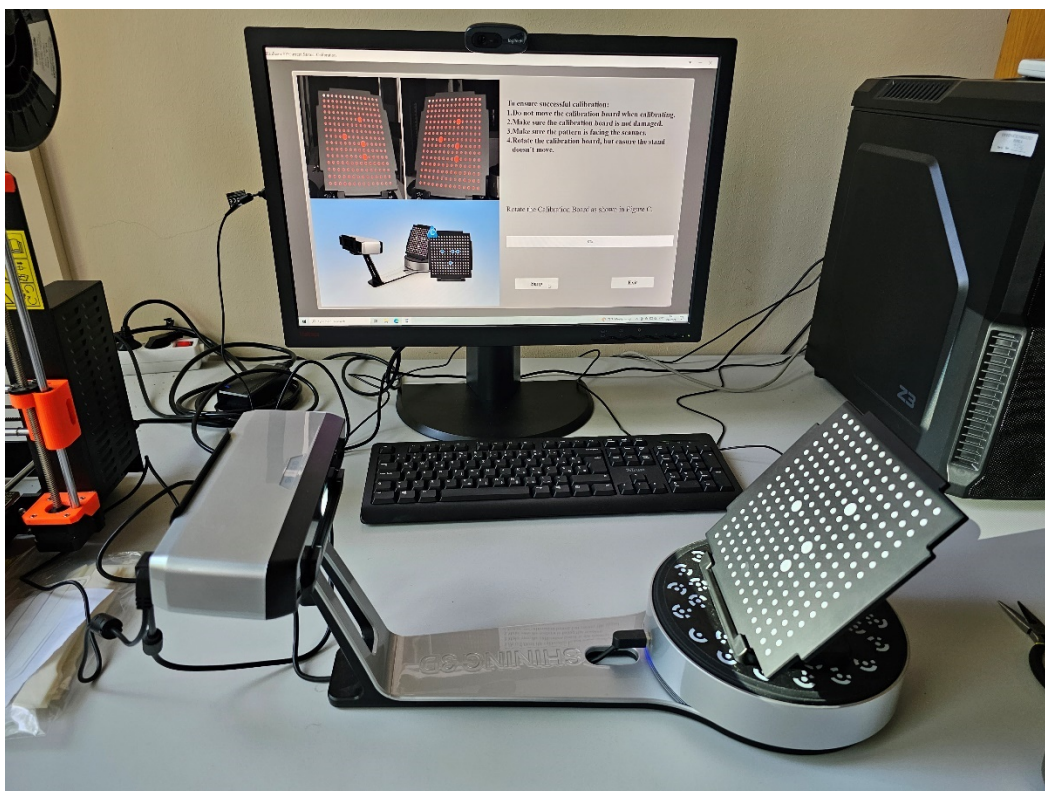
Prije samog skeniranja potrebno je pripremiti nosač i skener za postupak. S obzirom da nosač ima površine koje reflektiraju svjetlost, one se premazuju slojem praha u spreju. Obično se koristi sprej koji se koristi kod ispitivanja materijala bez razaranja. Sloj bijelog praha je uglavnom tanak, no ovisi o tome koliko je sjajna površina. Ukoliko su neke površine matirane, ne treba ni stavljati sprej jer površine neće reflektirati svjetlost.

Nakon nanošenja praha, slijedi priprema skenera. Glava skenera, postolje i rotacijski stol se spoje, napajanje se uključi, i sve se poveže na računalo. Na računalu se sve radi u aplikaciji EinScan-SP. Odmah pri ulasku u aplikaciju, prikaže se ekran (slika 4.3) u kojemu se odabere kalibracija.



*Slika 4.3 Odabir kalibracije skenera*

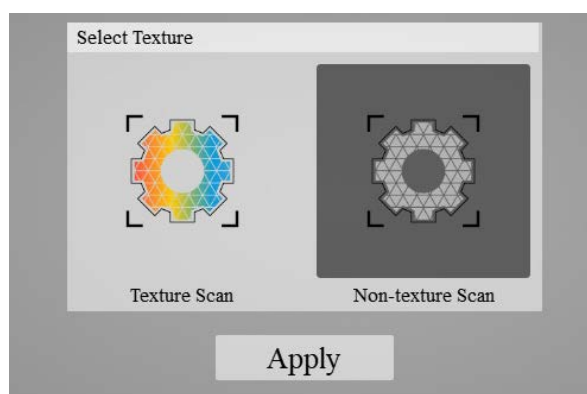
Aplikacija korisnika vodi kroz cijeli postupak kalibracije. Za kalibraciju je potrebno postaviti kalibracijsku ploču na postolje i rotacijski stol točno prema uputama, odnosno prema slikama prikazanim na ekranu. Na slici 4.4 prikazano je postavljanje kalibracijske ploče i kalibracija u programu. Nakon svakog skeniranja ploče, postupak se spremi te pokrene idući korak, uz okretanje ploče. Navedeni postupak se prema uputama ponavlja 3 puta, kako bi kalibracija bila uspješna.



Slika 4.4 Kalibracija 3D skenera

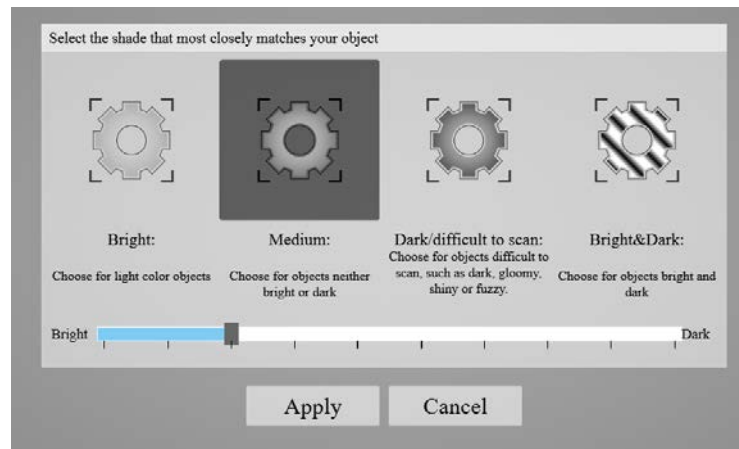
### 4.3. 3D skeniranje nosača motora

Nakon uspješno odrađene kalibracije, moguće je krenuti sa skeniranjem. Umjesto opcije kalibracija (slika 4.3), odabere se postupak skeniranja, odnosno *Fixed scan*. Na početku skeniranja podešavaju se parametri skeniranja. Ovisno o svrsi skeniranog modela, odabire se vrsta skena, odnosno opcija sa teksturom ili bez tekture. S obzirom da su u slučaju nosača najvažnije dimenzije, a ne detalji i tekstura površine, dovoljno je odabrati opciju bez tekstura kao na slici 4.5.



Slika 4.5 Odabir teksture skeniranog modela

Pored tekstone, odabire se i svjetlina površine (slika 4.6). Moguće je koristiti neku od definiranih opcija ili podešavati svjetlinu, ovisno o potrebama predmeta, koristeći klizač.



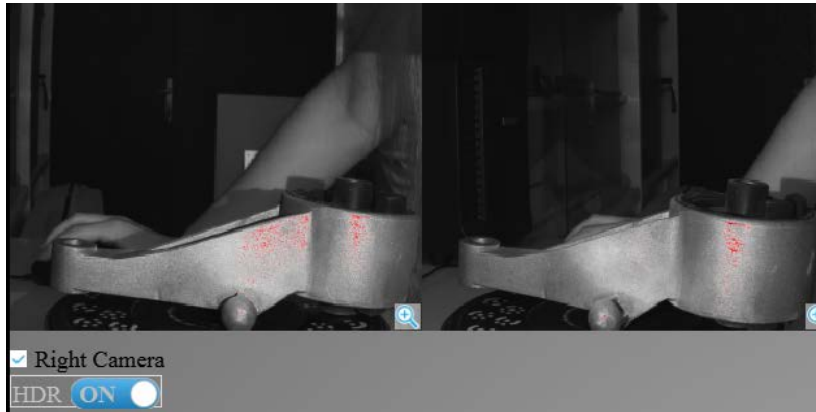
*Slika 4.6 Odabir svjetline*

Ukoliko je odmah na kameri slika loša i nemoguće je jasno vidjeti predmet, svjetlina je premala, no ukoliko je ekspozicija prevelika, na predmetu će se pojaviti previše crvene boje, što znači da je poželjno smanjiti svjetlinu. U slučaju skeniranja nosača, na nosaču se tijekom skeniranja vidi nešto crvene boje, što je taman u granicama da svjetlina ne postane prevelika, a da se predmet i dalje jasno vidi [11]. Navedeno se može vidjeti na slici 4.7.



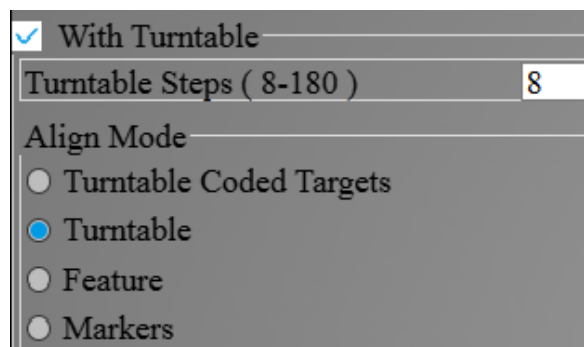
*Slika 4.7 Prikaz nosača na kameri skenera*

Ostali parametri koji se podešavaju su broj kamera (hoće li raditi samo lijeva ili lijeva i desna), HDR snimanje, okretanje stola, koliko položaja će kamera snimiti, te tip poravnanja. Za bolju kvalitetu podataka, uključeno je da rade obje kamere (slika 4.8) i opcije HDR.



*Slika 4.8 Postavke kamere*

Okretanje rotacijskog stola uključeno je kako bi kamera što bolje mogla uhvatiti nosač sa svih strana, a podijeljeno je na 8 koraka što je minimalna vrijednost za snimanje položaja. Za način poravnanja je stavljeno da se rotacijski stol koristi kao referenca tijekom skeniranja i kod kasnijeg spajanja svih podataka, odnosno podataka pojedinačnog skena. Postavljanje spomenutih parametara moguće je vidjeti na slici 4.9.



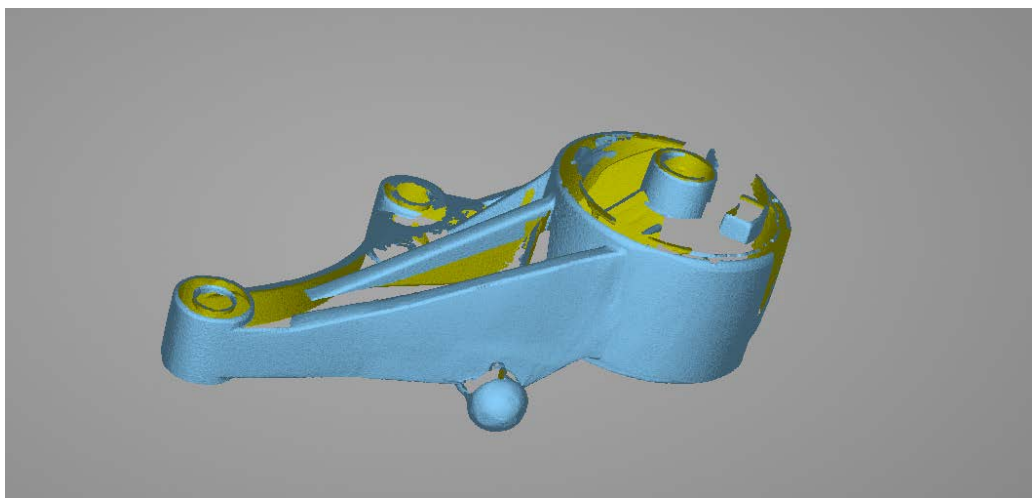
*Slika 4.9 Parametri skeniranja*

Nakon što su se odredili svi potrebni parametri, moguće je započeti skeniranje. Nosač se postavi u središte stola, a na aplikaciji na računalu se pokrene skeniranje. Početna pozicija nosača za prvo skeniranje je prikazana na slici 4.10.



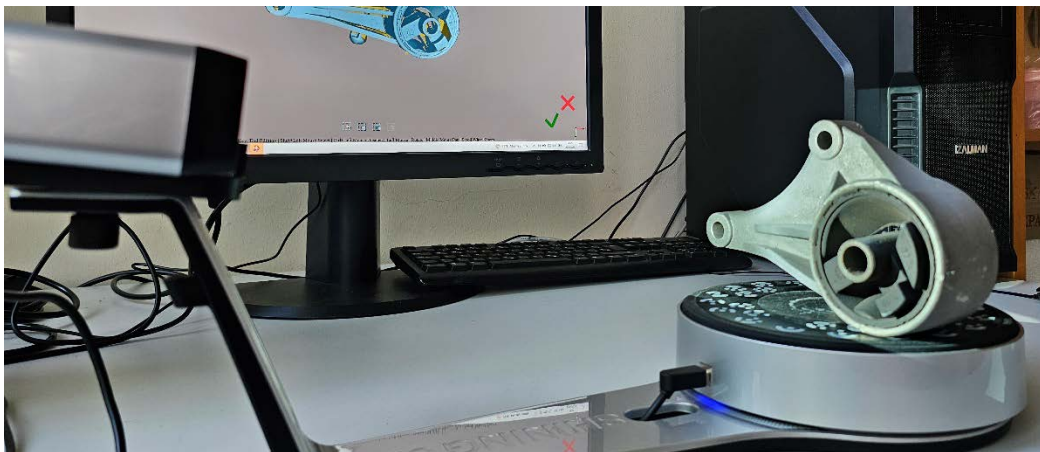
*Slika 4.10 Početak skeniranja*

S obzirom da je postavljen mali broj koraka skeniranja, prvo skeniranje je brzo odrađeno, a rezultati su vidljivi na slici 4.11.



*Slika 4.11 Rezultati prvog skeniranja*

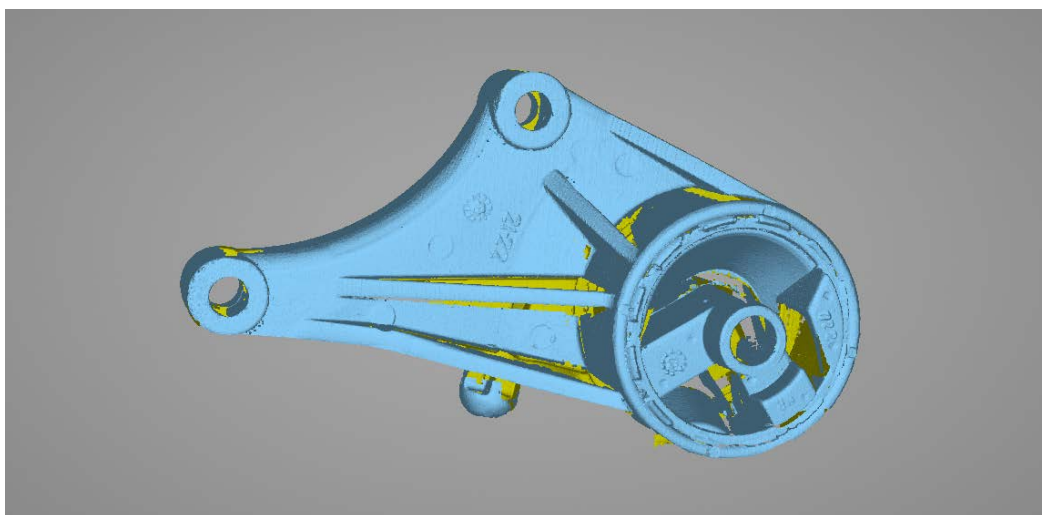
Nakon prvih rezultata, može se vidjeti da skenirani nosač odmah poprima oblik pravog nosača. Međutim, kako je odrađeno skeniranje samo rotacijom oko jedne osi nosača, neka područja u podacima imaju praznine. Navedeno je sasvim normalno s obzirom da se sve plohe ne vide jednako sa svih strana, stoga je nužno okretati nosač i provesti više skeniranja (rotacijom oko svih osi nosača), kako bi se dobro skenirale sve plohe. Na slici 4.12 prikazano je drugo skeniranje, gdje se promijenio položaj nosača, kako bi se skenirale unutarnje plohe koje se bočno ne vide.



*Slika 4.12 Skeniranje drugog položaja nosača*

Usporedbom rezultata prvog i drugog skeniranja (slika 4.13), vidi se kako se promjenom položaja bolje uhvatilo unutarnje plohe nosača, no podaci također imaju prazne prostore na nekim dijelovima, stoga je poželjno odraditi još jedno skeniranje.



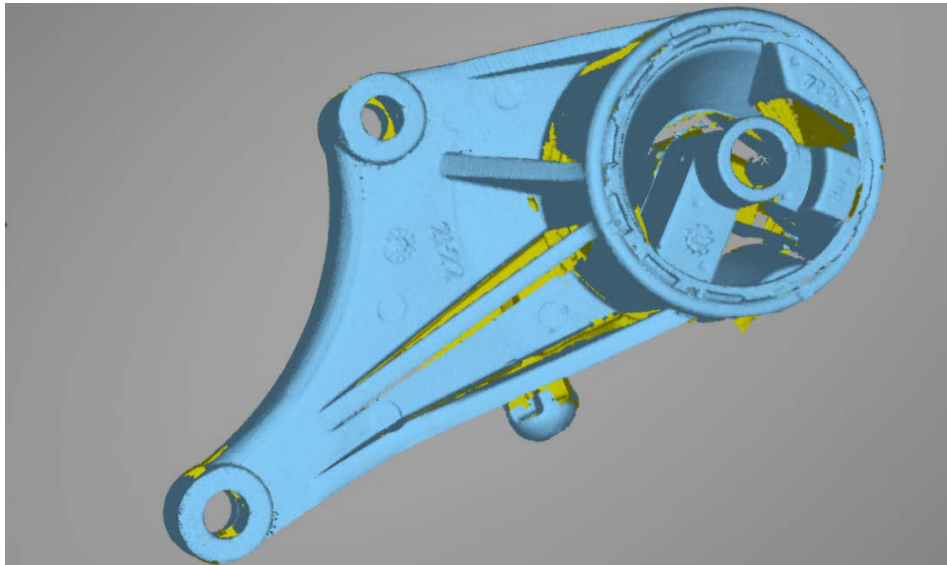


*Slika 4.13 Rezultati nakon drugog skeniranja*

U cilju dobivanja čim boljih rezultata skeniranja odnosno modela nosača, odrađeno je i treće, završno skeniranje u dodatnom položaju nosača. Treći položaj za skeniranje nosača prikazan je na slici 4.14, a rezultati skeniranja na slici 4.15.

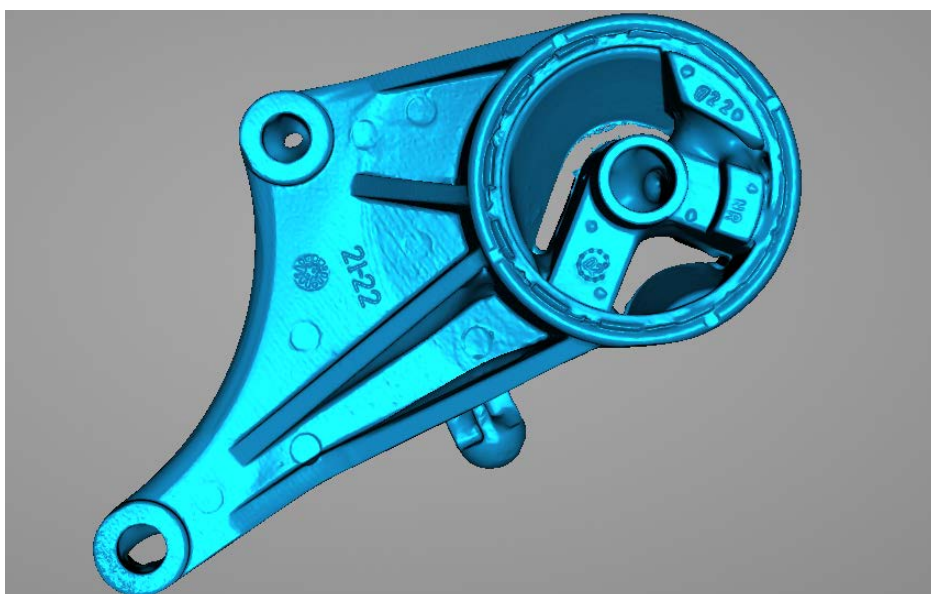


*Slika 4.14 Skeniranje trećeg položaja nosača*



*Slika 4.15 Rezultati trećeg skeniranja*

Nakon odrađena 3 skeniranja, može se vidjeti da skenirani model nosača poprima puniji oblik u odnosu na rezultate prvog skeniranja, ali i dalje postoje određeni prazni prostori unutar modela. Kako bi se te praznine popunile, u programu od skenera moguće je odabrati opciju automatskog popunjavanja praznih dijelova površine. Automatskim popunjavanjem praznina, skenirani nosač izgleda kao na slici 4.16. Podaci skeniranja spremaju se u .stl datoteku, kako bi se mogli koristiti za obradu podataka i izradu modela.



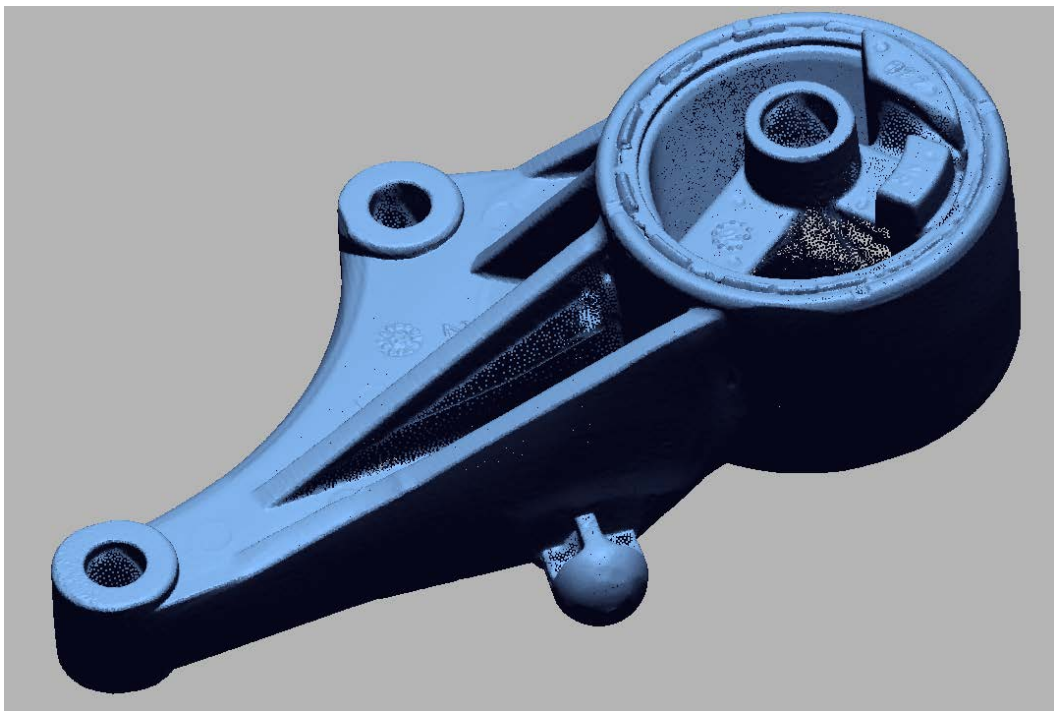
*Slika 4.16 Gotovi rezultati skeniranja*



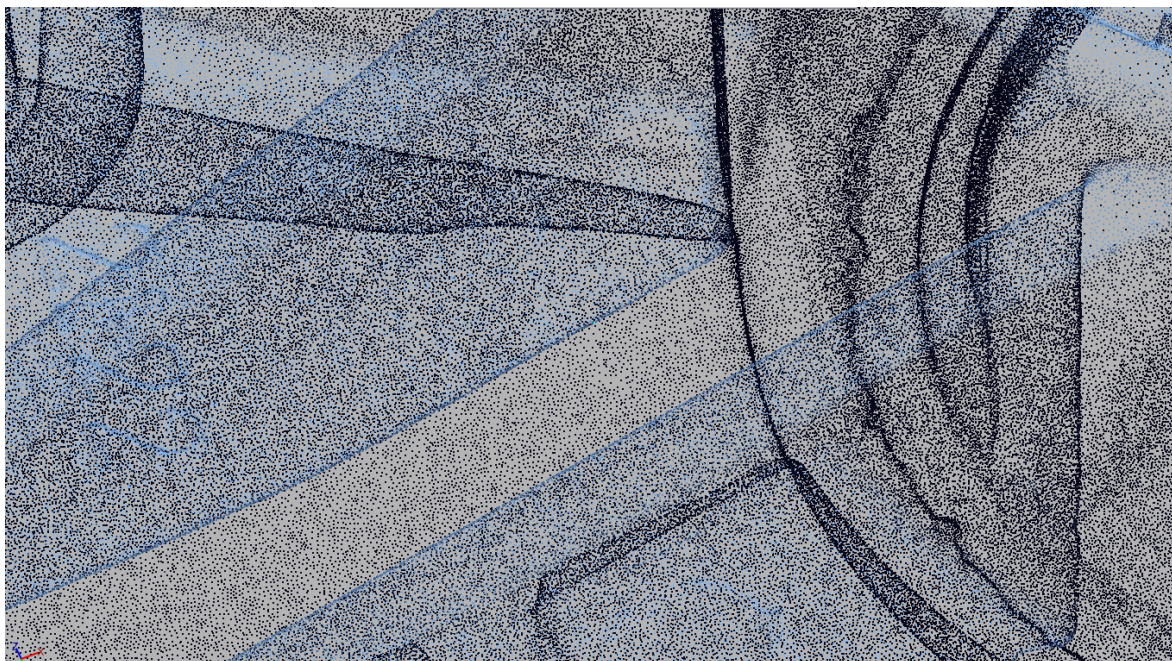
#### 4.4. Obrada podataka

Podaci koji nastaju 3D skeniranjem prikazani su oblakom točaka. Mogu se koristiti za dodatne analize, optimizacije ili 3D tiskanje. Kako bi bili spremni za takvo korištenje, podaci se prvo obrađuju. Ukoliko postoje određeni šumovi u podacima, oni se filtriraju, a točke koje stvaraju šumove se uklanjaju, kako bi se dobilo točnije podatke [3].

Na slici 4.17 može se vidjeti kako se skenirani nosač zapravo sastoji od velikog broja točaka koje su međusobno na maloj udaljenosti u odnosu na cijeli predmet. S obzirom da su točke veoma blizu, a predmet je nešto veći, udaljavanjem od pojedinih točki i sagledavanjem cijelog nosača, može izgledati kao da točke ni ne postoje, te da je nosač jedno cijelo čvrsto tijelo. Približavanjem točaka u prvi plan, jasnije se vidi da su podaci oblak točaka, prikazano na slici 4.18.



*Slika 4.17 Skenirani podaci*



*Slika 4.18 Uvećani prikaz oblaka točaka*

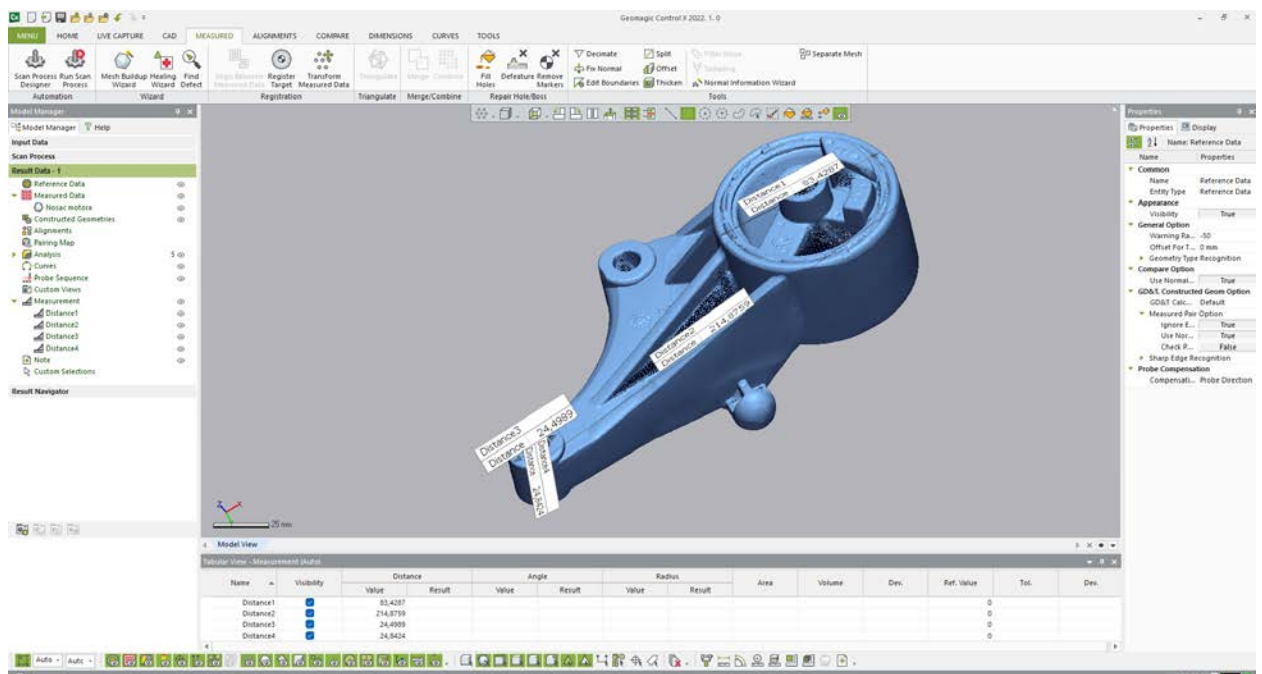
Pod obradom podataka smatra se i spajanje više skenova istog predmeta. Ukoliko se skeniralo više puta tj. u više različitih položaja, u programu se može odabrati automatsko spajanje tih skenova u odnosu na neku referentnu vrijednost (kao što se ovdje radilo) ili ručno spajati svaki sken prema potrebama. Na taj način, moguće je prvo filtrirati šumove pojedinog skena, te onda spojiti podatke, čime se uklanja mogućnost od dodatnih pogrešaka kod višestrukog skeniranja.

Programi koji se mogu koristiti za obradu skeniranih podataka su *Geomagic*, *SolidWorks*, *Autodesk ReCap* i sl. Ovi programi imaju specijalizirane alate kojima omogućavaju transformaciju skeniranih podataka u CAD modele. Ovisno o svrsi CAD modela, razini detalja i prirodi skeniranih podataka, svaki program ima svoje prednosti i nedostatke. U ovom radu, za obradu podataka, koristio se program marke *Geomagic*, čiji je vlasnik tvrtka 3D Systems [12]. Marka *Geomagic* ima više programa (slika 4.19): *Geomagic Control X*, *Design X*, *Freeform* i *Wrap*, od kojih su korišteni *Control X* i nešto više *Design X*.



*Slika 4.19 Pregled Geomagic programa*

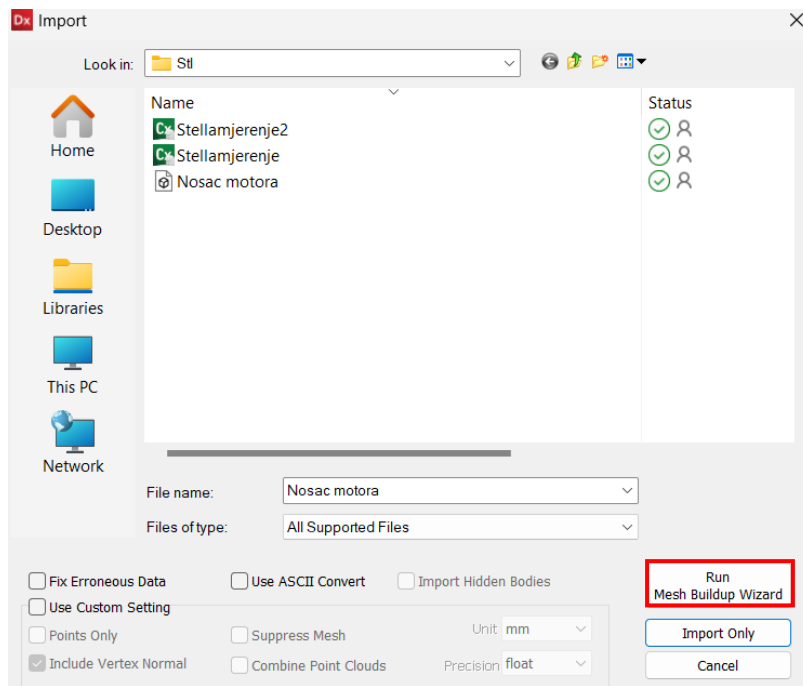
*Geomagic Control X* je program koji se koristi za mjeriteljstvo i inspekciju 3D podataka. Uglavnom se koristi za obradu skeniranih podataka i usporedbu ili inspekciju uz veliku razinu automatizacije, što znači da program olakšava korisniku proces inspekcije određenim alatima i minimizira ručnu intervenciju, ovisno o potrebama korisnika [13]. Program je ovdje korišten za uspoređivanje podataka dobivenih 3D skeniranjem i stvarnog nosača. Kao referentne uzete su gabaritne dimenzije skeniranog modela u programu i stvarnog nosača, kako bi se moglo odrediti jesu li podaci dobiveni skeniranjem mjerodavni i prihvatljivi. Sučelje programa prikazano je na slici 4.20. Na slici se vidi kako je odrađeno mjerenje nekih dimenzija, što je kasnije uspoređeno na stvarnome nosaču. Ovime je potvrđeno da su skenirani podaci ispravni i relevantni za daljnje korištenje.



