

# Numerička analiza 3D printanih dijelova za konstrukciju električnog romobila

---

**Mrakar, Marko**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2023**

*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:190:382794>

*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

Diplomski sveučilišni studij strojarstva

Diplomski rad

**NUMERIČKA ANALIZA 3D PRINTANIH DIJELOVA ZA  
KONSTRUKCIJU ELEKTRIČNOG ROMOBILA**

Rijeka, svibanj 2023.

Marko Mlakar  
0069080963

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Diplomski sveučilišni studij strojarstva

Diplomski rad

**NUMERIČKA ANALIZA 3D PRINTANIH DIJELOVA ZA  
KONSTRUKCIJU ELEKTRIČNOG ROMOBILA**

Mentor: izv. prof. dr. sc. Marino Brčić

Rijeka, svibanj 2023.

Marko Mlakar  
0069080963

**SVEUČILIŠTE U RIJECI**  
**TEHNIČKI FAKULTET**  
POVJERENSTVO ZA DIPLOMSKE ISPITE

Rijeka, 7. ožujka 2022.

Zavod: **Zavod za tehničku mehaniku**  
Predmet: **Metoda konačnih elemenata čvrstih tijela**  
Grana: **2.15.06 tehnička mehanika (mehanika krutih i deformabilnih tijela)**

## ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Pristupnik: **Marko Mlakar (0069080963)**  
Studij: **Diplomski sveučilišni studij strojarstva**  
Modul: **Inženjerstvo materijala**

Zadatak: **Numerička Analiza 3D printanih dijelova za konstrukciju električnog romobila / Numerical Analysis of 3D printed parts for the construction of an electric scooter**

### Opis zadatka:

Pripremiti 3D printane dijelove konstrukcije električnog romobila, izrađene od polimernog materijala i pripremiti za testiranje primjenjivosti za konstrukciju električnog romobila.

Upotrebom metode konačnih elemenata, napraviti optimizaciju dizajna konstrukcije te predložiti izmjene dizajna, uz prepoznavanje kritičnih točaka.

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

*Marko Mlakar*

Zadatak uručen pristupniku: 21. ožujka 2022.

Mentor:



Izv. prof. dr. sc. Marino Brčić

Predsjednik povjerenstva za  
diplomski ispit:



Prof. dr. sc. Kristian Lenić

## **IZJAVA**

Sukladno članku 9. Pravilnika o diplomskom radu, diplomskom ispitu i završetku diplomskih sveučilišnih studija Tehničkog fakulteta u Rijeci izjavljujem da sam rad pod nazivom “Numerička analiza 3D printanih dijelova za konstrukciju električnog romobila” izradio samostalno, koristeći navedenu literaturu, uz znanja stečena tijekom studija te pod stručnim vodstvom mentora izv. prof. dr. sc. Marina Brčića.

---

Marko Mlakar

## ZAHVALA

*Zahvaljujem se svojem mentoru izv. prof. dr. sc. Marinu Brčiću na prenesenom znanju, uloženom trudu i savjetima prilikom izrade ovog diplomskog rada.*

*Hvala svim dragim prijateljima i kolegama na savjetima, potpori i prijateljstvu tijekom studiranja.*

*Posebno se zahvaljujem svojoj obitelji na podršci, pomoći i razumijevanju tijekom cijelog akademskog obrazovanja.*

# SADRŽAJ

<b>1. UVOD .....</b>	<b>1</b>
<b>2. ELEKTRIČNI ROMOBIL.....</b>	<b>2</b>
2.1. Povijest .....	3
2.2. Dijelovi .....	5
2.3. Baterije.....	6
2.4. Kočnice.....	8
2.5. Kotači i gume.....	10
2.6. Motor .....	11
2.7. Istosmjerni motor bez četkica.....	11
2.8. Kontroler motora .....	13
2.9. Platforma .....	14
2.10. Upravljač.....	15
2.11. Stup upravljača.....	15
2.12. Svjetla .....	16
2.13. Ovjes .....	16
2.14. Materijal .....	17
<b>3. 3D ISPIS .....</b>	<b>18</b>
3.1. Fotopolimerizacija (eng. Vat Photopolymerisation) .....	20
3.2. Raspršivanje materijala (eng. Material Jetting).....	21
3.3. Ekstrudiranje materijala (eng. Material Extrusion) .....	22
3.4. Stapanje naslage praha (eng. Powder Bed Fusion).....	24
3.5. Raspršivanje veziva (eng. Binder Jetting) .....	26
3.6. Laminiranje (eng. Sheet Lamination) .....	27
3.7. Taloženje usmjerenim izvorom energije (eng. Directed Energy Deposition) .....	28
<b>4. METODA KONAČNIH ELEMENATA.....</b>	<b>30</b>
4.1. Jednodimenzionalni konačni elementi.....	31

4.2.	Dvodimenzionalni konačni elementi .....	33
4.3.	Trodimenzionalni konačni elementi .....	35
<b>5.</b>	<b>PRAKTIČNI DIO.....</b>	<b>38</b>
5.1.	Geometrija konstrukcije električnog romobila .....	39
5.2.	Analiza konstrukcije .....	40
5.2.1.	Zamjena dijelova .....	53
5.2.2.	Nosač prednje vilice .....	56
5.3.	Nastavak za prikolicu .....	58
5.4.	Eksperimentalno ispitivanje .....	62
<b>6.</b>	<b>ZAKLJUČAK.....</b>	<b>69</b>
	<b>LITERATURA .....</b>	<b>70</b>
	<b>POPIS SLIKA.....</b>	<b>72</b>
	<b>POPIS TABLICA .....</b>	<b>74</b>
	<b>SAŽETAK.....</b>	<b>75</b>
	<b>SUMMARY .....</b>	<b>76</b>



# 1. UVOD

Posljednjih godina ekološki problemi uzrokovani vozilima s unutrašnjim izgaranjem i ekonomičnošću goriva postaju sve ozbiljniji. Vozila nove energije, koja je zelena, ekološki prihvatljiva i ekonomična, važan su cilj za gospodarski i društveni razvoj mnogih zemalja, ali i budući smjer razvoja vozila. Električno vozilo je vozilo s nultom emisijom onečišćenja te je kao takvo važan korak u smanjenju onečišćenja okoliša.

Električni romobili postali su sve popularniji posljednjih godina kao održiv i isplativ način prijevoza, osobito u urbanim područjima. Međutim, konstrukcija ovih vozila zahtijeva materijale koji su i lagani i čvrsti kako bi se osigurao siguran i pouzdan rad. Tradicionalni proizvodni procesi ponekad ne dopuštaju složene geometrije koje su poželjne u dizajnu električnih romobila. Kao rezultat toga, 3D ispis se pojavio kao obećavajuća tehnologija za proizvodnju takvih materijala.

Napredak u tehnologiji 3D ispisa, materijalima i softveru omogućio je proizvodnju složenih geometrija koje su prije bile nemoguće s tradicionalnim procesima proizvodnje. To je otvorilo nove mogućnosti za proizvodnju laganih i čvrstih komponenti, što je posebno važno u području električnih romobila, gdje su težina i čvrstoća presudni čimbenici. Također, mogućnost proizvodnje na zahtjev u malim količinama smanjuje potrebu za velikim zalihama što dovodi do uštede.

Međutim, mehanička svojstva 3D tiskanih materijala mogu varirati ovisno o procesu ispisa i korištenom materijalu, što dovodi u pitanje njihovu prikladnost za upotrebu u izradi električnih romobila. Unatoč nižoj čvrstoći i krutosti u usporedbi s tradicionalnim metalima, polimeri su atraktivni materijali za proizvodnju električnih romobila jer su lakši te imaju mogućnost 3D ispisa sa složenim geometrijama.

U ovom radu, praktični dio usredotočen je na dizajn i analizu električnog romobila. Glavni cilj je procijeniti izvedivost i učinkovitost korištenja 3D tiskanih materijala za upotrebu u konstrukciji električnih romobila primjenom metode konačnih elemenata. Implementacijom ovih tehnologija omogućio bi se popravak, održavanje, poboljšanje funkcionalnosti i učinkovitosti električnih romobila širem broju ljudi. Također, u odnosu na tradicionalne tehnologije smanjila bi se količina otpada i njegovog negativnog učinka na okoliš.

## 2. ELEKTRIČNI ROMOBIL

Električni romobil je osobno vozilo koje pokreće električni motor s upravljačem, platformom i kotačima koji se uglavnom koristi kao prijevozno sredstvo za kratke ili srednje udaljenosti u gradovima ili selima, jer se lako vozi, jeftin je i obično se može sklopiti za spremanje.



*Slika 2.1. Električni romobil [1]*

Od običnih romobila koji su pogonjeni snagom korisnika razlikuju se tako što imaju dodan električni motor za pogon te bateriju za njegovo napajanje i pripadajuću elektroniku. Iako ne postiže velike brzine te nema domet i mogućnost nošenja tereta poput motocikla ili automobila, može ići brže od normalnog bicikla te su cjenovno mnogo prihvatljiviji.

Posljednjih godina upotreba električnih romobila u gradovima je značajno porasla zbog tvrtki koje ljudima omogućuju iznajmljivanje romobila po minuti što predstavlja problem za gradove koji donose nove zakone za regulaciju vožnje romobilima kako bi spriječili nesreće. Eksplozija tržišta romobila dovela je do uvoza stotina različitih modela električnih romobila velikog broja različitih marki.

Najveća prednost električnih romobila su njihove male dimenzije, kompaktnost i mogućnost sklapanja pa se može jednostavno spremati u stanu ili uredu. Omogućuju izbjegavanje gužve u

prometu, a većinom su praktičniji od javnog prijevoza dok su opet brži od pješaćenja. Mnogo su povoljniji od električnih bicikli i u pogledu okoliša bolja alternativa vozilima na fosilna goriva u gradovima.

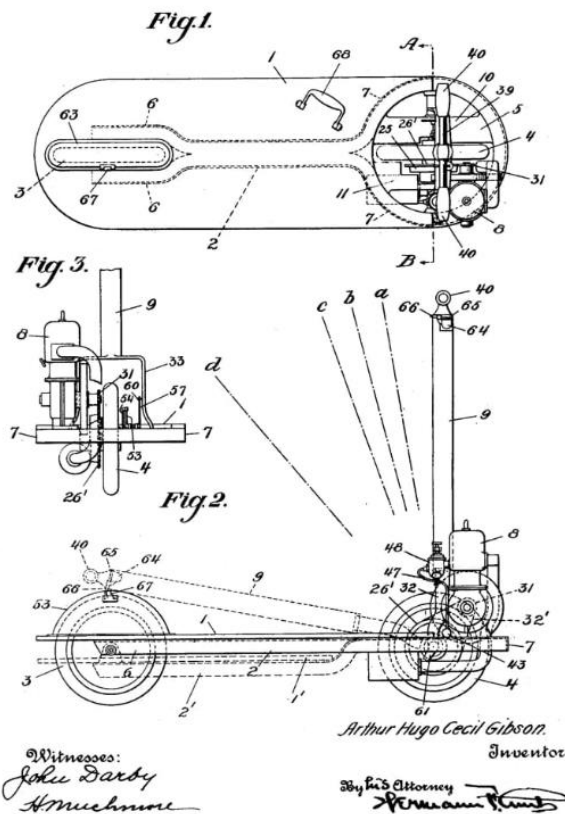
Jedan od nedostataka električnih romobila je njihova sigurnost u prometu jer je upravljanje romobilom teže nego biciklom zbog njegovih manjih kotača što otežava svladavanje oštih zavoja, rupa i neravnina na cesti. Zbog potrebe za što manjim baterijama autonomija im je relativno mala, a brzina ograničena tako da stvara probleme na cesti, ali i ako se vozi na nogostupu. [2]

## **2.1. Povijest**

Od početka do sredine 1800-ih parni su vlakovi brzo postajali novo prijevozno sredstvo, preuzimajući tradicionalne konje i kola. Industrijska revolucija potaknula je razvoj mnogih izuma.

Jedan od njih je vozilo na dva kotača na ljudski pogon koje je 1817. godine predstavio barun Karl Freiherr von Drais i nazvao ga "draisine". Nije imalo pedale, kočnice i konstrukcija je bila drvena. Smatra se pretečom bicikla i romobila. Tijekom sljedećeg stoljeća njegov je izum nadahnuo nekoliko drugih izumitelja za proizvodnju motoriziranih osobnih vozila. 1895. godine Ogden Bolton Jr. dobio je prvi patent za bicikl na baterije i to je potaknulo razvoj motoriziranih romobila. [3]

Prvi motorizirani, masovno proizveden romobil za odrasle stvorio je izumitelj Arthur Hugo Cecil Gibson. Dana 26. srpnja 1913. prijavio je patent za vozilo s vlastitim pogonom koje kasnije naziva Autoped.



Slika 2.1.1. Patent za vozilo s vlastitim pogonom [4]

Dizajn Autopeda prilično je sličan modernom električnom romobilu. U odnosu na današnje električne romobile bio je glomazniji zbog tehnoloških ograničenja te je koristio motor s unutrašnjim izgaranjem, ali konstrukcija je vrlo slična. Bio je namijenjen za kratke udaljenosti te su ga između ostalog koristili i poštari. Kako su motorizirani bicikli i motocikli postajali sve popularniji, Autoped se teško borio s konkurencijom i bio je ispred svog vremena na mnogo načina. Do 1921. proizvodnja u SAD-u završila je nakon što tvrtka nije zadovoljila svoj cilj prodaje. [4]

Tijekom sljedećih sedam desetljeća bilo je različitih koncepata za motorizirani romobil. Svaki je donosio mala poboljšanja tehnologije i dizajna u odnosu na prethodni, ali ni jedan od projekata nije komercijalno zaživio.

Sve do 90-ih godina kada je nemotorizirani romobil doživio revoluciju. Te je godine švicarski poduzetnik Wim Ouboter izumio lagani, prijenosni model romobila koji se mogao sklapati.

Napravio ga je od aluminijske konstrukcije i kotača za skateboard. 1998. godine verzija romobila s 3 kotača puštena je u prodaju i vrlo dobro prihvaćena što je omogućilo Ouboter-u pokretanje Micromobility Systems-a 1999. godine, proizvođača posvećenog proizvodnji njegovog koncepta romobila na dva kotača.

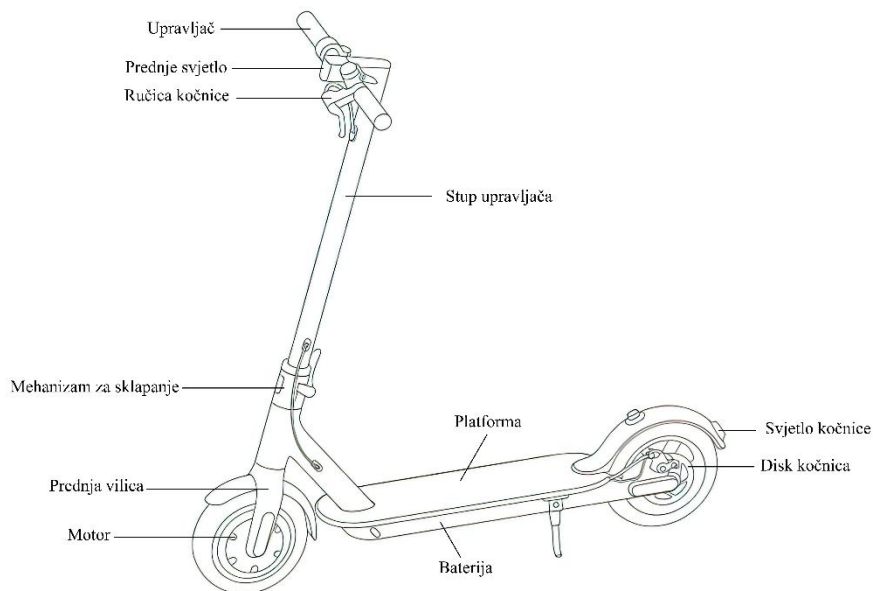
Potražnja za romobilom bila je toliko velika da je Ouboter dopustio svom tajvanskom proizvodnom partneru da distribuira romobil u Sjedinjene Države za narudžbu pod imenom "Razor", a 2003. iznimno popularna marka dodala je električni motor. Priča o modernom električnom romobilu započinje nakon 2009. godine kada tehnologija litij-ionske baterije postaje dovoljno napredna da se može integrirati u mala vozila poput romobila koji se mogu puniti kod kuće. [4]

## **2.2. Dijelovi**

Električni romobili imaju pregršt različitih dijelova, ali glavni su: baterije, kočnice, kontroler, platforma, upravljač, stup upravljača, svjetla, elektromotor, i kotači.

Baterija je srce svakog električnog romobila. Njezin napon i kapacitet bit će dominantan faktor u određivanju najvažnijih značajki romobila, a to su ukupne performanse i najveća udaljenost koju može prijeći s jednim punjenjem. Motor je jednako važan kao i baterija. Njegova snaga i kvaliteta odredit će mnogo o performansama romobila, prvenstveno o njegovoj brzini, okretnom momentu, sposobnosti penjanja uz brda i njegovom dometu u manjoj mjeri.

Većina električnih romobila uglavnom ima sličnu konstrukciju kao na slici 2.2.1. Ovisno o modelu mnogi električni romobili su sklopivi za lakše transportiranje te imaju prednji i stražnji ovjes, a neki mogu kao dodatnu opremu montirati sjedala. [5]



*Slika 2.2.1. Konstrukcija električnog romobila*

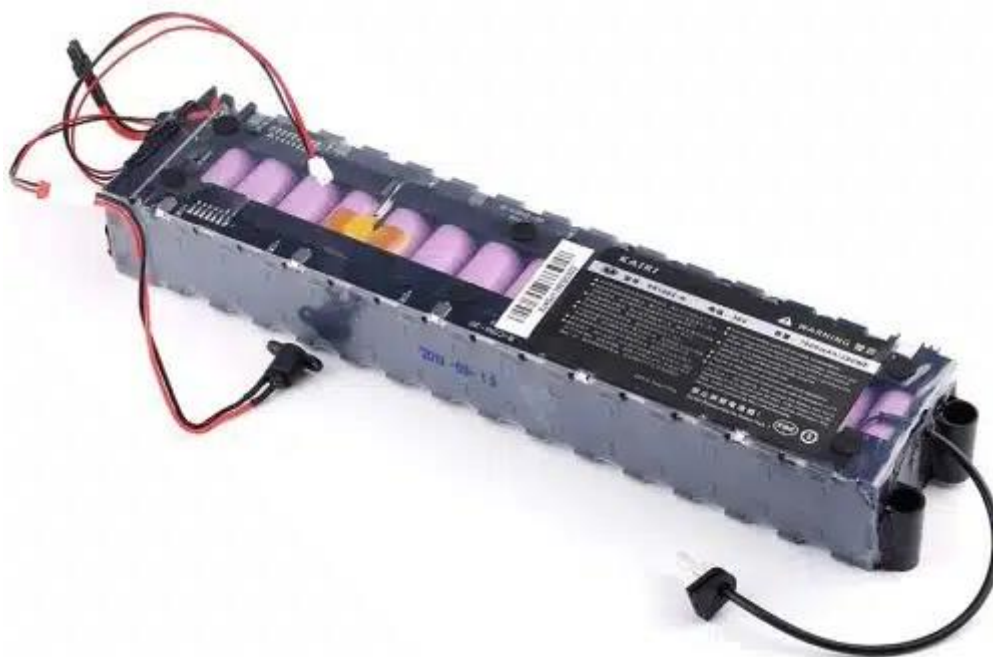
Budući da se radi o električnom romobilu, električni sustav igra značajnu ulogu u njegovom dizajniranju i stvaranju. Električni sustav sastoji se od baterije, motora, kontrolera motora i druge elektroničke opreme. Najvažnija stvar koju električni sustav čini je da daje snagu motoru koji pomaže u radu romobila. Najčešće se koristi DC motor bez četkica pričvršćen na glavčinu stražnjeg kotača romobila. Motor snagu uzima iz baterije koja pohranjuje električnu energiju koju osim motora koriste svjetla i ostali uređaji na romobilu.

### **2.3. Baterije**

Baterije za električne romobile sastoje se od mnogo pojedinačnih ćelija koje su sastavljene zajedno. Postoje razne vrste baterija s različitim karakteristikama. Dobre baterije trebaju biti što manje i lakše, sa što bržim punjenjem i pohranjivanjem što je više moguće električne energije.

Danas većina romobila dolazi s litij-ionskim baterijama koje su se pokazale kao najučinkovitiji izbor za električni romobil jer nude visoku gustoću energije dok su relativno lagane i kompaktne što omogućuje prelaženje većih udaljenosti. Također one također imaju izvrsnu dugovječnost što znači da se mogu prazniti i ponovno puniti relativno velik broj ciklusa i još uvijek zadržati svoj kapacitet pohrane. Nedostatak ovih baterija je što se ne mogu potpuno isprazniti te se mogu zapaliti zbog čega mogu biti vrlo opasne, stoga je bitno istražiti kvalitetu litij-ionskih ćelija i zaštitnih implementacija koje se koriste. [6]

Baterije u električnom romobilu dolaze u obliku baterijskog paketa kao na slici 2.3.1. sastavljenog od pojedinačnih ćelija i elektronike koja se zove sustav upravljanja baterijom (ENG. Battery management system) koji osigurava siguran rad. Baterije se u paketu spajaju serijski ili paralelno gdje sustav upravljanja baterijom nadzire i regulira svaku ćeliju.



*Slika 2.3.1. Baterija električnog romobila [7]*

Baterijski paketi izrađeni su od 18650 litij-ionskih ćelija cilindričnog oblika i dimenzija 18 mm \* 65 mm koje generiraju slabih 3,6 V uz kapacitet od otprilike 1800mAh do 3600 mAh. Radni napon im je od 3,0 V kada su prazne do 4,2 V pri 100% napunjenosti. Pojedinačne litij-ionske ćelije u paketu baterija za električne romobile proizvodi samo nekoliko različitih međunarodno poznatih tvrtki. Najkvalitetnije ćelije proizvode LG, Samsung, Panasonic i Sanyo. Ove vrste ćelija obično se nalaze samo u baterijama romobila više klase. Većina jeftinih električnih romobila ima baterije izrađene od generičkih ćelija proizvedenih u Kini, koje se uvelike razlikuju u kvaliteti. [7, 8]



*Slika 2.3.2. 18650 litij-ionska ćelija [9]*

Kapacitet baterijskih paketa izražen u Wh (vatsat) jedan je od najvećih čimbenika koji određuju domet električnog romobila. Veći kapacitet znači veći domet, koji kod standardnih romobila iznosi oko 250 Wh dok oni napredniji mogu postići vrijednosti blizu 3000 Wh. Tipična litij-ionska baterija moći će podnijeti 300 do 500 ciklusa punjenja/praznjenja prije nego što joj se kapacitet smanji za 10 do 20%. [7]

## **2.4. Kočnice**

Općenito, kočnice se koriste za kontrolu ili regulaciju brzine nekog vozila te njegovo zaustavljanje. Ključne su za sigurnu i pouzdanu vožnju električnim romobilom. Postoje dvije vrste kočnica kod električnih romobila:

- mehaničke i
- električne

Mehaničke kočnice se za usporavanje romobila oslanjaju na fizički mehanizme kao što su:

- disk,
- bubanj i
- nožne kočnice.



Nožne kočnice zahtijevaju da jedna noga bude postavljena na blatobran stražnjeg kotača, što ograničava način stajanja na romobilu. One se najsporije aktiviraju u odnosu na druge vrste kočnica i osim toga njihov se učinak se značajno smanjuje kada je cesta mokra. Ovakve kočnice se rijetko koriste.

Bubanj kočnice su najrobusnije, na njih ne utječu vremenski uvjeti, ali imaju najlošiju kontrolu jer sila kočenja samo raste nakon određene točke, što može lako uzrokovati blokiranje i klizanje kotača.

Disk kočnice, od svih navedenih, imaju najbolje performanse uključujući snagu zaustavljanja i mogućnost kontrole kočenja. Ovaj tip kočnica podložan je oštećenju diska u slučaju pada ili kod nošenja i spremanja romobila bez opreza.

Napredak tehnologije doveo je do razvoja najnaprednije metode kočenja, električne kočnice. One koriste sam motor za kočenje i funkcioniraju suprotno od procesa ubrzanja te sprječavaju kretanje motora. Električni romobili s ovom vrstom sustava kočenja također koriste i regenerativno kočenje. Ova metoda kočenja malo puni bateriju svaki put kada se aktivira čime se povećava domet vožnje. [2, 10]

Električni romobili često imaju kombinaciju mehaničkog i električnog sustava kočenja zbog povećanja sigurnosti.



*Slika 2.4.1. Disk kočnice električnog romobila [11]*

## 2.5. Kotači i gume

Dobra kvaliteta kotača važna je za postizanje dobrih performansi i uvelike doprinosi kvaliteti vožnje. Ovisno o modelu, promjeri kotača su između 12 i 30 cm. Kako bi romobil bio što kompaktniji poželjno je imati što manje kotače dok se s druge strane povećanjem kotača dobiva na stabilnosti, udobnosti i sigurnosti vožnje. [2]

Postoje dvije vrste guma koje može imati električni romobil:

- pune
- zračne (pneumatske)

Prednost punih guma je što se ne mogu probušiti zbog čega su pouzdanije, ali je vožnja mnogo neudobnija zbog čega električni romobili s ovakvim gumama najčešće koriste nekakvu vrstu ovjesa.

Češće korištena vrsta guma su pneumatske gume koje pružaju mnogo veću udobnost pri vožnji te imaju mnogo bolja svojstva apsorpcije udarca zbog čega nema potrebe za dodatnim amortizerom. Također, mogu se napuhati ili ispuhati do željene razine kako bi se vožnja prilagodila prema brzini ili kontroli. Najveći nedostatak ovih guma je što se mogu probušiti. [12]



*Slika 2.5.1. Pneumatske (lijevo) i pune (desno) gume [12]*

## 2.6. Motor

Električni romobili imaju gas koji pritisnut od strane vozača šalje električne signale uz pomoć žica do kontrolera koji bateriji omogućava oslobađanje električne energije prema motoru električnog romobila. Motor pretvara tu energiju u mehaničku energiju i prosljeđuje je kotačima čime ih pokreće prema naprijed. Postoje dvije izvedbe motora romobila:

- motor montiran unutar platforme, s kotačem povezan lancima ili zupčanicima
- motori integriran u sam kotač, što je modernije i boljeg dizajna

Danas većina električnih romobila ima motore ugrađene u glavčinu kotača romobila. Mogu biti motori u prednjem, stražnjem ili oba kotača. [13]



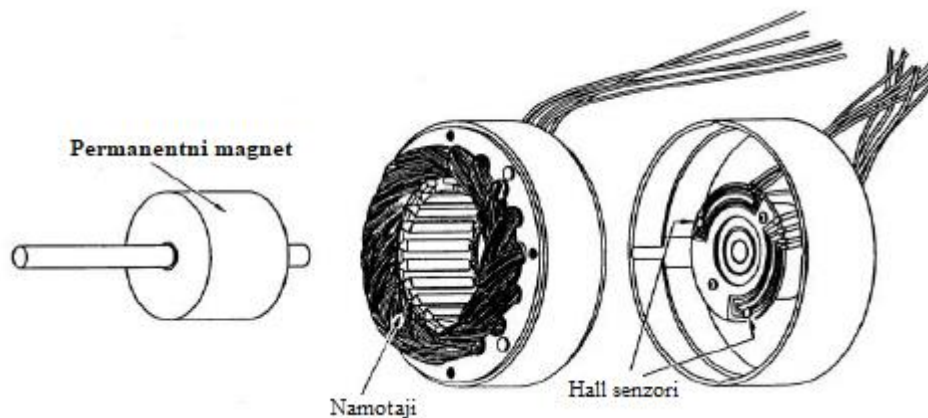
*Slika 2.6.1. Motor integriran u kotač [14]*

Snaga motora izražava se u vatima (W), a uobičajeni električni romobili imaju snagu od 250 do 600 wata. Noviji modeli obično će imati istosmjernne motore bez četkica (eng. BLDC - Brushless DC motor), budući da ta tehnologija pruža neke prednosti u odnosu na starije, motore s četkicama. [15]

## 2.7. Istosmjerni motor bez četkica

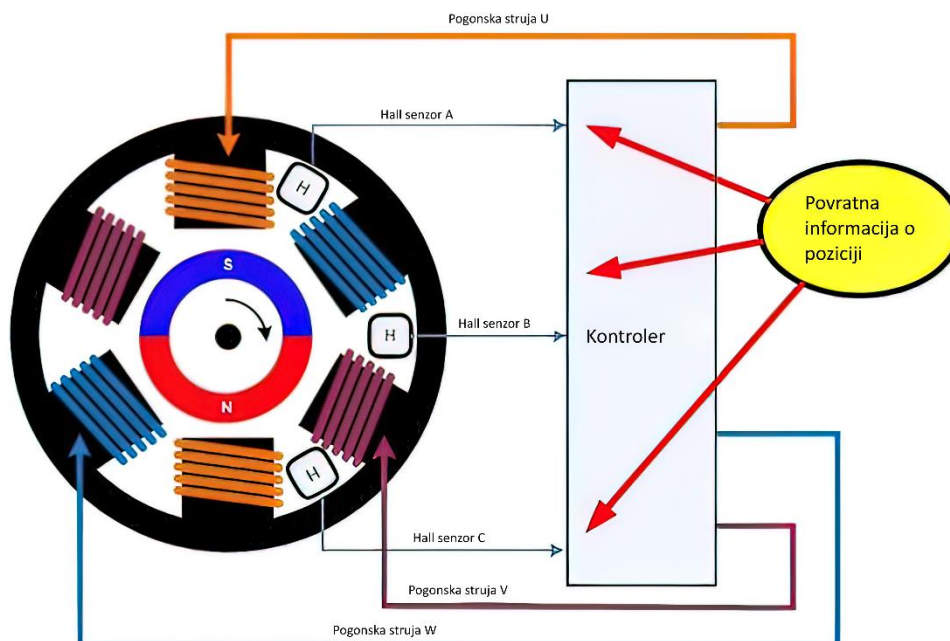
Istosmjerni motor bez četkica je sinkroni električni motor koji se napaja istosmjernom električnom energijom i koji ima elektronički upravljani komutacijski sustav umjesto mehaničkog

komutacijskog sustava koji se temelji na četkicama. U takvim motorima, struja i moment, napon i broj okretaja su linearno povezani. [6]



Slika 2.7.1. Istosmjerni motor bez četkica [16]

Sastoji se od rotora u obliku permanentnog magneta, a stator je napravljen od zavojnica koje pod naponom postaju elektromagnet. Interakcija između permanentnog magneta i elektromagneta uzrokuje rotaciju rotora. Kada je jedan svitak pod naponom, suprotni polovi rotora i statora se međusobno privlače. Kako se rotor okreće, zavojnica pod naponom se isključuje, ali susjedna zavojnica dolazi pod napon. Kako se ovaj proces ponavlja, rotor se nastavlja okretati.



Slika 2.7.2. Shema istosmjernog motora bez četkica [16]

Konstrukcija modernog istosmjernog motora bez četkica vrlo je slična konstrukciji izmjeničnog motora. Različiti su po tome što BLDC ima način za očitavanje položaja rotora. Hall senzori ili rotacijski enkoderi najčešće se koriste za očitavanje položaja rotora i postavljaju se oko statora. Povratna informacija o položaju rotora od senzora pomaže motoru odrediti kada treba prebaciti struju zavojnica. Motori s četkicama imaju učinkovitost od oko 75 do 80%, dok motori bez četkica imaju učinkovitost od 85 do 90%. [13]

Motori bez četkica imaju još nekoliko prednosti u odnosu na motore s četkicama:

- bolji omjer zakretnog momenta i mase
- pouzdaniji su i lakše se održavaju
- stvaraju manje buke
- dužeg su životnog vijeka
- ne proizvode iskre

## **2.8. Kontroler motora**

Kontroler motora je veza između kontrola za akceleraciju i kočenje te motora i baterije što ga čini centralnom komponentom sustava. To je uređaj ili skupina uređaja koji služe za upravljanje performansama elektromotora na unaprijed određeni način. On je osmišljen kao način za upravljanje i regulacije istosmjernih motora bez četkica i kao takav je neophodan za bilo koji uređaj s takvim motorom. Svaki put kada je gas pritisnut, signal prolazi kroz žice i kroz kontroler, koji govori bateriji da pusti više ili manje energije u motor. [10]

Kontroler motora ima različite zadaće kao što su pokretanje i zaustavljanje motora, odabir rotacije naprijed ili natrag, odabir i regulaciju brzine, ograničavanje ili regulaciju zakretnog momenta te zaštitu od preopterećenja i greški.

Iako često zanemarena stavka, kontroleri su od ključne važnosti za sigurnu i učinkovitu vožnju električnog romobila. Ako su loše kvalitete mogu iznenada prestati raditi usred vožnje ili spriječiti isporučivanje stabilne snage motora. [5]



*Slika 2.8.1. Kontroler motora [5]*

## **2.9. Platforma**

Kvalitetno izrađena platforma važna je za udobnu i stabilnu vožnju jer je to dio električnog romobila na kojem vozač stoji. Ona mora biti dovoljno čvrsta kako bi podnijela težinu vozača u različitim uvjetima vožnje kako ne bi došlo do savijanja ili loma. Platforma ima nekoliko karakteristika koje treba uzeti u obzir.

Jedna od njih, vjerojatno i najvažnija je veličina površine. Posebno je važna kod visokih ljudi s većim stopalima koji obično imaju problema s nekim romobilima koji imaju preuske platforme. Najčešća duljina platforme je oko 40 cm, a širina između 10 i 20 cm. [10]

Vrlo važna karakteristika je i visina platforme, njezina udaljenost od tla. Ona je najčešće oko 15 cm. Veća visina omogućuje lakše svladavanje nekih prepreka, ali povećava težište i smanjuje stabilnost vozača pri vožnji.

Većina platformi električnih romobila dolazi s nekom vrstom teksturirane ili gumene podloge koje pružaju bolje trenje za stopala. Unutar platforme se najčešće nalazi baterija, kontroler i ostale električne komponente važne za funkcioniranje električnog romobila.

## 2.10. Upravljač

Upravljač je glavna poveznica između vozila i vozača. Osim što služi za upravljanje kotačima, on sadrži i sve potrebne kontrole romobila. Na sredini upravljača nalazi se upravljački ekran s informacijama kao što su brzina, kapacitet baterije te obično daje mogućnost paljenja rasvjete i odabira načina vožnje. Gas se obično nalazi na desnoj strani, a kočnica na lijevoj. Ručke su najčešće izrađene od gume ili neke vrste silikona. Neki modeli dolaze sa sklopivim upravljačima što smanjuje volumen romobila kod spremanja. [5]



*Slika 2.10.1. Upravljač [17]*

## 2.11. Stup upravljača

Stup upravljača je obično metalna cijev koja povezuje upravljač s prednjim kotačima električnog romobila. To je dio romobila koji se najčešće može sklopiti kako bi se olakšalo nošenje i spremanje jer na taj način zauzima mnogo manje prostora.

Od presudne je važnosti da mehanizam za preklapanje i zaključavanje stupa upravljača bude kvalitetan kako bi se lako zaključao/otključao (sklopio/otklopio) i kako bi romobil držao stabilnim prilikom vožnje. Sklopivi mehanizam zvuči kao jedan od najjednostavnijih dijelova u romobilu, a zapravo je jedan od glavnih izvora frustracija za vlasnike električnih romobila. Često se može olabaviti ili potpuno prestati raditi. [18]



*Slika 2.11.1. Stup upravljača sa sklopivim mehanizmom [18]*

## **2.12. Svjetla**

Svjetla su važna značajka i jedna od glavnih sigurnosnih komponenti električnog romobila. Neophodna za su za sigurnu vožnju po noći. Gotovo svaki moderni električni romobil dolazi barem s jednim LED (eng. Light Emitting Diode) prednjim svjetlom, a neki dolaze i sa stražnjim svjetlom koje se aktivira prilikom kočenja. Neki romobili imaju LED svjetla sa strane ili na dnu platforme koja omogućuju bolju uočljivost po noći. [15]

Općenito, najčešći tipovi svjetala u električnim romobilima su:

- glavna prednja svjetla
- stražnje svjetlo za kočenje
- LED trake
- pokazivači smjera
- reflektirajuće naljepnice

Svjetla su poprilično velik potrošač baterije na električnom romobilu tako da većina njih dolazi s relativno slabim svjetlima.

## **2.13. Ovjes**

Sustav ovjesa za bilo koji uređaj omogućuje vozačima mirniju vožnju. Neki električni romobili imaju sustave ovjesa na kotačima za veću udobnost vožnje i manje podrhtavanja. Ovjes se često montira na električne romobile s čvrstim gumama, kako bi se nadoknadila smanjena stabilnost i



udobnost koju pružaju čvrste gume. Tri su vrste ovjesa koji se koriste: hidraulični, opružni i gumeni ovjes. [5]

Opružni ovjesi su jednostavniji, ali dobro funkcioniraju na mnogim modelima. Sustavi ovjesa od gume ili elastomera su vrlo slični opružnim, ali koriste gumene jastuke umjesto metalnih opruga za ublažavanje udara. Hidraulični ovjes je mnogo kompleksniji i skuplji tako da se koristi samo na vrlo kvalitetnim romobilima. [10]

Mnogi električni romobili koji imaju pneumatske gume ne koriste ovjes.

## **2.14. Materijal**

Za stabilnu i sigurnu vožnju važno je da platforma i stup upravljača budu napravljeni od čvrstog i kvalitetnog materijala. Također, materijal mora biti što lakši da bi se smanjilo opterećenje motora i ostvarila što bolja autonomija vožnje.

Većina električnih romobila za navedene dijelove koristi aluminijsku leguru industrijske kvalitete zbog dobrog omjera čvrstoće i mase. To je isti materijal koji se koristi za izradu bicikala. Jedna od najznačajnijih prednosti ovog materijala je njegova svestranost i jednostavna obradivost, a također može izdržati oštre vremenske uvjete, otporan je na UV zrake i koroziju. Neki proizvođači idu korak dalje i koriste zrakoplovnu aluminijsku leguru, materijal koji se koristi za izradu zrakoplova. Ta je vrsta aluminijska lakša i pruža prednosti za neke slučajeve upotrebe. Aluminij je jedan od ekološki najprihvatljivijih materijala s mogućnošću recikliranja od gotovo 100%. Također, zahtijeva puno manje energije tijekom procesa proizvodnje. [3]

Čelik je također jedan od izbora materijala, ali samo za dijelove koji moraju biti posebno čvrsti. Romobil u cijelosti izrađen od čelika nije izvediv jer bi bio previše težak.

Ugljična vlakna koja su lakša i čvršća od aluminijska polako postaju sve češće korišten materijal za izradu naprednijih električnih romobila.