Slika 4.20 Mjerenje u programu *Geomagic Control X*

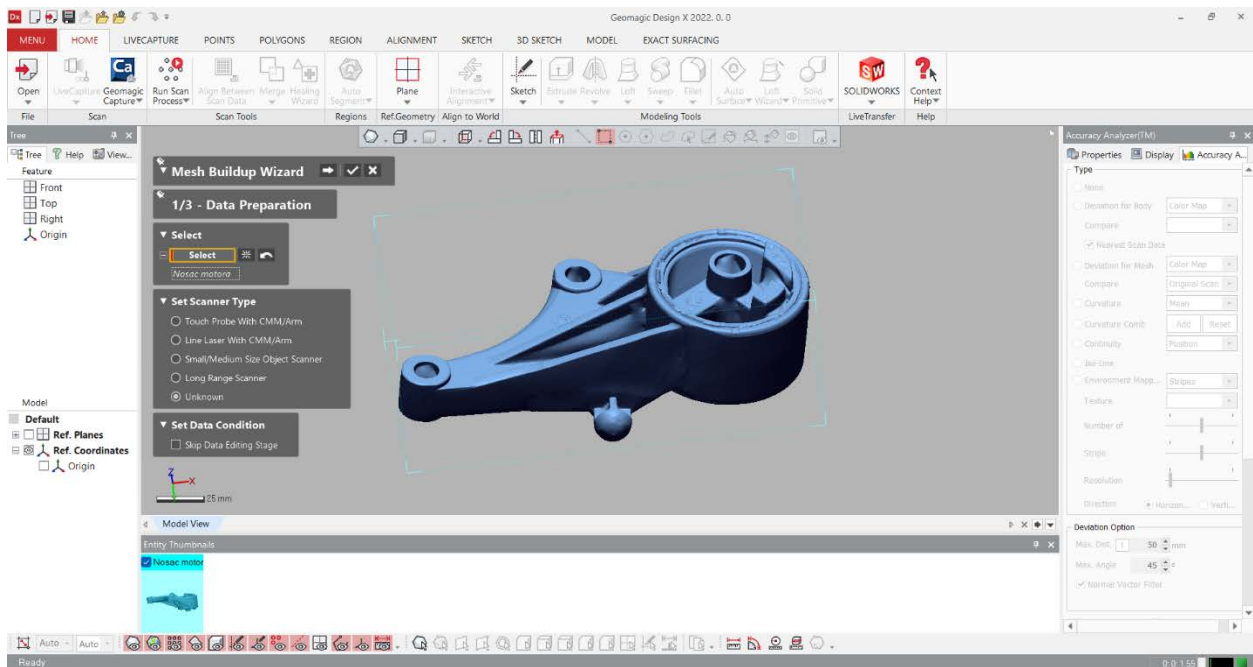
Drugi korišteni program je *Geomagic Design X*. *Geomagic Design X* je program specijaliziran za povratno inženjerstvo i olakšavanje obrade skeniranih podataka [14]. U programu je moguće i izraditi CAD modele na temelju skeniranih podataka, što uvelike olakšava proces povratnog inženjerstva i osigurava točnost CAD modela. Kako bi model imao dobru bazu, odnosno kako bi kasnije bila što lakša dorada modela, odrađene su korekcije oblaka točaka. Prilikom uvoza skeniranih podataka u *Geomagic Design X*, odabrana je opcija za izradu mreže (slika 4.21).





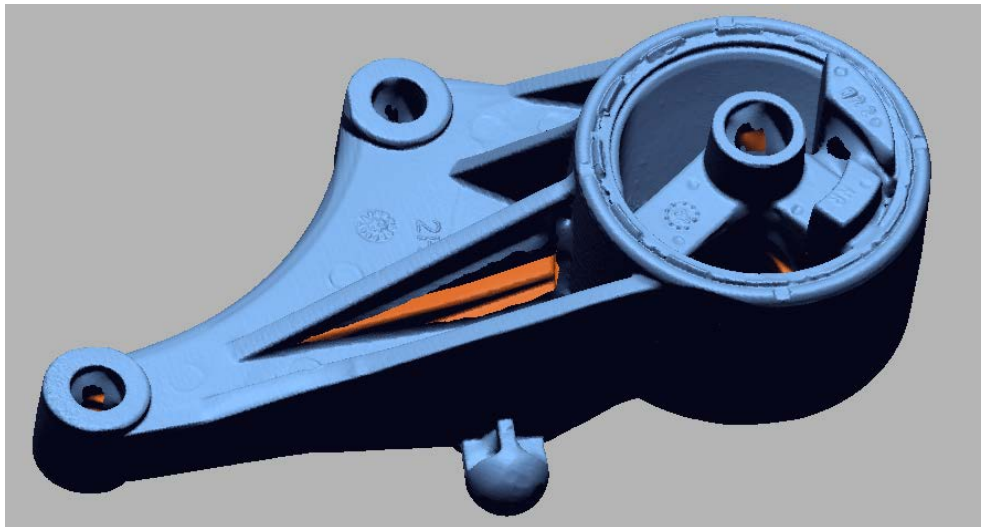
Slika 4.21 Uvoz podataka

Nakon uvoza, odabirom opcije za automatsko dodavanje mreže dolazi izbor parametara za dodavanje mreže. Prikaz izrade mreže, kao i sučelje programa prikazani su na slici 4.22.

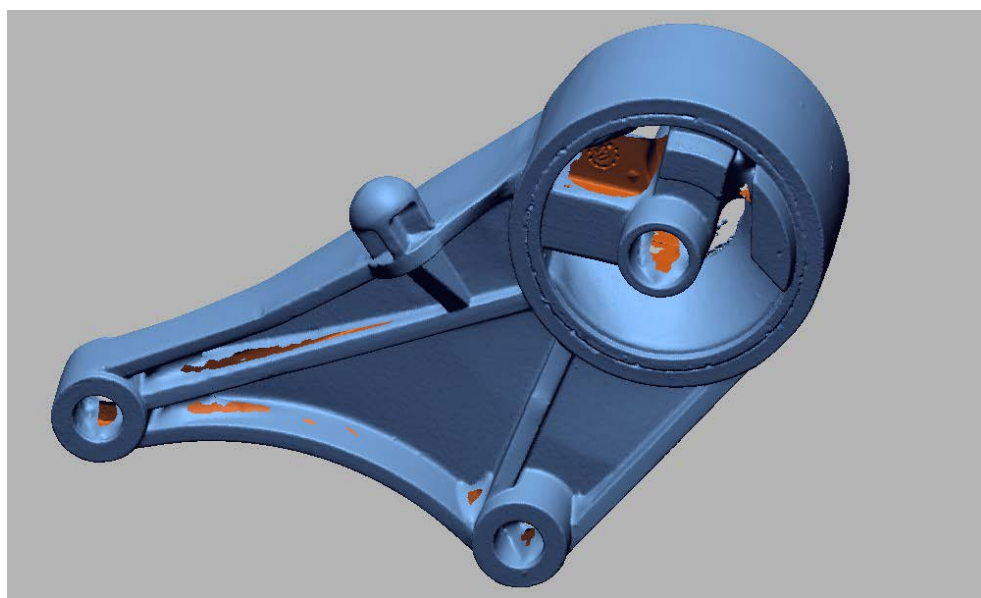


Slika 4.22 Dodavanje mreže

Dodavanjem mreže, dobije se prikaz kao na slici 4.23. Na slici se može vidjeti kako je program kreirao vanjsku mrežu na temelju oblaka točaka, međutim, postoje neke praznine među podacima. Rupe koje postoje u mreži, posljedica su nemogućnosti skenera da pristupi svim dijelovima nosača. Upravo radi toga postoje rupe točno na nekim manje pristupačnim dijelovima, poput dubina u provrtima ili dijelovima ojačanja. Vanjski dio mreže prikazan je plavom bojom tako da je rupe u mreži moguće vidjeti kao narančastu boju (unutarnji dio mreže). Navedeno se vidi na slici 4.24.



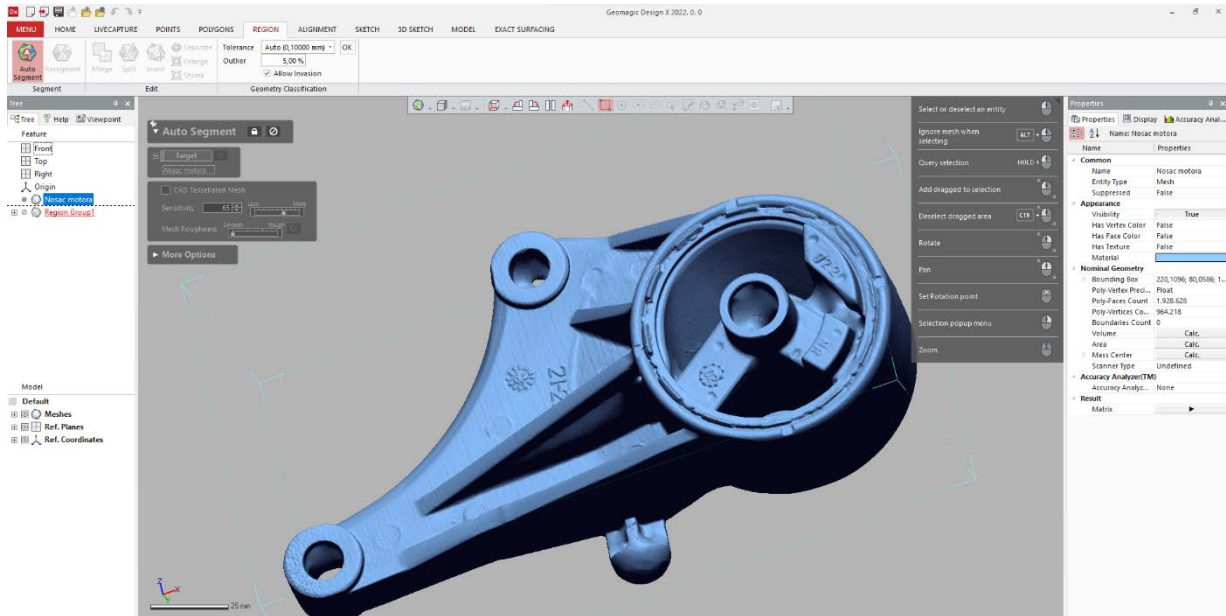
*Slika 4.23 Mreža skeniranih podataka*



*Slika 4.24 Rupe u mreži*

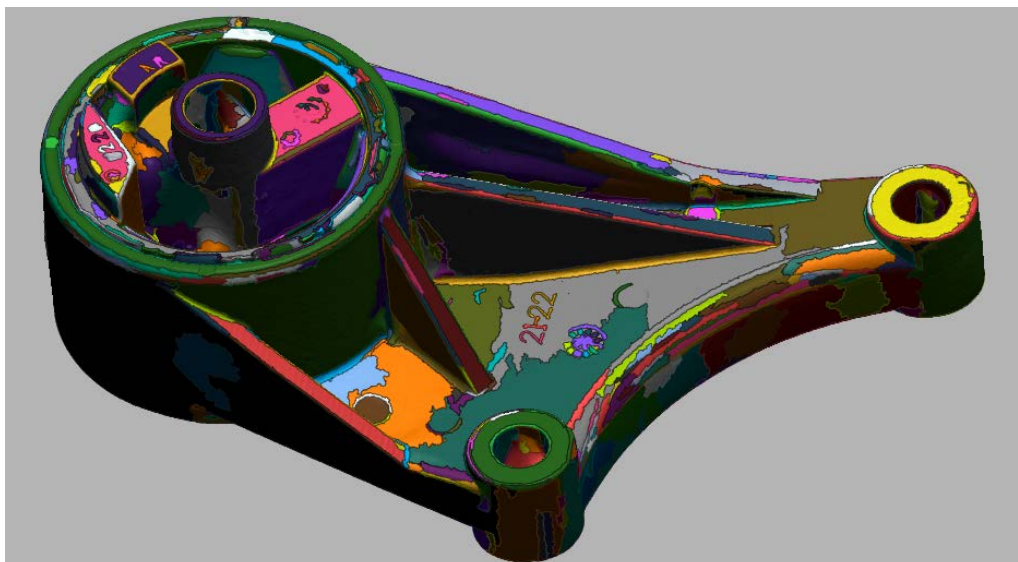
## 4.5. Izrada 3D modela

Obradom skeniranih podataka i dobivanjem mreže, moguće je krenuti na izradu modela. Nakon dobivanja zatvorene mreže, koristio se alat, koji pomažu u izradi modela: opcija *auto segment* (slika 4.25).



Slika 4.25 Kreiranje regija, auto segment

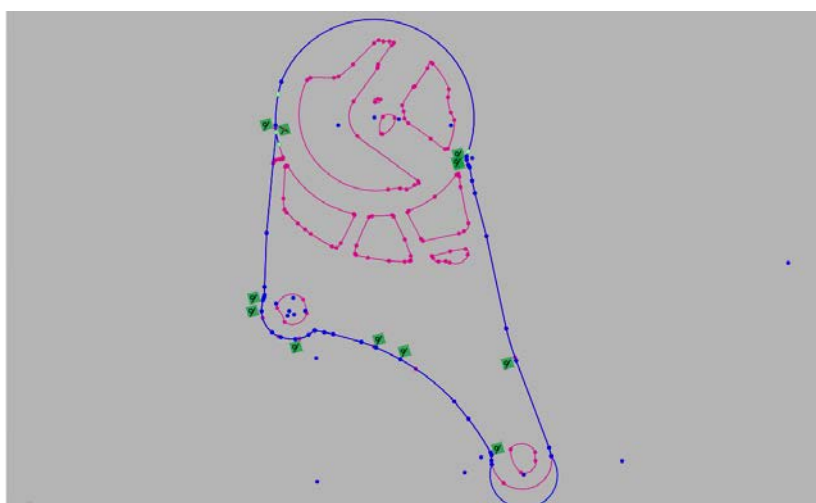
Opcija *auto segment* koristi se za dobivanje regija na mreži, tj. na kreiranoj mreži podataka, program prepoznaje regije, odnosno dijelove točaka na mreži koje čine neku ravninu ili plohu i temeljem toga kreira tu plohu kao regiju. Sve regije međusobno su spojene i nalaze se na mreži, ali kada bi ih se izdvojilo, mogle bi činiti zasebnu ravninu. Rezultati kreiranja regija prikazani su na slici 4.26.



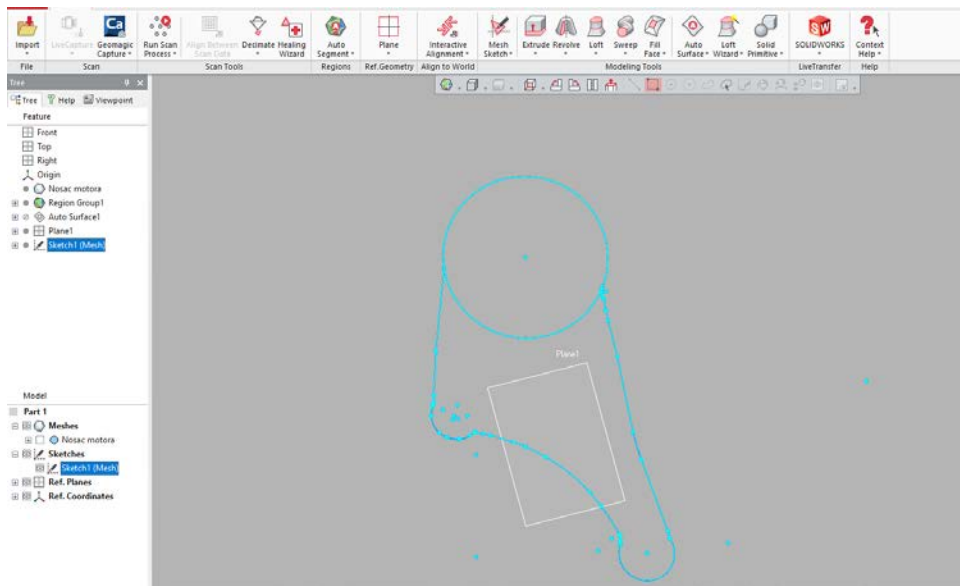
*Slika 4.26 Prikaz regija*

Upotrebom navedenih alata, mreža oblaka točaka spremna je za izradu modela. Model se kreira kao i u ostalim CAD programima, počevši od skice (*sketcha*) do 3D modela, međutim skenirani podaci olakšavaju taj proces. Crtanje skice moguće je raditi na bilo kojoj osi ili plohi, a radi se na način da se proizvoljno crta ili koristi mreža podataka kao referenca.

Mreža podataka na svakoj osi ostavlja svoj presjek, što crtanje čini lakšim, jer se mogu dobiti projekcije obrisa nosača. Početak skiciranja prikazan je na slici 4.27. Ružičastom bojom označene su linije presjeka mreže i ravnine crtanja, a plavom bojom su linije koje su nacrtane prema linijama presjeka. Prva skica prikazana je na slici 4.28.

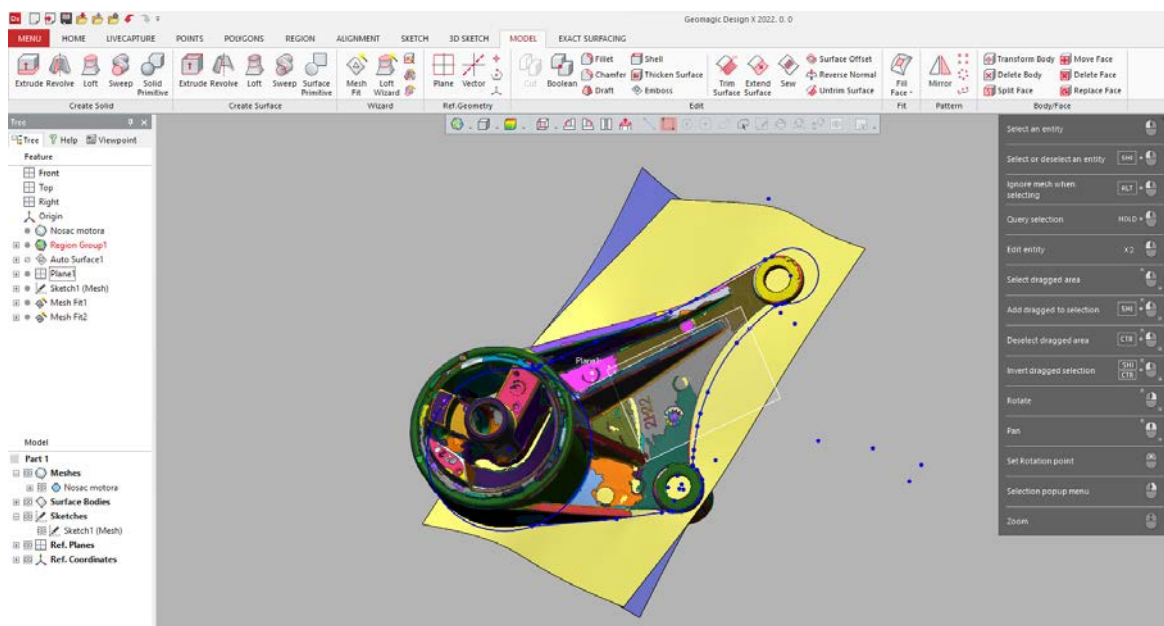


*Slika 4.27 Početak skiciranja*



Slika 4.28 Prva skica

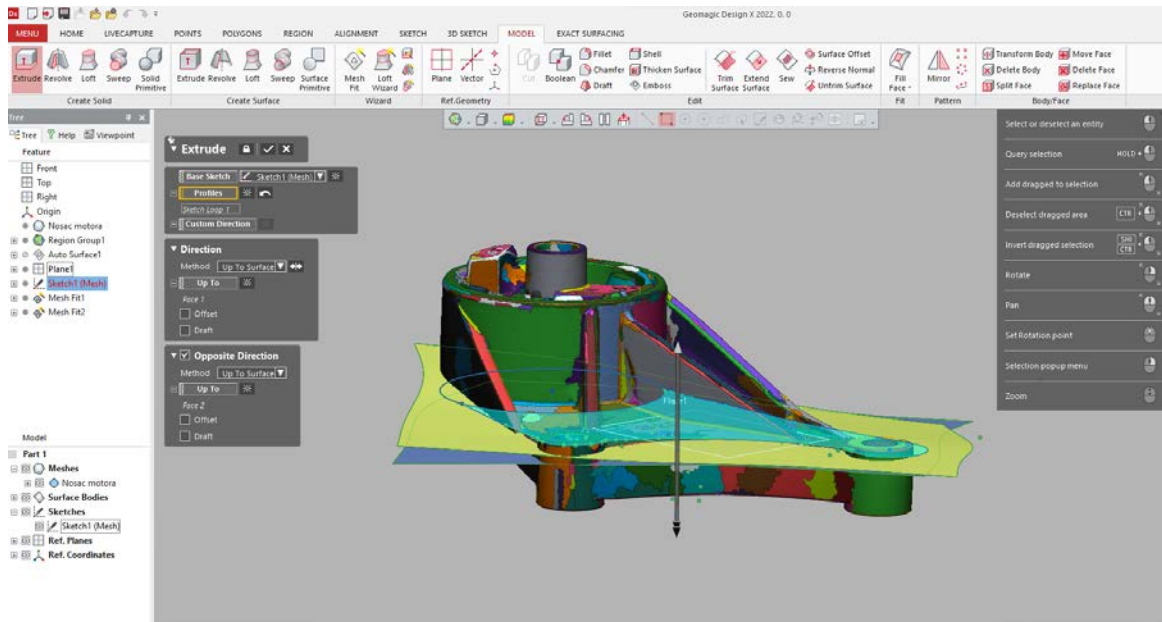
Završenom prvom skicom moguće je kreirati tijelo (volumen) naredbom *extrude* (kao u ostalim CAD programima), koristeći mrežu skeniranih podataka. Zbog prethodno kreiranih regija na mreži podataka, moguće je izraditi plohe koje u sebi imaju odabrane regije, a time i označiti granice novog tijela. Alatom *Mesh fit* odaberu se željene regije, a program sam kreira ravninu koja odgovara tim regijama. Kreiranje takvih ravnina prikazano je na slici 4.29.



Slika 4.29 Kreiranje ravnina

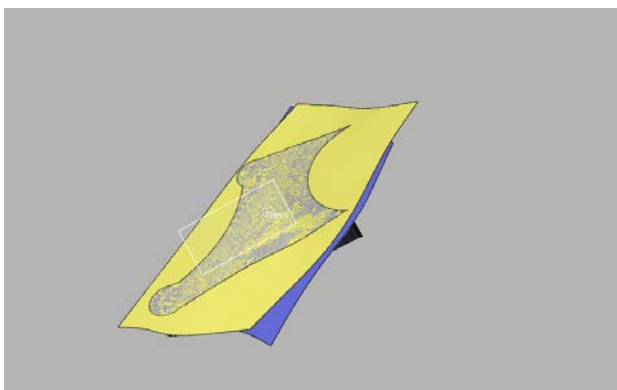


Ravnine su kreirane prema gornjoj i donjoj plohi nosača. S obzirom da je riječ o lijevanom dijelu, plohe nisu potpuno ravne, tako da je ovim alatima omogućeno da 3D model odgovara realnim podacima. Na temelju kreiranih ravnina, moguće je dobiti početne dijelove tijela. Na slici 4.30 prikazano je kreiranje tijela naredbom *extrude*, uz korištenje ravnina kao granica tijela.

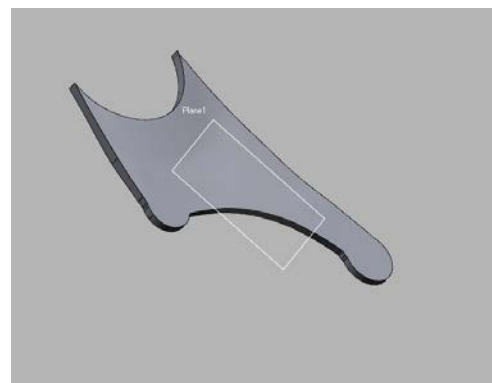


Slika 4.30 Kreiranje tijela

Na slikama 4.31 i 4.32, vidi se kako je tijelo točno između odabranih ravnina te odgovara središnjem dijelu nosača.

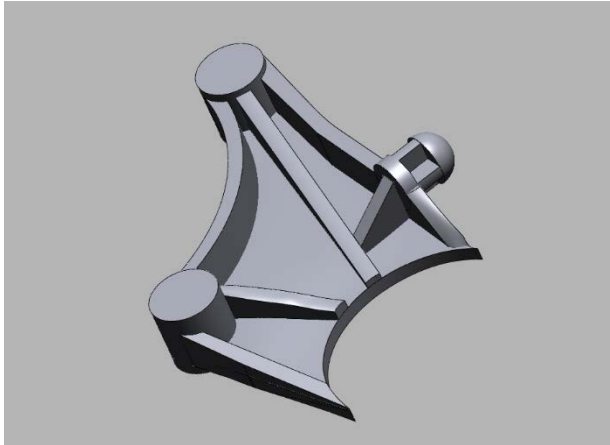


Slika 4.31 Tijelo između omeđenih ravnina



Slika 4.32 Kreirano tijelo

Kombinacijom gore opisanih alata, nacrtani su svi presjeci nosača kako bi se dovršilo modeliranje. Na središnji dio nosača, dodana su ojačanja i bočni bridovi (slika 4.33), a zatim i cilindrični dijelovi (slika 4.34) .

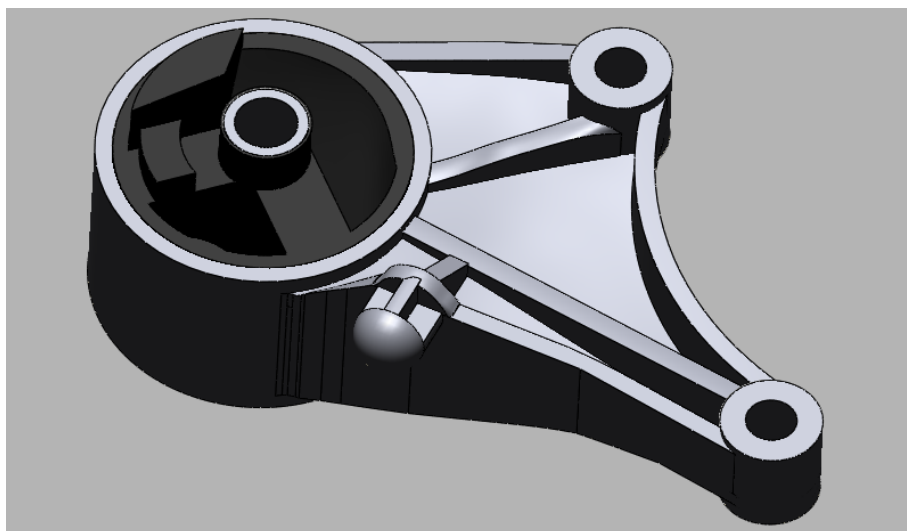


*Slika 4.33 Modeliranje ojačanja*



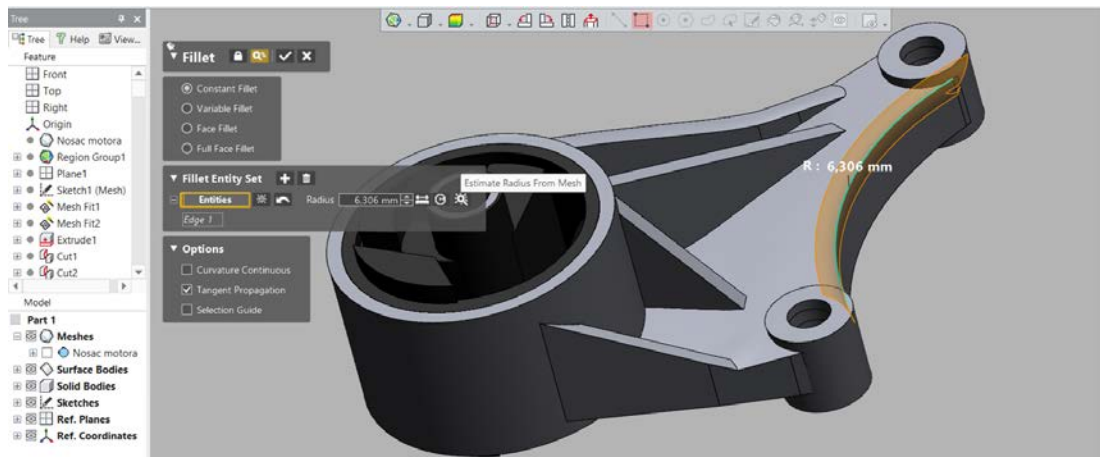
*Slika 4.34 Modeliranje cilindričnog dijela*

Za kraj je dodan gumeni dio nosača koji upija vibracije, nakon čega su svi modelirani elementi spojeni u jedno tijelo (slika 4.35).



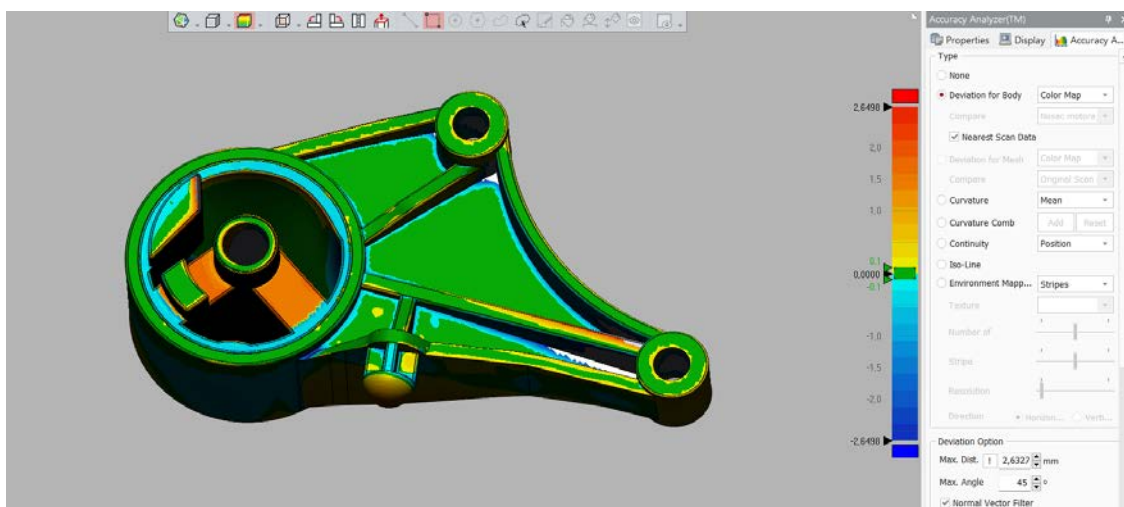
*Slika 4.35 Spojeni modelirani elementi*

Preostalo je doraditi detalje na modelu, poput skošenja i zaobljenja, čiju izradu olakšava postojeća mreža skeniranih podataka. Za dodavanje bilo kojeg zaobljenja koristi se naredba *fillet*. Prednost korištenja zaobljenja u ovom programu je opcija kojom se izabere da se skošenje ili zaobljenje napravi prema postojećoj mreži odabirom na opciju *Estimate Radius From Mesh*. Dodavanje zaobljenja korištenjem mreže prikazano je na slici 4.36.



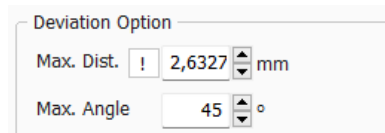
Slika 4.36 Izrada zaobljenja

Uređivanjem detalja, završena je izrada CAD modela automobilskog nosača. Ispravnost modela u odnosu na skenirane podatke, moguće je provjeriti u samome programu. Program ima opciju *Accuracy Analyzer*, kojom provjerava točnost modela i uspoređuje ih sa prvobitnim oblakom točaka. Na slici 4.37 prikazana je točnost izrađenog CAD modela u odnosu na skenirani.



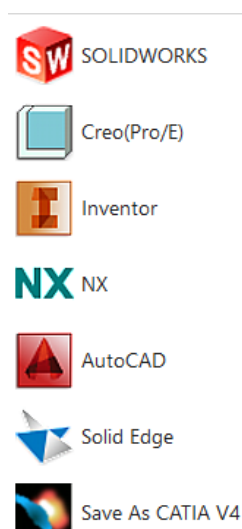
Slika 4.37 Točnost CAD modela

Na legendi je stavljeno da je gornja granica maksimalno odstupanje od skeniranih podataka, a zanemarivo odstupanje je postavljeno kao 0,1 mm. Program sam računa najveće odstupanje aktiviranjem opcije *Max Dist*. Prema tome, program je izračunao da je najveće odstupanje 2,63 mm (slika 4.38), što je prihvatljivo s obzirom da se najveća odstupanja javljaju na manje dostupnim mjestima, poput unutarnjih dijelova gumenog elementa (crvena boja) ili dubina unutar ojačanja (tamno plava boja).



Slika 4.38 Najveće odstupanje podataka

Boje idu prema crvenoj ako je riječ o dodavanju, odnosno prema tamno plavoj boji ako je riječ o oduzimanju volumena tijelu u odnosu na skenirane podatke. Na osnovi navedenog prikaza, zaključeno je da je izrađeni CAD model dobar prikaz skeniranih podataka odnosno stvarnog nosača te da se kao takav može koristiti u daljnjoj analizi. Za korištenje u drugim programima, moguće je prebaciti podatke izvozom u željeni program. Program *Geomagic Design X* nudi izbor programa u koje je moguće prebaciti podatke. Izvoz podataka se radi odabirom na opciju *Live Transfer* u kojoj se odabere neki od ponuđenih programa (slika 4.39). S obzirom da će se analiza odrađivati u programu *Inventor*, odabran je izvoz u datoteke *Inventora*.