Ostali dijelovi romobila mogu biti izrađeni od različitih vrsta materijala kao što su: različiti metali, plastika, guma, silikon i sl. [10]

### 3. 3D ISPIS

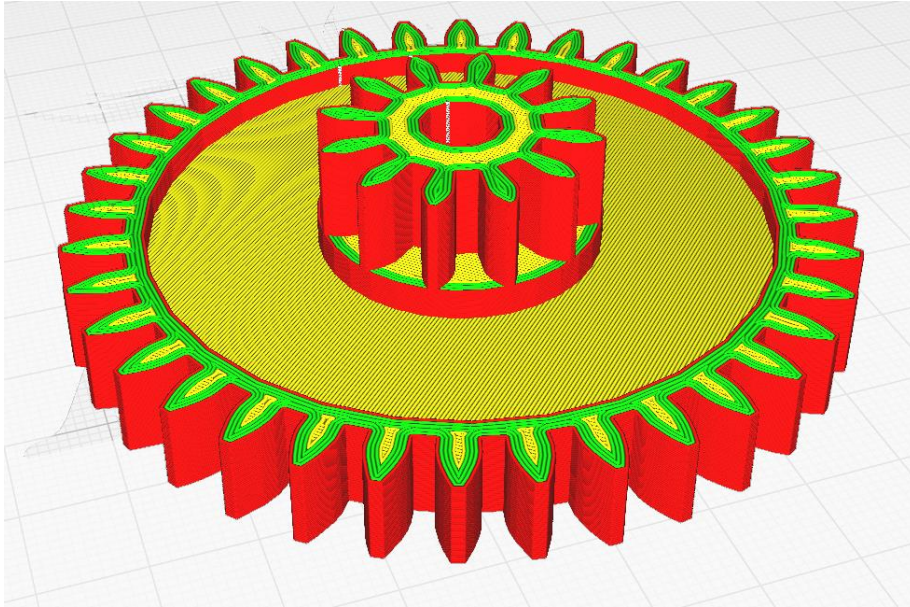
3D ispis je aditivna tehnologija koja se koristi za proizvodnju dijelova. Ovo je suprotno od procesa kao što su obrada odvajanjem čestica, gdje se konačni dizajn dobiva oduzimanjem materijala iz većeg bloka. U aditivnom procesu objekt se stvara iz digitalnog 3D modela polaganjem uzastopnih slojeva materijala dok se objekt ne stvori. Svaki od ovih slojeva može se vidjeti kao tanko rezan presjek predmeta. Ovakav proces je relativno brz, s niskim fiksnim troškovima postavljanja i može stvoriti složenije geometrije od tradicionalnih tehnologija, s popisom materijala koji je sve veći. Opsežno se koristi u inženjerskoj industriji, posebno za izradu prototipova i stvaranje laganih geometrija. Brža, lakša i jeftinija izrada prototipova omogućuje više inovacija i eksperimentiranja. [19]



*Slika 3.1. Proizvodi izrađeni 3D ispisom [20]*

Trenutno su brzine 3D ispisa prespore da bi se mogle koristiti u masovnoj proizvodnji. Međutim, tehnologija je korištena da se smanji vrijeme potrebno za razvoj prototipova dijelova i uređaja, te alata potrebnog za njihovu izradu. To je od velike koristi za male proizvođače jer smanjuje njihove troškove i vrijeme izlaska na tržište, odnosno vrijeme od osmišljavanja proizvoda do njegove dostupnosti za prodaju.

Polazna točka za bilo koji proces 3D ispisa je 3D digitalni model, koji se može izraditi pomoću raznih 3D softverskih programa. Model se zatim “reže” na slojeve kao što je prikazano na slici 3.2., čime se dizajn pretvara u datoteku koju 3D printer može čitati. [19]



*Slika 3.2. Model podijeljen na slojeve*

Postoji niz različitih vrsta tehnologija 3D ispisa, koje obrađuju različite materijale na različite načine kako bi se stvorio konačni objekt. Glavne razlike između procesa su u načinu na koji se slojevi talože za stvaranje dijelova i u materijalima koji se koriste. Svaki proces i dio opreme ima prednosti i mane. Pri odabiru procesa potrebno je uzeti u obzir brzinu, troškove, materijal, geometrijska ograničenja i tolerancije kao i mehanička svojstva te svojstva izgleda proizvoda kao što su čvrstoća, tekstura i boja.

Funkcionalna plastika, metali, keramika i pijesak sada se rutinski koriste za industrijske prototipove i proizvodne aplikacije. Također se provode istraživanja za 3D ispis bio materijala i različitih vrsta hrane. [21]

3D pisari mogu se kategorizirati u jednu od nekoliko vrsta procesa:

1. Fotopolimerizacija (eng. Vat Photopolymerisation)
2. Raspršivanje materijala (eng. Material Jetting)
3. Ekstrudiranje materijala (eng. Material Extrusion)
4. Stapanje naslage praha (eng. Powder Bed Fusion)
5. Raspršivanje veziva (eng. Binder Jetting)
6. Laminiranje (eng. Sheet Lamination)
7. Taloženje usmjerenim izvorom energije (eng. Directed Energy Deposition)

### 3.1. Fotopolimerizacija (eng. Vat Photopolymerisation)

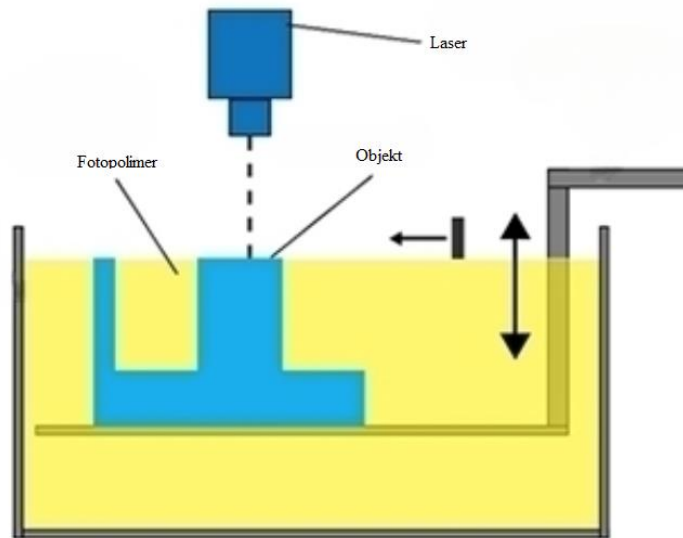
Fotopolimerizacija vrsta je tehnologije aditivne proizvodnje koja proizvodi 3D objekte selektivnim stvrdnjavanjem tekuće fotopolimerne smole pomoću polimerizacije aktivirane svjetlom. Kada su izložene određenim valnim duljinama svjetlosti, molekule tekućih fotopolimera brzo se međusobno povezuju i stvrdnjavaju u čvrsti oblik, proces poznat kao fotopolimerizacija. [22]

Većina 3D pisaača koji koriste fotopolimerizaciju drže tekući fotopolimer u posudi s platformom za izradu koja je djelomično uronjena u površinu tekućine. Pisač usmjerava izvor svjetlosti da selektivno stvrdne tekući fotopolimer u čvrsti sloj koristeći informacije iz CAD datoteke. Ultraljubičasto (UV) svjetlo se koristi za stvrdnjavanje smole, dok platforma pomiče predmet koji se izrađuje prema dolje nakon što se svaki novi sloj stvrdne. [23]

Stereolitografija (SLA, eng. Stereolithography), prvi proces aditivne proizvodnje koji je patentiran i komercijaliziran, tehnika je fotopolimerizacije. Od pojave stereolitografije 1980-ih, fotopolimerizacija se razvila tako da također uključuje očvršćivanje digitalno obrađenim svjetlosnim signalom (DLP, eng. Digital light processing) i proizvodnju kontinuiranim tekućim povezivanjem (CLIP, eng. Continuous Liquid Interface Production). [21, 24]

Koraci procesa:

1. Platforma se spušta od vrha posude za smolu prema dolje za debljinu sloja.
2. UV svjetlo stvrdnjava smolu sloj po sloj. Platforma se nastavlja kretati prema dolje, a dodatni slojevi se nadograđuju na prethodni.
3. Nakon završetka, posuda se isprazni i predmet se uklanja s platforme



*Slika 3.1.1. Postupak fotopolimerizacije [23]*

Fotopolimerizacija poznata je kao brz i vrlo precizan proces koji se može koristiti za ispis prilično velikih modela i prototipova ovisno o veličini platforme i posude. Međutim, fotopolimeri općenito nemaju robusne strukturne karakteristike, tako da su dobiveni dijelovi skloniji degradaciji i deformaciji tijekom vremena. Osim toga, dijelovi mogu zahtijevati posebno rukovanje i dodatnu obradu ovisno o procesu i korištenim polimerima što fotopolimerizaciju čini preskupom za neke primjene. [23]

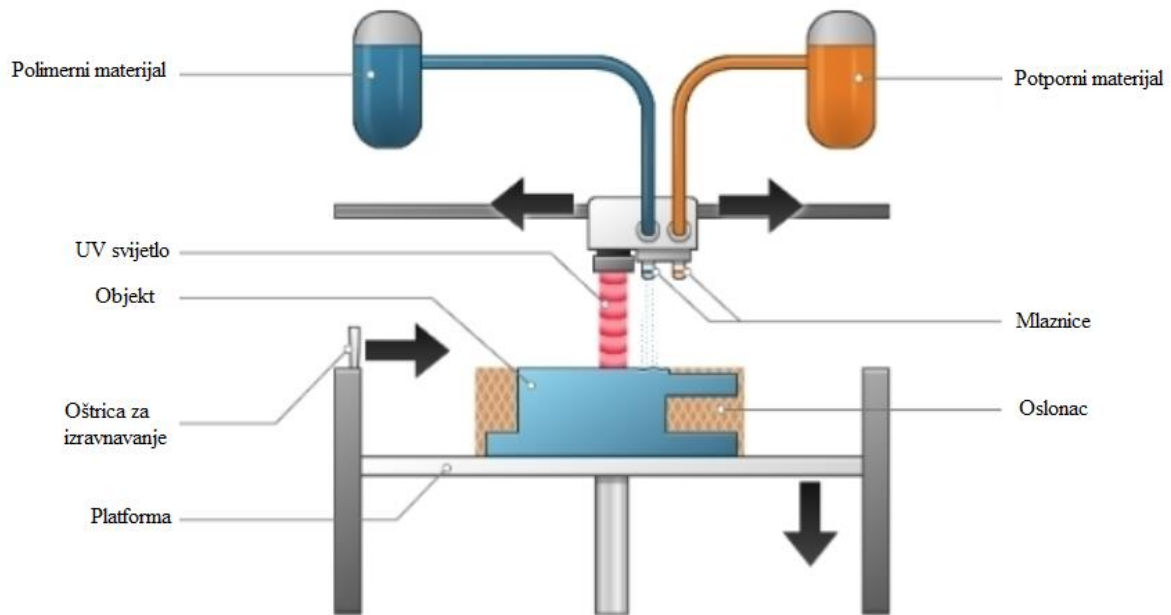
### **3.2. Raspršivanje materijala (eng. Material Jetting)**

Tehnika raspršivanja materijala vrlo je slična standardnim tintnim pisačima, gdje se kapljice materijala selektivno talože mlazom sloj po sloj kako bi se stvorio trodimenzionalni objekt. Nakon što je sloj gotov, stvrdnjava se ultraljubičastim svjetlom u slučaju fotoosjetljivog materijala ili toplinom za metalne i keramičke dijelove. Materijal se taloži iz mlaznice koja se pomiče vodoravno preko platforme i omogućuje 3D ispis različitih materijala unutar istog dijela. Strojevi se razlikuju po složenosti i po metodama kontrole taloženja materijala. [25, 26]

Za razliku od drugih tehnologija 3D ispisa, ne postoje hobističke verzije strojeva za raspršivanje materijala. Namijenjeni su profesionalcima, koriste ga proizvođači automobila, tvrtke za industrijski dizajn, umjetnički studiji, bolnice i svi ostali proizvođači proizvoda koji žele stvoriti točne prototipove za testiranje koncepata i brže plasiranje proizvoda na tržište. [27]

Koraci procesa:

1. Glava za ispis postavljena je iznad platforme
2. Kapljice materijala talože se s ispisne glave na površinu gdje je to potrebno
3. Kapljice materijala se skrućuju i čine prvi sloj
4. Daljnji slojevi se nadograđuju na prethodni
5. Slojevi se ostavljaju da se ohlade i stvrdnu ili se stvrđavaju UV svjetlom
6. Naknadna obrada uključuje uklanjanje potpornog materijala



Slika 3.2.1. Proces raspršivanja materijala [25]

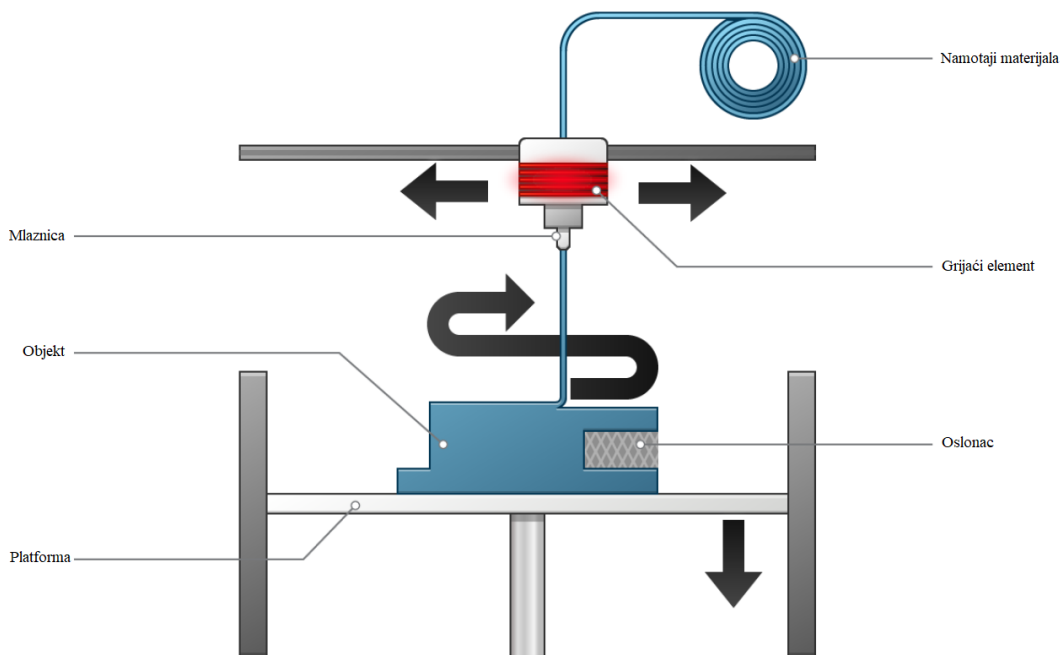
Glavni nedostaci ispisa s tehnologijom raspršivanja materijala su visoki troškovi i činjenica da UV-aktivirani fotopolimeri gube mehanička svojstva tijekom vremena i mogu postati kruti. [25]

### 3.3. Ekstrudiranje materijala (eng. Material Extrusion)

Ekstrudiranje materijala je najčešći i najpoznatiji proces 3D ispisa materijala. Najpopularniji naziv za proces je taložno očvršćivanje (eng. Fused Deposition Modeling - FDM), no to je trgovački naziv, registriran od strane tvrtke Stratasys, koja ga je izvorno razvila. Stratasys-ova FDM tehnologija prisutna je od ranih 1990-ih i danas je industrijski proces 3D ispisa. FDM je tek kasnije postao popularan među nekomercijalnim korisnicima kroz RepRap zajednicu. Projekt RepRap

započeo je kao akademski projekt 2005. godine Adrian Bowyer na Sveučilištu u Bathu s primarnim ciljem proizvodnje samoreplicirajućih uređaja. Kada je FDM patent istekao 2009. godine, nekoliko bivših RepRap volontera osnovalo je MakerBot Industries, jednu od prvih neindustrijskih tvrtki koje su komercijalizirale FDM 3D pisaače otvorenog koda na temelju RepRap projekta. [28]

Tehnologija ekstruzije materijala 3D ispisa kao osnovni materijal koristi kontinuiranu žicu termoplastičnog materijala koja se naziva filament. Materijal koji se koristi u FDM 3D ispisu često dolazi namotan u kolutima filameta. Filament se dovodi iz koluta kroz pokretnu grijanu glavu ekstrudera pisaača koja se nalazi nadomak podlozi za ispis. Ona ima mogućnost gibanja u smjeru X, Y i Z osi. Kako se glava pomiče rastaljeni materijal se istiskuje iz mlaznice ekstrudera i prvo se taloži na podlogu za 3D ispis, koja se može zagrijati za dodatno prijanjanje. Po izlasku iz mlaznice otopljeni materijal se trenutno hladi i skrućuje te tako omogućuje da se na nju postavi novi sloj vruće plastike. Nakon što je prvi sloj dovršen, glava se pomiče gore po Z osi i drugi sloj se tada može izravno nanijeti na rastući izradak. Jedan sloj se nanosi na prethodni sloj dok se ne završi izrada predmeta. Neki FDM 3D pisaači ne pomiču glavu, već se podloga za ispis pomiče dolje dok glava cijelo vrijeme boravi na istoj visini. [25, 27]



*Slika 3.3.1. Proces ekstrudiranja materijala [25]*

Sustav pomicanja odgovoran za pomicanje glave FDM pisaa u trodimenzionalnom prostoru se najeeše sastoji od koračnih motora, linearnih vodilica, navojnih vretena i sustava zupčastih remena.

Većina FDM sustava omogućuje podešavanje nekoliko parametara procesa. To uključuje temperature mlaznice i podloge za ispis, brzinu pomicanja glave, visinu sloja i brzinu ventilatora za hlađenje. Uobičajena veličina komercijalnog 3D pisaa prikazanog na slici 3.3.2. je 220 x 220 x 250 mm, dok industrijski strojevi mogu biti mnogo veći.



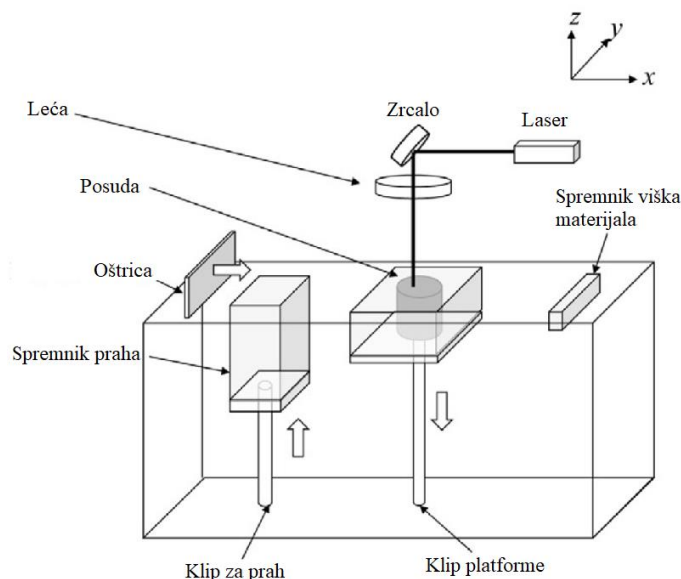
*Slika 3.3.2. Ender 3 3D pisaa [29]*

#### **3.4. Stapanje naslage praha (eng. Powder Bed Fusion)**

Stapanje naslage praha (PBF, eng. Powder Bed Fusion) je proces u kojem toplinska energija kao što je laser ili elektronski snop selektivno stapa područja praha u sloj, a slojevi se nadograđuju jedan na drugi kako bi stvorili komad. Ova tehnologija uključuje sljedeće procese: taljenje elektronskim snopom (EBM, eng. electron beam melting), selektivno lasersko taljenje (SLM, eng. selective laser melting) i selektivno lasersko sinteriranje (SLS, eng. selective laser sintering). Ako se koristi laserski izvor (SLM, SLS) za taljenje ili sinteriranje slojeva, proces taloženja provodi se u inertnoj atmosferi kao što je komora s argonom ili helijem kako bi se spriječila oksidacija materijala na povišenoj temperaturi. Za korištenje elektronskog snopa (EBM) potrebna je vakuumska komora. U svim procesima koristi se podloga s prahom na kojoj se izrađuje model. [30]

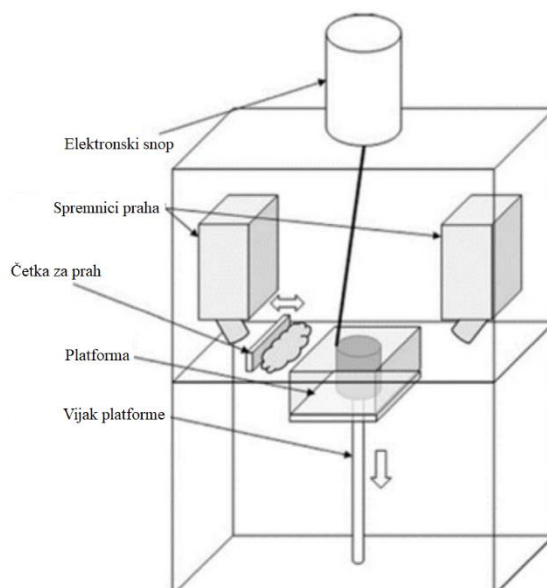


Iako su principi ova dva procesa slični, koraci obrade su prilično različiti. U procesu laserskog taljenja prikazanog na slici 3.4.1. laserska zraka prolazi kroz sustav leća i reflektira se od zrcala na površinu platforme. Zrcala se koriste za kontrolu kretanja točke laserske zrake u smjerovima  $x$  i  $y$  osi po zadanoj putanji. Nakon što se sloj praha selektivno otopi, platforma se pomiče prema dolje, oštrica ili četka za ponovno nanošenje guraju drugi sloj svježeg praha iz dozatora praha na vrh prethodno izgrađene površine, a proces laserskog taljenja se ponavlja.



*Slika 3.4.1. Proces laserskog taljenja [31]*

EBM proces prikazan na slici 3.4.2. je u osnovi razvijen iz tehnike skenirajućeg elektronskog mikroskopa. Koristi mnogo snažniji elektronski snop za selektivno taljenje praha. Za EBM proces potrebni su uvjeti niskog tlaka, što bliže vakuumu. Izvor elektronske zrake nalazi se iznad sloja praha, a kretanje elektronskog snopa izravno je kontrolirano sustavom leća. Spremnik za prah istrese svježi prah na bočnu stranu platforme, a zatim se sloj praha raspoređuje preko prethodno otopljenog sloja. [30]



*Slika 3.4.2. EBM proces [31]*

### **3.5. Raspršivanje veziva (eng. Binder Jetting)**

Tehnika raspršivanja veziva sastoji se od nanošenja vezivnog ljepila na tanke slojeve praškastog materijala. Sustav se u osnovi sastoji od platforme, spremnika praha i mlaznice veziva. Na početku procesa tanak sloj praha se raspoređuje na platformu pomoću valjka za izravnavanje. Nakon toga, inkjet mlaznica se pomiče duž x i y smjerova po projektiranoj putanji kako bi lokalno rasporedila i zalijepila prah. Koristi jednu ili više mlaznica za ubrizgavanje tekućeg veziva na sloj praha. Nakon dodavanja svakog sloja praha, platforma se pomiče prema dolje po osi z za malu udaljenost, drugi sloj praha se distribuira i proces ubrizgavanja veziva se ponavlja. Konačno, 3D objekt se formira slaganjem slojeva. Kada su svi slojevi izgrađeni, lijepljeni predmet, uzima se iz sloja praha za daljnju naknadnu obradu. [30]

Dio se dalje sinterira u peći kako bi se vezivni materijal mogao spaliti. Temperatura uklanjanja veziva je obično u rasponu od 200-600°C. Odabir veziva ovisi o tome koji se materijal tiska. Mnogi materijali mogu se obraditi tehnikom raspršivanja veziva, uključujući metale, pijesak i keramiku. Neki materijali, poput pijeska, ne zahtijevaju dodatnu obradu. Naknadna obrada predmeta izrađenih raspršivanjem veziva često je kompliciranija od drugih tehnika aditivne proizvodnje, posebno za metalne materijale zbog skupljanja dijela nakon uklanjanja veziva. [30]

Proces je općenito brži od ostalih i može se dodatno ubrzati povećanjem broja rupa na mlaznici koja taloži materijal, ali unatoč relativno velikoj brzini ispisa, dodatna naknadna obrada može dodati značajno vrijeme cjelokupnom procesu. Pristup dva materijala omogućuje veliki broj različitih kombinacija vezivo-prah i različita mehanička svojstva konačnog modela koja se mogu

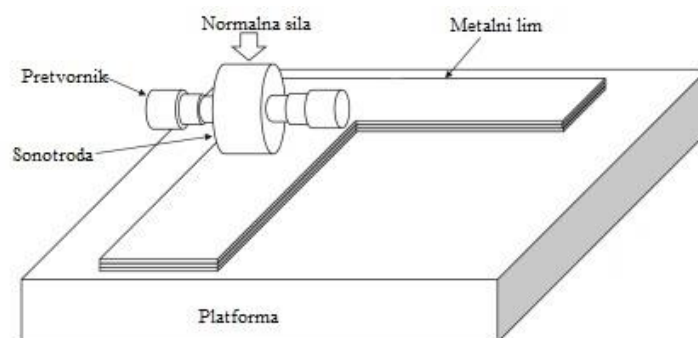
postići promjenom omjera i pojedinačnih svojstava dvaju materijala. Proces je stoga vrlo prikladan kada unutarnja struktura materijala treba biti specifične kvalitete. U usporedbi s tehnikom stapanja naslage praha, metoda raspršivanja veziva ima prednost jer ne koristi toplinu tijekom procesa izrade, što sprječava stvaranje zaostalih naprezanja u dijelovima. [32]

Zbog metode vezanja, karakteristike materijala nisu uvijek prikladne za strukturne dijelove, ali je izvrstan za primjene koje zahtijevaju dobru estetiku i oblik, kao što su arhitektonski modeli, igračke i figurice.

### 3.6. Laminiranje (eng. Sheet Lamination)

Laminiranje je aditivni proizvodni proces koji se sastoji od oblikovanja i lijepljenja listova materijala kako bi se oblikovao predmet. Listovi se selektivno izrezuju prema zadanoj konturi i povezuju sloj po sloj. [30]

Ovaj proces se ponavlja dok se ne dovrše svi slojevi kako bi se postigla puna visina. Zatim se uklanjaju svi neželjeni vanjski rubovi kako bi se otkrio ispisan 3D objekt.



Slika 3.6.1. Laminiranje [30]

Za laminiranje se mogu koristiti različiti materijali poput papira, polimera i metala, ali svaki zahtijeva različitu metodu povezivanja listova materijala. Listovi papira obično se povezuju pomoću topline i pritiska kako bi se aktivirao sloj ljepila koji se prethodno nanosi na listove. Za određene polimere koristi se ista primjena topline i tlaka za topljenje ploča. Metalni limovi povezani su zajedno ultrazvučnim vibracijama pod pritiskom, odnosno ultrazvučno zavarivanje. Laminiranje jedna je od manje preciznih metoda aditivne proizvodnje, proizvođači je koriste kao brz i jeftin način za 3D ispis nefunkcionalnih prototipova, kalupa za lijevanje i drugih jednostavnih

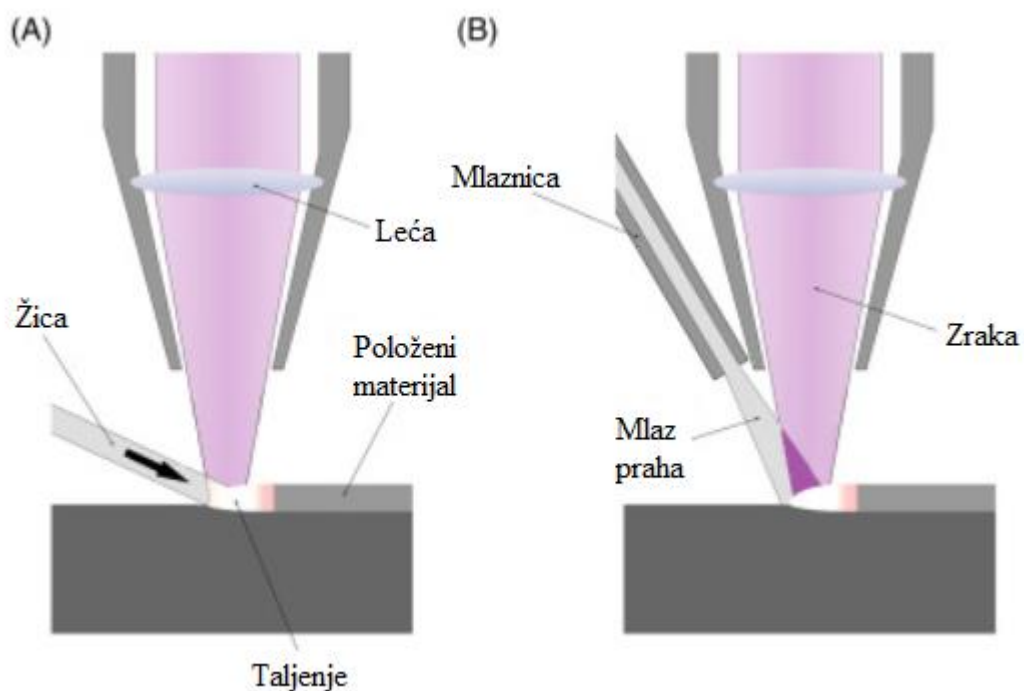
dizajna od materijala kojima se lako rukuje. Budući da omogućuje izmjenu materijala za ugradnju usred ispisa, laminiranje se također koristi za izradu kompozitnih materijala. [30]

Laminiranje može rezultirati smanjenjem troškova alata i vremena proizvodnje te je jedna od najboljih metoda aditivne proizvodnje za veće strukture. Međutim, ovaj proces ima nisku kvalitetu površine i njegova točnost dimenzija je inferiorna u odnosu na metode praškastog sloja. Također, uklanjanje viška materijala nakon formiranja predmeta uzima mnogo vremena u usporedbi s metodama s prahom pa se ne preporučuje za složene oblike. [33]

### **3.7. Taloženje usmjerenim izvorom energije (eng. Directed Energy Deposition)**

Taloženje usmjerenim izvorom energije je metoda 3D ispisa koja koristi fokusirani izvor energije, kao što je luk plazme, laser ili elektronski snop za topljenje materijala koji se istovremeno taloži pomoću mlaznice. Ovi sustavi se mogu koristiti za dodavanje materijala postojećim komponentama, za popravke ili povremeno za izradu novih dijelova. Proces se može koristiti s polimerima i keramikom, ali se obično koristi s metalima. [34]

Početni materijal je metalni prah ili žica. Prah rezultira nižom učinkovitošću taloženja u usporedbi s metalnom žicom jer se samo dio ukupnog praha otopi i zalijepi za podlogu. Zatim se na predmet ili podlogu nanosi materijal pomoću mlaznice postavljene na 4 ili 5-osnu robotsku ruku. Kako izlazi iz mlaznice, izvor topline istovremeno topi materijal. U većini slučajeva, objekt ostaje u fiksnom položaju dok se ruka pomiče kako bi položila materijal. Ovaj se postupak ponavlja sloj po sloj sve dok se slojevi ne očvrstnu i ne stvore ili poprave objekt. Slojevi su obično debljine od 0,25 mm do 0,5 mm. Vremena hlađenja materijala su vrlo brza na oko 1000-5000 °C u sekundi. Vrijeme hlađenja utječe na konačnu strukturu zrna iako preklapanje u materijalu može uzrokovati ponovno taljenje, što stvara jednoliku mikrostrukturu. [32]



*Slika 3.7.1. Taloženje usmjerenim izvorom energije [31]*

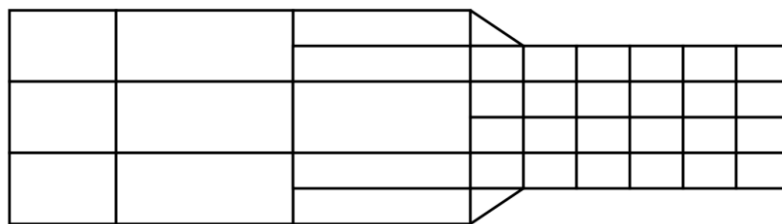
Kao i kod procesa stapanja naslaga praša, sustavi s elektronskim snopom zahtijevaju vakuum kako ne bi imali problema s oksidacijom dok laserski sustavi zahtijevaju uvođenje inertnih plinova koji se obično upuhuju zajedno s prašom iz mlaznica čime se zaštićuje otopljeno područje i znatno usporava oksidacija. Sustavi s prašom mogu koristiti jednu ili više mlaznica za izbacivanje metalnog praša. Korištenje više mlaznica omogućuje mogućnost miješanja različitih materijala za dobivanje predmeta željenih svojstava. [35]

## 4. METODA KONAČNIH ELEMENATA

Metoda konačnih elemenata predstavlja numerički postupak rješavanja inženjerskih problema i problema matematičke fizike. U najvećem broju slučajeva kada analizirana struktura ima složenu geometriju, kada je složeno opterećenje i kada su strukture od različitih materijala, nije moguće naći rješenje u analitičkom obliku. Analitičko rješenje podrazumijeva dobivanje analitičkih izraza za računanje traženih karakteristika na različitim mjestima strukture. Za dobivanje takvih podataka treba rješavati diferencijalne ili parcijalne diferencijalne jednačbe. Mnoge inženjerske zadaće imaju vrlo složenu geometriju i rubne uvjete, što dovodi do nemogućnosti dobivanja analitičkih rješenja polaznih jednačbi. Analitičko rješenje rubnih zadaća moguće je iskazati samo za pojedine posebne slučajeve s nizom pojednostavljenja u odnosu na izvornu zadaću.

Zbog toga se koriste numeričke metode, a jedna od njih, najčešće korištena metoda je metoda konačnih elemenata (MKE, eng. FEM - finite element method). Ona je najrasprostranjenija i najprimjenjenija metoda jer može biti prilagođena zadacima velike složenosti i neuobičajene geometrije te je vrlo korisno sredstvo u rješavanju kritičnih zadaća proračuna konstrukcija, provođenja topline i mehanike fluida. [36]

MKE se temelji na diskretizaciji promatranog područja podijeljeno na konačan broj podpodručja tzv. konačnih elemenata, međusobno povezanih pomoću jednog ili više čvorova (eng. nodes) u mrežu (eng. mesh) konačnih elemenata. Npr. ploča se može podijeliti na površinske elemente u obliku trokuta ili pravokutnika, slika 4.1.



*Slika 4.1. Diskretizacija na konačne elemente [37]*

Stanje u svakom elementu, kao što je npr. polje pomaka, deformacije, naprežanja, temperature te ostalih veličina, opisuje se pomoću interpolacijskih funkcija. Te funkcije moraju zadovoljavati odgovarajuće uvjete da bi se diskretizirani model što više približio ponašanju kontinuiranog sustava. Nakon izvođenja jednačbi za konačni element te njihovim združivanjem u jednačbu

konstrukcije, rješenja se dobivaju u obliku pomaka i sila u čvorovima konačnih elemenata, a zatim i u poljima konačnih elemenata. [38]

Osim pravilne primjene i odabira odgovarajućeg tipa konačnih elemenata, povećanje točnosti rješenja raste s povećanjem gustoće mreže konačnih elemenata. Po svojoj definiciji, MKE unosi trajnu grešku u rješenje problema, a zadatak inženjera je da grešku kontrolira i drži unutar propisanih veličina. Izbor elemenata koji se koristi u MKE uvelike ovisi o problemu koji se rješava te o željenoj točnosti rezultata. Tipovi konačnih elemenata su:

1. Jednodimenzionalni (linijski)
2. Dvodimenzionalni (plošni)
3. Trodimenzionalni
4. Osnosimetrični

Razvoj računala koja u kratkom vremenu mogu riješiti velike sustave jednažbi omogućio je široku primjenu MKE u inženjerskoj praksi.

#### 4.1. Jednodimenzionalni konačni elementi

Najjednostavniji konačni elementi kojima se korisnik može koristiti su jednodimenzionalni konačni elementi. Oni služe za diskretizaciju i analizu linijskih konstrukcija te su u ovom slučaju sve varijable funkcije samo jedne koordinate (duljinske). Za jednodimenzionalni konačni element jednažba glasi:

$$k^e u^e = f^e \quad (4.1)$$

Gdje je:

$k^e$  – matrica krutosti

$u^e$  – vektor pomaka konačnog elementa

$f^e$  – vektor opterećenja konačnog elementa

Jednodimenzionalnim konačnim elementima pripadaju:

- opružni, štapni i

- gredni konačni elementi.

Opružni i štapni ne mogu prenositi moment, već samo mogu preuzeti aksijalna opterećenja. Stupnjevi slobode gibanja ograničeni su na translaciju oko uzdužne osi konačnog elementa pa se na taj način definira pomak. Matrice navedenih elemenata imaju sljedeći oblik:

$$k_w^e = \frac{EA}{l} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

Gdje je:

$k_w^e$  – matrica aksijalne krutosti

$E$  – modul elastičnosti

$A$  – površina konačnog elementa

$l$  – duljina konačnog elementa

Gredni elementi za razliku od opruga i štapova mogu uz aksijalna opterećenja preuzimati i poprečna opterećenja te momente savijanja i uvijanja. Iz tog razloga, gredni element koji spaja dva čvora ima mogućnost translacijskog i rotacijskog gibanja u smjeru svih koordinatnih osi tj, ima slobodu gibanja po svim stupnjevima. Zbog djelovanja više vrsta opterećenja, matrica krutosti grednog konačnog elementa nastaje zbrajanjem pojedinih matrica krutosti koje odgovaraju svakom tipu opterećenja:

$$k^e = k_w^e + k_v^e + k_u^e + k_\varphi^e \quad (4.3)$$

Gdje je:

$k_v^e$  – matrica krutosti s obzirom na savijanje oko osi x

$k_u^e$  – matrica krutosti s obzirom na savijanje oko osi y

$k_\varphi^e$  – matrica torzijske krutosti

Navedene matrice potrebno je proširiti dodavanjem nul redaka i stupaca kako bi se omogućilo njihovo zbrajanje nakon čega se dobiva sljedeća matrica krutosti grednog elementa:



$$k^e = \begin{bmatrix} a & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -a & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & b_1 & 0 & 0 & 0 & c_1 & 0 & -b_1 & 0 & 0 & 0 & c_1 \\ 0 & 0 & b_2 & 0 & -c_2 & 0 & 0 & 0 & -b_2 & 0 & -c_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & t & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -t & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -c_2 & 0 & d_2 & 0 & 0 & 0 & c_2 & 0 & e_2 & 0 \\ 0 & c_1 & 0 & 0 & 0 & d_1 & 0 & -c_1 & 0 & 0 & 0 & e_1 \\ -a & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -d_1 & 0 & 0 & 0 & -c_1 & 0 & b_1 & 0 & 0 & 0 & -c_1 \\ 0 & 0 & -b_2 & 0 & c_2 & 0 & 0 & 0 & b_2 & 0 & c_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -t & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & t & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -c_2 & 0 & e_2 & 0 & 0 & 0 & c_2 & 0 & d_2 & 0 \\ 0 & c_1 & 0 & 0 & 0 & e_1 & 0 & -c_1 & 0 & 0 & 0 & d_1 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

Gdje je:

$$a = \frac{EA}{l}, b_1 = \frac{12EI_y}{l^3}, b_2 = \frac{12EI_x}{l^3}, c_1 = \frac{6EI_y}{l^2}, c_2 = \frac{6EI_x}{l^2}, d_1 = \frac{4EI_y}{l}, d_2 = \frac{4EI_x}{l} l$$

$$e_1 = \frac{2EI_y}{l}, e_2 = \frac{2EI_x}{l}, t = \frac{GI_t}{l}$$

Pri čemu je:

$I_y$  – moment inercije oko osi x

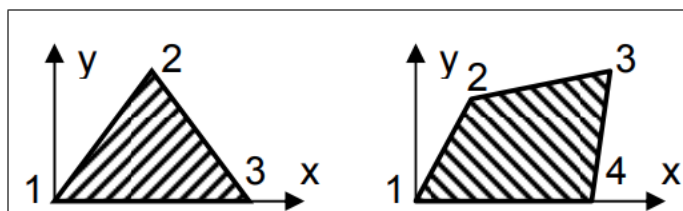
$I_x$  – moment inercije oko osi y

$I_t$  – torzijski moment inercije

$G$  – modul smicanja

## 4.2. Dvodimenzionalni konačni elementi

Ploče, ljske i stijene su dvodimenzionalni konačni elementi koji se koriste za analizu ravninskog stanja naprezanja i deformacija. Kod dvoosnog stanja naprezanja sve komponente naprezanja leže u međusobno paralelnim ravninama, a rezultat je troosno stanje naprezanja. Usporedno tome, kod dvoosnog stanja deformacije, sve komponente deformacije leže u međusobno paralelnim ravninama što znači da se radi o troosnom stanju deformacije. Dvodimenzionalni elementi prema obliku dijele se na trokutaste i pravokutne konfiguracije konačnih elemenata s tri, odnosno četiri čvora. Općenito pravokutni elementi koji se sastoje od četiri čvora daju bolju preciznost od trokutastih sastavljenih od tri čvora, zbog više čvorova.