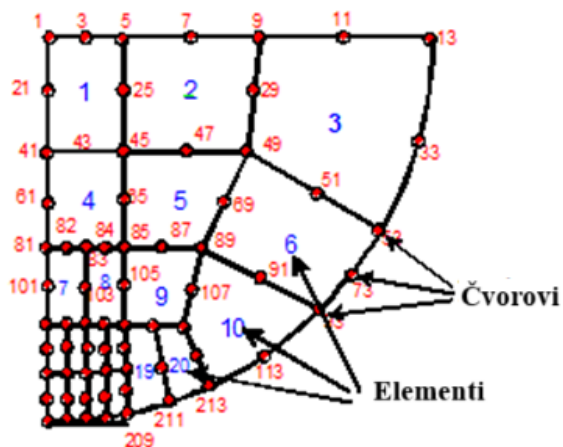
Slika 4.39 Izvoz podataka u Inventor

## 5. FEM ANALIZA

### 5.1. Općenito

Po završetku izrade CAD modela automobilskog nosača, moguće je provesti potrebne analize i planirane optimizacije. Prije optimizacije nosača, nužno je odrediti mjerodavna opterećenja i provesti statičku numeričku analizu. Statičkom analizom dobit će se raspodjela naprezanja i deformacije, kao i najveće vrijednosti naprezanja i progiba koji se javljaju u pravome nosaču. Navedene vrijednosti služit će kao referenca za optimizaciju, a kasnije i analizu optimiranih modela.

Statička numerička analiza provodi se metodom konačnih elemenata, koja se često naziva FEM analiza prema engleskoj skraćenici od *Finite Element Method*. Metoda konačnih elemenata jedna je od računalnih tehnika koja se koristi za aproksimiranje fizičkih sustava u određenim uvjetima. Temelji se na manjim dijelovima modela, odnosno mreži konačnih elemenata, koja se bazira na CAD geometriji. Svaki pojedini element vezan je točkama, odnosno čvorovima (slika 5.1), u kojima program računa određene matematičke jednadžbe.



Slika 5.1 Primjer mreže konačnih elemenata [15]

Numeričke jednadžbe ovise o postavljenim svojstvima predmeta, tj. o glavnim pretpostavkama. Postoje 4 glavne pretpostavke metode konačnih elemenata [16]:

1. Geometrija
2. Svojstva materijala
3. Rubni uvjeti (ograničenja i opterećenja)

#### 4. Mreža konačnih elemenata

Geometrija je zapravo definirana CAD modelom, tako da je ona prva pretpostavka koja je već spremna za numeričku analizu. Preostaje odrediti materijal nosača, kreirati mrežu i odrediti rubne uvjete. Kako bi se moglo odrediti rubne uvjete, u idućem poglavlju objasniti će se nešto više o sustavu automobilskih nosača i odnosu nosača u tome sustavu. Kompletna statička numerička analiza, odradit će se u programu *Inventor*, koristeći alat *Stress analysis*.

### 5.2. Sustav nosača automobila

Nosač motora služi kao spoj motora (i mjenjača) i karoserije automobila, odnosno zadržava motor u određenoj poziciji te istovremeno ublažava prenošenje vibracija s motora na ostatak automobila. Zadani nosač nalazi se u automobilima marke Opel i Vauxhall, godišta između 1998. i 2009 [17]. Jedan od takvih automobila je Opel Astra G.

Da bi se pronašao sklop nosača, odabire se točan model automobila u katalogu te motor koji ima. Odabrane su verzije automobila koje imaju dizelski motor, s obzirom na činjenicu da imaju veći moment od benzinskih motora. Na slici 5.2 prikazane su sve moguće opcije motora koje ulaze u izbor s odabranim modelom automobila.

ENGINE AND CLUTCH
X12XE[LW4],Z12XE[LW4] PETROL ENGINES
X14XE[L95],Z14XE[L95] PETROL ENGINES
Z14XEP[LJ2] PETROL ENGINE
X16SZR[L73] PETROL ENGINE
Z16SE[L55] PETROL ENGINE
C16SEL[L91] PETROL ENGINE
X16XEL[L91],Z16XE[L91],Z16XEP[LJ7] PETROL ENGINES
X18XE1[2H9],Z18XE[2H9],Z18XEL[L97] PETROL ENGINES
X20XER[L34],X20XEV[L34] PETROL ENGINES
Z20LET[L70] PETROL ENGINE
Z22SE[L61] PETROL ENGINE
Y17DT[L6],Z17DT[L6] DIESEL ENGINES
X17DTL[2H8] TURBO-DIESEL ENGINE
X20DTL[LD3],Y20DTL[LD3],Y20DTH[LB5/LD1/LP4] TURBO-DIESEL ENGINES
Y22DTR[L50/LRE] TURBO-DIESEL ENGINE
Z16YNG[LR1] NATURAL GAS ENGINE

Slika 5.2 Odabir motora [18]

Nakon provjere svih navedenih automobila, zaključeno je da je motor najveće mase i momenta model Y20 DTH. Specifikacije motora prikazane su tablicom 5.1.

*Tablica 5.1 Specifikacije odabranog motora [19]*

Godine proizvodnje	2000-2005
Zapremnina, cm <sup>3</sup>	1995
Sustav goriva	direktno ubrizgavanje
Izlazna snaga, ks	101
Zakretni moment, Nm	230
Blok motora	lijevano željezo R4
Glava motora	aluminij 16v
Provrta cilindra, mm	84
Hod klipa, mm	90
Kompresijski omjer	18,5
Dodaci	interkuler
Hidropodizači	da
Distribucija	lanac
Ispravljač napona	ne
Turbo punjenje	da
Preporučeno ulje motora	5W-40
Kapacitet ulja, litra	5,5
Vrsta goriva	dizel
Euro standard	EURO 3
Potrošnja goriva, L/100 km	
— grad	8
— autoput	5,3
— kombinirano	6,3
Trajnost motora, km	~320 000
Težina, kg	190

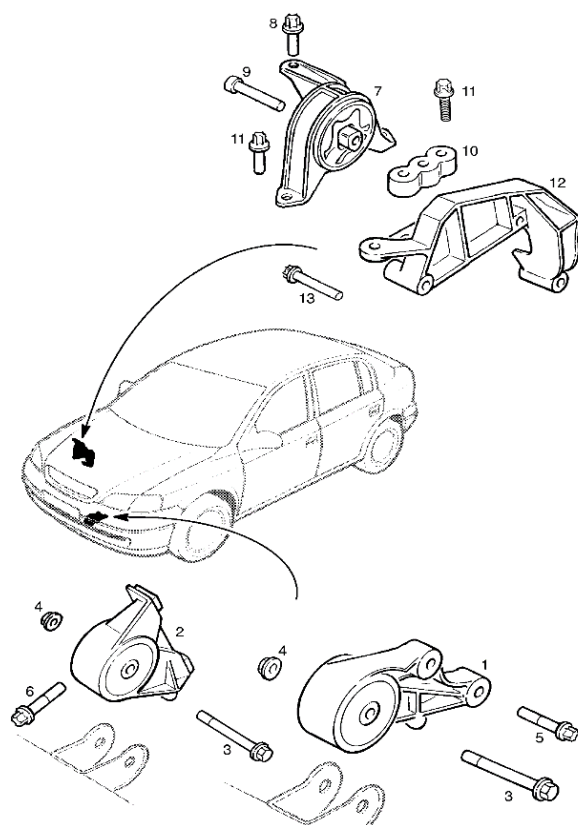
Izbor mjenjača je odrađen na istoj stranici kataloga kao kod odabira motora. Prema popisu mogućih mjenjača [18], odabran je ručni mjenjač F23. U tablici 5.1, gdje se nalaze specifikacije motora, može se vidjeti da je vrijednost zakretnog momenta motora 230 Nm, što odgovara specifikacijama mjenjača F23. Specifikacije mjenjača prikazane su tablicom 5.2.

*Tablica 5.2 Specifikacije odabranog mjenjača [20]*

Vrsta	prednji pogon, ručni mjenjač s pet brzina
Najveći zakretni moment motora, Nm	210
Najveći zakretni moment mjenjača, Nm	230
<b>Prijenosni omjer brzina</b>	
Prva	3,58
Druga	2,02
Treća	1,35
Četvrta	0,98
Peta	0,69
Rikverc	3,31
Najveća bruto težina vozila, kg	1857
Materijal kućišta	aluminij
Preporučeno ulje	Dexron III
Masa mjenjača, kg	46,3

Sklop motora i mjenjača oslonjen je na sveukupno 4 nosača. Dva nosača drže motor, a druga dva mjenjač. Sklop nosača koji drže motor prikazan je na slici 5.3, a pojedini dijelovi sklopa i njihove pozicije, sadržani su u tablici 5.3.





Slika 5.3 Sklop nosača [21]

Tablica 5.3 Dijelovi sklopa nosača motora [21]

Pozicija	Dio	Količina
1	Prednji nosač motora s gumom protiv vibracija	1
2	Prednji nosač motora s gumom protiv vibracija	1
3	Vijak M10 x 95, šesterokutna glava	1
4	Matica M10, samokočna	1
5	Vijak M12 x 50, vanjski torx	2
6	Vijak M12 x 50, vanjski torx	2
7	Desni nosač motora s gumom protiv vibracija	1
8	Vijak M10 x 20, vanjski torx	3
9	Vijak M12 x 65, torx glava	1
10	Distancer desnog nosača	1
11	Vijak M10 x 55, vanjski torx s podloškom	3
12	Desni potporni nosač motora	1
13	Vijak M10 x 115, vanjski torx	3

S obzirom da nije poznato koliko je svaki od nosača opterećen te da automobilski motor ima veću masu od mjenjača, u proračunu će se gledati kao da je cijeli sustav oslonjen samo na 2 nosača motora. Promatrajući ovu opciju kao kritičniji slučaj, bilo kakva drugačija raspodjela opterećenja, uzrokovat će manja naprezanja. Kao što je već spomenuto u prethodnim poglavljima, nosač motora sastoji se u principu od dva dijela: lijevanog aluminijskog kućišta (nosi opterećenje) i gume (ublažava vibracije i udare tijekom rada motora). Kako se u ovom radu optimizacija nosača temelji isključivo na statičkoj analizi, gumeni dio je izostavljen, jer je njegov utjecaj na statičku analizu zanemariv. Izostavljen je i utjecaj zakretnog momenta, odnosno vibracija koje nastaju kao posljedica momenta, jer bi to uključivalo dinamičku analizu. S pogleda statičke analize, najvažnija stvar je težina kojom motor i mjenjač opterećuju nosač. Kako bi se odredila njihova težina potrebno je saznati mase motora i mjenjača.

Mase su očitane iz njihovih tablica specifikacija (tablica 5.1 i tablica 5.2):

$$m_{\text{motora}} = 190 \text{ kg}$$

$$m_{\text{mjenjača}} = 46,3 \text{ kg}$$

Znajući oba iznosa masa, moguće je odrediti ukupnu vrijednost mase:

$$m_{\text{ukupna}} = m_{\text{motora}} + m_{\text{mjenjača}}$$

$$m_{\text{ukupna}} = 190 + 46,4$$

$$m_{\text{ukupna}} = 236,3 \text{ kg}$$

Težina se dobije umnoškom ukupne mase i vrijednošću gravitacijske konstante:

$$G = m_{\text{ukupna}} \cdot g$$

$$G = 236,3 \cdot 9,81$$

$$G = 2318,103 \text{ N} \approx 2400 \text{ N}$$

### 5.3. Svojstva materijala

Kako je prethodno spomenuto, postoje 4 glavne pretpostavke kod metode konačnih elemenata. Prva pretpostavka je geometrija tijela. Geometrija je definirana CAD modelom koji je izrađen prema skeniranom nosaču, tako da je geometrija spremna za analizu i uvezena u *Inventor*. Za potrebe provođenja statičke analize određuju se preostale 3 pretpostavke. CAD model se sastoji od 2 dijela. Prvi dio čini metalni dio, dok je drugi dio guma. U statičkoj analizi nije potrebno promatrati gumeni dio jer je njegova uloga upijanje vibracija, tako da je taj dio uklonjen (naredbom *Suppress feature* ) kako ne bi utjecao na rezultate analize (slika 5.4).



*Slika 5.4 Geometrijski model metalnog dijela nosača u programu Inventor*

Metalni dio nosača izrađen je od lijevanog aluminijskog aluminija. S obzirom da nije moguće pronaći informaciju o kojoj točno vrsti lijeva aluminija je riječ, odabran je aluminij AC-4300 T6, zbog činjenice da je vrlo otporan na koroziju, velike čvrstoće i koristi se za odljevke koji su izloženi vibracijama [22], prema tablici 5.4. Također, odabrani materijal se često koristi u automobilske industriji, stoga predstavlja logičan izbor za materijal nosača motora.

Tablica 5.4 Aluminijske slitine za lijevanje [22]

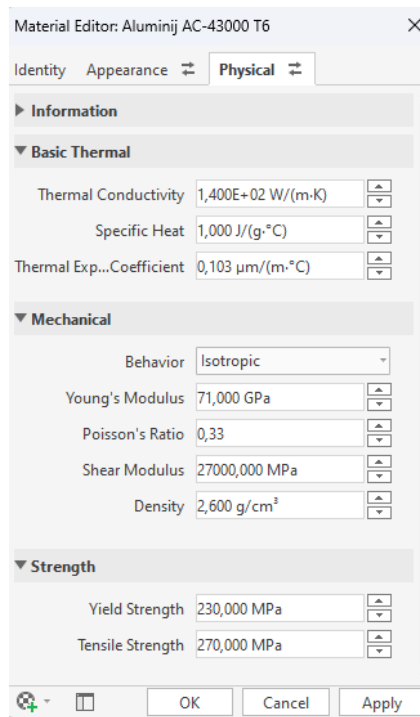
Oznaka materijala					Vrijednosti čvrstoće (N/mm <sup>2</sup> )	
EN		DIN	Stara HRN	Werkstoff-Nr.	$R_m$	$R_e$ $R_{p0,2}$
Slovná oznaka	Broj materijala					
AC-ALSi8Cu3	AC-46200	G-ALSi9Cu3	P-ALSi9Cu3	3.2163.01	160...200 (140)	100...150 (100)
	AC-46200	GK-ALSi9Cu3	K-ALSi9Cu3	3.2163.02	180...240 (160)	110...160 (100)
AC-ALSi9Cu3(Fe)	AC-46000	GD-ALSi9Cu3	T-ALSi9Cu3	3.2163.05	240...310	140...240
Za opću primjenu. Dobro se da lijevati, obrađivati i zavarivati. Otporno na toplinu, uvjetno otporno na koroziju.						
AC-ALSi12(a)	AC-44200	G-ALSi12	P-ALSi12	3.2581.01	160...210 (160)	70...100 (70)
Dobro se da lijevati, obrađivati i zavarivati; vrlo otporno na koroziju. Za odljevke tankih stijenki koji su izloženi vibracijama.						
AC-ALMg9	AC-51200	GD-ALMg9	T-ALMg9	3.3292.05	200...300	140...220
Dobro se da lijevati i izvrsno obrađivati. Visoka otpornost na koroziju i dobar vanjski izgled – npr. u optičkoj industriji.						
AC-ALSi10Mg(a) T6	AC-4300 T6	G-ALSi10Mgwa	P-ALSi10Mgwa	3.2381.61	220...320 (200)	180...260 (170)
Kao AC-ALSi12(a), ali veće čvrstoće.						

Odabrani materijal ne nalazi se u *Inventorovom* katalogu materijala, stoga se ručno dodaje materijal i unose se njegova mehanička svojstva. Sva potrebna mehanička svojstva aluminijske slitine AC-ALSi10Mg T6 preuzeta su iz online baze podataka „*Make It From*“ [23], koja se temelji na kombinaciji raznih tehničkih literatura i vlastitih podataka, te su navedena u tablici 5.5.

Tablica 5.5 Mehanička svojstva materijala AC-ALSi10Mg(a) T6 [23]

Tvrdoća po Brinellu, HB	94	
Istezanje pri lomu, $\epsilon_f$	1,1	%
Modul elastičnosti, $E$	71	GPa
Modul smicanja, $G$	27	GPa
Poissonov broj, $\nu$	0,33	
Vlačna čvrstoća, $R_m$	270	MPa
Granica tečenja, $R_e$	230	MPa

Materijal i njegova svojstva dodani su u *Inventor* prema podacima iz tablice 5.5, kao na slici 5.5. Mehanička svojstva nužno je unijeti zbog vrijednosti modula elastičnosti, granice tečenja  $R_e$  i vlačne čvrstoće  $R_m$ , budući da su ti parametri ključni prilikom izvođenja statičke analize.



Slika 5.5 Dodavanje materijala

Ovisno o prirodi materijala, za izračunavanje faktora sigurnosti u *Inventoru*, važno je odabrati je li mjerodavna granica tečenja  $R_e$  ili vlačna čvrstoća  $R_m$ . Iako je aluminij duktilan materijal, lijevane slitine imaju tendenciju biti krhke. S obzirom da je ovo lijevana slitina s velikim udjelom aluminija, za početak će se pretpostaviti da se ponaša više kao duktilni materijal zbog čega se kao mjerodavna veličina kod određivanja faktora sigurnosti uzima granica tečenja  $R_e$ . U *Inventoru*, odabrani materijal i mjerodavna veličina za faktor sigurnosti su prikazani slikom 5.6.

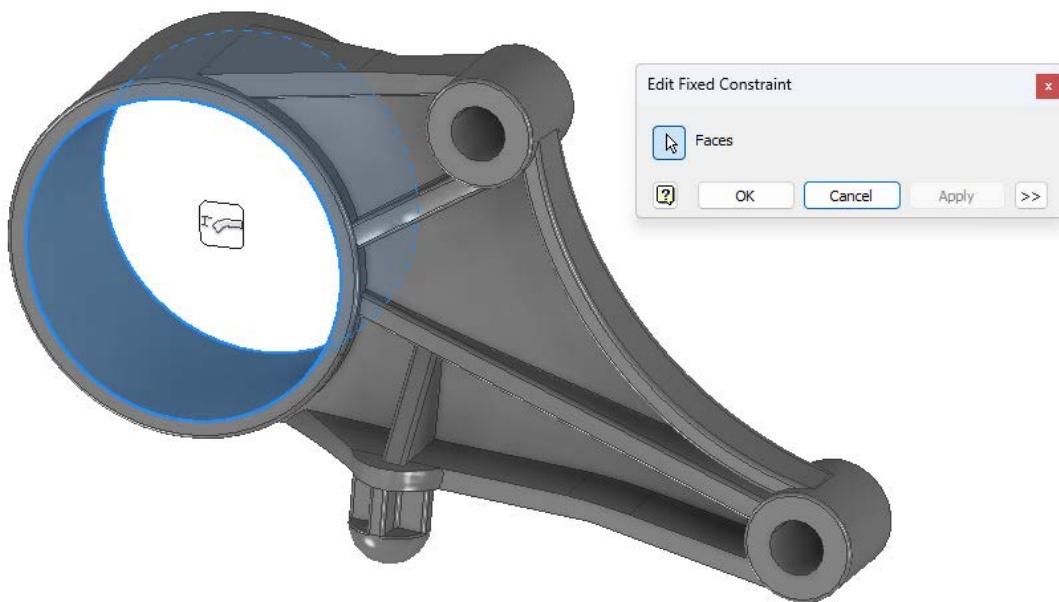
Assign Materials			
Component	Original Material	Override Material	Safety Factor
Nosac 18 spojen.ipt	Aluminij AC-43000 T6	(As Defined)	Yield Strength

Slika 5.6 Određivanje faktora sigurnosti

## 5.4. Rubni uvjeti

Rubni uvjeti definiraju kako predmet analize djeluje u interakciji s okolinom i imaju vrlo velik utjecaj na rezultate simulacije. Glavna podjela rubnih uvjeta je na one koji uvjetuju pomake ili ograničavaju stupnjeve slobode (oslonci) i na vanjske utjecaje koji djeluju na model (opterećenja). Oslonci mogu biti takvi da sprječavaju samo 1 ili 2 stupnja slobode, ili uklještenja, kojima se sprječava pomak u svim smjerovima. Opterećenje može djelovati u točki (čvoru) ili biti raspodijeljeno duž linije ili površine.

Promatrani nosač ima 3 provrta preko kojih ostvaruje kontakt sa šasijom automobila i motorom, stoga se jednom od ta 3 provrta mora ograničiti sloboda. Provrta u kojem se nalazi gumeni dio je stavljeno uklještenje i oduzeti su mu svi stupnjevi slobode (slika 5.7).



Slika 5.7 Dodavanje uklještenja

Na preostala 2 provrta postavlja se opterećenje. Prethodno je spomenuto kako će se u slučaju statičke analize proučavati samo utjecaj težine motora i mjenjača na nosač, te je izračunat iznos ukupne težine. Ukupna težina iznosila je:

$$G = 2400 \text{ N}$$

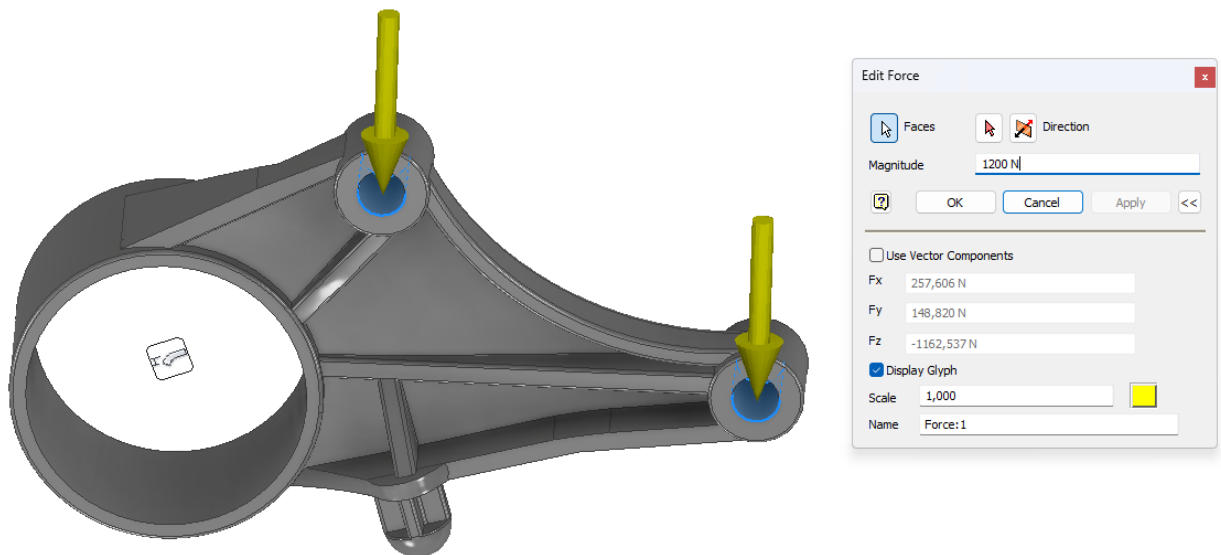
Kao kritični slučaj uzima se situacija u kojoj se ukupna težina dijeli na 2 nosača u sustavu, stoga se sila koja djeluje na promatrani nosač dijeli s 2 te iznosi:

$$G_n = \frac{G}{2}$$

$$G_n = \frac{2400}{2}$$

$$G_n = 1200 \text{ N}$$

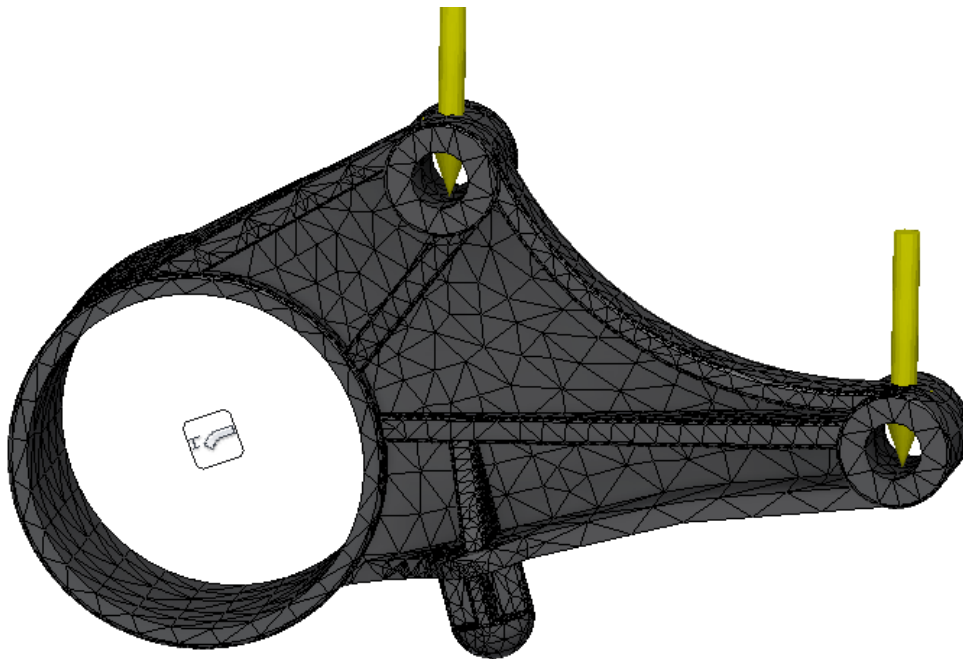
S obzirom da raspodjela sile na oba provrta nije jednaka i ne može se znati njezin točan iznos, sa strane faktora sigurnosti odlučeno je postaviti puni iznos utjecaja težine na oba provrta. U programu su dodane 2 sile koje djeluju na donjoj površini provrta, iznosa 1200 N. Navedeno je prikazano na slici 5.8. Sila je dodana sukladno stvarnome položaju nosača i smjeru djelovanja težine motora.



*Slika 5.8 Dodavanje opterećenja*

## 5.5. Podešavanje mreže konačnih elemenata

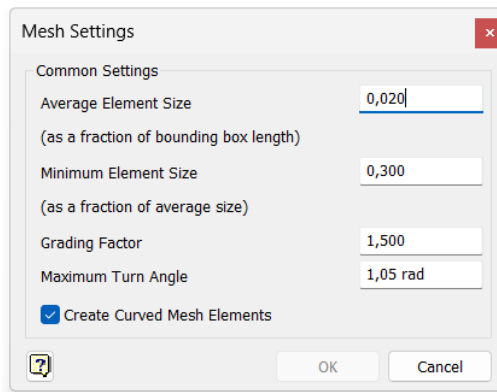
Zadnja pretpostavka koja se određuje prije same numeričke analize jest mreža. Mreža zapravo predstavlja geometriju modela podijeljenu na konačan broj elementa, koji su međusobno povezani čvorovima. Kao što je u početku ovog poglavlja spomenuto, čvorovi elemenata su važni jer se u njima odvija numerička analiza, stoga je dobro postavljena mreža ključ dobivanju što točnijih rezultata. Dobra mreža trebala bi imati pravilno kreirane elemente, bez naglih prijelaza između elemenata ili spojeva ploha te biti postepeno rjeđa ili gušća, prilagođena geometriji modela [24]. U programu *Inventor*, mrežu je moguće automatski kreirati prema osnovnim postavkama mreže. Prikaz automatski kreirane mreže nalazi se na slici 5.9. Kreirana mreža izgleda u redu, međutim za preciznije rezultate bolja je gušća mreža, bez naglih prijelaza sa manjih na veće elemente.



Slika 5.9 Kreiranje mreže

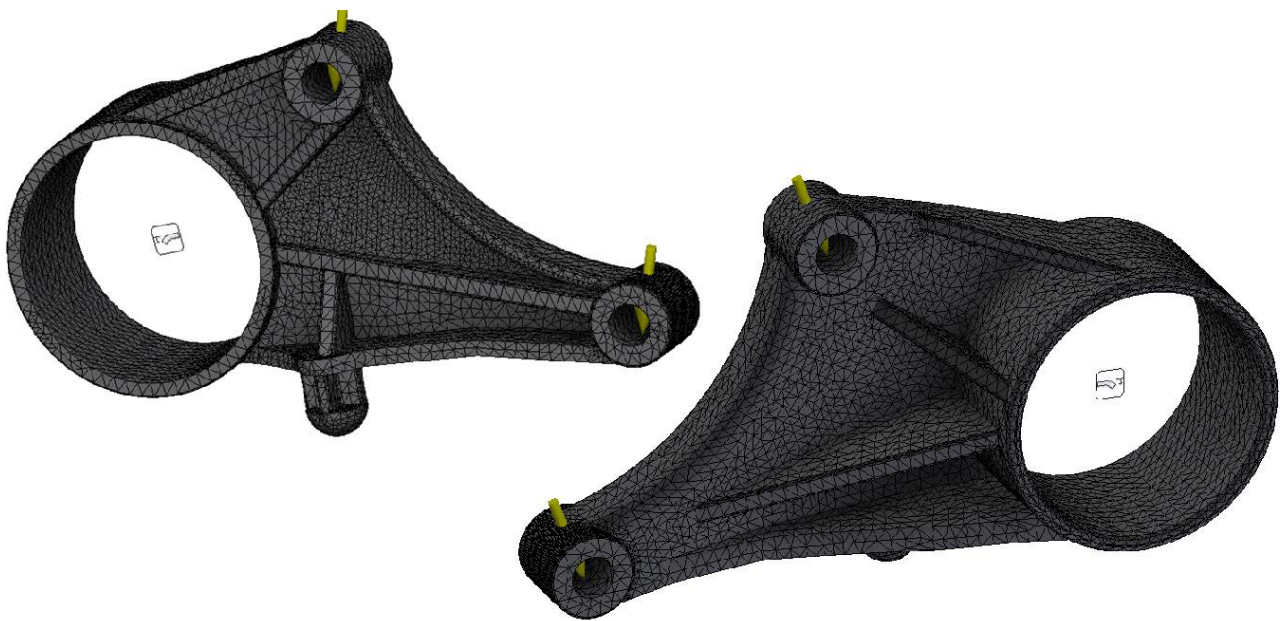
Mrežu je moguće poboljšati lokalnim uređenjem mreže ili mijenjajući osnovne definirane postavke mreže. Postavke mreže koje je moguće mijenjati su prosječna veličina elemenata, najmanja veličina elemenata, najveća vrijednost kuta zakretanja i faktor gradacije [25]. Sve navedene postavke mreže mogu se vidjeti na slici 5.10.





*Slika 5.10 Postavke mreže*

Prosječna veličina elemenata određuje kolika će biti veličina elemenata u odnosu na veličinu modela. Početno postavljena vrijednost je 0,1 te je u ovoj analizi promijenjena na 0,02. Najmanja veličina elemenata predstavlja najmanju vrijednost koju elementi mogu imati u malim područjima. Omogućava automatsko usavršavanje mreže kod malih područja, gdje je to potrebno. Vrijednost najmanje veličine elemenata prema postavljenim vrijednostima iznosi 0,2, a označava relativnu vrijednost u odnosu na prosječnu veličinu elemenata. Ova vrijednost postavljena je na 0,3, dok se preostale dvije vrijednosti nisu mijenjale. Sukladno drugačijim postavkama, izgled mreže se ažurira i mijenja, što je prikazano na slici 5.11.



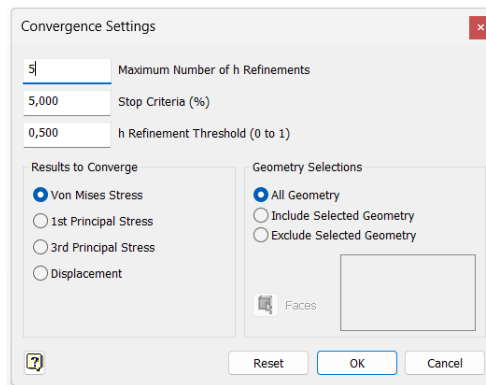
*Slika 5.11 Uređivanje mreže*

S obzirom da je najveće opterećenje na zadnjem dijelu ojačanja nosača, na tome dijelu mreža je lokalno dodatno podešena, kako bi se dobilo bolje rezultate. Parametri lokalnog podešavanja mreže prikazani su na slici 5.12.



*Slika 5.12 Lokalno podešavanje mreže*

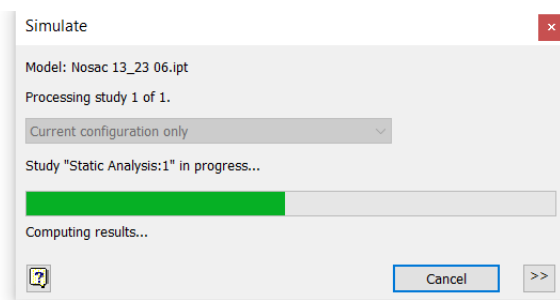
Osim postavki mreže, moguće je mijenjati i postavke konvergencije. Konvergencija je dobar pokazatelj kvalitete mreže konačnih elemenata. Ukoliko rezultati konvergiraju s malim postotkom, znači da je posljednje odstupanje u odnosu na prethodno dobivenu vrijednost također malo. Ako su ta odstupanja, sadašnje i prošle vrijednosti, sve manjeg postotka, znači da rezultati konvergiraju jer se odstupanje smanjuje. Kada to odstupanje dođe do prihvatljivog postotka, rezultati mogu biti mjerodavni. Postavke koje se mogu mijenjati su broj  $h$  preciziranja, kriterij zaustavljanja i prag  $h$  preciziranja. Postavljene postavke prikazane su na slici 5.13.



*Slika 5.13 Podešavanje konvergencije*

Maksimalni broj h preciziranja određuje najveći broj iteracija u kojima se prilagođava gustoća mreže odnosno u okviru kojih se mijenja veličina konačnih elemenata za postizanje konvergencije. Povećavanjem ove vrijednosti, povećava se vrijeme umrežavanja modela, a isto tako i trajanje analize odnosno simulacije. Međutim, kriterij koji se prvo gleda je kriterij zaustavljanja. Kriterij zaustavljanja definira kada su rezultati dovoljno dobri za zaustavljanje simulacije. Ovaj kriterij se postavlja tako da se odredi postotak razlike između zadnja 2 rezultata. Ukoliko je vrijednost postotka manja od zadane, znači da je gustoća odnosno kvaliteta mreže u svim dijelovima modela zadovoljavajuća te je u tom trenutku i simulacija gotova.

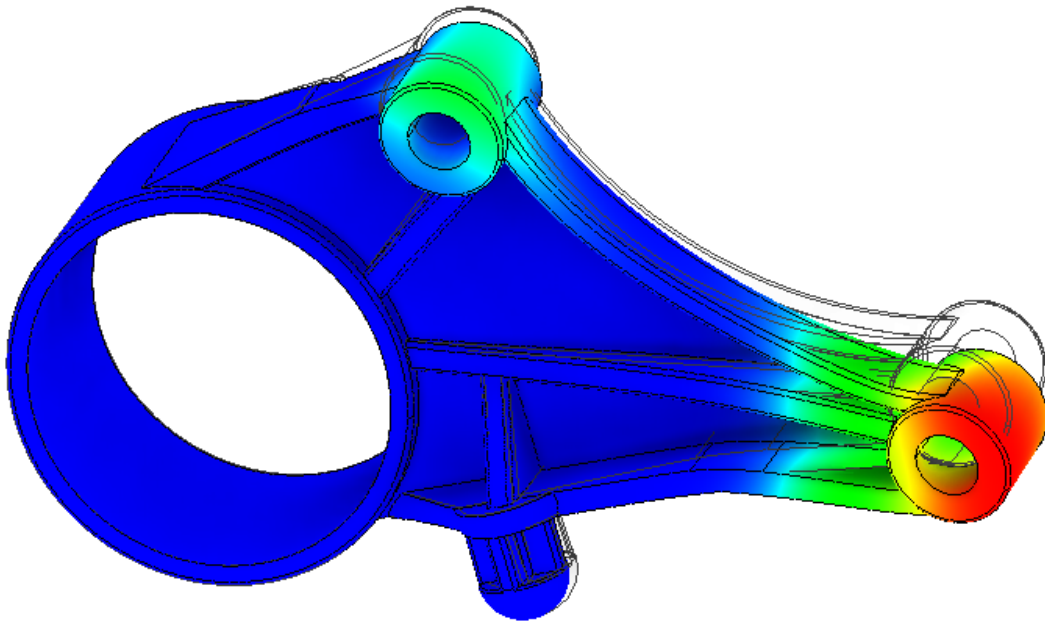
Nakon određivanja svih pretpostavki i postavljanja potrebnih parametara, model je spreman za pokretanje simulacije. Program radi na način da sastavlja sustave jednadžbi u jedan globalni sustav i numeričkim metodama dolazi do rješenja tih jednadžbi. O broju čvorova i postavkama konvergencije ovisi koliko će trajati vrijeme numeričke analize. Tijek numeričke analize moguće je pratiti skočnim prozorom (slika 5.14), a zatvaranje navedenog prozora označava njezin završetak.



*Slika 5.14 Pokretanje simulacije*

## 5.6. Analiza dobivenih podataka

Nakon što program numeričkim metodama dođe do rezultata, oni se grafički prikažu dijagramima, deformiranim oblicima na samome modelu i legendama. Inicijalna verifikacija rezultata radi se na temelju vizualnih rezultata deformacija. Ukoliko deformirani rezultati vizualno odnosno intuitivno odgovaraju smjeru djelovanja sila, može se dalje krenuti u analiziranje podataka. Na slici 5.15 prikazan je deformirani oblik nosača. Na slici se vidi da se deformacija nosača javlja u smjeru djelovanja vanjskih sila. Sukladno tome, vizualni rezultati odgovaraju onim pretpostavljenim.

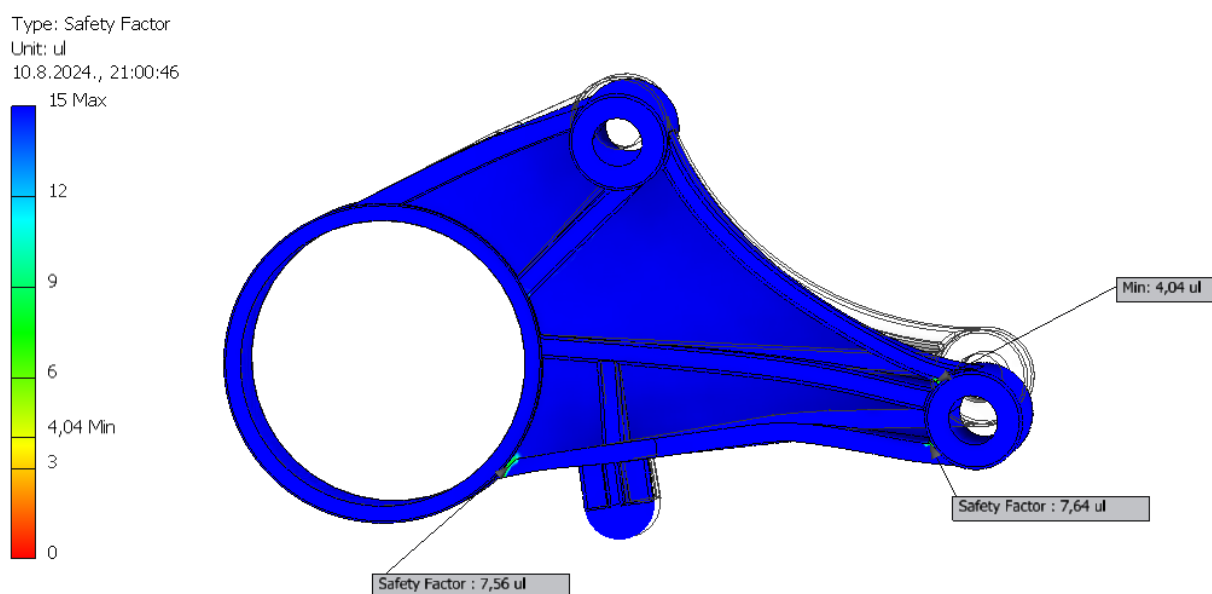


*Slika 5.15 Vizualni prikaz rezultata (deformacije)*

Rezultati koji će se analizirati su vrijednosti naprezanja prema von Misesu, pomaka i faktora sigurnosti. Prije nego se analiziraju podaci, treba saznati vrijednosti faktora sigurnosti kako bi se provjerilo je li pretpostavka da je materijal duktilne prirode ispravna.

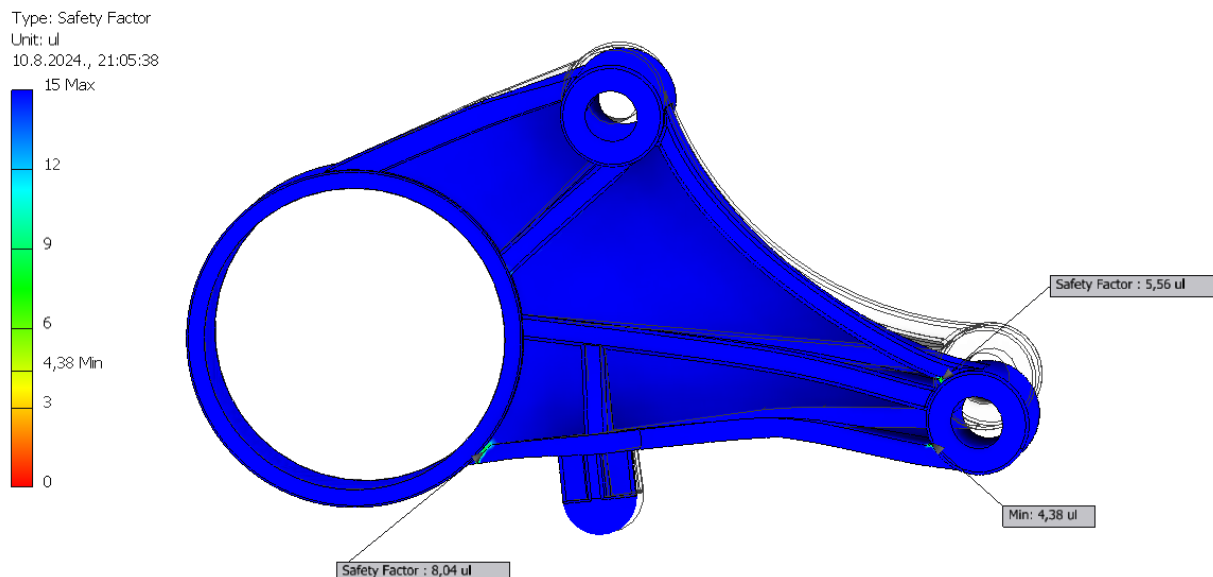
### 5.6.1. Faktor sigurnosti

Faktor sigurnosti daje rezultate prema odabranom pokazatelju čvrstoće materijala. S obzirom da je ovdje pretpostavka kako je materijal duktilan, granica tečenja  $R_e$  bila je izabrana kao mjerodavna. Prema rezultatima analize (slika 5.16), najmanja vrijednost faktora sigurnosti, s obzirom na granicu tečenja  $R_e$ , iznosi 4,04. Navedeni faktor sigurnosti zadovoljava pretpostavljeni minimalni prag faktor sigurnosti od 1,5, no s obzirom da stvarno ponašanje slitine AC- $AlSi10Mg$  T6 nije u potpunosti poznato, za svaki slučaj provjerava se i koliki je faktor sigurnosti u slučaju krhkog ponašanja materijala.



Slika 5.16 Faktor sigurnosti s obzirom na granicu tečenja,  $R_e$

Za provjeru faktora sigurnosti u slučaju krhkog materijala, potrebno je promijeniti mjerodavni faktor na vlačnu čvrstoću  $R_m$ . Navedenom promjenom, novi faktor sigurnosti iznosi 4,38 (slika 5.17). Iz dobivenih rezultata, može se zaključiti kako je kritičniji slučaj onaj u kojemu faktor sigurnosti ovisi o vrijednostima granice tečenja  $R_e$ , stoga se prvotna pretpostavka usvaja.



Slika 5.17 Faktor sigurnosti s obzirom na vlačnu čvrstoću  $R_m$

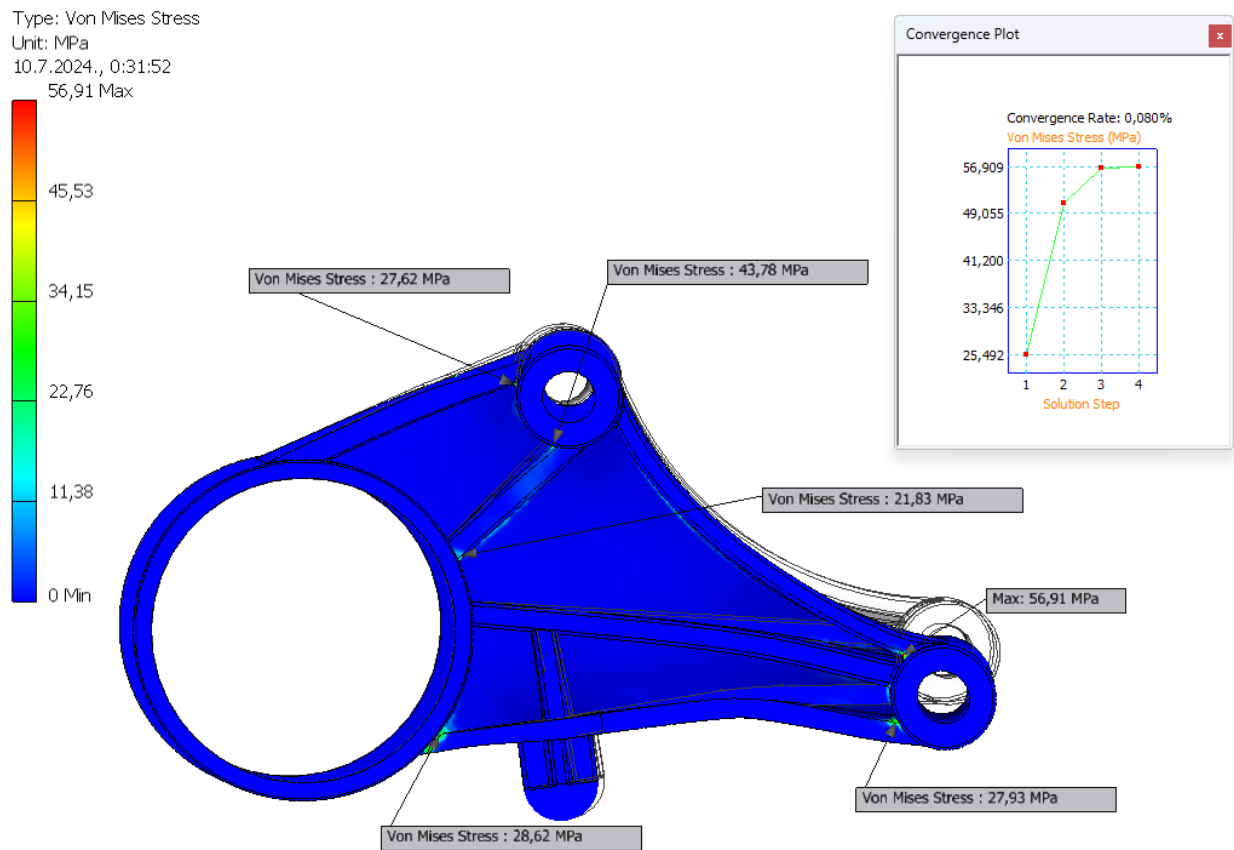
Potvrdom pretpostavljenih kriterija, moguće je analizirati dobivene rezultate naprezanja i pomaka nosača.

### 5.6.2. Naprezanje prema von Misesu

Teorija najveće distorzijske energije (engl. *Distorsional Energy Density Criterion*) ili von Misesova teorija, odličan je kriterij kod određivanja dopuštenog naprezanja za duktilne materijale. Teorija se temelji na tome da gustoća distorzijske energije (koja utječe na promjenu oblika) treba biti manja od dopuštene. S obzirom da se potencijalna energija deformiranja sastoji od gustoće dilatacijske i gustoće distorzijske energije, gustoću distorzijske energije moguće je izraziti preko gustoće potencijalne energije deformiranja, a time i preko naprezanja. Za prostorno stanje naprezanja, sva naprezanja izraze se preko jednog ekvivalentnog naprezanja, koje treba biti manje od onog dopuštenog, a koje je kod duktilnih metala vezano za granicu tečenja  $R_e$  ili  $R_{p0,2}$ . [26].

$$\sigma_{\text{ekv}} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \leq \sigma_{\text{dop}}$$

U programu, najveća vrijednost naprezanja prema von Mises-u, prikazana je karticom *Von Mises Stress*. Raspodjela vrijednosti ekvivalentnog naprezanja prema von Mises-u na modelu prikazana je na slici 5.18.



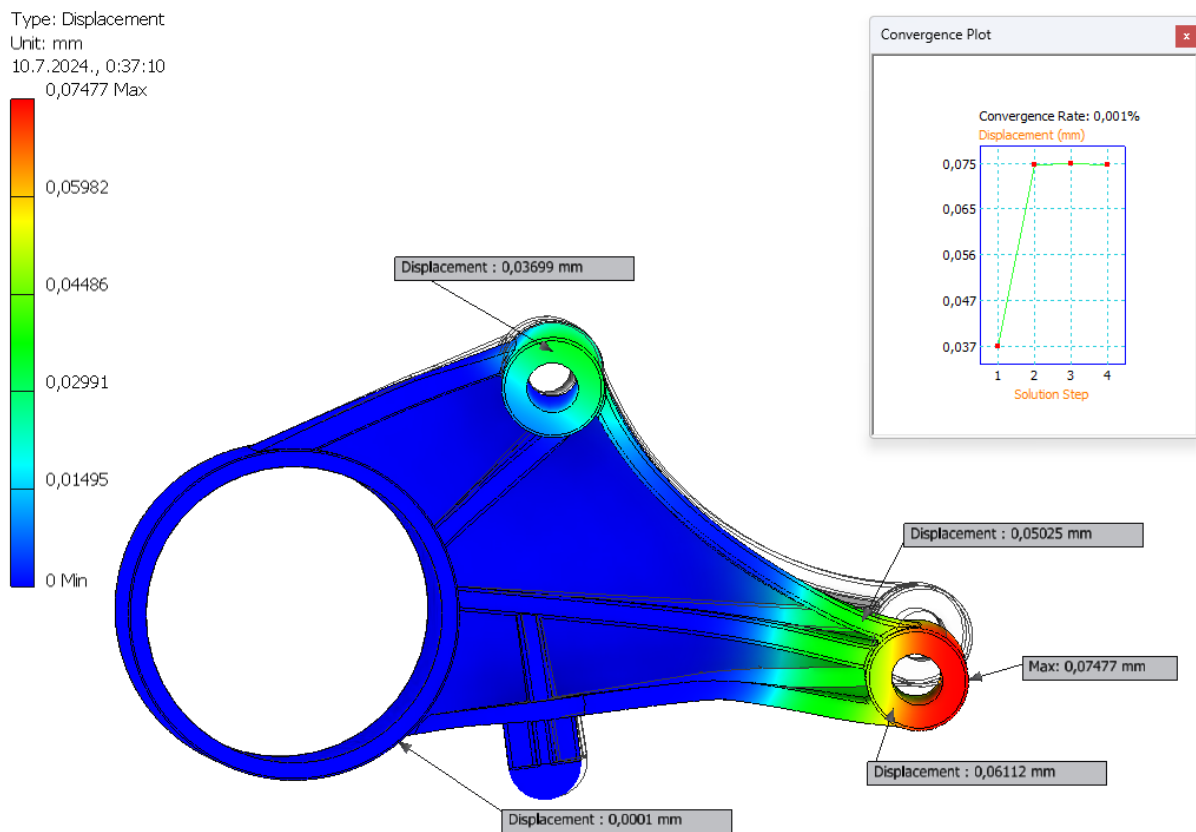
Slika 5.18 Rezultati najvećeg naprezanja prema von Misesu

Prema dobivenim rezultatima, vidi se da je najveća vrijednost naprezanja 56,91 MPa, što je poprilično manje od dozvoljenih 270 MPa. Također, na slici se može vidjeti kako se najveća naprezanja javljaju na spojevima ojačanja, dok ostali tanji dijelovi nosača imaju minimalne iznose naprezanja. Iz dobivenih rezultata naprezanja, može se zaključiti kako je konstrukcija nosača dobro izrađena u dijelovima gdje se javljaju najveća naprezanja te da vrijednost najvećeg naprezanja ne prelazi dopuštene vrijednosti s većim faktorom sigurnosti. Također, prema dijagramu konvergencije, može se zaključiti kako je rješenje normalnog naprezanja u potpunosti konvergiralo (0,08%), čime je moguće prihvatiti dobivena rješenja. Što se tiče same krivulje konvergencije, vidi se kako krivulja postepeno konvergira te nema nikakva odstupanja.



### 5.6.3. Pomaci

Zadnji rezultati koji se prikazuje jesu pomaci. Ukupni pomaci prikazani su na slici 5.19 iz koje se može vidjeti kako najveća vrijednost pomaka iznosi 0,0748 mm, što je izrazito mala vrijednost i kao takva prihvatljiva. Prikazane su i manje vrijednosti pomaka kako bi se prikazalo kako odmicanjem od ukliještenog dijela, raste vrijednost pomaka kao rezultat djelovanja sile. Glavni pomaci nosača motora rezultiraju u gumenom dijelu, s obzirom da taj dio apsorbira vibracije i elastičan je, dok nosač motora ima ulogu nosivog elementa.



Slika 5.19 Rezultati pomaka

Važno je napomenuti kako je konvergencija rezultata pomaka postignuta već u drugom koraku, što ukazuje na ispravnost dobivenih vrijednosti.



## 6. OPTIMIZACIJA

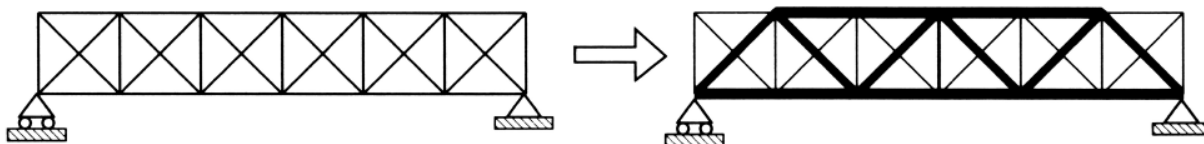
### 6.1. Optimizacija strukture

Optimizacija je postupak kojim se na temelju željenih kriterija dolazi do najboljeg izbora nekih vrijednosti. To mogu biti neki ekonomski ili tehnički kriteriji. U inženjerstvu, optimizacija podrazumijeva proces stvaranja nekog sustava ili elementa, uz što veću učinkovitost i bolju funkcionalnost. Da bi se to postiglo, određuju se zadani parametri i ograničenja, kako bi se moglo dobiti najbolje željene izlazne parametre. U ovom slučaju promatrat će se materijal kao skup podataka koji na najbolji način treba izdržati određena opterećenja, stoga se radi o optimizaciji strukture [27].

Kod optimizacije strukture radi se o 2 slučaja. Jedan je da se dobije što lakša struktura uz jednaka opterećenja, dok je u drugom slučaju cilj postići što bolju krutost strukture. Kako bi se moglo doći do smanjenja mase ili povećanja krutosti, potrebno je imati i određena ograničenja. Ograničenja mogu biti opterećenja, pomaci, uvjeti geometrije, ali i masa i krutost, ovisno o tome što je rezultat optimizacije.

Ovisno o željenim svojstvima strukture i optimizirane značajke, postoje tri glavne vrste strukturne optimizacije [27]:

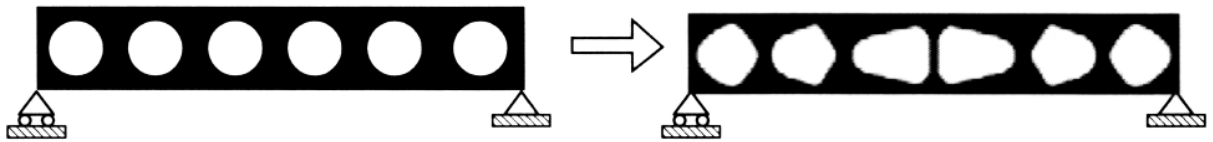
1. Optimizacija dimenzija (veličina) – Pod optimizacijom dimenzija smatra se promjena neke dimenzije konstrukcijskih elemenata kako bi se dobila najbolja izvedba konstrukcije. Te dimenzije mogu biti debljina, duljina ili površina poprečnog presjeka (kod nosača, greda, stupova). Cilj optimizacije veličine je smanjiti potrošnju materijala, odnosno masu, uz zadovoljavanje potrebne čvrstoće, stabilnosti i krutosti konstrukcije. Primjer optimizacije dimenzija nalazi se na slici 6.1.



*Slika 6.1 Primjer optimizacije dimenzija [28]*

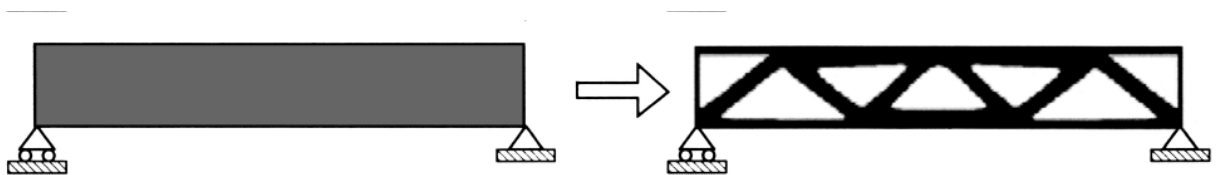
2. Optimizacija oblika – U ovome slučaju, optimizira se neki oblik ili kontura strukture, odnosno geometrija. Cilj ovakve optimizacije može biti poboljšavanje funkcionalnosti,

učinkovitosti ili nekih specifičnih svojstava poput smanjenja otpora zraka, povećanje uzgona ili poboljšavanje aerodinamike. Primjer optimizacije oblika vidi se na slici 6.2.



*Slika 6.2 Primjer optimizacije oblika [28]*

3. Optimizacija topologije – Optimizacija topologije je najviše korištena vrsta optimizacije, kod koje se optimizacijom dobiva najbolji raspored strukture odnosno materijala unutar nekog ograničenog prostora. To rezultira dobivanjem složenijih geometrija, ali lakših struktura, što je vrlo učinkovito kod potrebe za smanjenjem materijala uz jednaku raspodjelu opterećenja. Primjer optimizacije topologije prikazan je slikom 6.3.



*Slika 6.3 Primjer optimizacije topologije [28]*

Optimizacija oblika i topologije, vrlo su slične pa neki čak optimizaciju oblika svrstavaju pod optimizaciju topologije. Međutim, kako se sam postupak tih optimizacija bazira na drugačijim metodama procesa optimiranja, dijele se kao zasebne vrste. S druge strane, optimizacija topologije i dimenzija su potpuno suprotne jer se topologijom ne mijenjaju osnove dimenzije, nego samo raspored materijala [27].

Ovaj rad bazirat će se na optimizaciji topologije, stoga će se u idućem poglavlju detaljnije opisati optimizacija topologije i njezin postupak.

## 6.2. Optimizacija topologije

S obzirom da inženjerstvo teži kreiranju što lakših struktura, bolje učinkovitosti i većih performansi, optimizacija topologije postala je jedna od popularnijih vrsta kod optimiranja struktura ili konstrukcija. Optimizacija topologije radi na način da optimizira distribuciju materijala unutar postojećeg prostora, uz određena ograničenja. Ograničenja predstavljaju zadana opterećenja i rubni uvjeti, a potrebno je da i novo rješenje ispunjava zahtjeve željenih performansi.

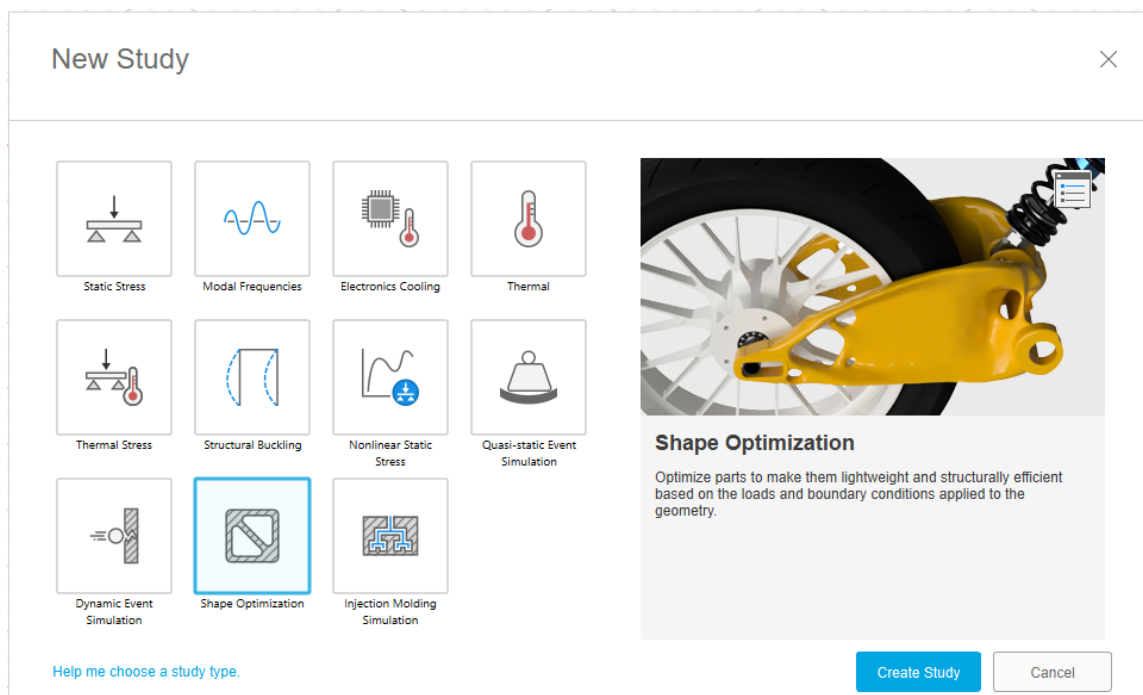
Proces optimizacije vezan je uz CAD model, FEM analizu i neki od algoritama optimizacije. Za početak je nužno imati CAD model kako bi se bilo kakve izmjene, analize ili optimizacije mogle izvoditi, dok je FEM analiza potrebna radi saznanja o raspodjeli naprezanja i dozvoljenim pomacima. Dobivanjem raspodjele naprezanja, moguće je pronaći područja u strukturi koja su manje ili nisu uopće opterećena odnosno napregnuta (pa tako i deformirana), stoga takva područja nisu ni potrebna konstrukciji s aspekta mehanike i nosivosti konstrukcije. Optimizacija topologije pronalazi takva područja u materijalu nekog modela i različitim algoritmima ih uklanja. Ovim principom moguće je uštedjeti na materijalu, poboljšati krutost, ali i pridonijeti boljem izgledu modela [29]. Optimizirani model kasnije se verificira dodatnom analizom naprezanja i dovršava CAD modeliranjem kako bi se dobio završni model.

Postoji nekoliko različitih računalnih programa koji u sebi sadrže alate za optimizaciju topologije. Svaki od njih ima svoje prednosti i nedostatke, te se razlikuju po svojoj specijaliziranosti. Alati za optimizaciju topologije mogu se nalaziti u specijaliziranim programima samo za optimizaciju poput *Altair OptiStruct-a* koji se fokusira na strukturnu analizu i optimizaciju topologije, *Dassault-ovog* programa *SIMULIA Abaqus* koji se koristi kod složenih slučajeva opterećenja za FEM analize kao i za složene optimizacije topologije, ili programa *SolidThinking Inspire* koji je razvijen kako bi korisnicima olakšao optimizaciju topologije i provođenje generativnog dizajna. Pored toga, postoje integrirani programi koji imaju više ugrađenih različitih dodataka. To su uglavnom programi koji se koriste za CAD, CAE ili CAM modeliranje, pored čega imaju ugrađene dodatke za kompleksnije analize ili određene vrste optimizacije. Neki od takvih programa su *ANSYS*, *Autodesk Fusion 360*, *Siemens NX* i *COMSOL Multiphysics*. S obzirom da se FEM analiza odrađivala u programu *Inventor*, koji je od *Autodeska*, odabrano je da će se optimizacija topologije odraditi također u programu *Autodeska*, *Fusion 360*, zbog olakšavanja između kompatibilnosti programa.

### 6.3. Optimizacija u programu Fusion 360

*Fusion 360* je program koji se koristi za računalno konstruiranje i oblikovanje modela, njegovo analiziranje, a onda i praćenje proizvodnje, s ugrađenim dodatkom za optimizaciju topologije [30]. Kao što je u prethodnom poglavlju objašnjeno, za optimizaciju topologije odabran je *Autodeskov* program *Fusion 360*, zbog svoje kompatibilnosti sa programom *Inventor*. *Inventor* također ima alate za optimizaciju, međutim, program *Fusion 360* prilagođeniji je za optimiranje modela sukladno načinu izrade. S obzirom da je tema ovoga rada optimizacija topologije za izradu aditivnim tehnologijama, činjenica da program *Fusion 360* u sebi ima već ugrađene dodatke za modele izrađene aditivnim tehnologijama dodatno opravdava odluku.

Kako bi se započelo s optimizacijom topologije, učitava se postojeći CAD model u programu, kreira se nova studija i odabire se simulacija. U *Fusionu 360*, optimizacija topologije se nalazi pod karticom *Shape Optimization*, kao na slici 6.4. Odabirom na navedenu karticu otvara se novo sučelje sa optimizacijom topologije i pretpostavkama koje se ispunjavaju prije odrađivanja optimizacije.