Slika 4.2.1. Dvodimenzionalni elementi [37]

Kako bi se omogućilo određivanje matrice krutosti dvodimenzionalnog konačnog elementa potrebno je odrediti matricu koja daje vezu između deformacija i pomaka u čvorovima konačnog elementa:

$$B = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial x} & 0 & \frac{\partial N_2}{\partial x} & 0 & \dots & \frac{\partial N}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial N_1}{\partial y} & 0 & \frac{\partial N_2}{\partial y} & \dots & 0 & \frac{\partial N}{\partial y} \\ \frac{\partial N_1}{\partial y} & \frac{\partial N_1}{\partial x} & \frac{\partial N_2}{\partial y} & \frac{\partial N_2}{\partial x} & \dots & \frac{\partial N}{\partial y} & \frac{\partial N}{\partial x} \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

Gdje je:

$N_1, N_2, N_3$  – aksijalna sila

Za potpuno određivanje matrice krutosti dvodimenzionalnog elementa još je potrebna i matrica elastičnih konstanti materijala koja u slučaju ravninskog stanja naprezanja ima oblik:

$$C = \frac{E}{1 - \nu^2} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1 - \nu^2}{2} \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

Matrica elastičnih konstanti u slučaju ravninskog stanja deformacije:

$$C = \frac{E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \begin{bmatrix} 1 - \nu & \nu & 0 \\ \nu & 1 - \nu & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1 - 2\nu}{2} \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

Gdje je:

$\nu$  – Poissonov broj

Konačno, matricu krutosti dvodimenzionalnog elementa moguće je odrediti pomoću izraza:

$$k^e = \int_{A_e} B^T C B h dA_e \quad (4.8)$$

Gdje je:

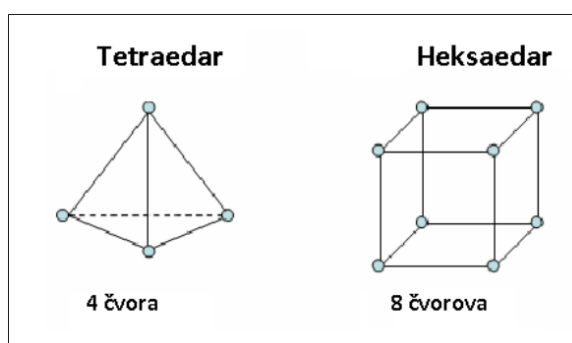
$h$  – debljina konačnog elementa

$A_e$  = površina konačnog elementa

### 4.3. Trodimenzionalni konačni elementi

Analiza trodimenzionalnih problema teorije elastičnosti po MKE se svodi na jednostavno proširenje promatranja o dvodimenzionalnim problemima uvođenjem još jedne nove dimenzije. To znači da se preko jednostavnih trokutastih i četvrtastih dvodimenzionalni elemenata dodavanjem treće dimenzije dođe do trodimenzionalnih poput:

- tetraedra
- heksaedra



Slika 4.3.1. Trodimenzionalni elementi [39]

Tetraedar ima 12 stupnjeva slobode zbog čega je prilagodljiviji te se mogu umrežiti složenije geometrije u odnosu na heksaedar koji je s 24 stupnjeva slobode kvalitetniji.

Zbog porasta snage računala i razvoja 3D CAD programa, u suvremenom konstruiranju omogućena je izrada kompliciranih geometrija u relativno kratkom vremenu te se iz tog razloga najčešće koriste trodimenzionalni elementi.

Prije određivanja matrice krutosti konačnog elementa kao i kod dvodimenzionalnih konačnih elemenata potrebno je definirati matricu koja daje vezu između deformacije i pomaka B:

$$B = [B_1, B_2, B_3, \dots, B_n], B_i = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial N_i}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial N_i}{\partial z} \\ \frac{\partial N_i}{\partial y} & \frac{\partial N_i}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial N_i}{\partial z} & \frac{\partial N_i}{\partial y} \\ \frac{\partial N_i}{\partial z} & 0 & \frac{\partial N_i}{\partial x} \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

Matrica elastičnih konstanti C:

$$C = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

Iz prethodno dobivenih matrica dobiva se matrica krutosti trodimenzijskog konačnog elementa pomoću izraza:

$$k^e = \int_{V_e} B^T C B h dV_e \quad (4.11)$$

Gdje je:

$V_e$  – volumen konačnog elementa

## 5. PRAKTIČNI DIO

Zadatak ovog rada je ispitivanje primjenjivosti 3D ispisanih dijelova od polimernih materijala pri izradi konstrukcije električnog romobila. Praktični dio usmjeren je na dizajn i analizu električnog romobila, točnije električnog romobila marke Xiaomi. Cilj ovog rada je procijeniti izvedivost i učinkovitost zamjene pojedinih komponenti romobila s 3D ispisanim polimernim dijelovima što bi omogućilo vlasnicima romobila jednostavniji popravak ili poboljšanje pojedinih dijelova ili nekome tko nema romobil izradu novog, uz uvjet da posjeduju 3D pisač.

Za izradu geometrije konstrukcije električnog romobila koja će služiti kao osnova za analizu i dizajn, korišten je programski paket SolidWorks. Električni romobil koji će se promatrati je Xiaomi Mi Electric Scooter pro 2 prikazan na slici 5.1. zbog njegove popularnosti te se njegov dizajn najčešće pojavljuje i kod drugih električnih romobila.



*Slika 5.1. Xiaomi Mi Electric Scooter pro 2 [40]*

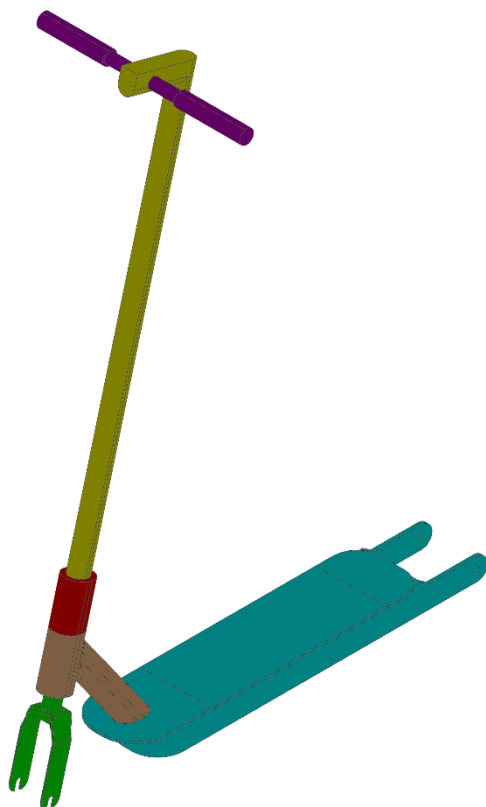
Nakon izrade geometrije napravljena je FEM analiza cijele konstrukcije kako bi se dobili početni podaci naprežanja i pomaka konstrukcije. U sljedećoj fazi izrađeni su pojedini dijelovi romobila iz polimernih materijala. Ovi dijelovi su zatim zamjenjeni za postojeće komponente u izvornoj

konstrukciji, što dovodi do ponovne FEM analize romobila. Rezultati ove ponovne analize uspoređuju se s izvornima kako bi se utvrdio učinak zamjene.

Zadnji korak u praktičnom dijelu je 3D ispisivanje jednog dijela električnog romobila od polimernog materijala i provedba eksperimentalnog ispitivanja. Rezultati ovih ispitivanja uspoređuju se sa rezultatima FEM analize u programu Femap (Finite Element Modeling And Postprocessing), čime se provjerava točnost i vrijednost provedene analize.

## 5.1. Geometrija konstrukcije električnog romobila

Za izradu 3D modela konstrukcije električnog romobila korišten je programski paket za računalno potpomognuti dizajn (eng. Computer aided design – CAD) SolidWorks. Slika 5.1.1. prikazuje model električnog romobila Xiaomi Mi Electric Scooter pro 2.

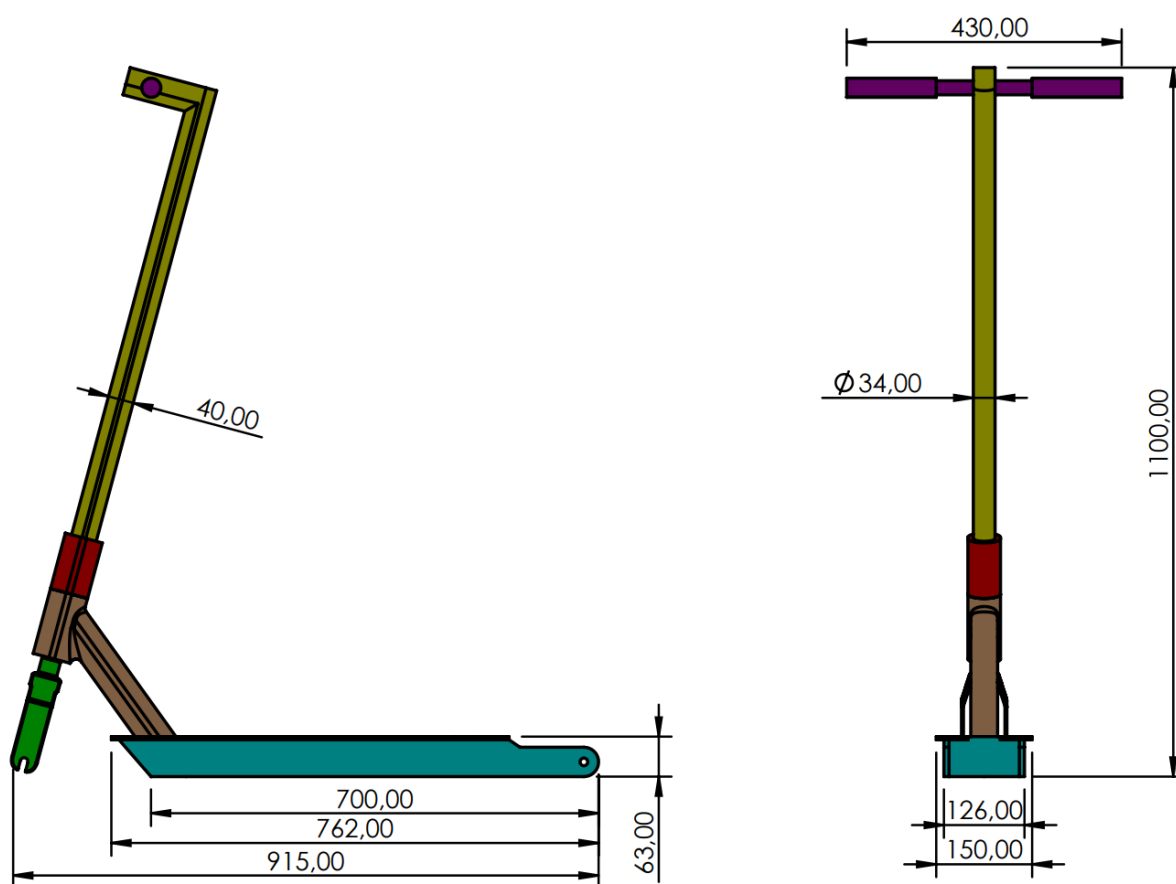


*Slika 5.1.1. Xiaomi Mi Electric Scooter pro 2 model*

Model je pojednostavljen kako bi se olakšala analiza te se sastoji od sljedećih dijelova:

1. Platforma
2. Prednja vilica
3. Stup upravljača
4. Upravljač
5. Spojna cijev platforme i prednje vilice
6. Mehanizam za sklapanje

Model je izrađen prema osnovnim dimenzijama koje su prikazane na slici 5.1.2., a dobivene su izravnim mjerenjem navedenog romobila. Svi dijelovi izrađeni su od aluminijske legure.



Slika 5.1.2. Osnovne dimenzije električnog romobila

## 5.2. Analiza konstrukcije

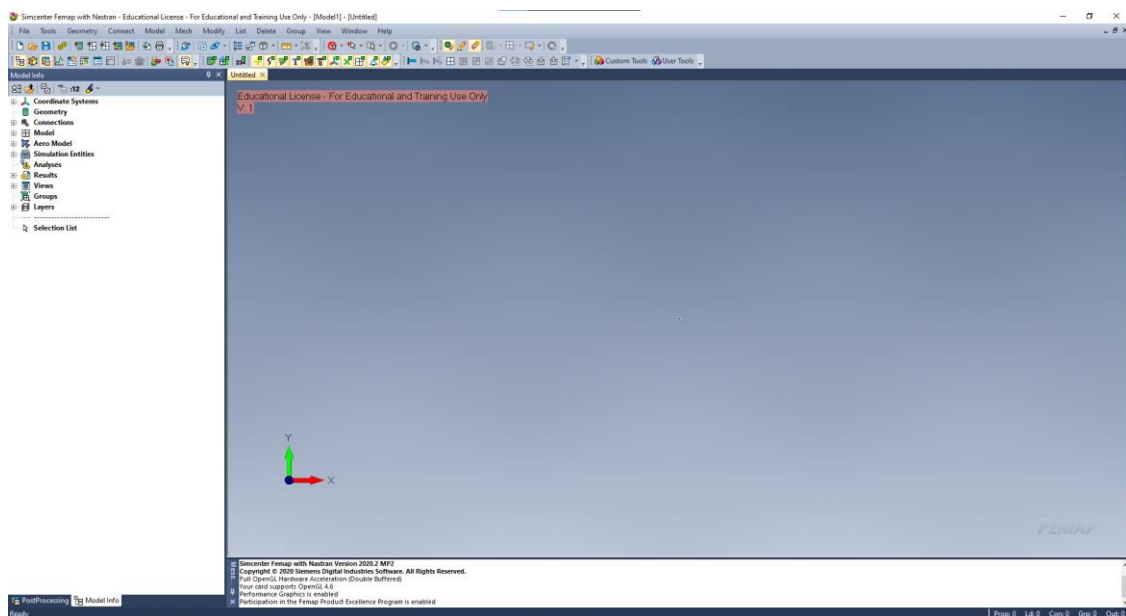
Koristeći metodu konačnih elemenata, inženjeri mogu steći dragocjen uvid u ponašanje i performanse električnog romobila u različitim uvjetima i donijeti informirane odluke za



poboljšanje njegove sigurnosti, pouzdanosti i učinkovitosti. U ovom poglavlju objašnjena je primjena studentske verzije programa Femap za analizu konstrukcije električnog romobila.

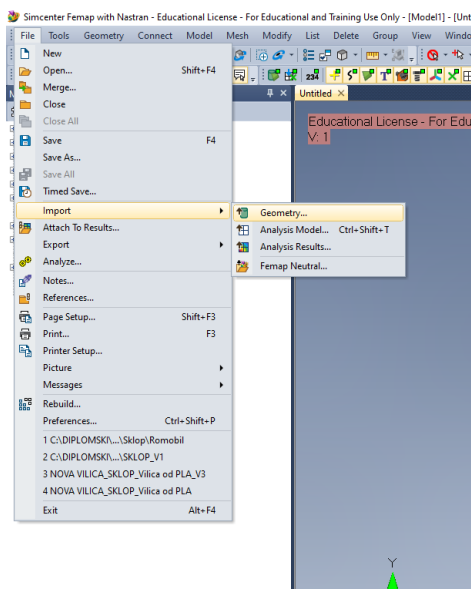
Femap je komercijalni softver za analizu konačnih elemenata koji se koristi za stvaranje, analizu i simulaciju složenih inženjerskih sustava i struktura. On pruža korisničko sučelje za stvaranje i uređivanje modela, postavljanje simulacija i naknadnu obradu rezultata. Podržava širok raspon vrsta analiza, uključujući statičke analize, dinamičke analize i toplinske analize, između ostalih.

Za početak rada u bilo kojem softveru za FEM analizu, potrebno je stvoriti model geometrije koju želimo analizirati. Model se može kreirati unutar programa za FEM analizu, ili u CAD programu, a potom uvoziti u željenom formatu u Femap. Kao što je prije spomenuto, programski paket SolidWorks korišten je za izradu modela koji se zatim uvozi u Femap. Početno sučelje programa prikazano je na slici 5.2.1.



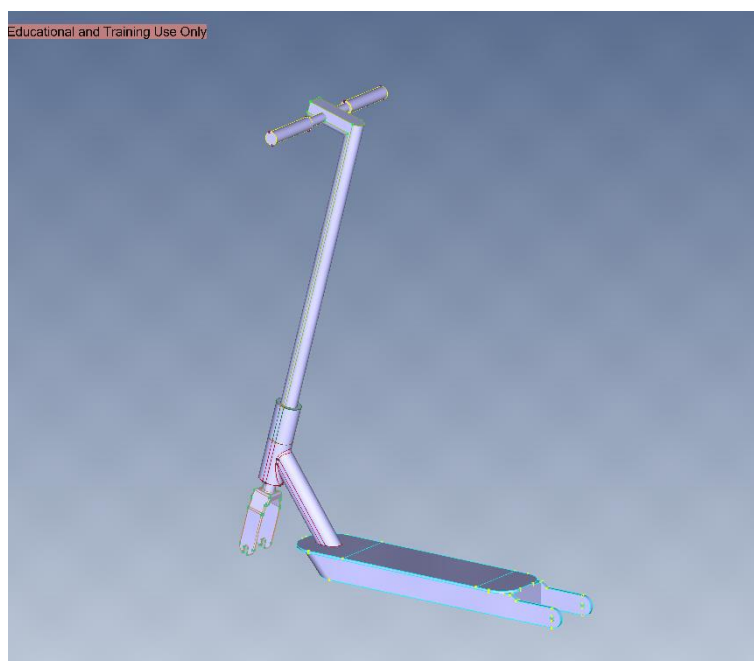
Slika 5.2.1. Početno sučelje programa Femap

Kako bi importirali gotov model potrebno je kliknuti na *File* te u padajućem izborniku odabrati *Import* te zatim *Geometry*. U izborniku za uvoz geometrije za analize odabire se željena datoteka 3D modela koja može imati format kao što su .stp, .sldprt., .stl. i slični. (Slika 5.2.2.)