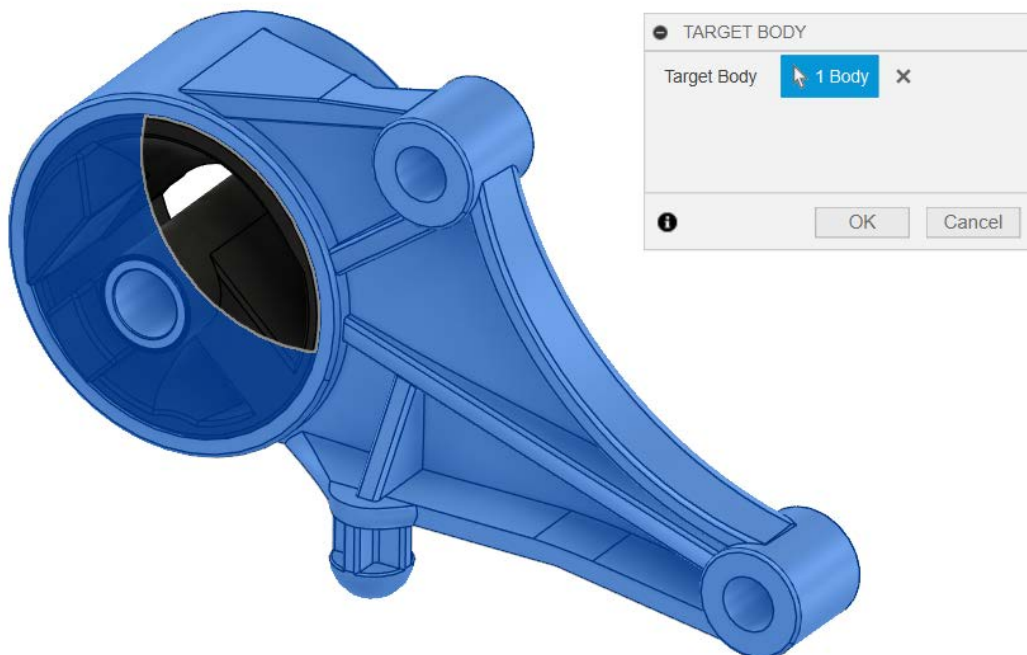
Slika 6.4 Pokretanje optimizacije topologije

Kao i kod FEM analize, prilikom optimiziranja postoje pretpostavke koje uvjetuju uspješno optimiranje modela:

1. Geometrija
2. Definiranje materijala
3. Kriterij (cilj) optimizacije
4. Rubni uvjeti
5. Mreža

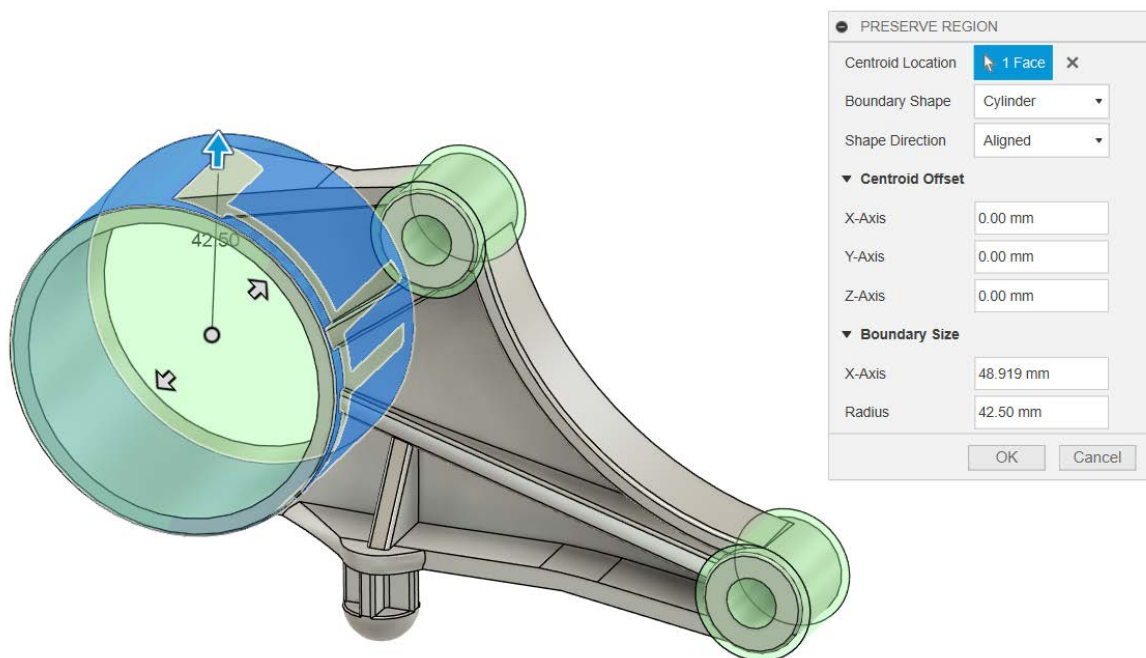
### 6.3.1. Odabir geometrije

Geometrija je, kao i kod FEM analize, definirana geometrijom CAD modela, a predstavlja prostor unutar kojeg se materijal može distribuirati, odnosno najveći dopušteni volumen za neku strukturu. S obzirom da je CAD model već kreiran, i korišten za FEM analizu u *Inventoru*, idući korak je odabrati tijelo koje će se optimizirati. Kako je prethodno objašnjeno da gumeni dio ne sudjeluje u statičkoj analizi, za optimizaciju je odabran samo nosivi dio nosača. Odabir tijela koji sudjeluje u optimizaciji topologije vidljiv je na slici 6.5.



*Slika 6.5 Odabir tijela za optimizaciju*

Postoje dijelovi sklopa koji ne sudjeluju u optimizaciji, odnosno guma i čahura. Kako ne bi utjecali na rezultate, navedeni dijelovi ne smiju biti dio sklopa tijekom optimizacije. Nije ih moguće samo potisnuti, već se koristi opcija *Simplify*, gdje se brišu dijelovi koji nisu potrebni prilikom optimizacije. Ovime je gotov odabir tijela koja sudjeluje u optimizaciji, ali još uvijek nije gotovo definiranje svih parametara geometrije. S obzirom da na modelu postoje dijelovi koji su nužni za funkcionalnost sklopa, takvi dijelovi trebaju ostati isti. U ovome slučaju nužni dijelovi su svi provrti, jer se na tim dijelovima nalaze spojevi nosača i šasije automobila ili motora. Kako bi se očuvalo navedene dijelove, označava ih se opcijom *Preserved Region*. Odabire se svaki provrt i određuje se koliki je radijus očuvanog dijela. Ova opcija prikazana je na slici 6.6. Dijelovi koji ne ulaze u optimizaciju označeni su zelenom bojom.



Slika 6.6 Očuvanje dijelova

### 6.3.2. Definiranje materijala

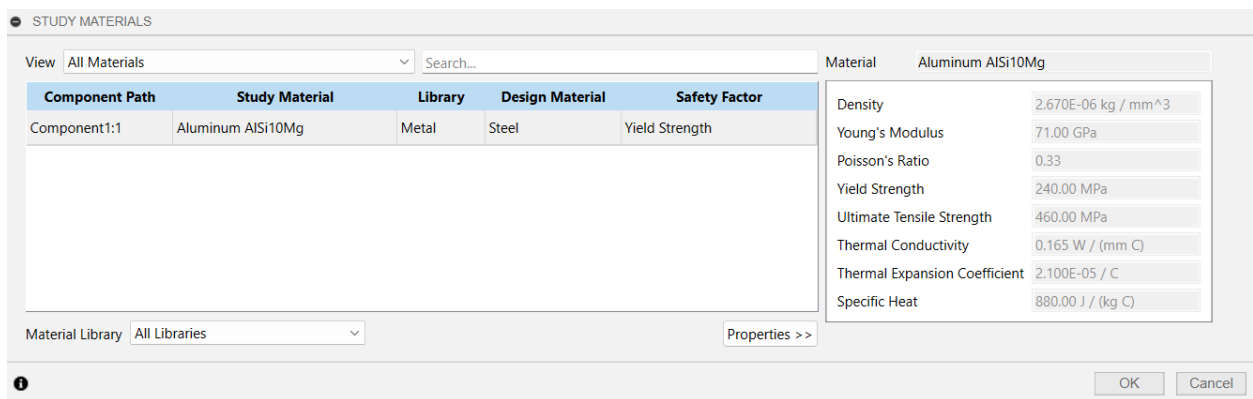
Prilikom definiranja pretpostavki za FEM analizu, određeno je da se odabire slitina aluminija AlSi10Mg. Proizvodnja optimiranog modela uključuje aditivne tehnologije, stoga se provjerava koja vrsta aluminija se koristi kod proizvodnje aditivnim tehnologijama. Prema tablici 6.1 može se vidjeti kako se korištena slitina aluminija koristi i kao metalni prah kod aditivnih

tehnologija. Sukladno tome, odabire se isti materijal kako bi mjerodavne vrijednosti granice tečenja  $R_e$  ostale iste.

Tablica 6.1 Slitine aluminijevog praha [31]

	Aluminium & Trace elements	Si	Mg	Zn	Cu	Others
F357	Rem.	6.5 – 7.5	0.4 – 0.7			Ti: 0.04 – 0.2
AlSi10	Rem.	9 – 11				
AlSi10Mg	Rem.	9 – 11	0.2 – 0.5			
AlSi12	Rem.	11 – 13				
AlSi14	Rem.	13 – 15				
6061	Rem.	0.4 – 0.8	0.8 – 1.2		0.15 – 0.4	
7075	Rem.		2.1 – 2.9	5.1 – 6.1	1.2 – 2.0	Cr: 0.2 – 0.3

Odabrani materijal AlSi10Mg, nalazi se u *Fusion*-ovoj bazi podataka kao materijal koji se koristi u aditivnim tehnologijama i nije ga potrebno ručno dodavati. Odabir materijala i njegova mehanička svojstva prikazani su na slici 6.7.

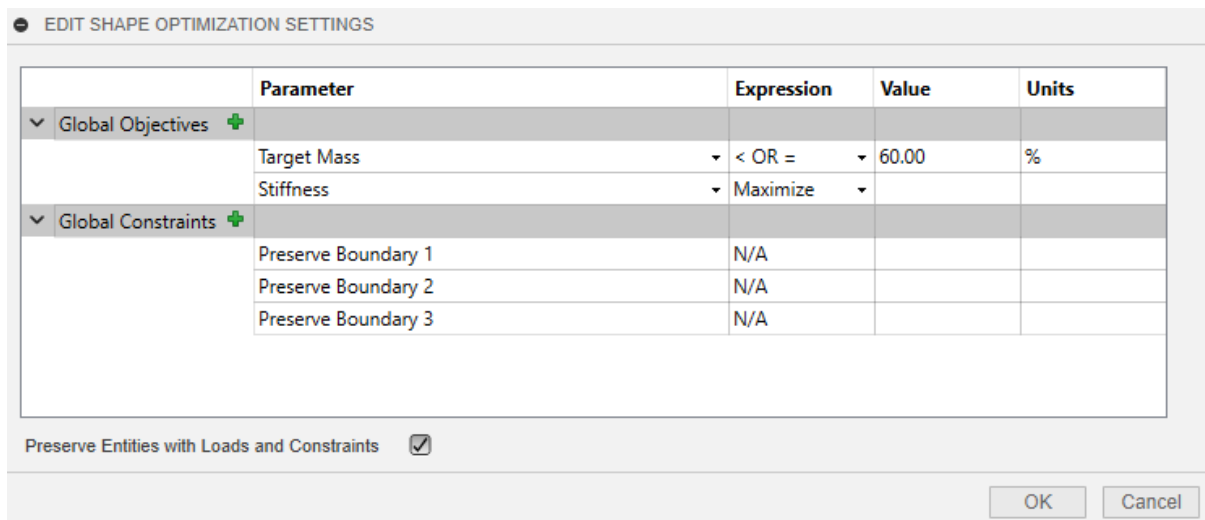


Slika 6.7 Odabir materijala

Vrijednosti vlačne čvrstoće  $R_m$  i granice tečenja  $R_e$ , jednake su kao kod FEM analize nosača motora, a za mjerodavnu vrijednost kod faktora sigurnosti postavljena je granica tečenja  $R_e$ , sukladno odabranim vrijednostima prilikom odrađivanja analize.

### 6.3.3. Kriterij optimizacije

Kriteriji koje se može podešavati kod optimizacije topologije su masa i krutost. Optimizacija u *Fusion*-u se temelji na tome da se očuva krutost, odnosno da je najveća moguća za taj materijal, dok se masa smanjuje uklanjanjem viška materijala. Podešava se postotak preostale mase, čime se postavlja ciljani rezultat optimizacije. Postotak ciljane mase je podešen na 60% ukupne mase tijela (slika 6.8).

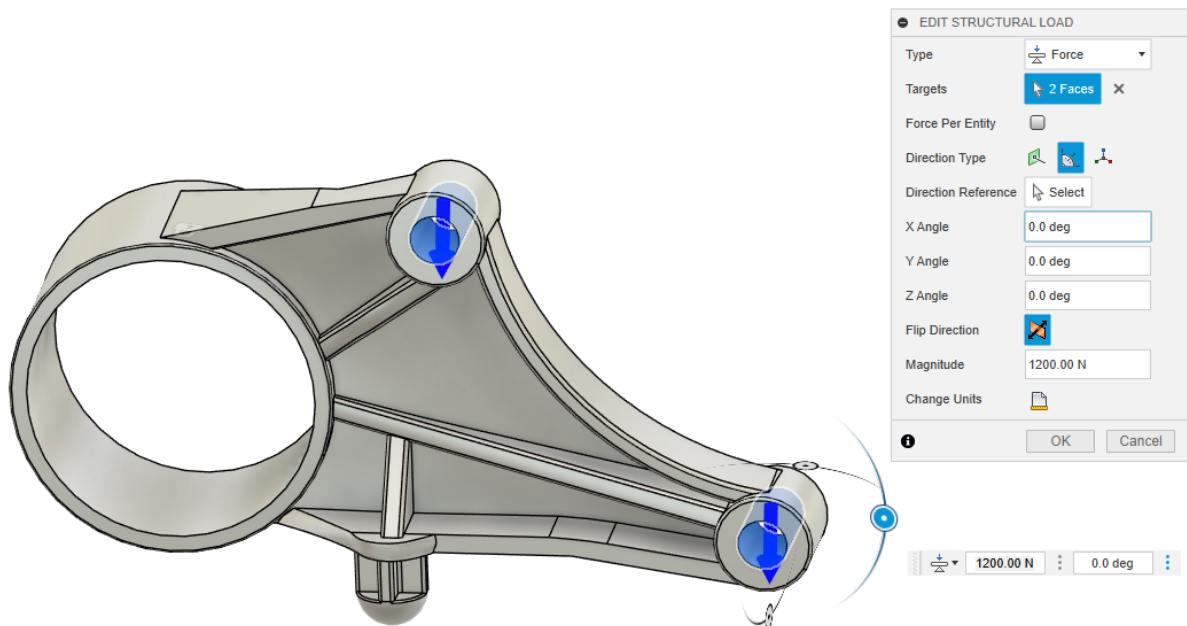


Slika 6.8 Ciljevi optimizacije

### 6.3.4. Rubni uvjeti

Rubni uvjeti kod optimizacije predstavljaju (kao i u analizi naprezanja) interakciju predmeta s okolinom pa je tako moguće ograničiti stupnjeve slobode ili utjecati na model vanjskim opterećenjima. Za ograničenje slobode je postavljeno uklještenje u provrtu u kojemu se nalazi gumeni dio, dok su vanjske sile postavljene na preostala 2 provrta. Iznosi tih sila su 1200 N, kako je prethodno izračunato da su vrijednosti težina, a usmjerene su u smjeru osi z u odnosu na poziciju nosača u automobilu (slika 6.9).

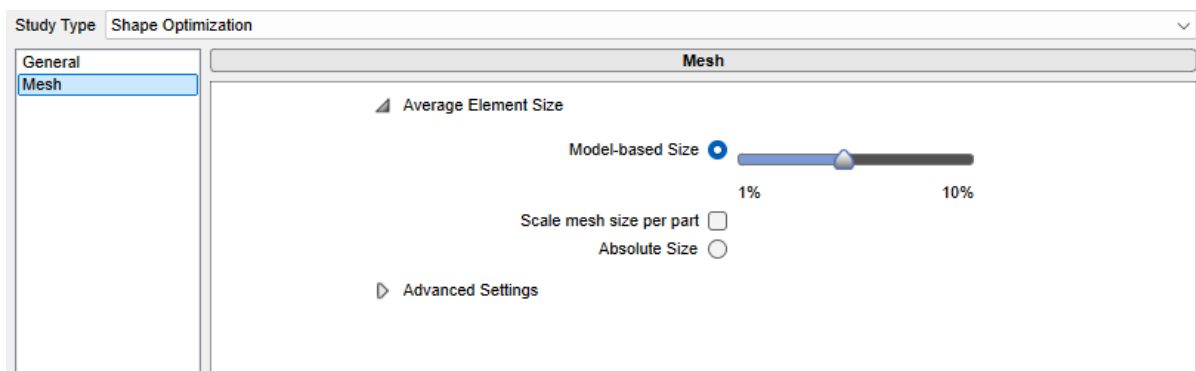




Slika 6.9 Dodavanje rubnih uvjeta

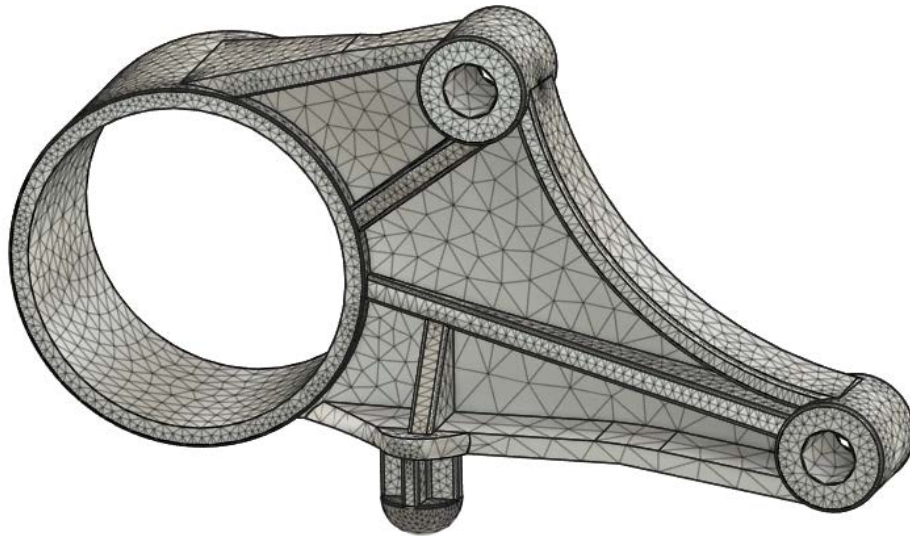
### 6.3.5. Definiranje i postavljanje mreže

Omrežavanjem modela, njegova geometrija se diskretizira konačnim elementima, stoga je važan dio u pripremi jer utječe na točnost optimizacije. U ovom programu, softver automatski generira mrežu koja se bazira na geometriji modela. Unatoč automatskom generiranju mreže, moguće je određene postavke mreže mijenjati prema potrebama kao na slici 6.10.



Slika 6.10 Postavke mreže

Osnovna postavka mreže koju je moguće kontrolirati je prosječna veličina elemenata. Prosječnu veličinu elemenata moguće je izraziti u postotku (u odnosu na model) ili odrediti točnu veličinu elemenata u milimetrima. Postoje i napredne postavke mreže kojima se kontroliraju najmanja veličinu elemenata, kut zakretanja i određeni omjeri veličina elemenata. Za potrebe ove optimizacije, napredne postavke su ostavljene prema osnovnim postavkama programa, iz kojih proizlazi mreža konačnih elemenata prikazana na slici 6.11.



Slika 6.11 Mreža konačnih elemenata

Prije samog pokretanja simulacije, provjerava se jesu li sve potrebne pretpostavke i kriteriji određeni. Program se tijekom odabira svih parametara sam ažurira i radi provjeru pretpostavki. Ukoliko su sve potrebne pretpostavke određene, kartica *pre-check* će zazeleniti, nakon čega je moguće započeti rješavanje optimizacije. Tijek svih operacija moguće je pratiti u kartici statusa, kao što se na slici 6.12 vidi se tijekom optimizacije nosača motora.

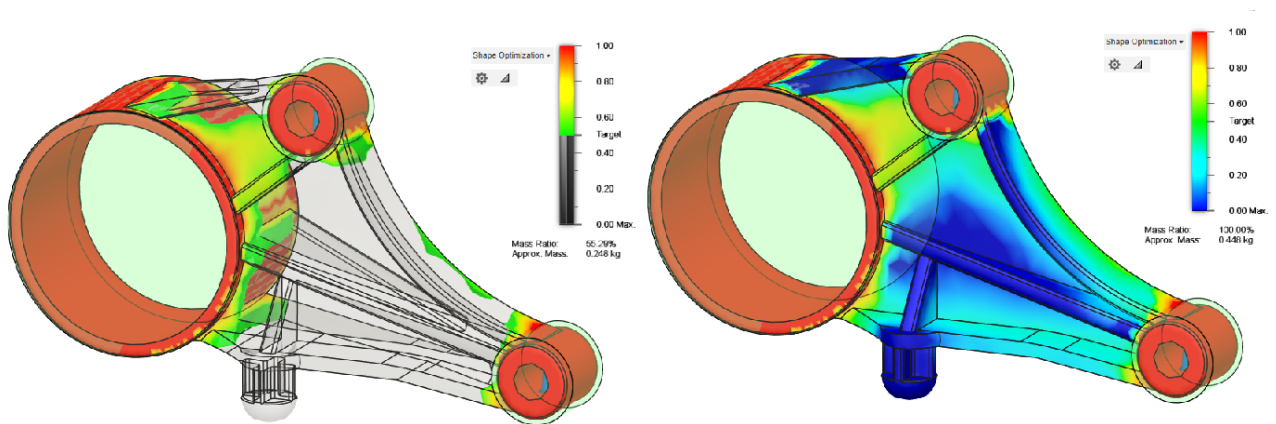
Data		Simulations		Generative Designs		Drawing Automation	
Study	Name	Document	Model	Status	Action		
▼	Study 1 - Shape Optimization	Nosac 1... rebro)	Simulation Model 1	5%			
	Sending...			100%			

Slika 6.12 Tijek optimizacije topologije

## 6.4. Evaluacija dobivenih rezultata

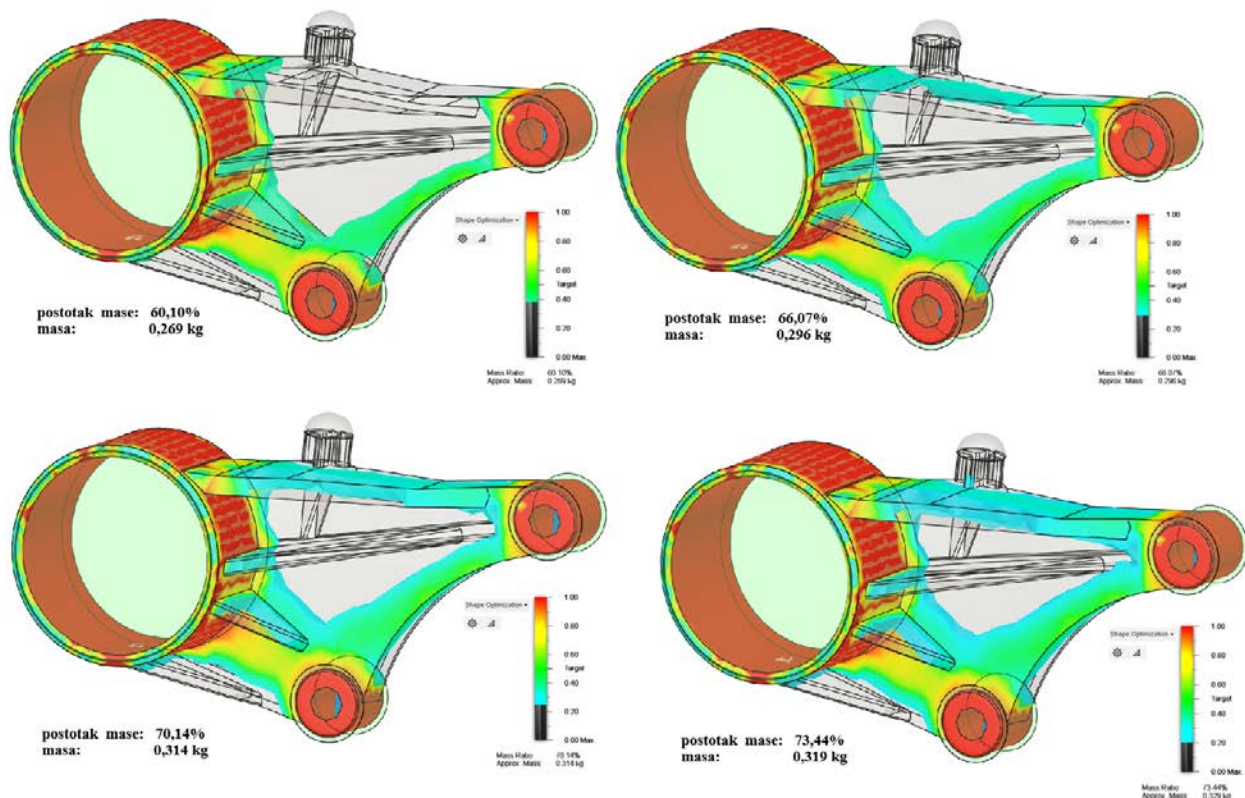
### 6.4.1. Rezultati optimizacije

Nakon završene simulacije, ukoliko je rješenje za zadane uvjete dobiveno, program izbaci preporučenu ciljanu masu i raspodjelu opterećenja. Na slici 6.13, lijevo se nalazi optimirani oblik s ciljem preostale mase ispod 60%. U ovome slučaju, program je odredio da je taj postotak preostale mase 55%. Desno na slici, prikazan je cjelokupni raspored naprezanja u nosaču, s cijelom svojom masom.



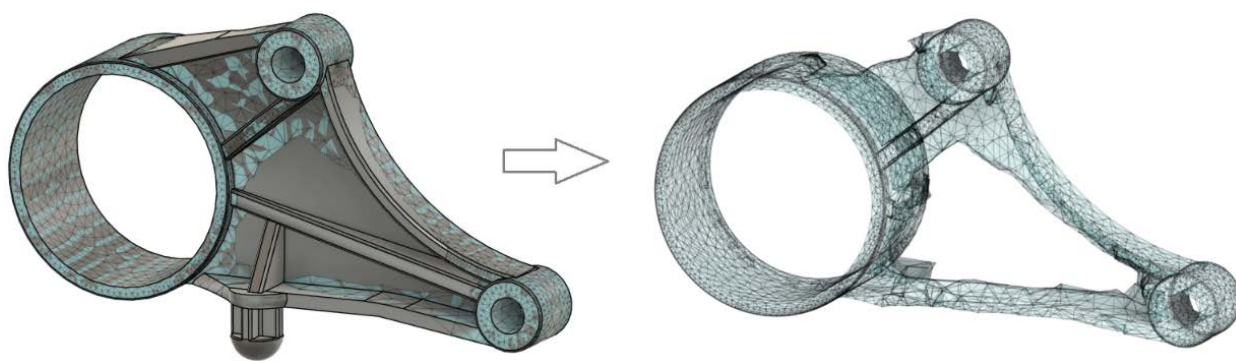
Slika 6.13 Usporedba optimiranog i neoptimiranog modela

Iz slike 6.13 moguće je zaključiti kako cilj od 60% mase nije moguće ostvariti, s obzirom da svi najvažniji elementi ne mogu ostati povezani. Sukladno tome, povećava se postotak preostale mase. Različite vrijednosti postotka mase tijela, prikazane su na slici 6.14. Iz Slike 6.14 može se vidjeti kako se povećavanjem preostale mase, svi potrebni dijelovi geometrije nosača postepeno spajaju. Tek nakon 65 posto mase, moguće je kreirati spojeni model koji bi mogao funkcionirati kao nosač motora.



Slika 6.14 Optimizacija s različitim postotcima preostale mase

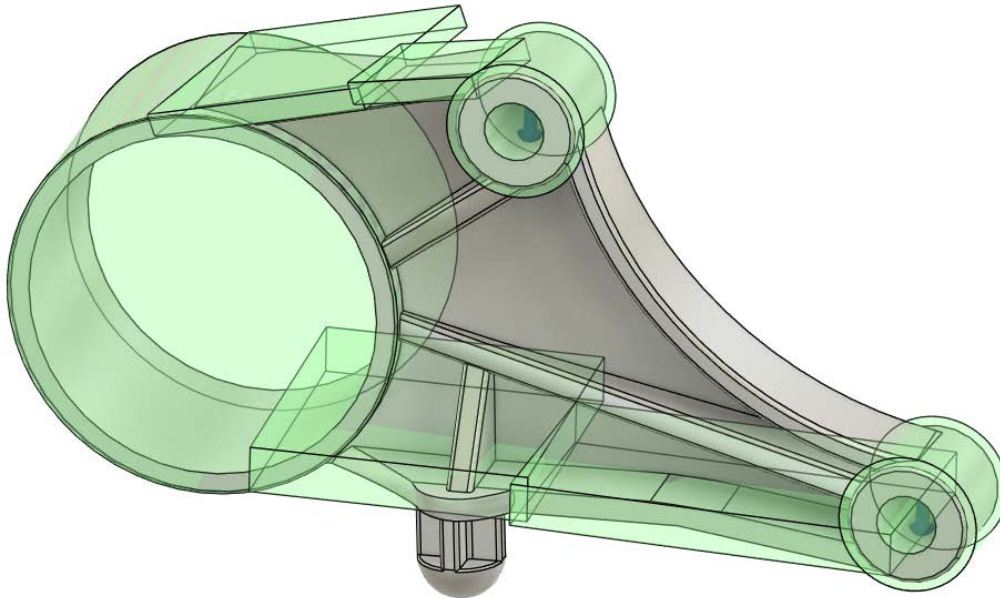
Odabrana je opcija sa 70 posto preostale mase, kako bi se osigurala bolja čvrstoća strukture. Rješenje optimizacije sa 70 posto mase izuzeto je u zasebnu mrežu, pomoću koje je moguće kreirati novi volumen, a onda i CAD model (slika 6.15), što će biti prikazano u kasnijim dijelovima rada.



Slika 6.15 Pretvaranje rješenja optimizacije u mrežu

#### 6.4.2. Druga iteracija

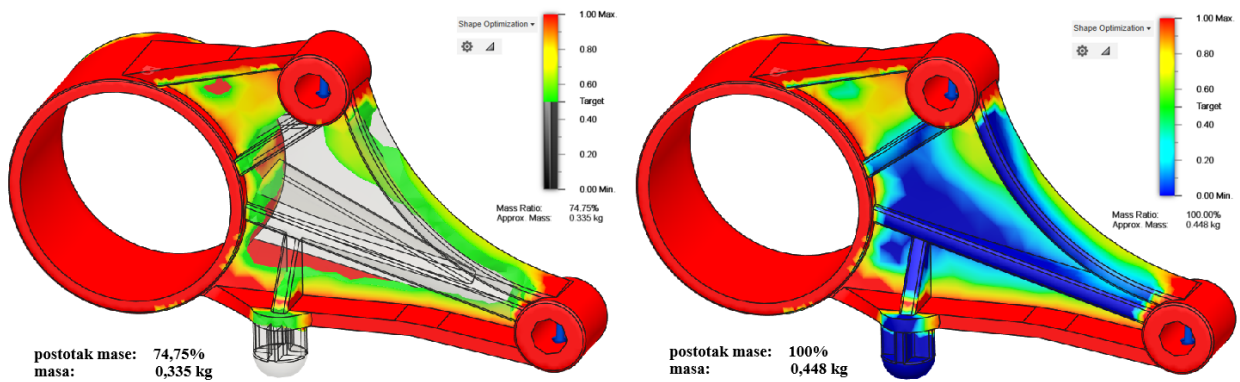
Optimizacija topologije je iterativan proces u kojem program preko algoritma procjenjuje kakvi bi struktura i raspored materijala trebali biti. S obzirom da je cilj doći do optimalnog rješenja, navedeni proces je moguće ponoviti i nekoliko puta. Da bi se dobio što bolji i učinkovitiji optimizirani model, potrebno je evaluirati dobivene međurezultate i po potrebi mijenjati neke od parametara, što dovodi do novih iteracija. Kako bi se dobio bolji rezultat, odrađena je dodatna iteracija optimizacije. S obzirom da je kod ciljane mase u prošloj iteraciji program u potpunosti eliminirao rubove tijela i posljedično razdvojio osnovne dijelove, u ovom slučaju je postavljen dodatni dio mase koji se izuzima iz procesa optimizacije. Svi rubni dijelovi koji spajaju cilindrične dijelove su označeni kao nužni dijelovi (slika 6.16).



*Slika 6.16 Dodavanje očuvanih dijelova*

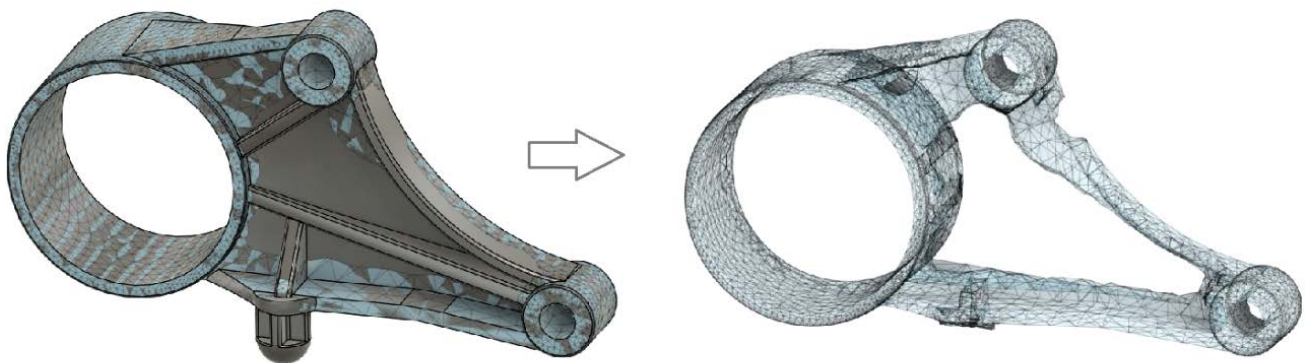
Preostale pretpostavke, parametri i kriteriji, ostavljeni su jednakima kao u prvoj iteraciji simulacije, međutim, nakon odrade druge iteracije simulacije, došla je poruka kako nije moguće ostvariti model uz kriterij od samo 60 posto mase, stoga je taj kriterij povećan na 75 posto. Unosom novog kriterija, simulacija je uspješno došla do novog rješenja. Rješenja druge iteracije prikazana su na slici 6.17.





*Slika 6.17 Rješenja druge iteracije*

Iz dobivenih rezultata može se zaključiti kako nije moguće ostvariti vrijednosti mase ispod 70 posto, uz očuvanje svih potrebnih dijelova i strukture modela. Dodavanjem novih zahtjeva u pogledu očuvanja tijela, raste i postotak preostale mase. Raspodjela naprezanja u oba slučaja su jednaka (što se vidi na rješenju sa 100 posto mase), ali oblik je malo drugačiji sukladno zadanim uvjetima optimizacije. Rješenje druge iteracije spremljeno je u zasebnu mrežu, kako bi uz korištenje dodatnih alata od mreže moglo dobiti CAD model, što je prikazano slikom 6.18.



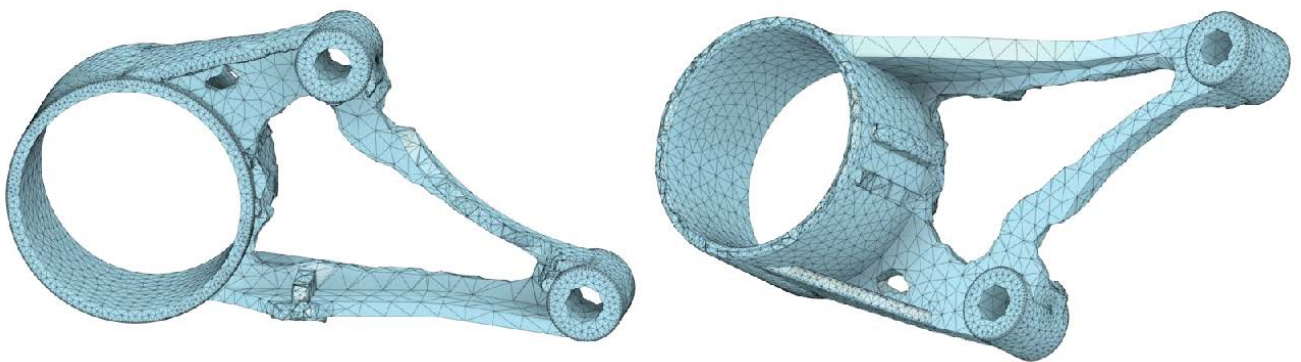
*Slika 6.18 Mreža druge iteracije optimizacije*

### 6.4.3. Modeli rješenja optimizacije

Dobivenu mrežu moguće je pretvoriti u zasebnu komponentu, kako bi optimizacija mogla iskoristiti za kreiranje tijela i novog modela. Nakon toga, kreirani CAD model može se odmah koristiti u daljnjim analizama, kao novo rješenje, ili dodatno obraditi kako bi se optimirani oblik još više poboljšao. Na slikama 6.19 i 6.20, prikazani su modeli kreirani od mreža prve i druge iteracije optimizacije.



*Slika 6.19 Neobrađena komponenta, 70% mase*



*Slika 6.20 Neobrađena komponenta, 75% mase*

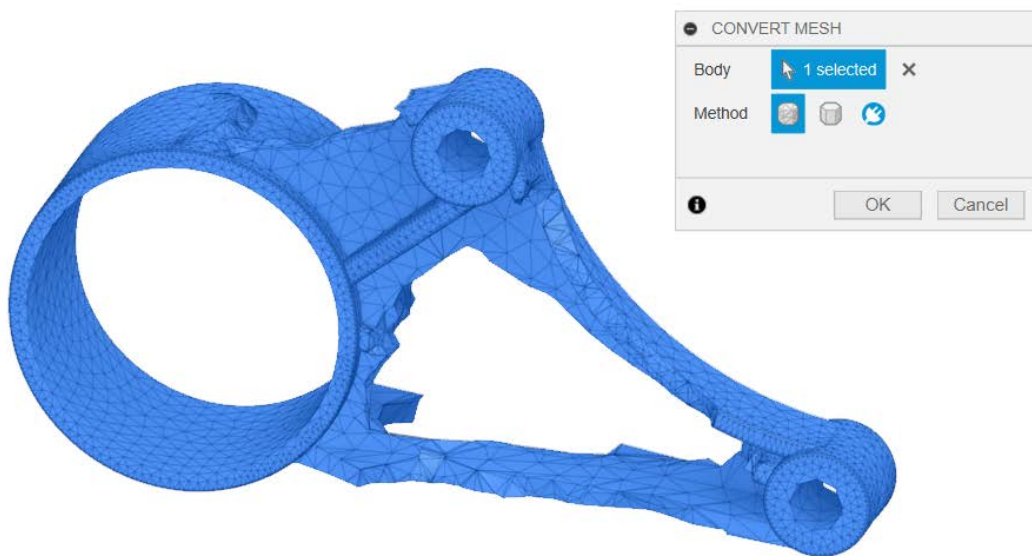
Na oba primjera vidi se da je jednako djelovanje opterećenja, jer oba tijela imaju sličan raspored preostale mase. Glavna razlika je u očuvanju vanjskog oblika kod drugog tijela, sukladno zadanim uvjetima. S obzirom da su kreirani modeli mreža grubih rubova i neusklađenih ploha, zbog raspodjele opterećenja, dodatno se obrađuju 3D modeliranjem kako bi se dobilo iskoristivi model.

## 7. ANALIZIRANJE OPTIMIZIRANIH MODELA

### 7.1. CAD modeli

#### 7.1.1. Model 1, 70% mase

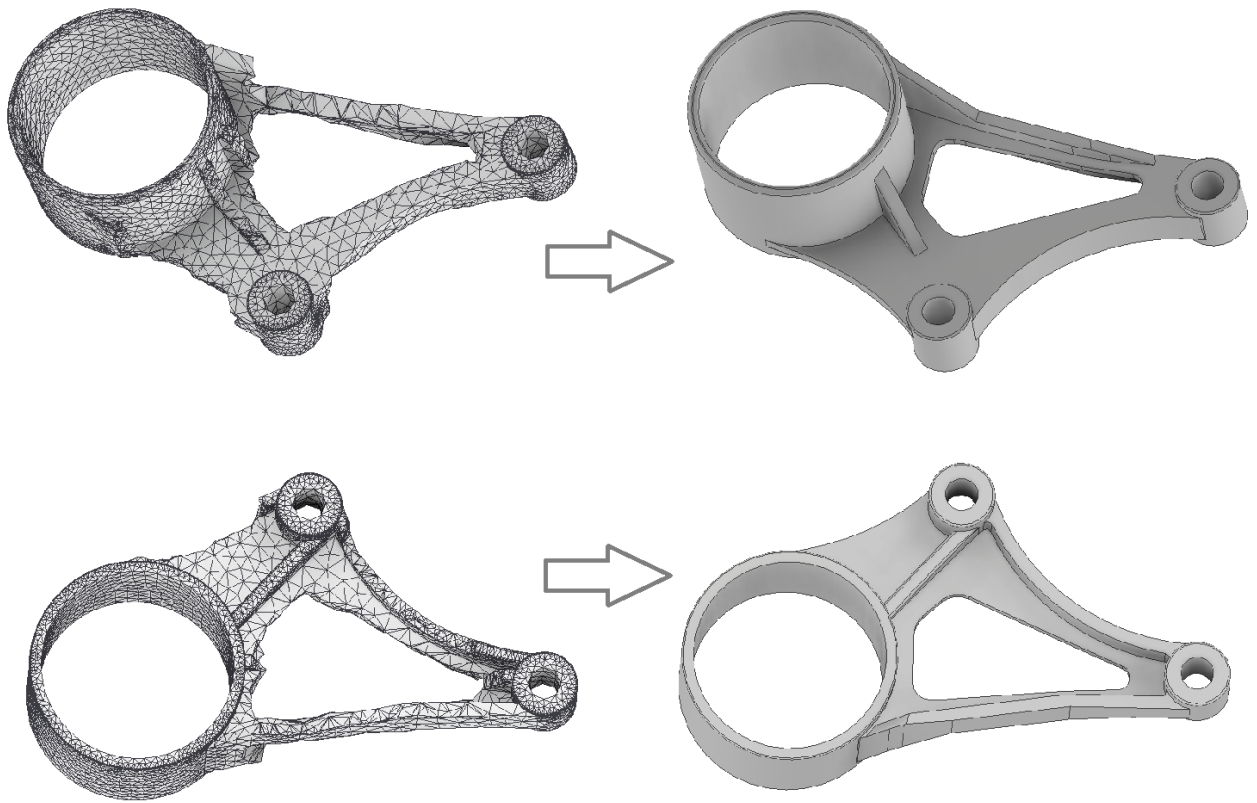
Mreža koja je kreirana od rješenja optimizacije nije tijelo, stoga ju nije moguće doraditi ili vršiti analize na samoj mreži. Kako bi se mreža prebacila u tijelo ograničenog volumena, koristi se opcija pretvaranja mreže u tijelo. Navedeno je prikazano na slici 7.1



*Slika 7.1 Tijelo modela 1*

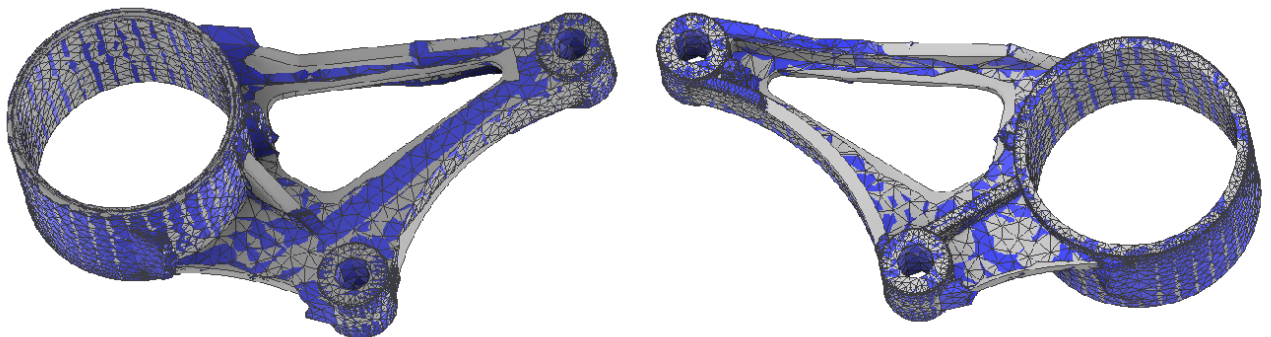
Pretvaranjem mreže u tijelo, moguće je doraditi geometriju modela, kako ne bi imao grube prijelaze koji su nastali kreiranjem mreže iz rješenja optimizacije. Nakon dorade, novi model prikazan je na slici 7.2.





*Slika 7.2 Izrada modela 1*

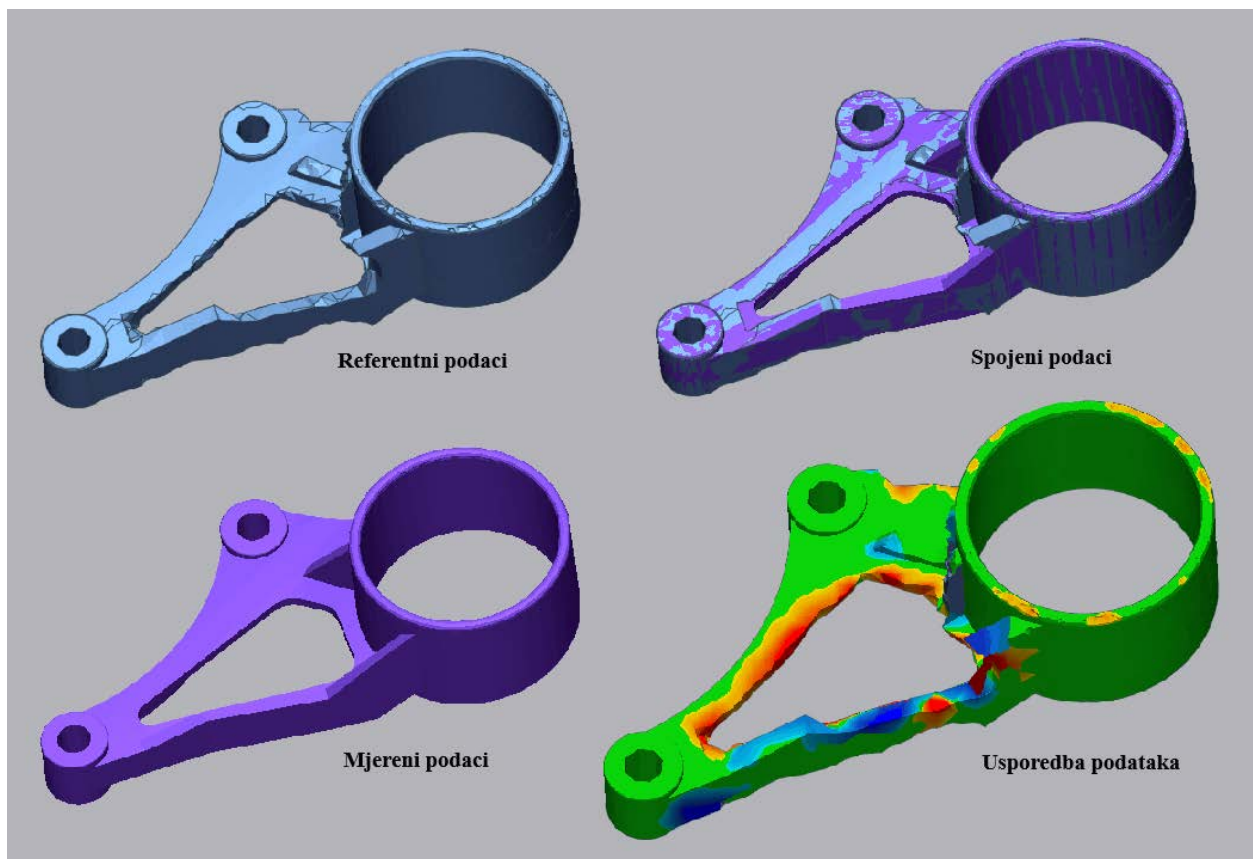
Model od mreže i dorađeni optimizirani model, spremljeni su kao zasebne komponente tako da je moguće usporediti njihove razlike u geometriji. Odstupanje tj. preklapanje modela moguće je vidjeti i u *Inventoru*, što je prikazano na slici 7.3, no za detaljniju usporedbu bolje je koristiti *Geomagic Control X*.



*Slika 7.3 Usporedba preklapanja mreže i modela 1*

Na slici 7.3 se vidi kako je zadržan glavni oblik optimiranog modela, uz bolju doradu grubih prijelaza između elemenata. Neravnomjerno maknuti dijelovi tijela su poravnati kako bi se kreirale kontinuirane plohe.

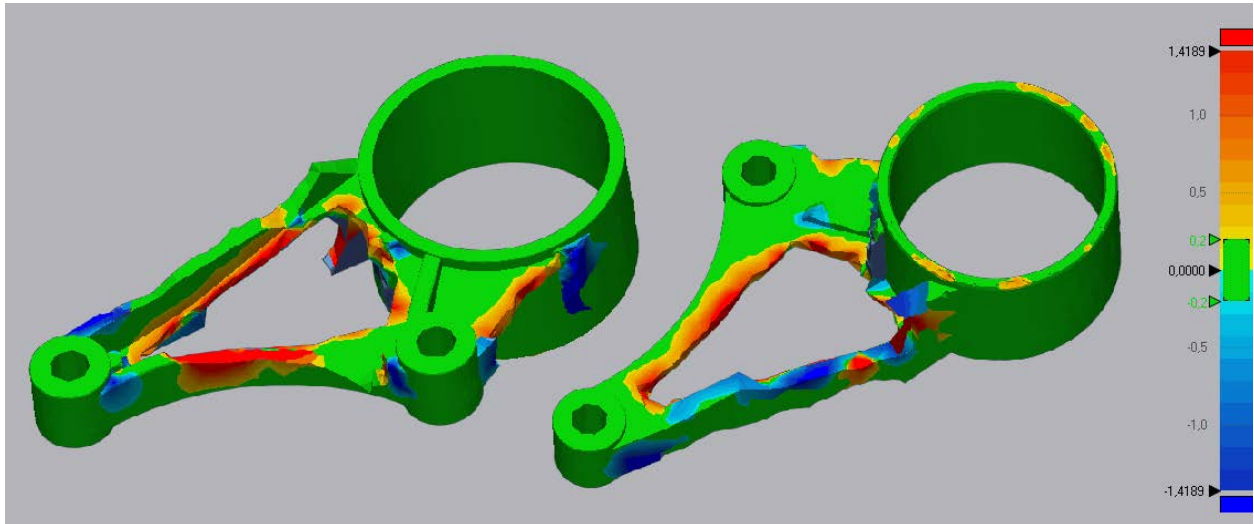
Za detaljniju provjeru odstupanja mreže optimizacije i novog modela koristi se program *Geomagic Control X*. *Geomagic Control X* ima alate za poravnanje različitih podataka kao što su skenirani podaci ili CAD modeli, koje je zatim moguće usporediti koristeći alate za usporedbu. Moguće je koristiti 3D i 2D usporedbu ili ručno uspoređivati prema željenim točkama. U ovome radu korištena je 3D usporedba, s obzirom da se radi o 3D CAD modelima. Tijelo mreže je uvezeno kao referentni podaci, dok je novi model uvezen kao mjereni podaci. Prikaz svih podataka te same usporedbe, moguće je vidjeti na slici 7.4



Slika 7.4 Usporedba podataka 1, *Geomagic Control X*

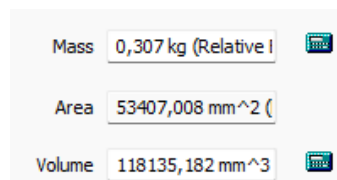
Detaljniji prikaz odstupanja prikazan je na slici 7.5. Iz usporedbe mreže optimizacije i novo kreiranog modela, vidi se da je postignut željeni oblik, jer je većina modela unutar dopuštenog odstupanja, odnosno u zelenoj boji (označeno legendom). Plava boja na legendi ukazuje da su

mjerene vrijednosti ispod vrijednosti referentnih, dok od žute prema crvenoj znači da su mjerene vrijednosti preko referentnih podataka. Najveća odstupanja nalaze se na dijelovima koji su bili grubo odrezani i koji su se trebali poravnati, jer bi takvi narušavali strukturu samoga modela.



Slika 7.5 Odstupanje modela 1 i optimizacije

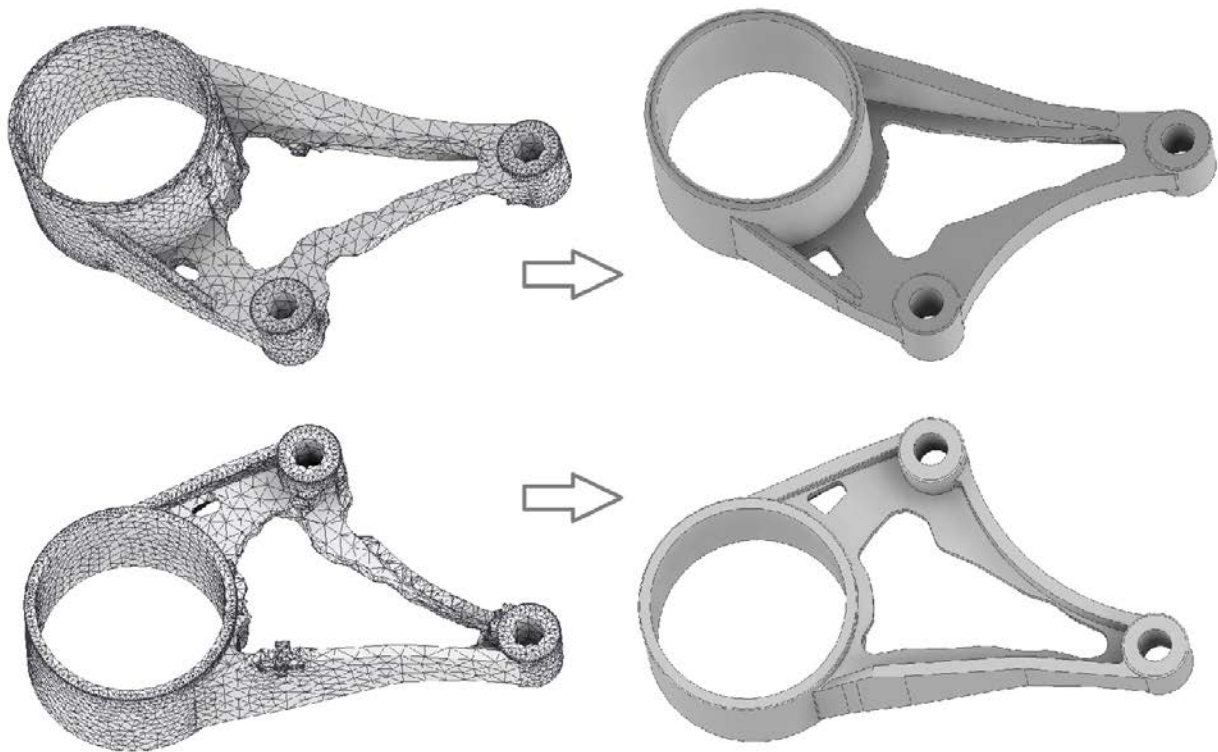
S obzirom da su negdje maknuti grubo odrezani dijelovi, a negdje su se poravnale plohe, potrebno je provjeriti kolika je masa u odnosu na predviđenu masu optimizacijom. Optimizacijom topologije, program je predvidio kako je ostavljeno 70% prvobitne mase modela, što je iznosilo 0,314 kg. Provjerom mase u *Inventoru* (slika 7.6), prema definiranome materijalu, dolazi da je nova masa optimiziranog modela 0,307 kg, što znači da je obradom modela postignut željeni postotak mase (uz dodatno smanjenje od 7 g).



Slika 7.6 Dobivena masa modela 1

### 7.1.2. Model 2, 75% mase

Drugi model obrađen je na jednak način kao i prvi, što znači da se za početak komponentu mreže prebacilo u zasebno tijelo, nakon čega je provedena dorada modela. Na slici 7.7 prikazan je neobrađeni model 2 i gotov model nakon dodatnog modeliranja.



*Slika 7.7 Izrada modela 2*

Model 2 trebalo je manje dorađivati, s obzirom da je okvir nosača ostao isti jer je tako stavljeno u uvjetima. Dorađen je unutarnji dio nosača, zbog grubih prijelaza, kao i donje rubno rebro, zbog nepravilnih dijelova. Novi model sličan je prvome, sukladno jednakom rasporedu naprezanja u optimizaciji, uz veće smanjenje središnje plohe i očuvanja vanjskog okvira.

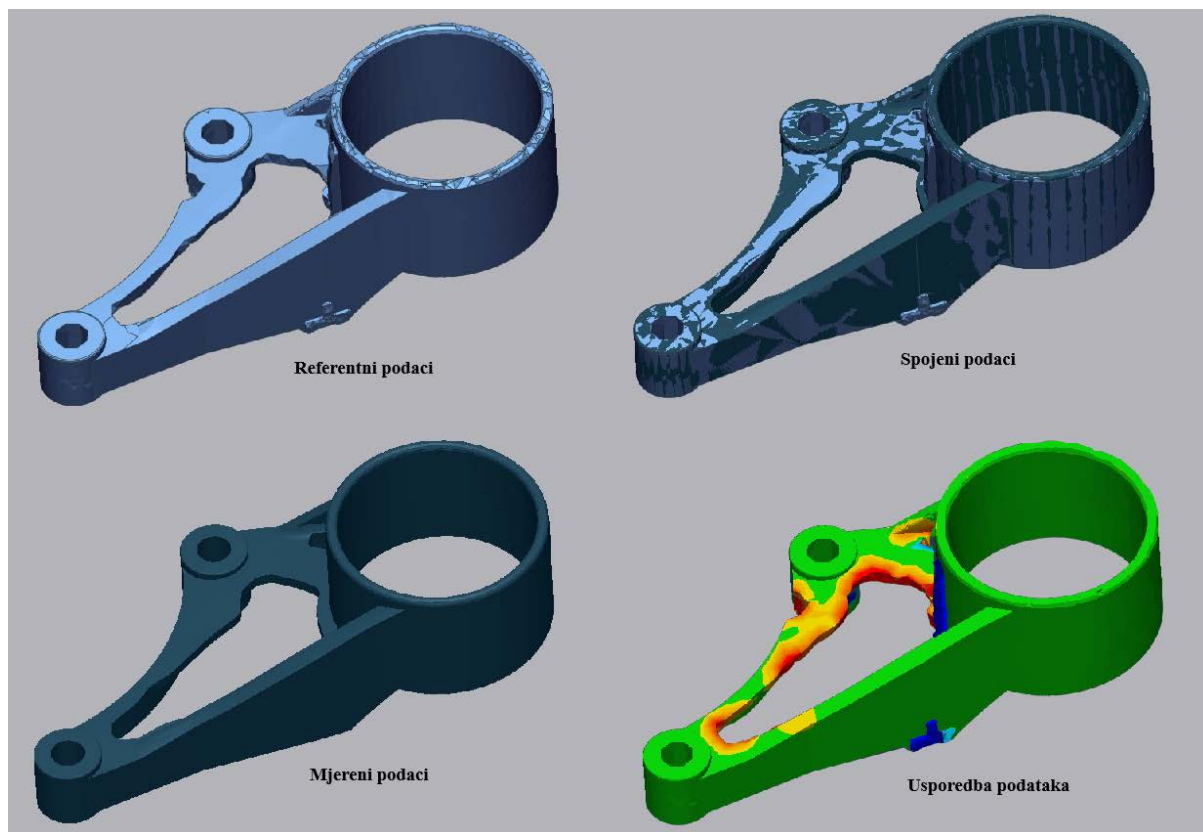
Novi model moguće je usporediti s dobivenom optimiziranom mrežom. Gruba usporedba prikazana je na slici 7.8, dok je ona detaljnija odrađena u programu *Geomagic Control X*.





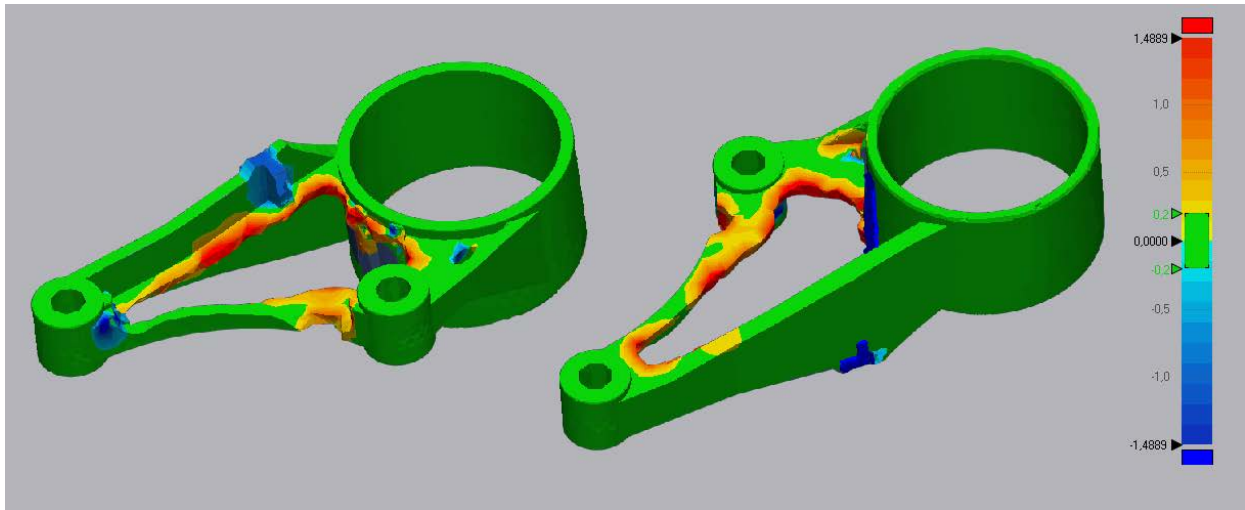
Slika 7.8 Usporedba preklapanja mreže i modela 2

Na slici se može vidjeti kako je preklapanje mreže i modela uz minimalna odstupanja, zbog boljeg početnog modela. S obzirom da je cijeli okvir ostao isti, odrađene su minimalne dorade modela, kako bi model bio upotrebljiv. Iako se na slici vidi kako se modeli dobro preklapaju, za detaljnija odstupanja odrađena je provjera u programu *Geomagic Control X*. Jednako kao i kod prvog modela, za referentne podatke uzeta je mreža od optimizacije, dok se kao mjerene podatke proučavalo novi model 2. Navedena provjera prikazana je slikom 7.9.



Slika 7.9 Usporedba podataka 2, *Geomagic Control X*

Na slici 7.10 nalazi se detaljan prikaz odstupanja modela 2 od tijela dobivenog optimizacijom. Vidi se da su mala odstupanja od modela na unutarnjim dijelovima koje je bilo potrebno prepraviti. Ostatak nosača ostao je isti, stoga ne postoje odstupanja. Ovaj model ima manja odstupanja od prethodnog, sukladno boljoj geometriji modela nastalog drugom optimizacijom.



Slika 7.10 Odstupanje modela 2 i optimizacije

Preostaje usporediti dobivenu masu nakon dorade modela. Početna masa dobivena optimizacijom topologije iznosila je 0,335 kg, što je 75% prvobitna mase. Novu masu modela moguće je provjeriti u *Inventoru*, koji računa masu prema definiranome materijalu. Prema izračunu programa, ispada da je nova masa modela 2 0,332 kg (slika 7.11), što je manje od predviđene mase optimizacijom, čime je zadovoljen kriterij od smanjenja mase na 75% prvobitne mase.

Mass	0,332 kg (Relative Err	
Area	55298,503 mm <sup>2</sup> (Re	
Volume	127833,246 mm <sup>3</sup> (R	

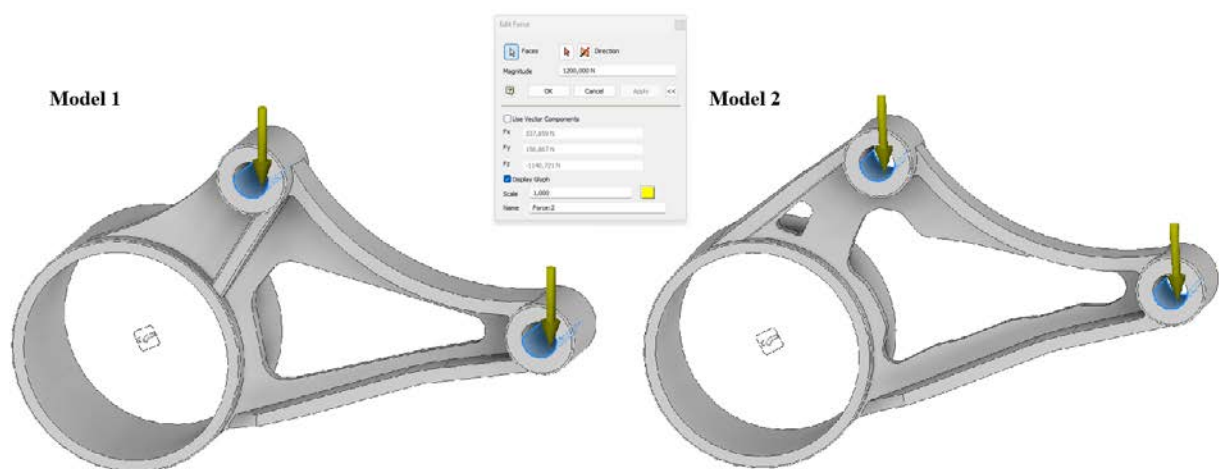
Slika 7.11 Masa modela 2

## 7.2. FEM analiza modela optimiranih modela

Doradom novih modela nakon optimizacije, provodi se detaljna analiza njihove čvrstoće i određuju relevantne vrijednosti naprezanja. U tu svrhu, provodi se detaljna FEM analizu na oba nova modela nosača. Za odrađivanje analize metodom konačnih elemenata prvo se trebaju odrediti 4 glavne pretpostavke: geometrija, svojstva materijala, rubni uvjeti i mreža konačnih elemenata. S obzirom da je cilj dobiti mjerodavne podatke koje je moguće usporediti sa prvim rezultatima analize na stvarnome nosaču, koristit će se jednake glavne pretpostavke i kod analize optimiziranih modela.

Geometrija, kao prva pretpostavka, već je određena CAD modelom tako da je moguće preći na preostale. Kod oba modela pretpostavljen je jednak materijal, odnosno slitina aluminija AC – 43000 T6, sa postavljenim faktorom sigurnosti u odnosu na granicu tečenja  $R_e$  (prema prethodnoj pretpostavci iz poglavlja 5.3 da je materijal duktilan). S obzirom da se navedeni materijal može koristiti u aditivnim tehnologijama, moguće ga je koristiti i kod optimiziranih modela jer bi se mogao koristiti u realnom slučaju proizvodnje.

Rubni uvjeti su postavljeni jednako kao i na pravome modelu, odnosno, uklještenjem se uklanjaju svi stupnjevi slobode na provrtu gdje se nalazi gumeni dio, dok se na preostala 2 stavljaju sile iznosa 1200 N, koje predstavljaju težinu motora i mjenjača. Na slici 7.12 prikazani su dodani rubni uvjeti na oba nova modela. Lijevo na slici nalazi se prvi optimirani model, dok se desno nalazi drugi model.



Slika 7.12 Definiranje rubnih uvjeta na optimiranim modelima

Preostaje podesiti mrežu na oba modela. Na slici 7.13 prikazana su oba modela s kreiranom mrežom. Lijevo na slici se nalazi prvi, dok se desno nalazi drugi model. Prosječni broj elemenata kod prvog modela je stavljen da iznosi 0,05, dok kod drugog 0,02, zbog više prijelaza na susjednim površinama. Najmanji broj elemenata je kod oba modela ostavljen na 0,2, dok su preostale vrijednosti ostavljene prema osnovnim postavkama programa.



*Slika 7.13 Definiranje postavki mreže optimiranim modelima*

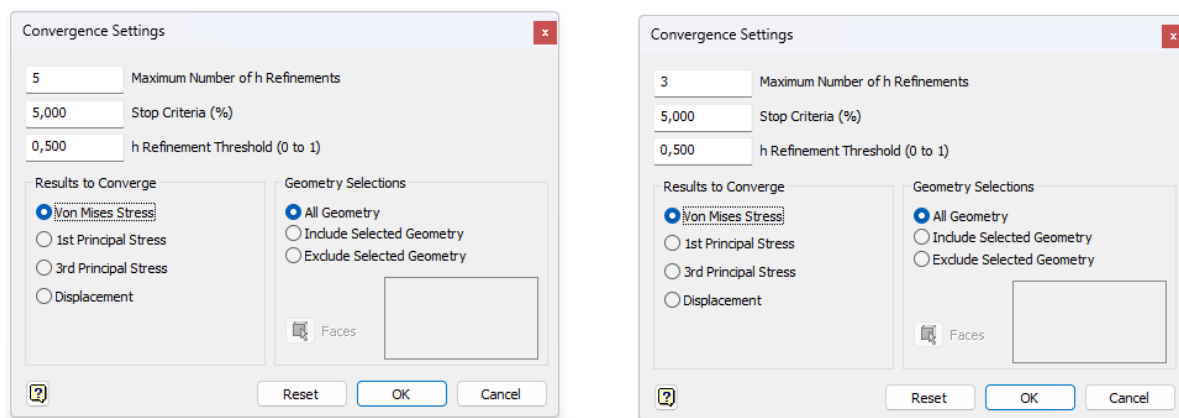
Kroz iteracije je ustanovljeno kako postoje određena kritična mjesta, stoga je na tim mjestima lokalno povećana gustoća mreže. Na slici 7.14 prikazani su dijelovi na kojima je lokalno uređena gustoća mreže. S obzirom da se u modelima na različitim mjestima javljaju kritičnija mjesta, sukladno tome lokalna mreža je na drugim područjima modela. Lijevo na slici se nalazi prvi model, a desno drugi model.