*Slika 5.2.2. Uvoz geometrije*

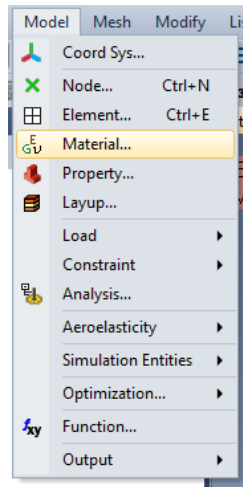
Uvezeni model prikazan je na slici 5.2.3.



*Slika 5.2.3. Uvezeni model*

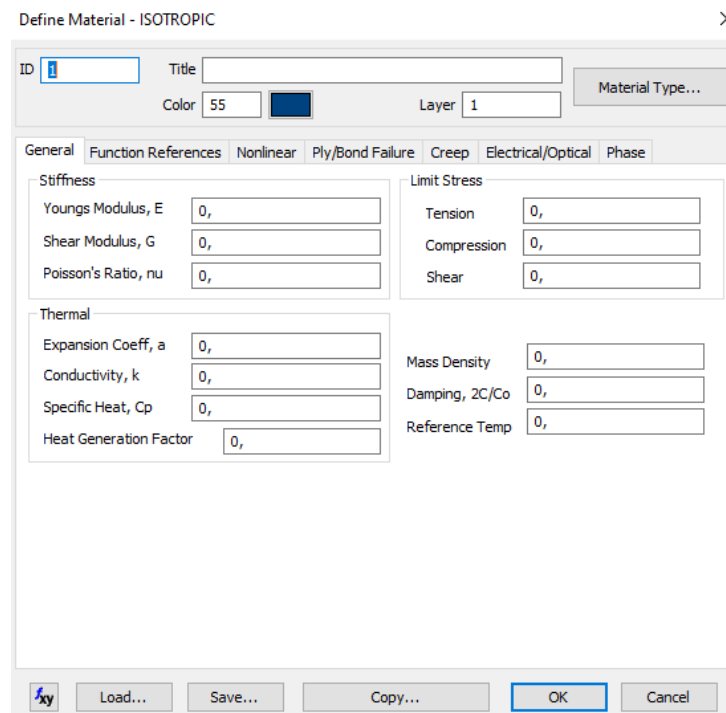
Nakon što se geometrija uveze, potrebno je izvršiti nekoliko koraka kako bi mogli provesti analizu. Vrlo važan korak je definiranje materijala i svojstva geometrije. To uključuje određivanje mehaničkih svojstava materijala korištenih u modelu, kao što su modul elastičnosti, Poissonov koeficijent, gustoća i toplinska vodljivost i sl. U Femapu se svojstva materijala mogu definirati odabirom materijala iz baze materijala ili ručnim upisivanjem mehaničkih svojstava željenog

materijala. Definiranje materijala izvodi se klikom na izbornik *Model* te odabirom opcije *Materijal* iz padajućeg izbornika kao što je prikazano na slici 5.2.4.



Slika 5.2.4. Odabir materijala

Pojavljuje se prozor *Define Material* gdje se upisuju mehanička svojstva izabranog materijala ili se ona učitavaju odabirom predefiniranog materijala iz baze pritiskom na tipku *Load*. (Slika 5.2.5.)



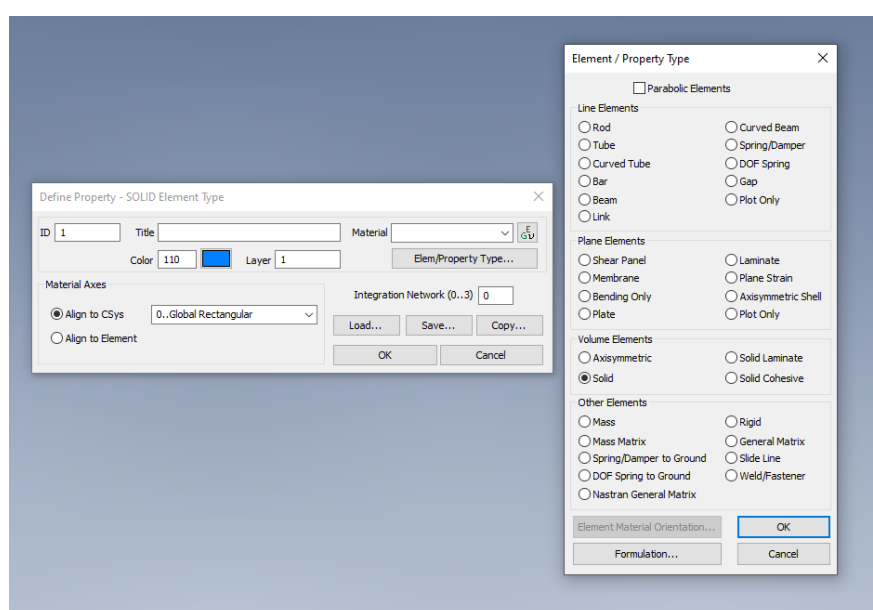
Slika 5.2.5. Definiranje materijala

Korištena svojstva za PLA i aluminij prikazane su u tablici 5.2.1.

Tablica 5.2.1. Svojstva materijala

Svojstvo	Oznaka	PLA	Aluminij	Mjerna jedinica
Modul elastičnosti	E	2636	70000	N/mm <sup>2</sup>
Poissonov koeficijent	$\nu$	0,3	0,31	-
Gustoća	$\rho$	1200	2700	kg/m <sup>3</sup>
Vlačna čvrstoća	R <sub>m</sub>	46,6	90	N/mm <sup>2</sup>

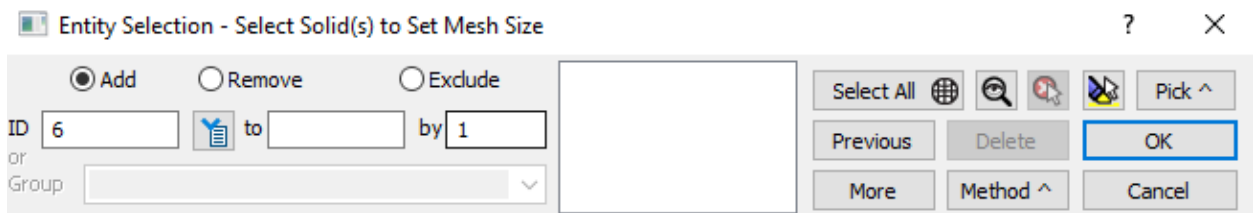
Sljedeći korak je definiranje značajki elementa modela. Pritiskom na *Model* te odabirom *Property* možemo definirati vrstu elementa. U prozoru *Define property* potrebno je kliknuti na *Elem/Property Type* te sljedećem prozoru odabrati *Solid*. (Slika 5.2.6.)



Slika 5.2.6. Odabir svojstva

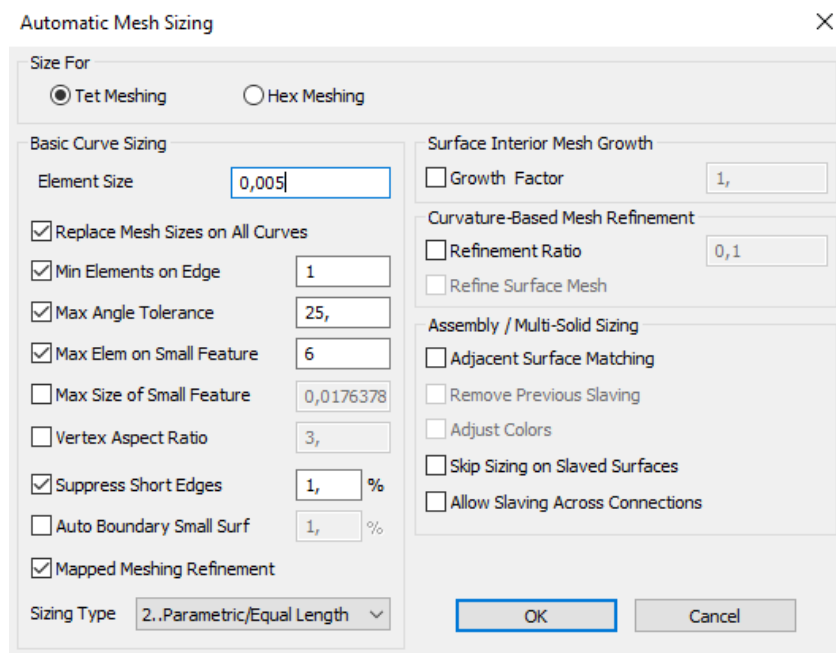
Nakon što su definirani materijal i značajke elementa, sljedeći korak je definiranje mreže konačnih elemenata, poznate kao *Mesh*. Ovaj proces uključuje određivanje broja i rasporeda konačnih elemenata, kao i njihove veličine i oblika. Cilj je postići dovoljno finu mrežu kako bi se osigurala točnost i pouzdanost rezultata, a istovremeno izbjegavajući nepotrebno veliki broj elemenata koji bi usporili analizu.

Kod izrade mreže konačnih elemenata prvi korak je definiranje veličine pojedinog elementa odnosno gustoće mreže. Kako je prethodno odabrana vrsta elementa *Solid*, veličina elementa određuje se naredbom *Size on solid* iz izbornika *Mesh – Mesh control*. Odabirom spomenute naredbe otvara se prozor za odabir dijelova kojima želimo odrediti veličinu konačnih elemenata prikazana na slici 5.2.7.



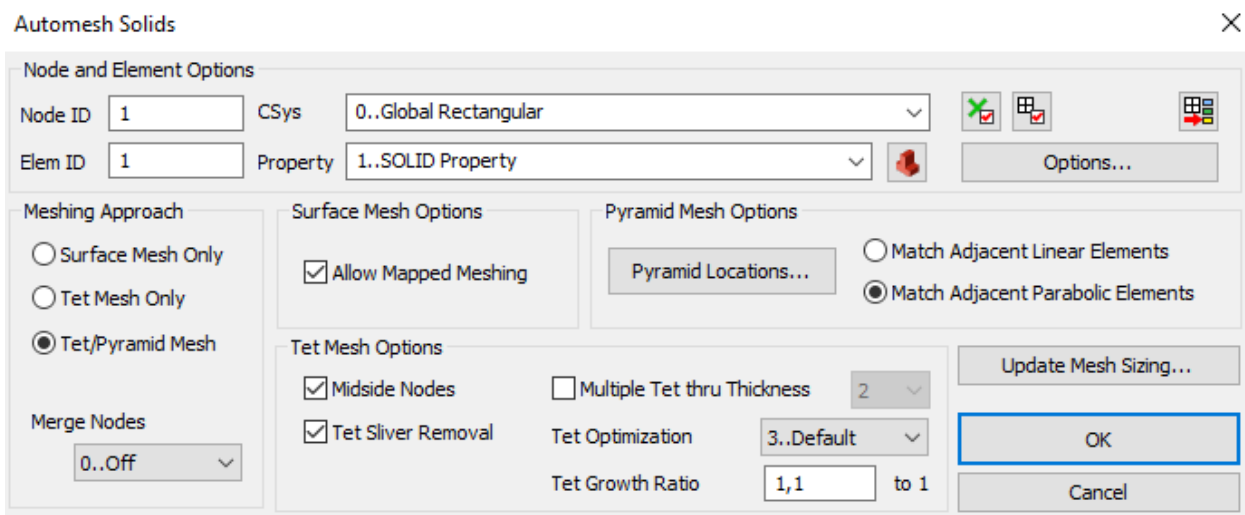
Slika 5.2.7. Odabir komponenti za mesh

Mogu biti odabrane sve komponente ili samo pojedine kojima će veličina konačnih elemenata biti ista. Nakon odabira prikazuje se prozor u kojem se definira veličina elementa uz različite dodatne opcije. Veličina elemenata može uvelike utjecati na točnost i učinkovitost simulacije. Tipično, manja veličina mreže rezultira točnijom simulacijom, ali zahtijeva više računalnih resursa, dok je veća veličina mreže manje precizna, ali zahtijeva manje računalnih resursa. Isprobavanjem različitih veličina elemenata pokazalo se da veličina od 0,005 pruža najbolju ravnotežu između točnosti i računalne učinkovitosti.



Slika 5.2.8. Definiranje gustoće mreže

Drugi korak za izradu mreže je postupak generiranja mreže. Klikom na *Mesh* te odabirom *Geometry* i zatim *Solids* iz padajućeg izbornika otvara se prozor za odabir komponenata kao u prethodnom koraku nakon kojeg slijedi prozor prikazan na slici 5.2.9.



*Slika 5.2.9. Umrežavanje geometrije*

Ovdje se između ostalog odabire vrsta elementa odnosno njemu pridružen materijal koji se želi primijeniti na odabranu komponentu geometrije. Nakon što su svi parametri provjereni i definirani, klikom na OK generira se mreža konačnih elemenata prikazana na slici 5.2.10.

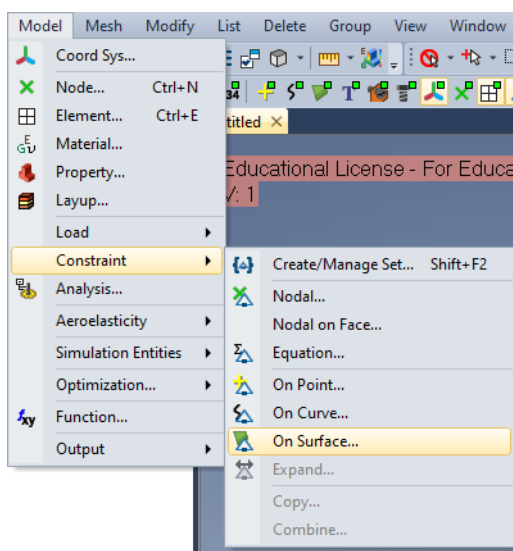


*Slika 5.2.10. Mreža konačnih elemenata*

Nakon što je mreža napravljena potrebno ju je provjeriti radi bilo kakvih pogrešaka ili problema s kvalitetom kao što su loši omjeri, iskrivljeni elementi i slično te ako je potrebno smanjiti ili modificirati mrežu.

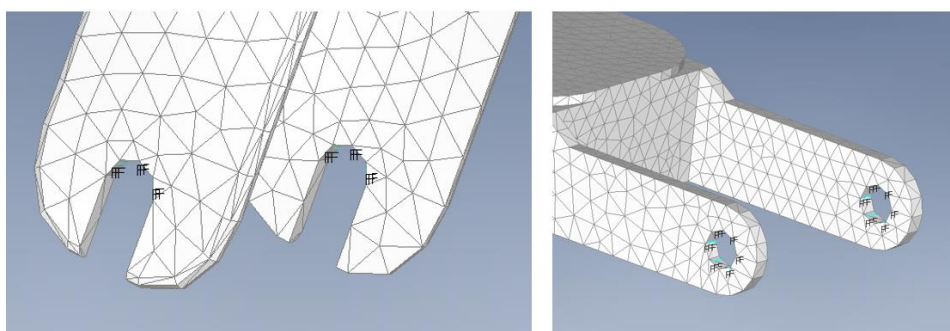
Postavljanje sila i određivanje njihovih mjesta djelovanja ključno je za provođenje analize metodom konačnih elemenata i dimenzioniranje konstrukcije. Također od jednake važnosti je postavljanje rubnih uvjeta gdje će geometrija biti fiksirana.

Za definiranje rubnih uvjeta pomaka koristi se naredba *Constraint* koja se nalazi pod izbornikom Model. U ovom slučaju odabire se On Surface kako bi se odabrale površine koje će biti fiksirane. (Slika 5.2.11.)



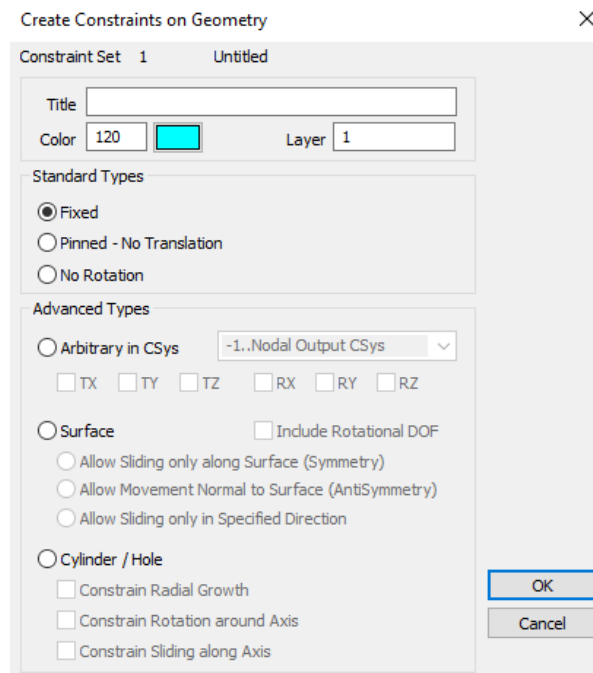
Slika 5.2.11. Odabir ograničenja

Model će biti fiksiran na površinama na koje naliježu osovine kotača. Na modelu se odabire površina koja odgovara navedenim pozicijama kao što je prikazano na slici 5.2.12.



Slika 5.2.12. Postavljanje ograničenja

Nakon što se potvrdi odabir klikom na *OK*, pojavljuje se prozor za definiranje rubnih uvjeta gdje se bira način na koji će se dijelovi fiksirati.



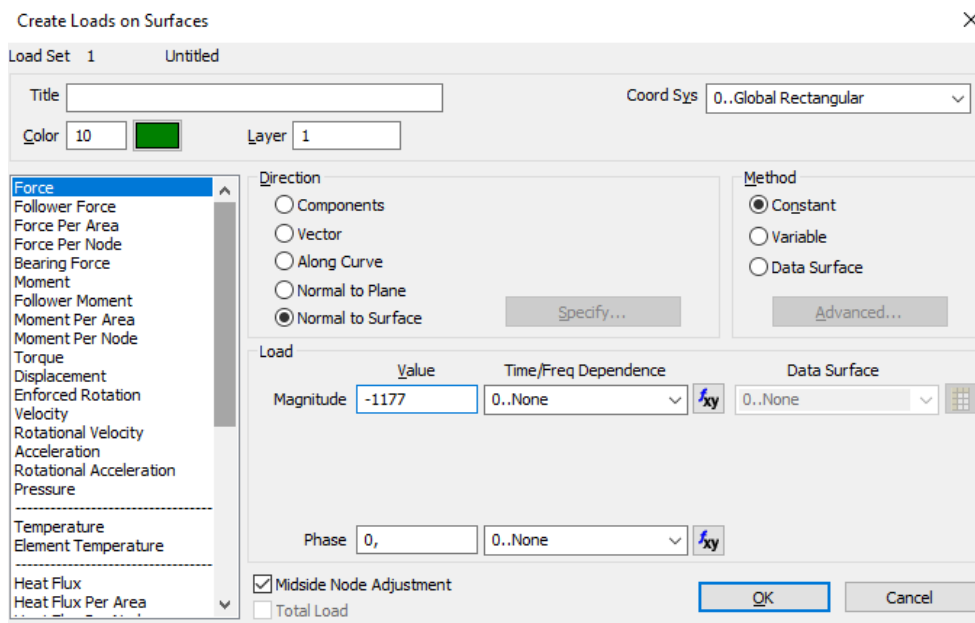
Slika 5.2.13. Definiranje ograničenja

Moguće je ograničiti translaciju, rotaciju ili oboje. U ovom slučaju odabran je *Fixed* način rubnog uvjeta kako bi se potpuno ograničio pomak u svim smjerovima.