Slika 7.14 Lokalno izmijenjena mreža konačnih elemenata optimiranih modela

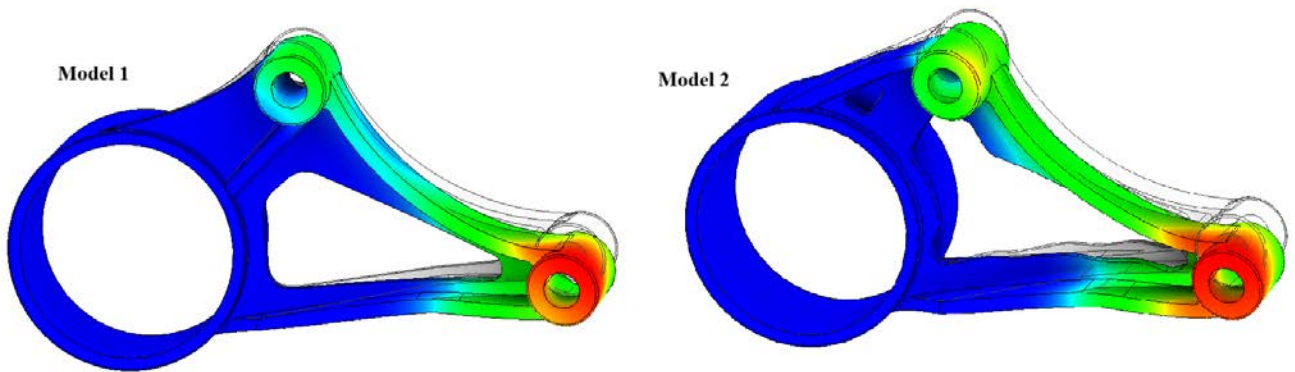
Kako bi se dobilo što bolja rješenja koja konvergiraju u svojim rezultatima, podešene su i postavke konvergencije. Kroz nekoliko iteracija, utvrđeno je da su najbolje postavke konvergencije kod povećavanja broja  $h$  elemenata i to za broj 5 u slučaju prvog modela i za 3 u slučaju drugog elementa. Kriterij zaustavljanja za oba modela postavljen je na 5 posto u odnosu na von Misesovo naprezanje. Postavke konvergencije prikazane su na slici 7.15.



Slika 7.15 Postavke konvergencije

### 7.3. Usporedba rezultata

Nakon završene simulacije, potrebno je vizualno verificirati deformirani oblik oba modela. Na slici 7.16 prikazani su deformirani oblici oba modela optimiziranog nosača. Lijevo na slici se nalazi model 1, dok je desno model 2.



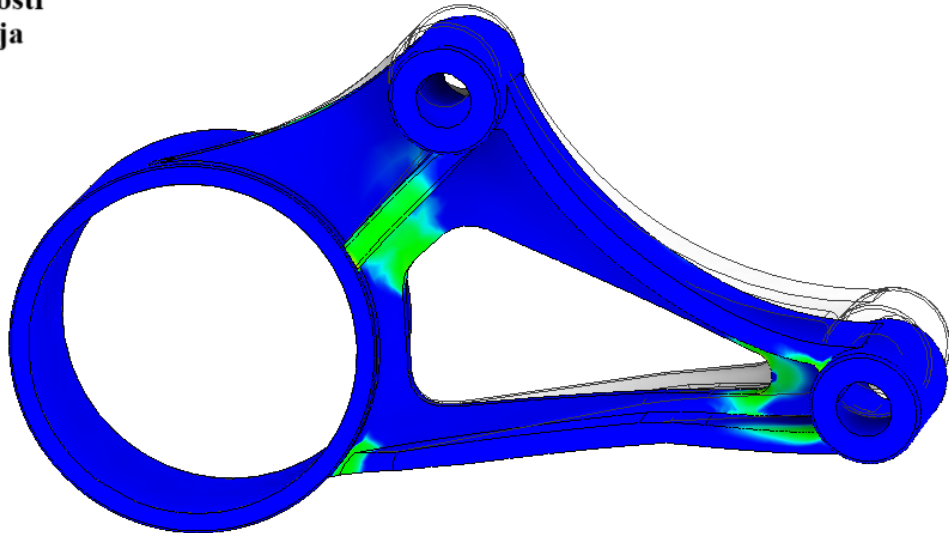
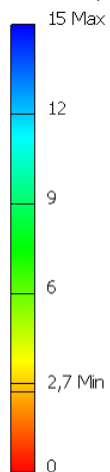
Slika 7.16 Vizualni prikaz rezultata (deformacije) optimiziranih modela

Iz vizualnog prikaza rezultata, može se vidjeti kako deformirani oblik odgovara djelovanju vanjskih sila. Sukladno tome, obje analize modela se prihvaćaju, a njihova rješenja bit će detaljnije prikazana u idućim potpoglavljima.

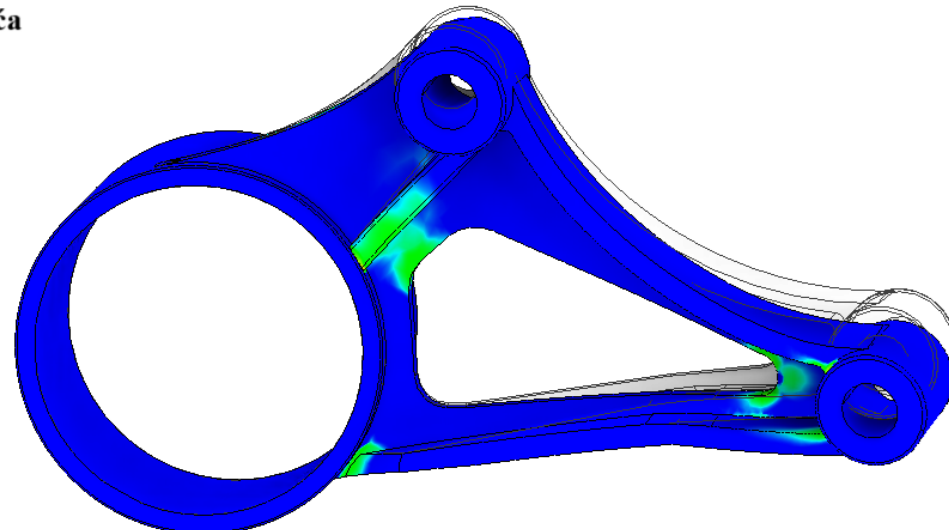
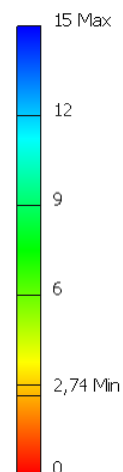
#### 7.3.1. Model 1

Kako bi se potvrdila pretpostavka o duktilnom ponašanju materijala, provjeravaju se oba faktora sigurnosti. Za početak je provjeren faktor sigurnosti za prvi model. Faktor sigurnosti za duktilne materijale, odnosno u odnosu na granicu tečenja  $R_e$  iznosi 2,7, dok u odnosu na vlačnu čvrstoću  $R_m$  iznosi 2,74. Faktor sigurnosti u odnosu na granicu tečenja  $R_e$  je kritičniji, čime se potvrđuje pretpostavka o duktilnom ponašanju materijala. Prikaz oba faktora sigurnosti iz *Inventora*, nalazi se na slici 7.17.

### Faktor sigurnosti Granica tečenja

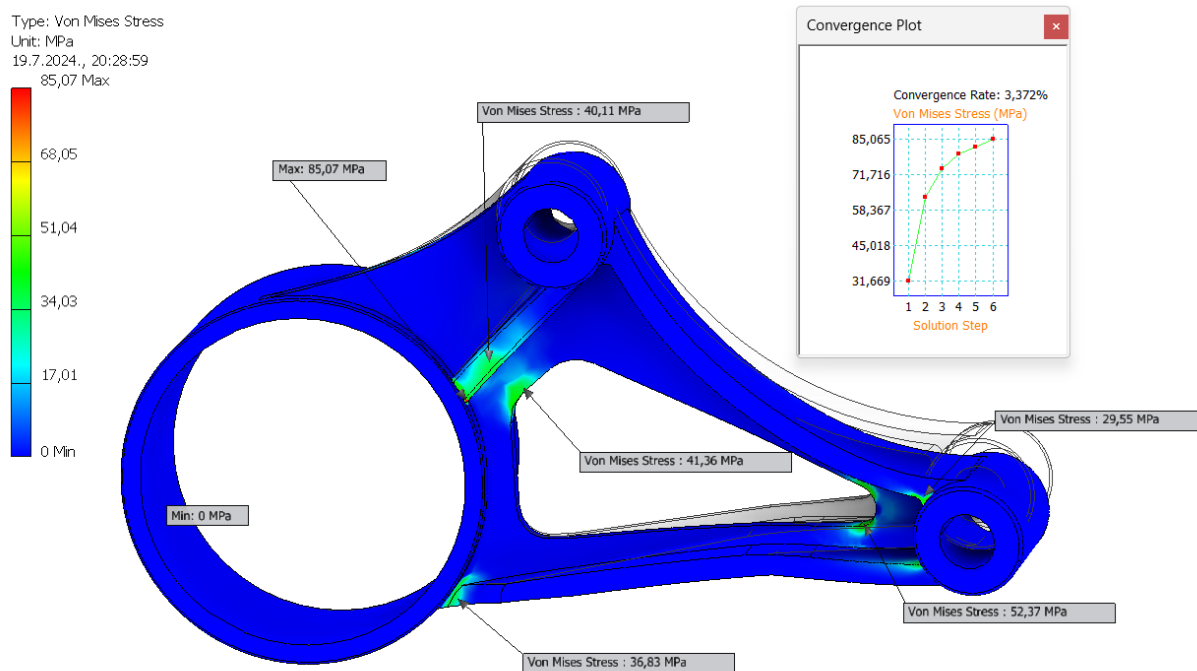


### Faktor sigurnosti Vlačna čvrstoća



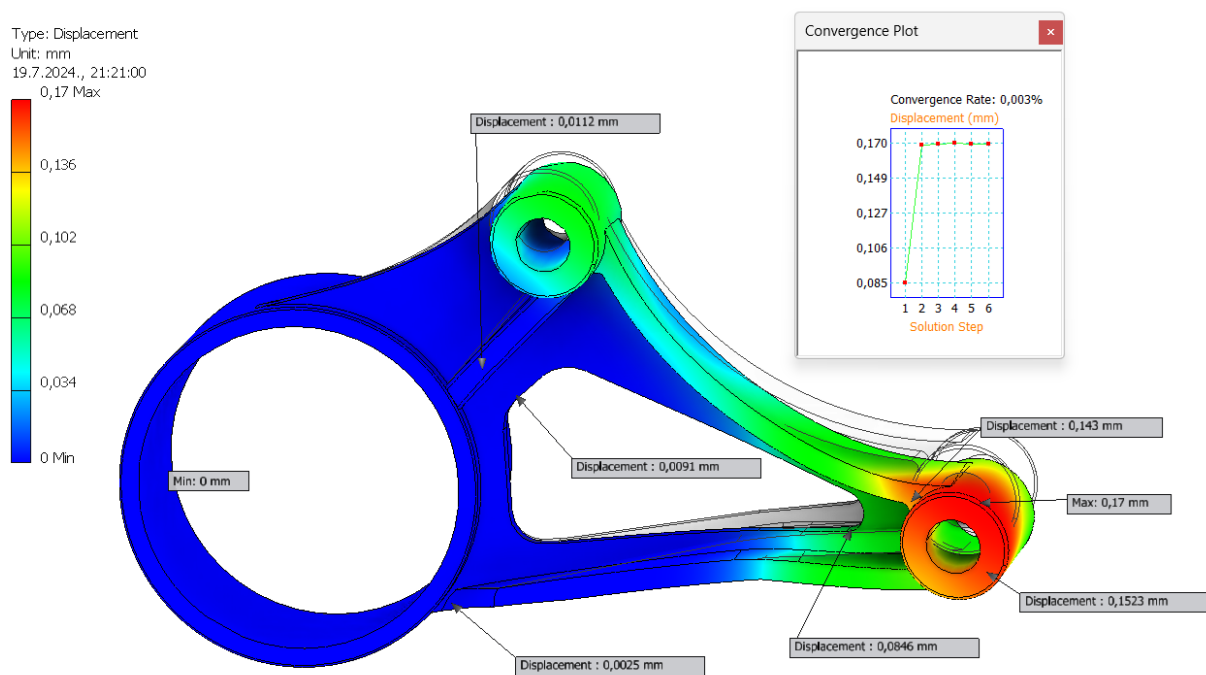
Slika 7.17 Usporedba faktora sigurnosti za oba kriterija, model 1

S obzirom da je kritičniji slučaj kod duktilnog ponašanja materijala, proučavaju se mjerodavna naprezanja prema teoriji von Misesa, kao i kod realnog nosača motora. Naprezanja prema von Misesu prikazana su na slici 7.18. Iz dobivenih rješenja vidi se kako je najveće naprezanje od 85,07 MPa, sa faktorom sigurnosti od 2,7. Prema dijagramu konvergencije, koji je manji od traženih 5 posto, može se zaključiti kako rješenje naprezanja postepeno konvergira i nalazi se unutar željenih odstupanja.



Slika 7.18 Naprezanja prema von Misesu, model 1

Pomaci modela 1 prikazani su na slici 7.19. Prema dobivenim podacima, vrijednost najvećeg pomaka je 0,17 mm, s postignutom konvergencijom od 0,003 posto.

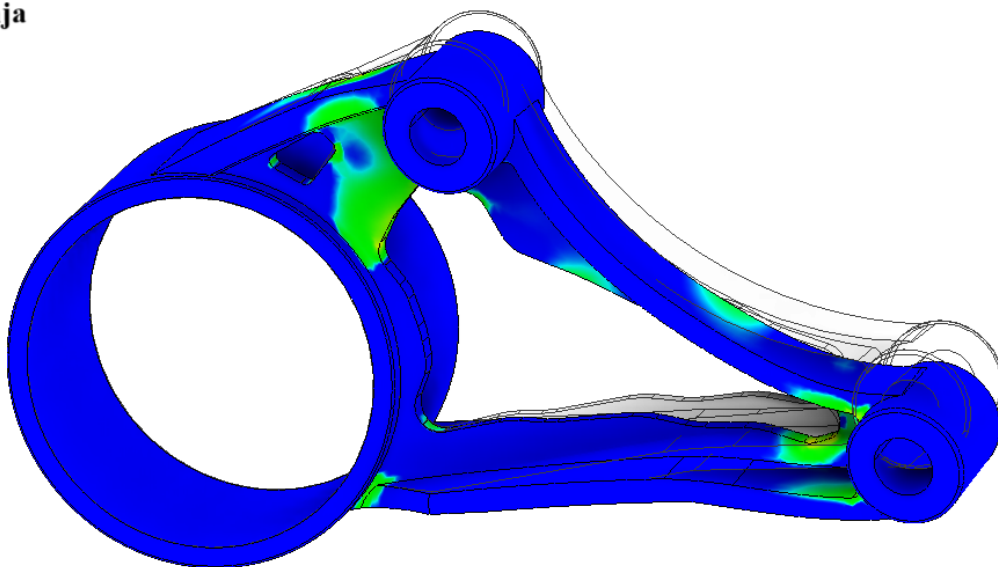
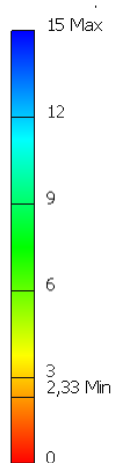


Slika 7.19 Pomaci, model 1

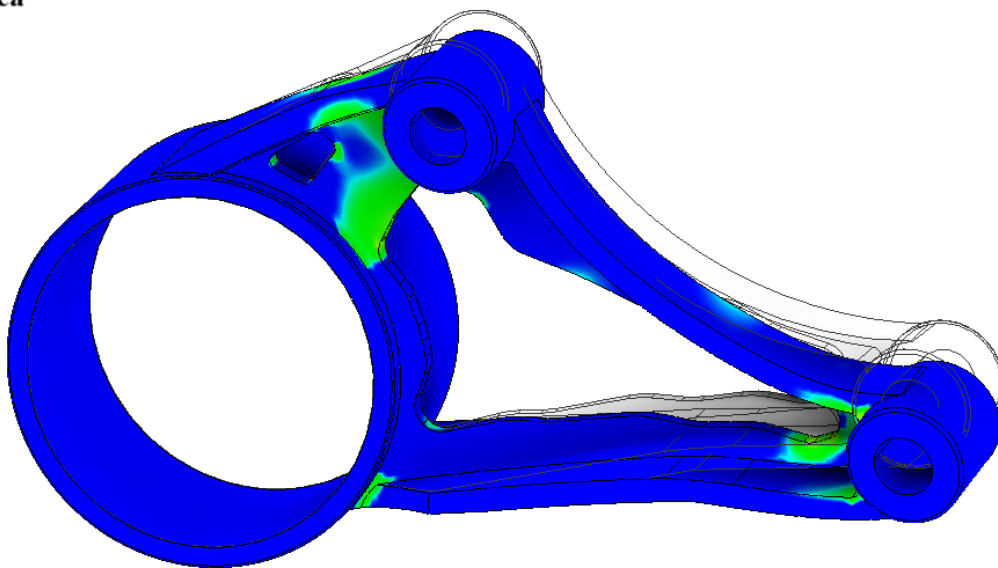
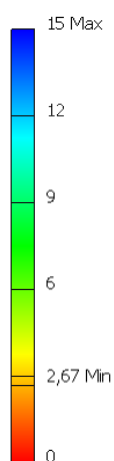
### 7.3.2. Model 2

Za drugi model je provjeren faktor sigurnosti s obzirom na granicu tečenja  $R_e$  i vlačnu čvrstoću  $R_m$ . Faktor sigurnosti za granicu tečenja  $R_e$  je iznosi 2,33, što je manje od faktora sigurnosti s obzirom na vlačnu čvrstoću  $R_m$  od 2,67, stoga se dokazuje da je u sva 3 slučaja kriterij prema granici tečenja  $R_e$  onaj kritičniji što ukazuje na duktilnost materijala. Usporedba oba faktora sigurnosti prikazana je na slici 7.20.

#### Faktor sigurnosti Granica tečenja

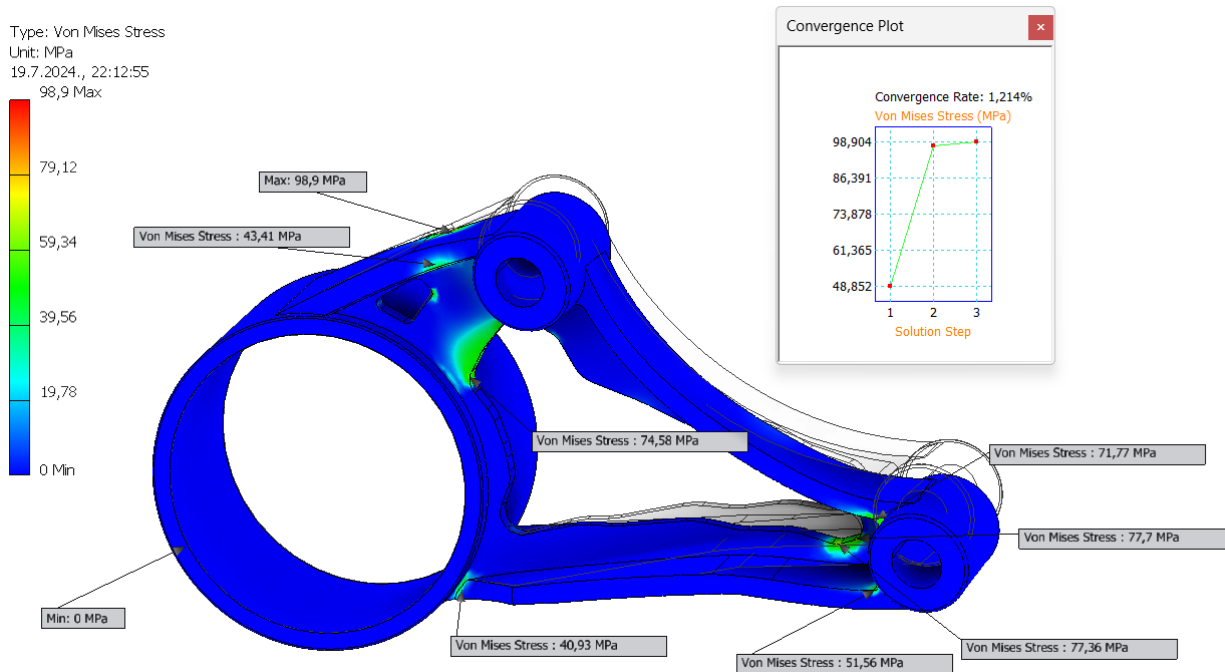


#### Faktor sigurnosti Vlačna čvrstoća



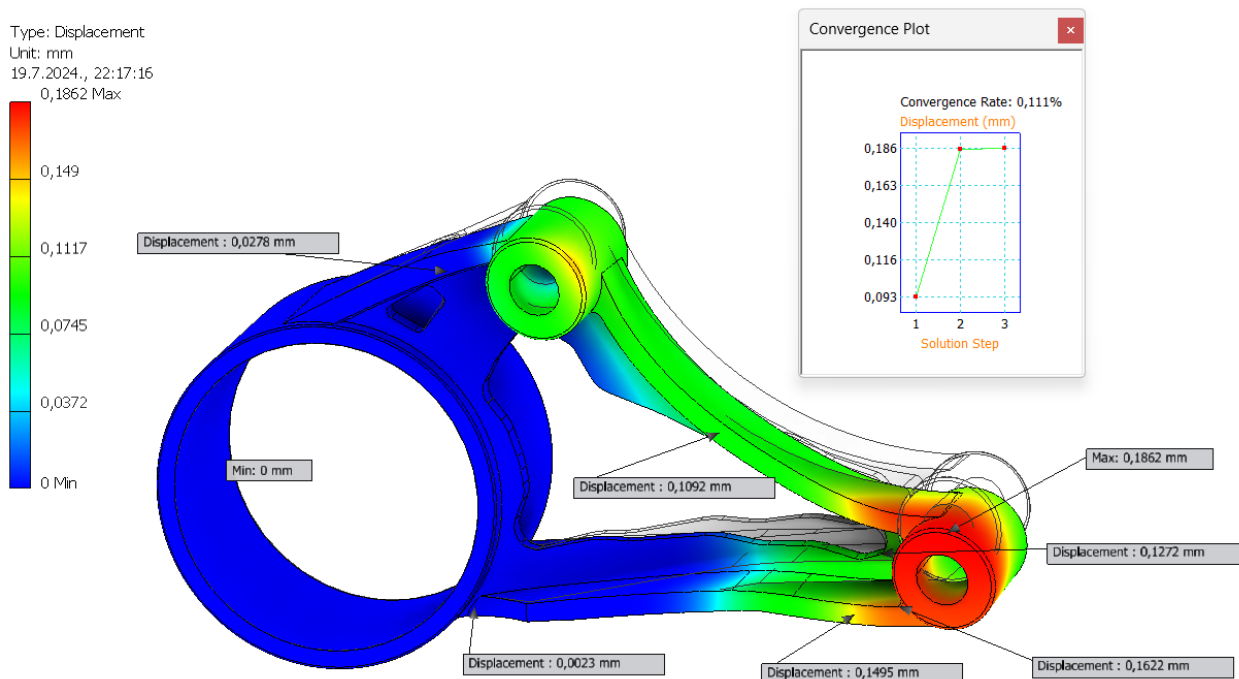
Slika 7.20 Usporedba faktora sigurnosti, model 2

Relevantna naprezanja su prema von Misesu, s obzirom da je to kritičniji slučaj kao i svim modelima dosad. Na slici 7.21 prikazana je raspodjela naprezanja prema von Misesu, gdje se vidi kako je najveće naprezanje od 98,9 MPa. Na slici je moguće vidjeti iznose naprezanja na različitim mjestima optimiziranog nosača. Također, iz dijagrama konvergencije vidi se kako je odstupanje od zadnja 2 rezultata 1,214%, što zadovoljava kriterij od 5%.



Slika 7.21 Naprezanja prema von Misesu, model 2

Pomaci modela 2 prikazani su na slici 7.22. Prema rezultatima analize, najveći pomak javlja se na drugom provrtu u iznosu od 0,186 mm. Na slici su istaknute različite vrijednosti pomaka, na temelju kojih se vidi kako iznos pomaka raste sukladno djelovanju sila. Iz dijagrama konvergencije, vidi se kako rezultat konvergira u drugome koraku s odstupanjem od samo 0,111%, što je manje od zadanih 5%.



Slika 7.22 Pomaci, model 2

### 7.3.3. Odabir optimiziranog modela

Nakon dobivanja rezultata FEM analize, razmatraju se njihove dobivene vrijednosti i odabire se najbolji model. U tablici 7.1 sumirane su sve relevantne dobivene vrijednosti od realnog nosača i oba optimizirana modela.

Tablica 7.1 Usporedba dobivenih vrijednosti

	Faktor sigurnosti	Najveće naprezanje, [MPa]	Najveći pomak, [mm]	Masa tijela [kg]	Masa tijela [%]
Stvarni nosač	4,04	56,91	0,07477	0,448	100
Model 1	2,7	85,07	0,17	0,307	68,53
Model 2	2,33	98,9	0,1862	0,332	74,11

Usporedbom dobivenih podataka vidi se kako od optimiziranih modela, veći faktor sigurnosti ima prvi model, uz manja naprezanja i pomake. Prvi model ima i manju masu tijela s preostalih 68,53% ukupne mase tijela, odnosno smanjenje od 31,47% mase. Sukladno navedenim podacima, zaključuje se kako prvi model ima bolji omjer mase i faktora sigurnosti, stoga se kao takav odabire za rješenje optimiziranog modela nosača motora.



## 8. IZRADA ADITIVNIM TEHNOLOGIJAMA

### 8.1. O aditivnim tehnologijama

Izrada predmeta jednako je važan dio svakoga projektiranja, kao njegovo modeliranje, analiza i optimizacija. Prethodno je već definirana jer je svrha ovoga rada optimizacija automobilskog nosača uz mogućnosti izrade aditivnim tehnologijama. Aditivne tehnologije odnose se na procese izrade nekog proizvoda slaganjem ili dodavanjem tankih slojeva materijala [32]. Razlikuju se od tradicionalnih načina izrade gdje se strojnom obradom uklanja materijal kako bi se dobio željeni oblik predmeta. Aditivne tehnologije ime su dobile sukladno činjenici da se materijal dodaje kako bi se dobio konačan oblik predmeta, a drugi korišteni naziv je i 3D tisk. Glavne prednosti ovakve izrade su povećavanje fleksibilnosti, smanjenje otpada, mogućnost izrade predmeta složenih geometrija te brza izrada prototipa.

Iako se aditivne tehnologije temelje na dodavanju slojeva materijala, postoji više vrsta materijala koji se tom metodom mogu koristiti pa tako i više različitih načina kojima se taj materijal nanosi. Sukladno navedenom postoji veliki broj inačica aditivnih tehnologija, odnosno podvrsta 3D tiska.

Prema normi ISO 52900 postoji standardizirana klasifikacija aditivnih tehnologija, koja se sastoji od sedam osnovnih kategorija [33, 34]:

1. engl. *binder jetting*, *BJT* – proces u kojem se nanose kapljice tekućeg vezivnog sredstva na praškasti materijal kako bi se on spojio
2. engl. *direct energy deposition*, *DED* – proces u kojem se koristi fokusirana toplinska energija za istovremeno spajanje i taljenje materijala dok se on taloži
3. engl. *material extrusion*, *MEX* – proces u kojem filament od termoplastike prolazi kroz grijanu mlaznicu gdje se rastali i može nanositi
4. engl. *material jetting*, *MJT* – proces u kojem se nanose kapljice tekućeg fotoosjetljivog sredstva na sloj praha te uzrokuju taljenje, a nakon toga očvrstnu pod UV svjetlom
5. engl. *powder bed fusion*, *PBF* – proces u kojem se raspoređuje fini sloj praha na radnoj ploči, gdje se selektivno topi sloj praha nekim visokim izvorom energije
6. engl. *sheet lamination*, *SHL* – proces u kojem se listovi materijala režu u oblik te spajaju (laminiraju) kako bi formirali neki dio
7. engl. *vat photopolymerization*, *VPP* – proces u kojem se tekući fotopolimer u kadi postepeno tj. selektivno stvrdnjava pod UV svjetlom

Najčešće zastupljene aditivne tehnologije su ekstruzija materijala, konkretnije, metoda FDM (engl. *Fused deposition modeling*), 3D tisak korištenjem fotopolimera (smole) i 3D tisak korištenjem metalnog praha. FDM je najzastupljenija i najpopularnija metoda 3D tiska, a njen princip rada zasniva se na polaganju slojeva rastopljene plastike (ABS, PLA, PETG) jednih na druge, sve dok se ne izradi kompletan izradak. Kod 3D tiska uz korištenje smole, princip je vrlo sličan kao i kod FDM-a, međutim umjesto slojeva rastopljene plastike koristi se smola, koja se najčešće skrućuje pomoću UV svjetlosti. Budući da i FDM metoda kao i 3D tisak korištenjem smole koriste isključivo polimere kao materijal za izradu predmeta, kao takve nisu prikladne za izradu prototipa nosača automobilskog motora. 3D tisak korištenjem metalnog praha radi slično FDM metodi, samo što se umjesto polimera koriste metalni materijali, točnije metalni prah koji se uz pomoć nekog izvora topline (najčešće lasera) međusobno spaja dok se ne dobije željeni izradak.

## 8.2. 3D tisak metala

Kako je automobilski nosač izrađen od metalnog dijela te je on i optimiziran, koristit će se tehnologije kojima je moguće izraditi dio od metala. Budući da postoji veliki broj različitih metalnih materijala te razni načini njihovog spajanja, u nastavku su navedene tehnologije korištenih inačica 3D tiska metala [33, 35].

1. *Powder bed fusion, PBF* – najčešća je vrsta kod 3D tiska metalnih predmeta. 3D pisaci koji se baziraju na ovome procesu raspoređuju fini sloj praha preko radne ploče i selektivno tope poprečni presjek nekog dijela sloja praha. Postoji više tehnika kojima je moguće taliti sloj praha koristeći ovu metodu, ali samo neke od njih koriste se za metalni prah: *Selective laser melting (SLM)*, *Direct metal laser sintering (DMLS)* i *Electron beam melting (EBM)*. Glavna razlika između navedenih tehnika je to što se kod SLM-a i DMLS-a koristi laser, a kod EBM-a snop elektrona za taljenje praha.
2. *Direct Energy Deposition, DED* – princip je sličan kao kod PBF-a uz glavnu razliku u tome što se ovdje istovremeno tali i spaja metal koristeći neki izvor visoke energije. Metal koji se tali može biti u obliku praha ili žice, na temelju čega postoje dvije vrste ove metode, odnosno *Powder DED* (koristi prah) i *Wire DED* (koristi metal u žici).
3. *Binder jetting, BJ* – ova tehnologija 3D ispisa odvija se u 2 koraka. U početku 3D pisac pravilno raspoređuje metalni sloj praha na radnu ploču, nakon čega se preko suhog sloja

nanosi vezivni polimer prilikom čega se metalni prah spaja u jedno. Proces se ponavlja dok se ne dobije gotov oblik. Ovakav 3D ispis zahtjeva naknadnu obradu u obliku sinteriranja, jer metalni prah zapravo nije homogen, već je spojen vezivnim sredstvom.

Materijal automobilske nosača je legura aluminija, točnije AlSi10Mg koja se nalazi i u obliku metalnog praha, što znači da se može ispisati nekom od navedenih aditivnih tehnologija. Metoda *Selective laser melting (SLM)* može koristiti jedino čiste metale, ne i legure, što znači da se ne bi mogla iskoristiti u ovome slučaju, isto kao i *Wire DED* jer koristi metal u obliku žice. Dijelovi izrađeni *binder jettingom*, odnosno korištenjem vezivnog polimera, nešto su slabijih mehaničkih svojstava u odnosu na dijelove proizvedene tradicionalnim metodama, stoga se često koriste za izradu prototipa, a ne završnih dijelova. Uz dodatnu činjenicu da je takve dijelove potrebno i dodatno obraditi sinteriranjem nakon čega se njihov volumen smanji, ovakva metoda ne bi zadovoljavala potrebna svojstva nosača automobilske motora. Od svega navedenog preostali su *Direct metal laser sintering (DMLS)*, *Electron beam melting (EBM)* i *Powder DED*. Svim trima tehnologijama može se izraditi nosač navedenog materijala, no ako bi se u obzir uzele cijena i pristupačnost takvih 3D pisaa, prednost bi imali 3D pisaa čiji se princip rada temelji na DMLS-u ili DED-u, zbog činjenice da je za EBM potrebno osigurati uvjete u vakuumu, što povećava cijenu izrade. Tehnologija snopa elektrona uglavnom se koristi za izradu dijelova u medicini i aeronautici gdje je potrebna visoko kvalitetna izrada, što na kraju i opravdava cijenu [33]. Dodatno, za DED metode potrebna je naknadna obrada zbog toga šta izradci budu grublje tolerancije. Također, DED metode nisu prikladne za složenije geometrije, odnosno za izratke kojima je potreban *support* tijekom ispisa, stoga je logično zaključiti kako bi najbolja opcija bila korištenje DMLS metode.

Tvrtka EOS (*Electro-Optical Systems*) na tržištu nudi širok spektar 3D pisaa industrijskih razmjera. Njihovi 3D pisaa baziraju se na više aditivnih tehnologija, od kojih je jedna i *Direct metal laser sintering*, skraćeno DMLS, a od materijala koriste razne vrste plastike i metala, među kojima je i aluminij AlSi10Mg. Štoviše, osim 3D pisaa nude i svoje materijale za 3D ispis, koji su testirani i čija je mehanička svojstva moguće pronaći na njihovim internetskim stranicama. Postoji više serija uređaja navedene tvrtke koji koriste DMLS tehnologiju i imaju mogućnost ispisa aluminija. Neke od navedenih serija su EOS M 290, EOS M 300 i EOS M 400, a na slici 8.1 prikazan je 3D pisaa 300 serije, točnije EOS M 300-4 [36].



*Slika 8.1 3D pisac EOS M 300-4 [36]*

Prikazani pisac može izraditi dijelove od odabranog materijala automobilskog nosača, AlSi10Mg, kao i ostale navedene serije, tako da je nosač moguće izraditi na nekoj od tih serija.

### **8.3. 3D tisak pokaznog primjera**

Za potrebe ovoga rada, izrađen je pokazni primjer optimiranog nosača od plastike na 3D pisacu *Bambu Lab X1* serije, koji je prikazan na slici 8.2.



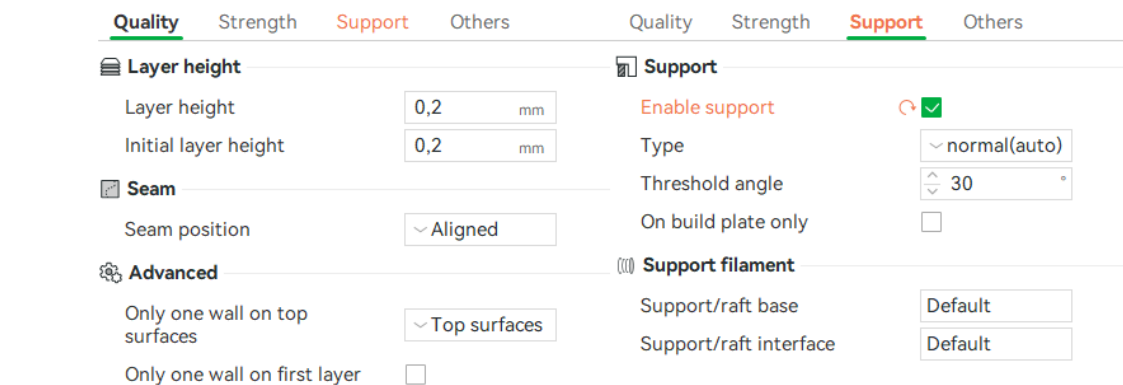
*Slika 8.2 3D pisac Bambu Lab X1 Carbon [37]*

*Bambu Lab X1 Carbon* radi na FDM tehnologiji ispisa, što pripada kategoriji pisača koji ekstrudiraju materijal. Radi na način da filament na bazi polimera prolazi kroz grijanu mlaznicu gdje se tali, nakon čega se nanosi sloj po sloj na radnu ploču. Kako su slojevi topli dok se slažu jedan na drugoga, međusobno se spajaju tijekom ispisa, što u konačnici rezultira 3D predmetom. Najvažnije specifikacije 3D pisača mogu se očitati iz tablice 8.1.

Tablica 8.1 Specifikacije 3D pisača *Bambu Lab X1 Carbon* [37]

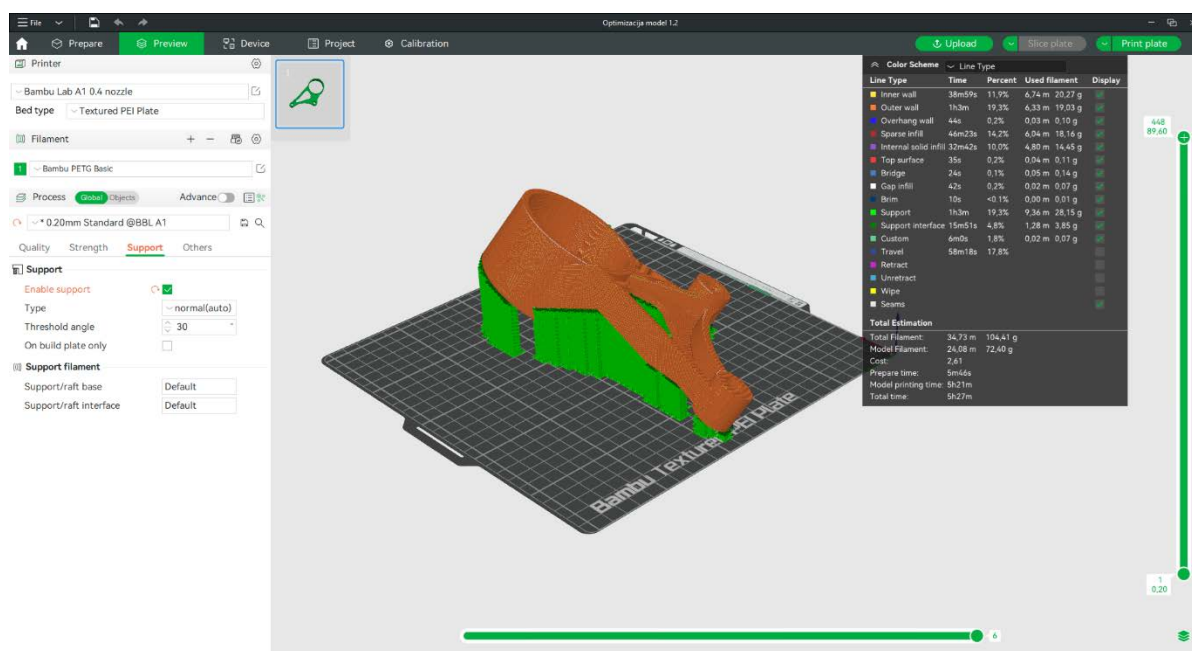
<b>Izradni volumen</b>	256 × 256 × 256 mm
<b>Mlaznica</b>	0.4 mm (uključen kaljeni čelik)
<b>Hotend</b>	Potpuno metalan
<b>Temperatura mlaznice</b>	300 °C
<b>Promjer filameta</b>	1.75 mm
<b>Podržani filamenti</b>	PLA, PETG, TPU, ABS, ASA, PVA, PET idealno za PA, PC, polimer ojačan karb./stakl. vlaknima
<b>Izradna površina</b>	Bambu hladna ploča, Bambu teksturirana PEI ploča
<b>Temperatura grijanog postolja</b>	110°C@220V, 120°C@110V
<b>Brzina ispisa</b>	500 mm/s
<b>Ubrzanje</b>	20 m/s <sup>2</sup>
<b>Fizičke dimenzije</b>	Dimenzije proizvoda 389 × 389 × 457 mm Dimenzije paketa 480 × 480 × 535 mm Neto težina 14.13kg, Bruto težina 18kg
<b>Nazivni napon i snaga</b>	100-240 VAC, 50/60 H, 1000W@220V, 350W@110V

Da bi se pokazni model ispisao na 3D pisaču, koristi se program tzv. *slicer*, koji pretvara 3D model u upute pomoću kojih pisač može ispisati 3D predmet. Takve upute pretvorene su u format G koda kojima pisač zna koordinate i upute kako se kretati. Model koji se učitava u program treba biti u obliku STL datoteke, stoga je prethodno spremljen u STL oblik u *Inventoru*. Program koji se koristi za 3D ispis je softver od proizvođača korištenog 3D pisača, odnosno program „*Bambu Studio*“. U programu se podešavaju osnovne postavke poput materijala, visine svakog sloja, postotak ispunjenosti, orijentacija modela, a mogu se i dodati potpore tijekom 3D ispisa. Pokazni model izrađen je od materijala PETG, a osnovne postavke ispisa i potpora mogu se vidjeti na slici 8.3.



Slika 8.3 Postavke 3D ispisa

Podešavanjem svih postavki generira se pregled 3D ispisa u kojemu se može vidjeti točan tijek ispisa slojeva, izgled ispisanog modela, te trajanje ispisa i ukupni utrošak materijala. Pregled ispisa u programu prikazan je na slici 8.4.



Slika 8.4 Pregled 3D ispisa u programu Bambu Studio

Nakon 3D ispisa od skoro 6 sati, dobije se gotov predmet, odnosno u ovome slučaju optimirani model automobilskog nosača. Kako su za potrebe ispisa, ispisane i potpore, one se fizički uklanjaju, čime preostaje gotov primjer optimiranog modela. Pokazni primjer optimiranog modela nalazi se na slici 8.5.



*Slika 8.5 Pokazni primjer optimiranog nosača*

Usporedba stvarnog nosača i 3D ispisanog optimiranog modela od PETG-a može se vidjeti na slici 8.6.



*Slika 8.6 Usporedba stvarnog i optimiranog nosača*



## 9. ZAKLJUČAK

Ovaj diplomski rad prati proces povratnog inženjerstva na stvarnome nosaču automobilskog motora. Svrha upotrebe procesa povratnog inženjerstva bila je dobivanje CAD modela kako bi se na njemu mogla odraditi optimizacija topologije. Za dobivanje CAD modela od stvarnoga nosača, odabrano je korištenje tehnologije 3D skeniranja, zbog složenosti geometrije nosača. Dodatna prednost ove tehnologije je jednostavnost korištenja 3D skenera i dobivanja skenova, međutim za daljnju obradu podataka i dobivanje funkcionalnog CAD modela, kojeg bi se moglo koristiti u numeričkoj analizi, trebalo je koristiti specijalizirane programe *Geomagic-a*.

Nakon dorade i dobivanja CAD modela, provedena je numerička analiza u programu *Inventor*. Kako bi se numerička analiza kvalitetno provela definirani su sustav nosača motora automobila, materijal nosača i njegova svojstva i rubni uvjeti, te je podešena mreža konačnih elemenata. Na temelju dobivenih podataka iz vrijednosti faktora sigurnosti zaključilo se kako je kritičniji slučaj duktilnog ponašanja materijala, stoga se naprezanje prema von Misesu uzelo kao mjerodavno. Osim naprezanja analizirale su se vrijednosti pomaka kako bi se mogle usporediti sa podacima optimiranih modela. Već nakon prve numeričke analize se moglo zaključiti kako nosač ima veliku vrijednost faktora sigurnosti, što je dobar preduvjet za optimizaciju jer znači da postoji višak mase koju je moguće optimizirati.

Optimizacija topologije je izvršena u programu *Fusion 360*, s namjerom smanjenja mase uz očuvanje trenutne krutosti modela. Prema navedenom definiran je kriterij optimizacije, materijal, rubni uvjeti i postavke mreže. Nakon provedene dvije iteracije dobivena su dva potencijalna rješenja optimizacije. Oba modela su dodatno dorađena kako bi se dobio funkcionalan optimirani model. Optimizirani modeli su analizirani numerički uz jednake preduvjete kao i CAD model stvarnoga nosača, kako bi usporedba rezultata bila mjerodavna. Iz rješenja numeričke analize zaključilo se kako je kod oba optimirana modela kritičniji slučaj duktilnog ponašanja materijala i relevantna su naprezanja prema von Misesu, kao i u slučaju CAD modela stvarnoga nosača. Usporedbom faktora sigurnosti, naprezanja i pomaka, vidjelo se kako prvi optimirani model ima bolji omjer smanjenja mase uz veći faktor sigurnosti, tako da je prvi model odabran kao konačni optimirani model nosača.

Kako bi se cijeli proces povratnog inženjerstva i optimizacije zaokružio, definiran je i proces izrade optimiranog nosača. Nosač je optimiziran uz uvid na mogućnosti izrade aditivnim tehnologijama. Kod početnog pretpostavljanja točne vrste slitine aluminija, odabrana je slitina AlSi10Mg, koja se često koristi u automobilskoj industriji, te je jedan od materijala koji se koriste u aditivnim tehnologijama, stoga je njegov odabir bio logičan. Sukladno izboru materijala,

naveden je pregled aditivnih tehnologija kojima bi se mogao izraditi, čime se došlo do zaključka kako je najbolja opcija izrade nosača korištenje tehnologije *Direct metal laser sintering*. Navedena je i serija 3D pisača, koji se baziraju na toj vrsti tehnologije, kojima bi se moglo izraditi optimirani nosač. S obzirom da su tehnologije 3D ispisa metala van dometa ovoga rada, pokazni primjer od PETG-e je ispisan na pisaču Bambu Lab X1 Carbon, kako bi se samo vizualno moglo usporediti koliko je moguće optimizirati neki predmet.

Ovaj rad može poslužiti kao primjer povratnog inženjerstva jer prolazi kroz cijeli proces u kojemu se koristi mnogo različitih specijaliziranih programa i govori o tehnikama 3D skeniranja i aditivnim tehnologijama. Sukladno dobivenim vrijednostima naprezanja i faktora sigurnosti može se zaključiti kako je nosač predimenzioniran jer ima veliki faktor sigurnosti. Takvo predimenzioniranje odgovara načinu izrade odnosno tlačnom lijevu, s obzirom da je cijena njegove izrade u masivnoj proizvodnji najoptimalnija. Kada bi se u stvarnosti radio ovakav tip optimizacije, potrebna bi bila drugačija vrsta izrade, poput ove u diplomskom radu, što povećava cijenu izrade, a ne opravdava smanjenje mase. Realan slučaj je da bi ovakav tip optimizacije uz izradu aditivnim tehnologijama, odnosno korištenje 3D ispisa metala, bio isplativ jedino u specijalnim slučajevima poput izrade specijalnih automobila i bolida za utrke, ili čak u svemirskoj i zrakoplovnoj industriji, u kojima je svako smanjenje mase važno.

## LITERATURA

- [1] Messler R. W., Jr.: „Reverse Engineering Mechanisms, Structures, Systems and Materials“, McGraw-Hill Education, New York, 2014., [http://elib.polban.ac.id/index.php?p=show\\_detail&id=18422](http://elib.polban.ac.id/index.php?p=show_detail&id=18422)
- [2] Basan R., Matušan K.: „Povratno inženjerstvo“, materijali uz predavanja iz kolegija „CAE u razvoju proizvoda“, Merlin, akad.god. 2022./23.
- [3] Raja V., Fernandes K. J.: „Reverse Engineering An Industrial Perspective“, Springer-Verlag, London, 2008., <http://wrap.warwick.ac.uk/47730/>
- [4] Hieu L.C., Sloten J.V., Hung L.T. i dr.: „Medical Reverse Engineering Applications and Methods“, Proceedings of International Conference On Innovations, Recent Trends And Challenges In Mechatronics, Mechanical Engineering And New High-Tech Products Development, vol. 2, 2010., pages 186-196, <http://gala.gre.ac.uk/id/eprint/11735>
- [5] Cincinnati Helium: „Steps in the Reverse Engineering Process“, Engineering Solutions, s interneta, <https://3d-engineering.net/reverse-engineering-process-steps/>, 17. travnja 2024.
- [6] Javaid, M., Haleem, A., Pratap Sing, R. Suman, R.: „Industrial perspectives of 3D scanning: Features, roles and it's analytical applications“, Sensors International, Vol. 2, 100114, 2021., ISSN 2666-3511, <https://doi.org/10.1016/j.sintl.2021.100114>
- [7] CNC STEP: CNC Machines, s interneta: <https://www.cnc-step.com/digitizer-scanner-1000pro-touchprobe/>, 10. svibnja 2024.
- [8] Confalone G. C., Smits J., Kinnare T.: „3D Scanning for Advanced Manufacturing, Design, and Construction“, John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, 2023., <https://doi.org/10.1002/9781119758532>
- [9] Professional 3D Scanning Solutions | Artec 3D: „What is laser 3D scanning?“, s interneta: <https://www.artec3d.com/learning-center/laser-3d-scanning>, 18. svibnja 2024.
- [10] Shining 3D - EinScan SP V2 Printer3D, Printer3D, s interneta: <https://printer3d.hr/shop/shining-3d-einscan-spv2/>, 20. svibnja 2024.
- [11] SolidSmack: „Einscan-SP 3D Scanner [Review]“, s interneta: <https://www.solidsmack.com/software-hardware-reviews/einscan-sp-3d-scanner-review/>, 03. lipnja 2024.

- [12] 3D Systems: „Software“, s interneta: <https://www.3dsystems.com/software>, 03. lipnja 2024.
- [13] Oqton, Geomagic Control X Software, Metrology Software, s interneta: <https://oqton.com/geomagic-controlx/>, 11. lipnja 2024.
- [14] Oqton, Geomagic Design X Software, 3D Reverse Engineering Software, s interneta: <https://oqton.com/geomagic-designx/>, 12. lipnja 2024.
- [15] Bower A. F.: „Mechanics of Solids, Chapter 2: Introduction to Finite Element Analysis in Solid Mechanics“, School of Engineering Brown University, s interneta: [https://www.brown.edu/Departments/Engineering/Courses/En1750/Notes/FEA\\_Intro/FEA\\_Intro.htm](https://www.brown.edu/Departments/Engineering/Courses/En1750/Notes/FEA_Intro/FEA_Intro.htm), 20. lipnja, 2024.
- [16] Basan R.: „Analiza metodom konačnih elemenata u razvoju proizvoda: Teoretske osnove za AMKE/FEA“, materijali uz predavanja iz kolegija „CAE u razvoju proizvoda“, Merlin, akad.god. 2022./23.
- [17] Autodoc: „Parts catalogue, Engine, Engine mount: Febi Bilstein Engine mount“, s interneta: <https://www.autodoc.co.uk/febi-bilstein/1875225>, 21. lipnja 2024.
- [18] Parts groups: „OPEL ASTRA-G + ZAFIRA-A“, s interneta: <https://opel.7zap.com/en/car/t98/>, 21. lipnja 2024.
- [19] Guardiola A.E.: „Engine specifications for Opel Y20DTH, characteristics, oil, performance“, s interneta: [https://mymotorlist.com/engines/opel/y20dth/#google\\_vignette](https://mymotorlist.com/engines/opel/y20dth/#google_vignette), 21. lipnja 2024.
- [20] Manual Transmission Ratios, s interneta: [https://www.fastfieros.com/NEW\\_manual\\_transmission\\_ratios.htm](https://www.fastfieros.com/NEW_manual_transmission_ratios.htm), 22. lipnja 2024.
- [21] Parts groups: „OPEL ASTRA-G + ZAFIRA-A: Engine mountings“, s interneta: <https://opel.7zap.com/en/car/t98/e/14/5-1/#1>, 22. lipnja 2024.
- [22] Križan B., Franulović M., Zelenika S.: „Konstrukcijski elementi, zbirka zadataka“, Tehnički fakultet Sveučilišta u Rijeci, Rijeka, 2012.
- [23] Make It From: „EN AC-43000-T6 Cast Aluminum“, s interneta: <https://www.makeitfrom.com/material-properties/EN-AC-43000-T6-Cast-Aluminum>, 23. lipnja 2024.

- [24] Adams V., Askenazi A.: „Building Better Products with Finite Element Analysis“, OnWord Press, Santa Fe, 1999.
- [25] Autodesk Inventor 2022, Help: „Adjust mesh settings and controls“, s interneta: <https://help.autodesk.com/view/INVTOR/2022/ENU/?guid=GUID-B73B2C75-4AA4-4F9E-9BC4-4AB8D26C1765>, 23. lipnja 2024.
- [26] Turkalj Goran: „Teorije čvrstoće (hipoteze čvrstoće)“, materijali uz predavanja iz kolegija „Čvrstoća konstrukcija“, Merlin, akad.god. 2018./19.
- [27] Christensen P. W., Klarbring A.: „An Introduction to Structural Optimization“, Linköping University, Linköping, Springer Science, 2009.
- [28] Bendsoe M. P., Sigmund O.: „Topology Optimization: Theory, Methods and Applications“, Berlin, Springer-Verlag, 2003.
- [29] Lemu H. G., Gebisa A. W.: „A case study on topology optimized design for additive manufacturing“, IOP Conference Series Materials Science and Engineering, vol 276, sn 012026, Stavanger, prosinac 2017., <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/276/1/012026>
- [30] Autodesk: „Fusion 360“, autodesk.com, 2021, s interneta: <https://www.autodesk.com/products/fusion-360/overview?term=1Y>, 01. srpnja 2024.
- [31] Metal Additive Manufacturing: „Atomised aluminium alloy powders for metal Additive Manufacturing“, s interneta: <https://www.metal-am.com/articles/selecting-atomised-aluminium-alloy-powders-for-the-metal-3d-printing-process/>, 03. srpnja 2024.
- [32] Degnan Michael: „3D Printing Techniques and Processes“, New York, Cavendish Square Publishing , 2018.
- [33] Protolabs Network by Hubs: „What are the types of 3D printers and what can they do?“, s interneta: <https://www.hubs.com/knowledge-base/types-of-3d-printing/>, 20. kolovoza 2024.
- [34] ISO norms: „3.2 Process categories“, norma ISO/ASTM 52900:2021(en), s interneta: <https://www.iso.org/obp/ui/es/#iso:std:iso-astm:52900:ed-2:v1:en>, 21. kolovoza 2024.
- [35] Markforged: „Types of 3D Printing in Metal“, s interneta: <https://markforged.com/resources/learn/design-for-additive-manufacturing-metals/metal-additive-manufacturing-introduction/types-of-3d-printing-metal>, 21. kolovoza 2024.

- [36] EOS info: „EOS Metal 3D Printers“, s interneta: <https://www.eos.info/en-us/metal-solutions/metal-printers>, 26. kolovoza 2024.
- [37] Bambu Lab EU: „Bambu Lab X1-Carbon 3D Printer“, s interneta: [https://eu.store.bambulab.com/en-hr/products/x1-carbon?srsltid=AfmBOooukJMKtn9X--ldQZn7TEbEGAkKjx9Vl6XZTe7F6PI\\_-BypKOMA](https://eu.store.bambulab.com/en-hr/products/x1-carbon?srsltid=AfmBOooukJMKtn9X--ldQZn7TEbEGAkKjx9Vl6XZTe7F6PI_-BypKOMA), 27. kolovoza 2024

## POPIS OZNAKA

$m$	kg	Masa
$G$	N	Težina
$g$	$\frac{m}{s^2}$	Gravitacijsko ubrzanje
HB		Tvrdoća po Brinellu
$\varepsilon_f$	%	Istezanje pri lomu
$E$	GPa	Modul elastičnosti
$G$	GPa	Modul smicanja
$\nu$		Poissonov broj
$R_m$	MPa	Vlačna čvrstoća
$R_e$	MPa	Granica tečenja
$\sigma_{ekv}$	MPa	Ekvivalentno naprezanje
$\sigma_{dop}$	MPa	Dopušteno naprezanje



## **POPIS KRATICA**

<i>BJT</i>	Binder jetting
<i>DED</i>	Direct energy deposition
<i>MEX</i>	Material extrusion
<i>MJT</i>	Material jetting
<i>PBF</i>	Powder bed fusion
<i>SHL</i>	Sheet lamination
<i>VPP</i>	Photopolymerization
<i>FDM</i>	Fused deposition modeling
<i>ABS</i>	Acrylonitrile butadiene styrene
<i>PLA</i>	Polylactic acid
<i>PETG</i>	Polyethylene terephthalate glycol
<i>SLM</i>	Selective laser melting
<i>DMLS</i>	Direct metal laser sintering
<i>EBM</i>	Electron beam melting

## POPIS SLIKA

Slika 3.1 Kontaktna sonda [7] .....	8
Slika 3.2 Laserski 3D skener [9] .....	8
Slika 3.3 Dijagram tijeka povratnog inženjerstva uz 3D skeniranje[3] .....	9
Slika 4.1 Nosač automobilskog motora.....	10
Slika 4.2 Dijelovi skenera [11] .....	11
Slika 4.3 Odabir kalibracije skenera .....	12
Slika 4.4 Kalibracija 3D skenera.....	13
Slika 4.5 Odabir teksture skeniranog modela.....	13
Slika 4.6 Odabir svjetline .....	14
Slika 4.7 Prikaz nosača na kameri skenera .....	14
Slika 4.8 Postavke kamere .....	15
Slika 4.9 Parametri skeniranja.....	15
Slika 4.10 Početak skeniranja.....	16
Slika 4.11 Rezultati prvog skeniranja.....	16
Slika 4.12 Skeniranje drugog položaja nosača.....	17
Slika 4.13 Rezultati nakon drugog skeniranja.....	18
Slika 4.14 Skeniranje trećeg položaja nosača .....	18
Slika 4.15 Rezultati trećeg skeniranja .....	19
Slika 4.16 Gotovi rezultati skeniranja .....	19
Slika 4.17 Skenirani podaci.....	20
Slika 4.18 Uvećani prikaz oblaka točaka .....	21
Slika 4.19 Pregled Geomagic programa.....	21
Slika 4.20 Mjerenje u programu Geomagic Control X .....	22
Slika 4.21 Uvoz podataka.....	23
Slika 4.22 Dodavanje mreže.....	23
Slika 4.23 Mreža skeniranih podataka .....	24
Slika 4.24 Rupe u mreži .....	24
Slika 4.25 Kreiranje regija, auto segment .....	25
Slika 4.26 Prikaz regija .....	26
Slika 4.27 Početak skiciranja .....	26
Slika 4.28 Prva skica .....	27
Slika 4.29 Kreiranje ravnina.....	27
Slika 4.30 Kreiranje tijela.....	28

Slika 4.31 Tijelo između omeđenih ravnina.....	28
Slika 4.32 Kreirano tijelo .....	28
Slika 4.33 Modeliranje ojačanja.....	29
Slika 4.34 Modeliranje cilindričnog dijela.....	29
Slika 4.35 Spojeni modelirani elementi .....	29
Slika 4.36 Izrada zaobljenja .....	30
Slika 4.37 Točnost CAD modela.....	30
Slika 4.38 Najveće odstupanje podataka.....	31
Slika 4.39 Izvoz podataka u Inventor.....	31
Slika 5.1 Primjer mreže konačnih elemenata [15] .....	32
Slika 5.2 Odabir motora [18].....	33
Slika 5.3 Sklop nosača [21].....	36
Slika 5.4 Geometrijski model metalnog dijela nosača u programu Inventor.....	38
Slika 5.5 Dodavanje materijala .....	40
Slika 5.6 Određivanje faktora sigurnosti.....	40
Slika 5.7 Dodavanje uklještenja .....	41
Slika 5.8 Dodavanje opterećenja.....	42
Slika 5.9 Kreiranje mreže.....	43
Slika 5.10 Postavke mreže .....	44
Slika 5.11 Uređivanje mreže .....	44
Slika 5.12 Lokalno podešavanje mreže.....	45
Slika 5.13 Podešavanje konvergencije .....	46
Slika 5.14 Pokretanje simulacije .....	46
Slika 5.15 Vizualni prikaz rezultata (deformacije).....	47
Slika 5.16 Faktor sigurnosti s obzirom na granicu tečenja, $R_e$ .....	48
Slika 5.17 Faktor sigurnosti s obzirom na vlačnu čvrstoću $R_m$ .....	49
Slika 5.18 Rezultati najvećeg naprezanja prema von Misesu .....	50
Slika 5.19 Rezultati pomaka.....	51
Slika 6.1 Primjer optimizacije dimenzija [28] .....	52
Slika 6.2 Primjer optimizacije oblika [28] .....	53
Slika 6.3 Primjer optimizacije topologije [28].....	53
Slika 6.4 Pokretanje optimizacije topologije.....	55
Slika 6.5 Odabir tijela za optimizaciju .....	56
Slika 6.6 Očuvanje dijelova .....	57

Slika 6.7 Odabir materijala.....	58
Slika 6.8 Ciljevi optimizacije .....	59
Slika 6.9 Dodavanje rubnih uvjeta .....	60
Slika 6.10 Postavke mreže .....	60
Slika 6.11 Mreža konačnih elemenata.....	61
Slika 6.12 Tijek optimizacije topologije .....	61
Slika 6.13 Usporedba optimiranog i neoptimiranog modela.....	62
Slika 6.14 Optimizacija s različitim postotcima preostale mase .....	63
Slika 6.15 Pretvaranje rješenja optimizacije u mrežu .....	63
Slika 6.16 Dodavanje očuvanih dijelova.....	64
Slika 6.17 Rješenja druge iteracije.....	65
Slika 6.18 Mreža druge iteracije optimizacije.....	65
Slika 6.19 Neobrađena komponenta, 70% mase .....	66
Slika 6.20 Neobrađena komponenta, 75% mase .....	66
Slika 7.1 Tijelo modela 1.....	67
Slika 7.2 Izrada modela 1 .....	68
Slika 7.3 Usporedba preklapanja mreže i modela 1 .....	68
Slika 7.4 Usporedba podataka 1, Geomagic Control X .....	69
Slika 7.5 Odstupanje modela 1 i optimizacije.....	70
Slika 7.6 Dobivena masa modela 1 .....	70
Slika 7.7 Izrada modela 2.....	71
Slika 7.8 Usporedba preklapanja mreže i modela 2 .....	72
Slika 7.9 Usporedba podataka 2, Geomagic Control X .....	72
Slika 7.10 Odstupanje modela 2 i optimizacije.....	73
Slika 7.11 Masa modela 2 .....	73
Slika 7.12 Definiranje rubnih uvjeta na optimiranim modelima.....	74
Slika 7.13 Definiranje postavki mreže optimiranim modelima .....	75
Slika 7.14 Lokalno izmijenjena mreža konačnih elemenata optimiranih modela.....	76
Slika 7.15 Postavke konvergencije.....	76
Slika 7.16 Vizualni prikaz rezultata (deformacije) optimiziranih modela .....	77
Slika 7.17 Usporedba faktora sigurnosti za oba kriterija, model 1 .....	78
Slika 7.18 Naprezanja prema von Misesu, model 1 .....	79
Slika 7.19 Pomaci, model 1.....	79
Slika 7.20 Usporedba faktora sigurnosti, model 2 .....	80

Slika 7.21 Naprezanja prema von Misesu, model 2.....	81
Slika 7.22 Pomaci, model 2.....	82
Slika 8.1 3D pisač EOS M 300-4 [36] .....	87
Slika 8.2 3D pisač Bambu Lab X1 Carbon [37] .....	87
Slika 8.3 Postavke 3D ispisa .....	89
Slika 8.4 Pregled 3D ispisa u programu Bambu Studio.....	89
Slika 8.5 Pokazni primjer optimiranog nosača.....	90
Slika 8.6 Usporedba stvarnog i optimiranog nosača .....	90

## POPIS TABLICA

Tablica 5.1 Specifikacije odabranog motora [19] .....	34
Tablica 5.2 Specifikacije odabranog mjenjača [20] .....	35
Tablica 5.3 Dijelovi sklopa nosača motora [21].....	36
Tablica 5.4 Aluminijske slitine za lijevanje [22].....	39
Tablica 5.5 Mehanička svojstva materijala AC- $\text{AlSi10Mg(a)}$ T6 [23] .....	39
Tablica 6.1 Slitine aluminijevog praha [31] .....	58
Tablica 7.1 Usporedba dobivenih vrijednosti.....	82
Tablica 8.1 Specifikacije 3D pisača Bambu Lab X1 Carbon [37] .....	88

## SAŽETAK I KLJUČNE RIJEČI

Diplomski rad baziran je na procesu povratnog inženjerstva sa svrhom topološke optimizacije nosača automobilskog motora. U proces je uključena i tehnologija 3D skeniranja, radi dobivanja CAD modela za daljnju analizu. Na doradenom CAD modelu realnog nosača, provedena je statička numerička analiza koristeći metodu konačnih elemenata, kako bi se dobilo relevantna naprezanja, pomake i faktore sigurnosti. Sa svrhom unaprjeđenja realnog nosača, definirani su kriteriji, te odrađena optimizacija topologije. Iterativnim postupkom dobivena su dva potencijalna optimirana modela. Nakon njihove dorade, provedena je numerička analiza, temeljena na jednakim uvjetima kao kod prve provedene analize nad CAD modelom realnog nosača. Usporedbom rezultata analize realnog i optimiranih modela, odabran je jedan od optimiranih modela nosača. Za optimirani model predložena je njegova izrada relevantnim aditivnim tehnologijama, a za potrebe rada 3D ispisan je i pokazni primjer optimiranog modela nosača automobilskog motora.

KLJUČNE RIJEČI: povratno inženjerstvo, nosač automobilskog motora, 3D skeniranje, statička numerička analiza, metoda konačnih elemenata, optimizacija topologije, aditivne tehnologije



## **ABSTRACT AND KEY WORDS**

The thesis is based on the process of reverse engineering with the purpose of topology optimization of a car engine mount. 3D scanning technology is also included in the process, in order to obtain a CAD model for further analysis. A static numerical analysis was performed on the refined engine mount CAD model, using the finite element method, in order to obtain the relevant stresses, displacements and safety factors. With the purpose of improving the real engine mount, the optimization criteria were defined, and topology optimization was performed. The iterative process resulted in two potential optimized models. After their refinement, a numerical analysis was performed, based on the same conditions as in the first analysis performed on the real engine mount CAD model. By comparing the analysis results of the optimized models with the real CAD model, an optimized model was chosen. A production process for the optimized model was proposed, using additive technologies. At the end, a demonstration example of the optimized car engine mount model was 3D printed.

**KEY WORDS:** reverse engineering, car engine mount, 3D scanning, static numerical analysis, finite element method, topology optimization, additive technologies