Dva glavna izvora opterećenja pri upravljanju električnim romobilom su masa vozača koja djeluje na platformu romobila i sile primijenjene na ručice upravljača. Sila na upravljaču je vrlo mala tijekom vožnje po ravnoj površini, kada vozač samo lagano drži upravljač kako bi održao ravnotežu i usmjerio upravljač. Međutim, te sile se povećavaju tijekom vožnje uzbrdo ili nizbrdo. Pretpostavljeno opterećenje na platformu je masa vozača od 120 kg, a na ručice 150 N.

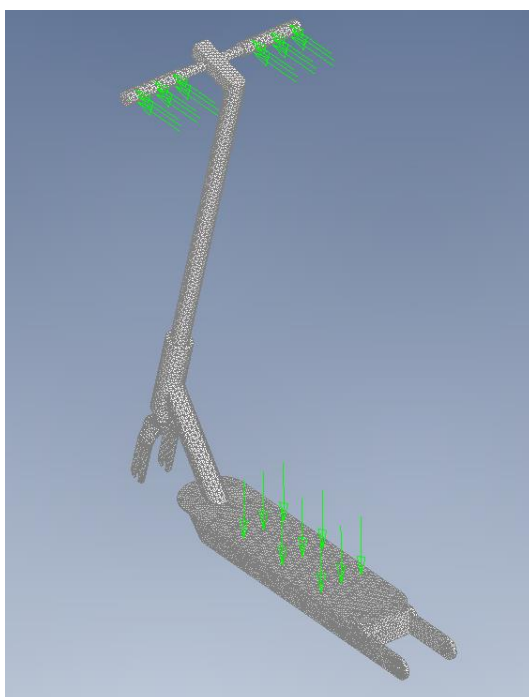
Za određivanje opterećenja potrebno je odabrati *Model*, zatim *Load* i u ovom slučaju *On Surface*. Postupak odabira površina isti je kao i kod ograničavanja pomaka. Odabire se površina platforme gdje vozač stoji za postavljanje prvog opterećenja i površina ručica upravljača za drugo. Nakon odabira dolazi se do prozora prikazanog na slici 5.2.14.





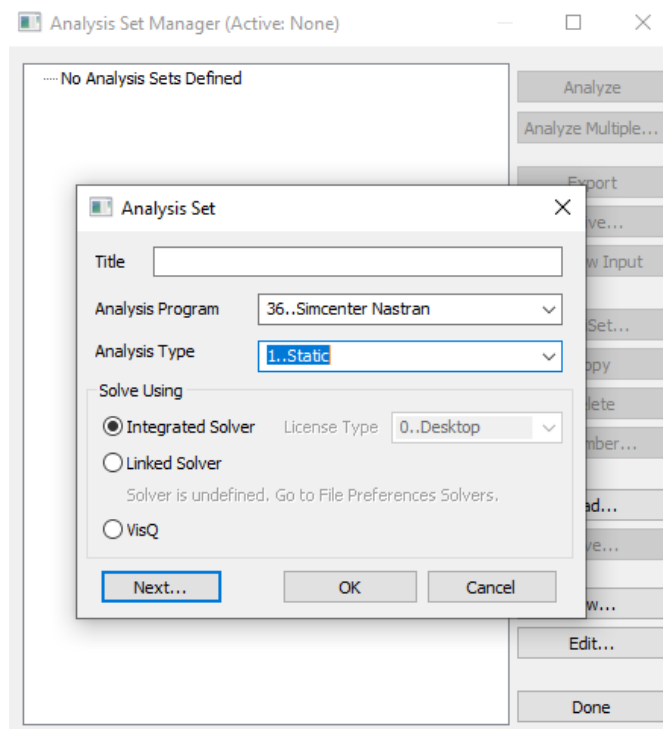
*Slika 5.2.14. Definiranje sile*

Ovdje se odabire vrsta opterećenja uključujući sile, pritisak, moment, gravitaciju itd. Za opterećenje na platformu odabrana je sila od 1177 N koja djeluje okomito na površinu platforme te će biti ravnomjerno raspoređena po toj površini kako bi simulirala opterećenje kada vozač stoji s obje noge na njoj. Sila od 150 N koje djeluje na ručice podijeljena je na pola po svakoj ručici te je usmjerena okomito na ručice u smjeru osi x kako bi simulirala opterećenje koje vozač uzrokuje pri vožnji blagom nizbrdicom. Raspodjela sile prikazana je na slici 5.2.15.



*Slika 5.2.15. Pozicija opterećenja*

Nakon što su definirani materijal, svojstvo elemenata, mreža konačnih elemenata i rubni uvjeti, sljedeći korak je proračun. Potrebno je definirati analizu pomoću naredbe *Analysis* iz izbornika *Model*. Klikom na *New* otvara se prozor za odabir vrste analize te programa za rješavanje. Femap sadrži različite vrste analiza uključujući statičku, dinamičku, toplinsku itd. Za potrebe ovog rada odabrana je statička analiza koristeći *Simcenter Nastran* kao program za analizu. (Slika 5.2.16.)



Slika 5.2.16. Pokretanje analize

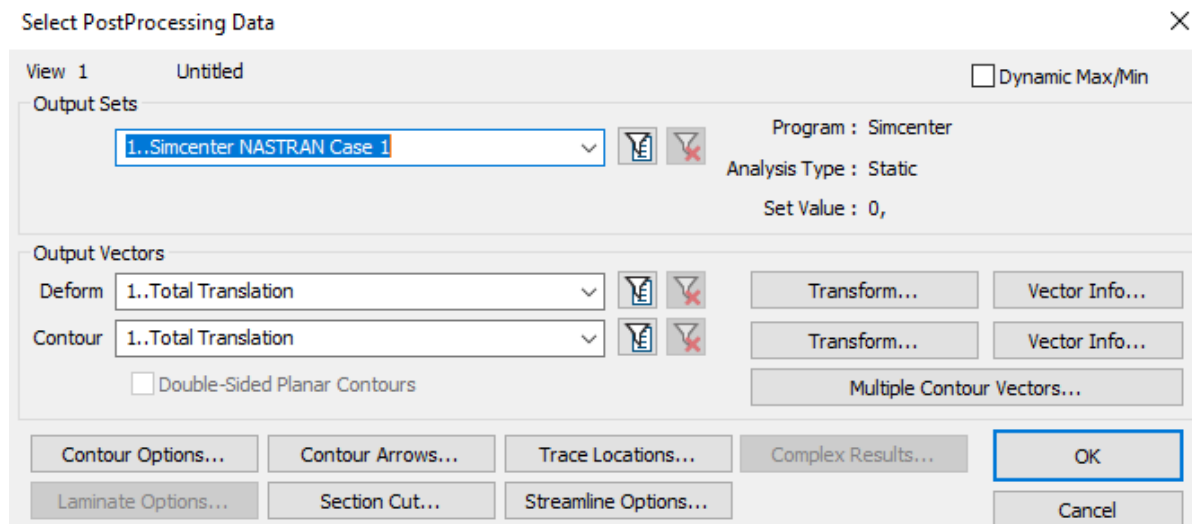
Nakon što su svi potrebni parametri definirani moguće je pokrenuti analizu odabirom naredbe *Analyze*. Nakon završetka analize, rezultati se mogu obraditi i interpretirati kako bi se razumjelo ponašanje strukture u različitim uvjetima.

Softver nudi niz alata za analizu koji korisnicima pomažu u ispitivanju rezultata analize u različitim oblicima. Ovi alati pomažu razumjeti ponašanje sustava ili strukture koja se analizira. Na primjer, mogu prikazati konture pomaka, naprezanja na strukturi ili prikazati rezultate kao animaciju da se prikaže kako struktura ili sustav reagiraju tijekom vremena. Softver također nudi opcije za prikaz rezultata u tabelarnom obliku, uključujući minimalne i maksimalne vrijednosti za različite parametre te mogućnost stvaranja presjeka kroz model kako bi se detaljnije ispitala određena područja, prikazali rezultati na deformiranim ili nedeformiranim oblicima i usporedili rezultati višestrukih analiza.

Ukupni pomak i ukupno naprezanje koje se javljaju na sklopu su promatrani kao rezultati analize.

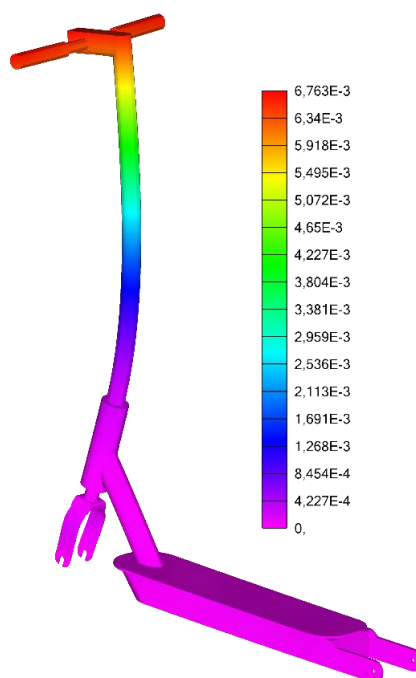
Sklop je promatran kao cjelina kako bi se dobio uvid zadovoljava li konstrukcija postavljene uvjete.

Odabirom opcije *Total translation* u okviru mogućnosti za deformaciju i konturu koje se nalaze u prozoru dostupnom klikom desne tipke miša i odabirom *Post data*.



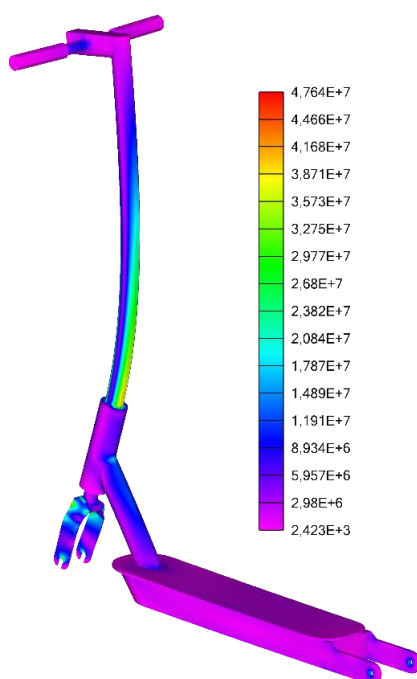
Slika 5.2.17. Obrada podataka

Uočeni najveći pomak prikazan na slici 5.2.18. iznosi 0,0068 mm i nalazi se na području cijevi upravljača. Kako bi se olakšalo prepoznavanje mjesta i načina pomaka, model je prikazan u deformiranom obliku sa 10 puta većom deformacijom od stvarne, što je omogućuje preciznije uočavanje područja na kojima dolazi do pomaka.



Slika 5.2.18. Ukupna translacija romobila

Prikaz ukupnog naprezanja omogućuje odabirom opcije *Solid Von Mises Stress* u istom prozoru kao za ukupan pomak. Na slici 5.2.19. vidljivo je da se najveća naprezanja pojavljuju na području prednje vilice. Maksimalno naprezanje je u granicama dopuštenog koje za aluminij iznosi oko 90 MPa dok za njegove legure može biti i veće.



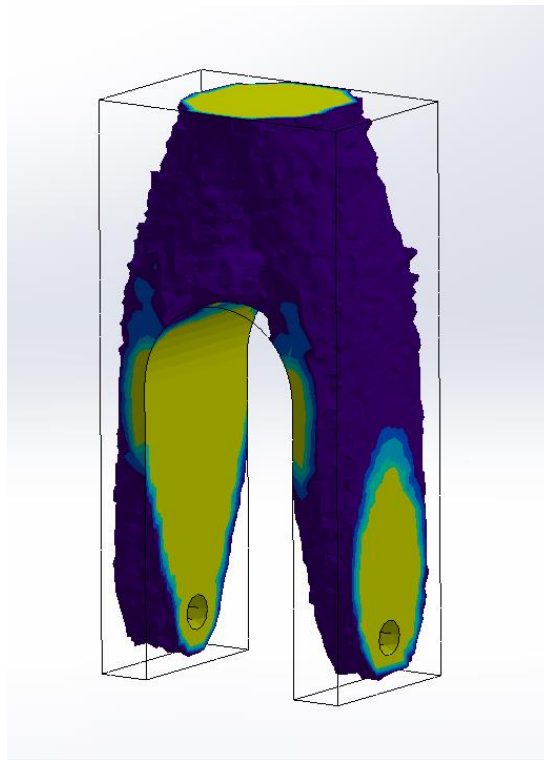
Slika 5.2.19. Ukupno naprezanje romobila

### 5.2.1. Zamjena dijelova

U svrhu provjere primjenjivosti 3D ispisanih polimernih materijala, uzet je primjer prednje vilice i cijevi koja ju povezuje s platformom. Cilj je testirati mogu li se takvi dijelovi koristiti za poboljšanje karakteristika ili popravak električnog romobila. Korištenjem 3D ispisa dijelovi bi postali dostupniji te bi se olakšao proces zamjene oštećenih komponenti i skratilo vrijeme popravka. Tijekom modeliranja geometrije spomenutih dijelova korištena je pomoć topološke optimizacije.

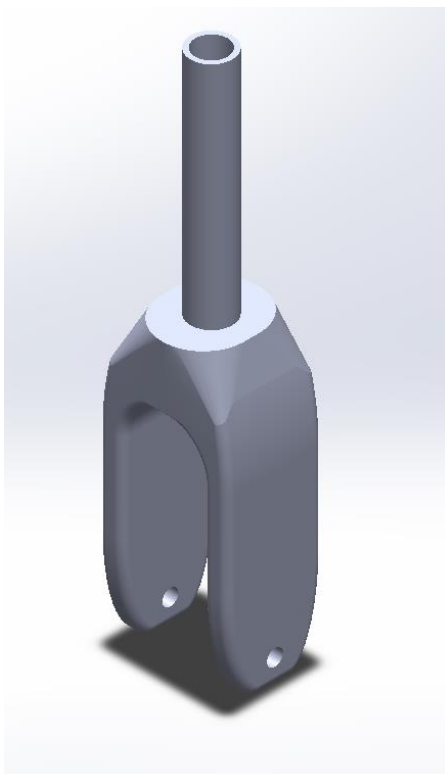
Topološka optimizacija je proces koji uključuje korištenje naprednih algoritama za određivanje optimalnog oblika i distribucije materijala unutar 3D modela. Cilj ovog procesa optimizacije bio je smanjiti količinu materijala i ukupne troškove potrebne za proizvodnju uz zadržavanje iste razine čvrstoće i izdržljivosti kao kod izvornog dizajna. U svrhu optimizacije korišten je dodatak za simulacije u programskom paketu SolidWorks.

Za optimizaciju, programu je zadana početna geometrija s viškom materijala te ograničenja i sile koje će djelovati na dio. Rezultat optimizacije prikazan je na slici 5.2.1.1.



*Slika 5.2.1.1. Rezultat topološke optimizacije vilice*

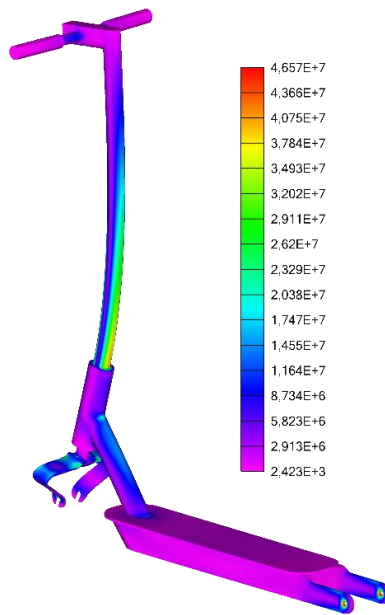
Prema prikazanoj geometriji modelirana je vilica prikazana na slici 5.2.1.2. uz nekoliko manjih promjena kako bi se pojednostavila analiza i ispis dijela.



*Slika 5.2.1.2. Geometrija optimizirane vilice*

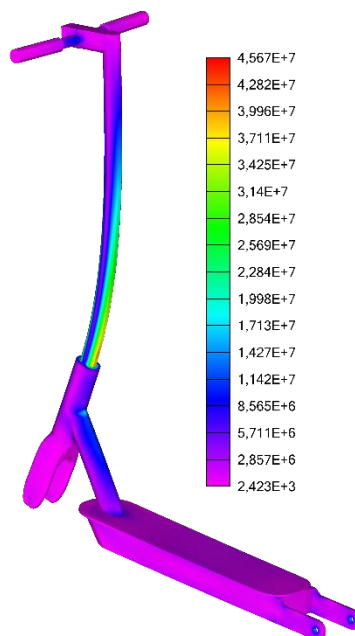
Taj dio biti će zamijenjen u prethodno analiziranom sklopu kako bi se mogao vidjeti utjecaj zamjene na naprezanja i pomak.

Prvo je analiziran slučaj kada bi se originalna vilica izradila od polimernog materijala, u ovom primjeru PLA (Polilaktična kiselina). Na slici 5.2.1.3. je vidljiva veća deformacija vilice uz vrlo sličnu raspodjelu naprezanja. U ovom slučaju došlo bi do loma jer naprezanje prelazi granicu dopuštenog koje za PLA iznosi oko 30 MPa.



*Slika 5.2.1.3. Romobil s originalnom vilicom izrađenom od PLA*

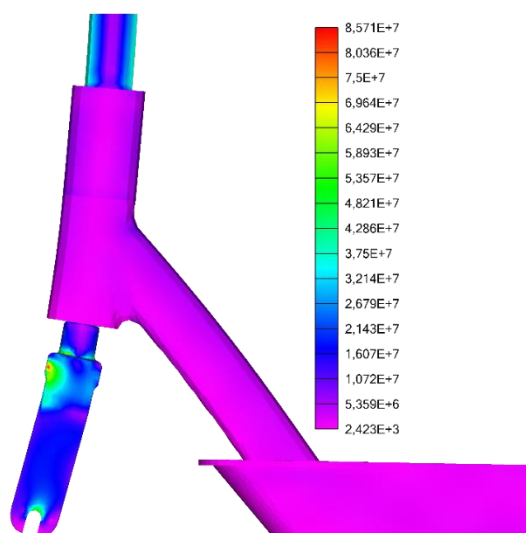
U slučaju zamijene vilice s optimiziranom verzijom, najveća naprezanja u području vilice kreću se u području 10 MPa uz mnogo manju pojavu deformacije te se može zaključiti kako je moguće primijeniti polimerne materijale pri izradi vilice za električni romobil. (Slika 5.2.1.4.)



*Slika 5.2.1.4. Električni romobil s optimiziranom vilicom*

### 5.2.2. Nosač prednje vilice

Za slučaj zamjene nosača koji povezuje prednju vilicu i platformu napravljen je vrlo sličan postupak. Prvo je napravljena simulacija sa slike 5.2.2.1. koja prikazuje istu konfiguraciju konstrukcije samo što je materijal nosača umjesto aluminija, PLA.

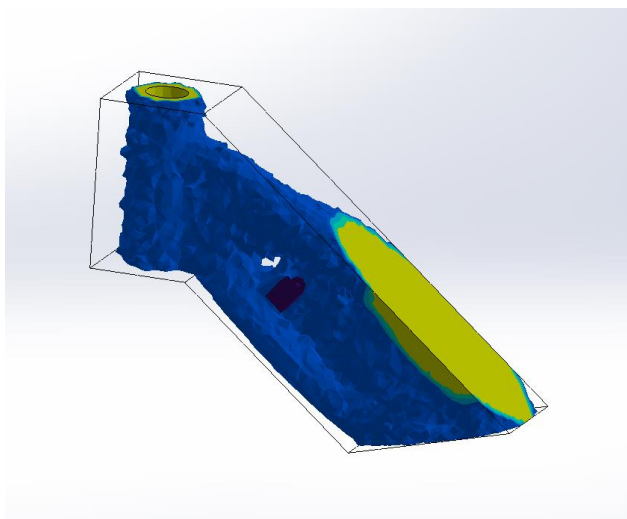


*Slika 5.2.2.1. Nosač izrađen od PLA*

Vidljivo je da vrijednost najvećeg naprezanja 86 MPa što je 2 puta veća vrijednost od početne. Mnogo je veća deformacija na području nosača i najveći pomak iznosi 0,015 mm što je povećanje od 76,5% u odnosu na početnih 0,0085 mm.

Ponovljen je postupak izrade nove geometrije kao i kod vilice. Programu je zadan početni oblik po uzoru na postojeći kako bi kutovi i pozicije na kojima dolazi do spajanja odgovarale originalnoj geometriji. Vodeći se dobivenom geometrijom sa slike 5.2.2.2., izrađena je nova verzija dijela romobila koji spaja platformu s vilicom.



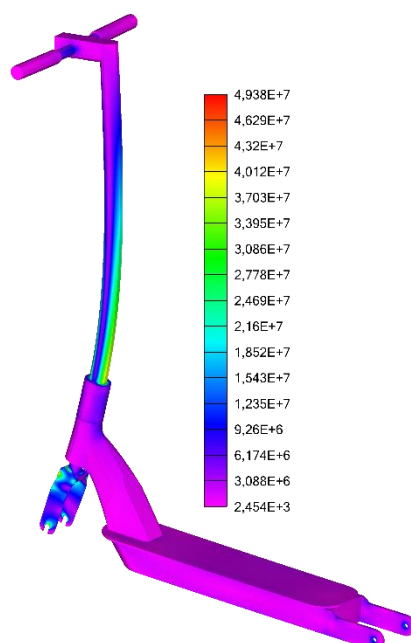


*Slika 5.2.2.2. Topološka optimizacija nosača vilice*



*Slika 5.2.2.3. Model po uzoru na optimizaciju*

Zamjenom navedenog dijela u konstrukciji i ponovnom analizom dobiveni su rezultati na slici 5.2.2.4. koji pokazuju značajnu redukciju najvećeg naprezanja koje iznosi 49 MPa što je 43% manje u odnosu na početnih 86, kao i smanjenje najvećeg pomaka za 40%, s 0,015 na 0,009 mm.



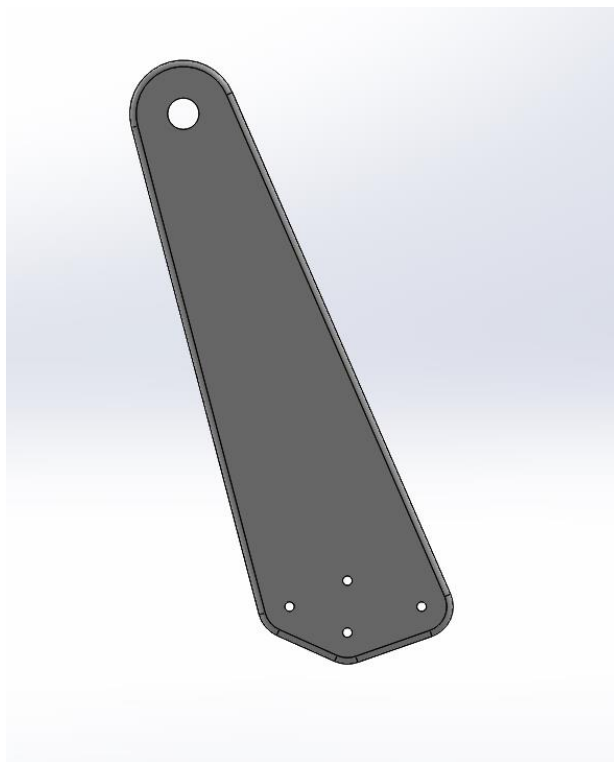
*Slika 5.2.2.4. Romobil s optimiziranim nosačem vilice*

### 5.3. Nastavak za prikolicu

Za 3D ispis, eksperimentalno testiranje i usporedbu s rezultatima analize u Femapu, odabran je nastavak električnog romobila namijenjen prikolicama. Radi se o vrlo korisnom dodatku koji omogućuje priključivanje prikolica za prijevoz ljubimaca, tereta i slično. On je odabran zbog ograničenja u resursima, materijalima i opremi. Nastavak za prikolicu je relativno jednostavan i jeftin dio za eksperimentiranje, što ga čini dobrom polaznom točkom. Testiranjem snage, izdržljivosti i funkcionalnosti jednostavnog i nekritičnog dijela kao što je nastavak za prikolicu, bilo je moguće utvrditi može li se tehnologija 3D ispisa koristiti za izradu funkcionalnih dijelova za romobil. Dodatno, fokusiranje na ovaj dio omogućilo je iterativni proces dizajna. Eksperimentiranjem s različitim dizajnom, materijalima i ispunama, bilo je moguće naučiti što daje dobre rezultate, a što loše, te primijeniti to znanje za poboljšanje dizajna za druge dijelove romobila.

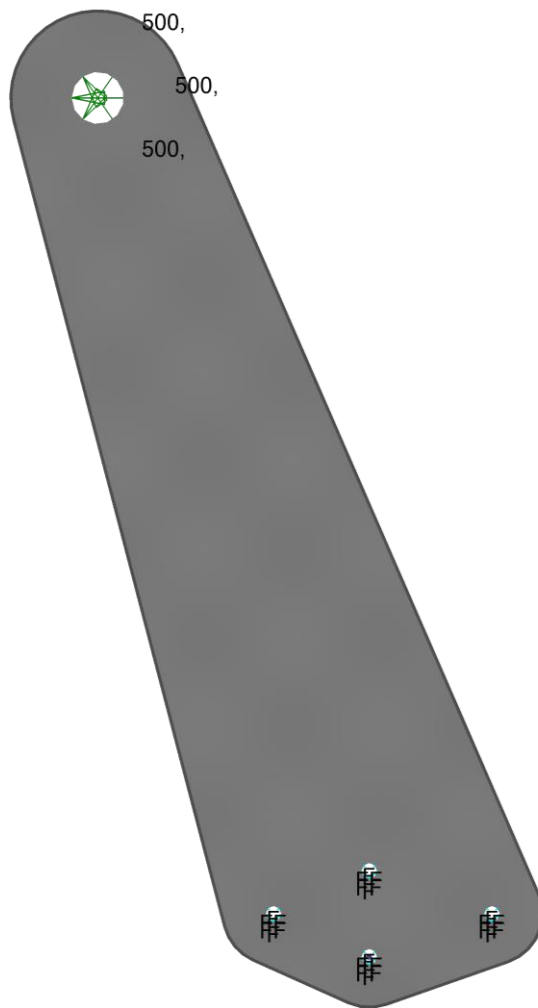
Cilj je bio izraditi dio koji je pogodan za ispis na većini komercijalnih 3D pisaača te može podnijeti zadana opterećenja. Dio je oblikovan s namjerom da se jednostavno pričvrsti vijcima na stražnju vilicu električnog romobila, koristeći postojeće rupe. To je učinjeno kako bi se osigurala kompatibilnost dijela s romobilom i omogućila jednostavna instalacija i uporaba korisnicima. Također predviđena masa prikolice s teretom je maksimalno 50 kg što je u većini slučajeva dovoljno kako se ne bi značajno smanjila autonomija i snaga romobila.

Za fazu modeliranja korišten je programski paket SolidWorks. Jedan od ključnih zahtjeva za dio bio je da mora biti kompatibilan sa širokim rasponom komercijalnih 3D pisača. To je značilo da je potrebno pažljivo razmotriti dimenzije dijela kako bi se osiguralo da se može ispisati na većini pisača. Kako bi dio imao tu mogućnost, dimenzije mu po širini i dužini moraju biti do 220 mm, a po visini ne smiju prelaziti 250 mm. Model prikazan na slici 5.3.1. pažljivo je modeliran kako bi bio funkcionalan i estetski prihvatljiv uz mogućnost jednostavnog laboratorijskog testiranja.



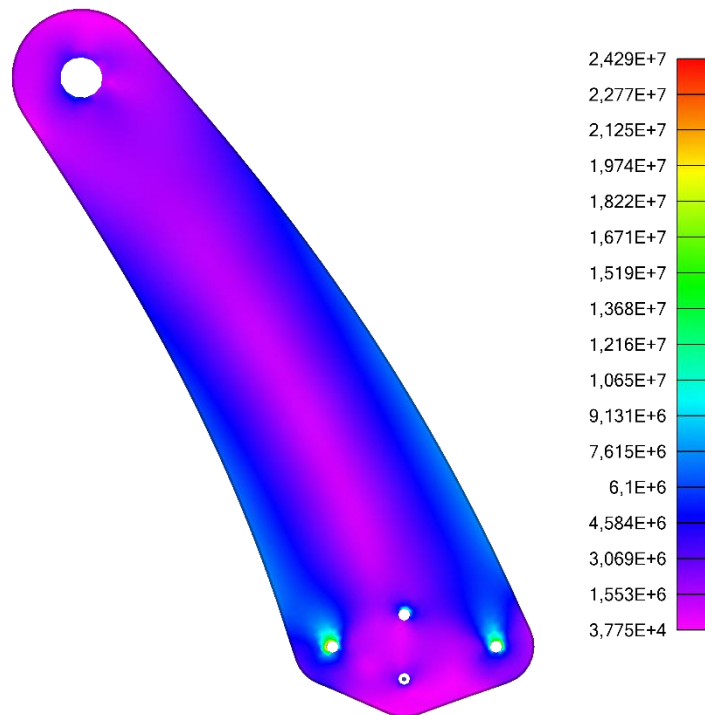
*Slika 5.3.1. Nastavak za prikolicu*

Geometrija modela zatim je uvezena u Femap u svrhu provođenja statičke analize. Ponovljen je prethodno opisan postupak analize. Ograničenja pomaka postavljena su na rupe gdje će nastavak biti fiksiran za vilicu romobila pomoću vijaka. Zadano je opterećenje od 500 N, na provrt koji će povezivati nastavak za prikolicu sa samom prikolicom. Materijal korišten za izradu modela je PLA. Postavljeni rubni uvjeti prikazani su na slici 5.3.2.



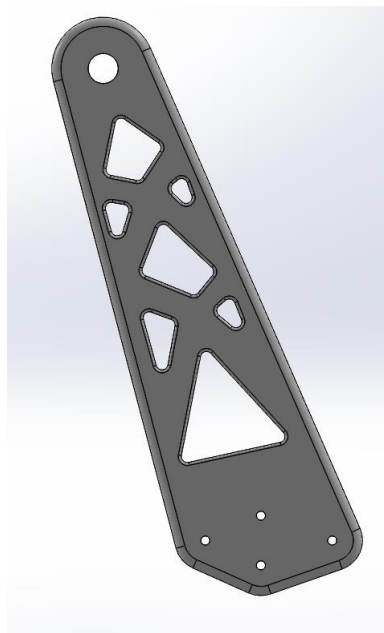
*Slika 5.3.2. Raspodjela ograničenja i opterećenja*

Rezultati analize na slici 5.3.3. prikazuju najveće naprezanje u području provrta za vijke koje iznosi 24 MPa uz najveći pomak od 0,0016 mm što su zadovoljavajući rezultati.



Slika 5.3.3. Rezultati analize originalnog dizajna

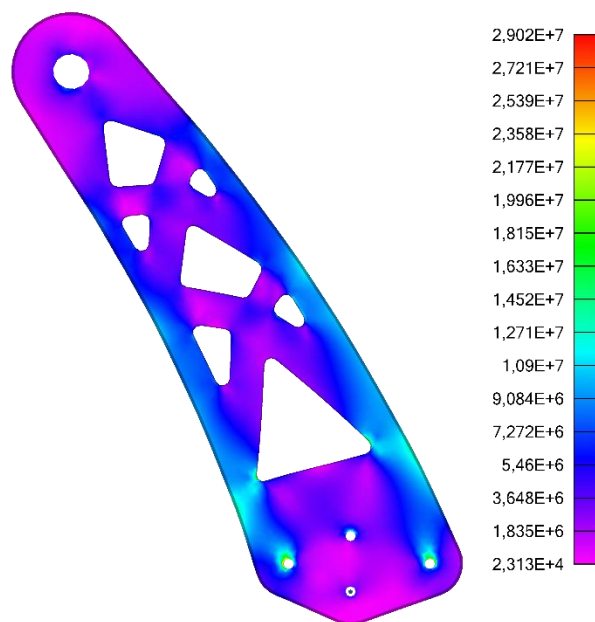
Tijekom procesa modeliranja provedena je topološka optimizacija modela kako bi se dobio što učinkovitiji dio. Nakon nekoliko iteracija simulacija i analize dobiven je optimalan dizajn prikazan na slici 5.3.4. koji zadovoljava potrebne kriterije.



Slika 5.3.4. Optimiziran dizajn nastavka za prikolicu

Postignuta masa je 73 g što je u odnosu na početnih 108 g smanjenje mase od 32,4%.

Kao i kod početne geometrije, provedena je statička analiza s istim rubnim uvjetima, materijalom te istom gustoćom konačnih elemenata kako bi se usporedili rezultati i ocijenila uspješnost optimizacije.



*Slika 5.3.5. Rezultat analize optimizirane geometrije nastavka za prikolicu*

Najveće naprezanje i dalje se nalazi u području provrta za vijke, a ono iznosi 29 MPa što je povećanje od 17%. Veća razlika pojavljuje se kod analize najvećeg pomaka koji u slučaju optimizirane geometrije iznosi 0,0023 mm što je povećanje od 43,8% u odnosu na početnih 0,0016 mm.

#### **5.4. Eksperimentalno ispitivanje**

Sljedeći korak je eksperimentalno ispitivanje kojim će biti provjerena točnost numeričke analize u Femapu. Modelirana geometrija u SolidWorks-u spremljena je u obliku \*.stl datoteke. STL je format datoteke koji pohranjuje informacije o 3D modelu te može biti učitani u slicer, program koji priprema model za 3D ispis „rezanjem“ u slojeve i generiranjem programskog koda kojeg će 3D pisac pratiti. U sliceru je moguće podesiti postavke kao što su visina sloja, gustoća ispune i brzina

ispisa između ostalih ovisno o potrebi kako bi se optimizirala kvaliteta ispisa i osigurao uspješan ispis.

U svrhu ovog testiranja, isprintani su uzorci prikazani na slici 5.4.1. s različitim postotkom ispune, 100% i 25%. Time se želi utvrditi utjecaj postotka ispune na mehanička svojstva dijelova.



*Slika 5.4.1. Ispisani modeli nastavka za prikolicu*

Ovi uzorci su zatim testirani u kidalici kao što je prikazano na slici 5.4.2 kako bi ispitali njihova mehanička svojstva. U ovom slučaju potrebno je saznati maksimalnu silu koju materijal može izdržati kako bi mogli usporediti u numeričkoj analizi.



*Slika 5.4.2. Ispitivanje na kidalici*

Uzorci nakon ispitivanja prikazani su na slici 5.4.3. Kod oba uzorka do loma je došlo na gornjoj polovici komada pri gornjoj čeljusti kidalice gdje dolazi do suženja te je samim time na tom mjestu uzorak manje čvrstoće.





*Slika 5.4.3. Uzorci nakon ispitivanja*

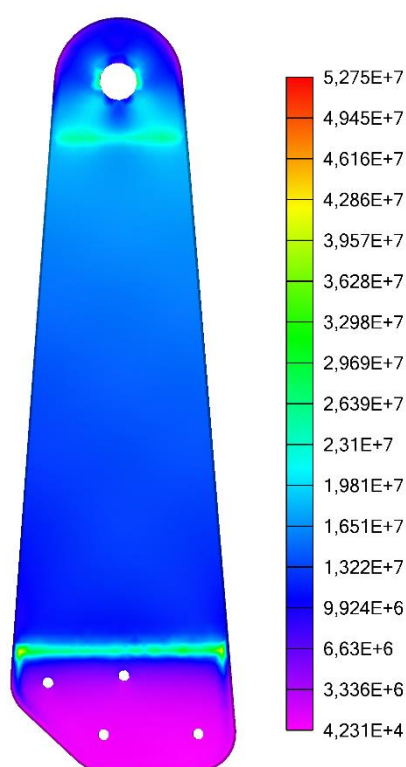
Dobivene sile i pomaci za običan i optimiziran uzorak prikazani su u tablici 5.4.1.

Ovdje je vidljivo kako je kod optimiziranog dijela sa smanjenom masom iznos maksimalne sile koju može podnijeti 33.33% manji u odnosu na običan uzorak. Tako da se smanjenjem mase od 32.4% dobiva i relativno isti postotak smanjenja čvrstoće. To sugerira da je postojao kompromis između mase i čvrstoće u ovom slučaju, te da optimiziranje oblika uzorka nije značajno poboljšalo njegovu izvedbu.

Tablica 5.4.1 Dobivene sile i pomaci

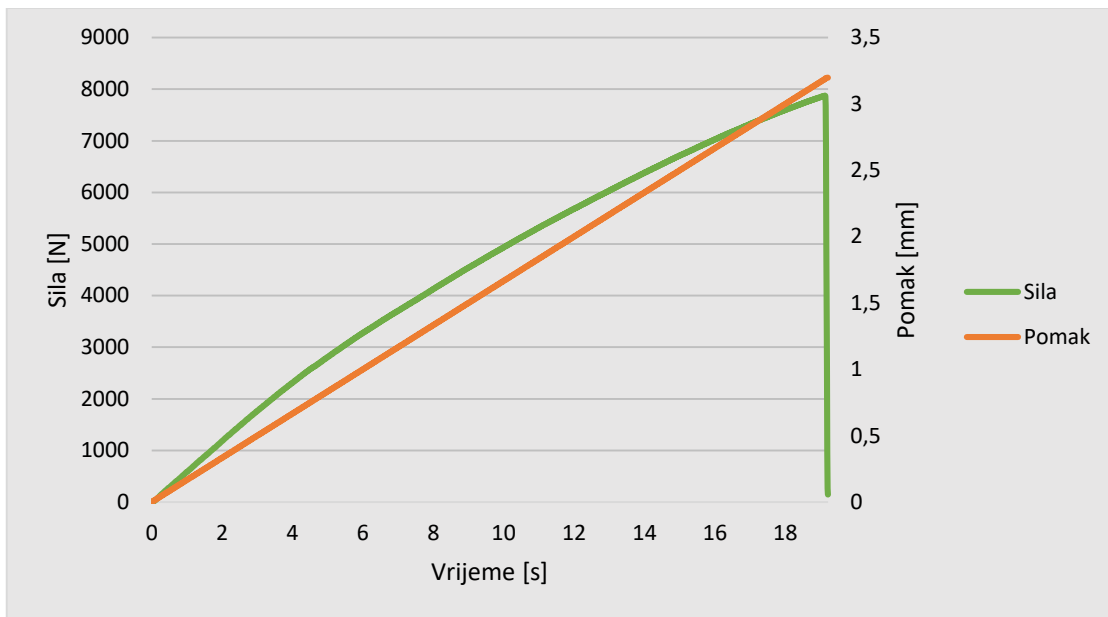
	Uzorak			
	Običan		Optimizirani	
Ispuna:	F(N)	Pomak (mm)	F(N)	Pomak (mm)
100%	7874	3,188	5328	2,94
25%	4061	3,48	2319	2,49

Provođenjem numeričke analize običnog dijela s postavljenom silom u iznosu od 7874 N u smjeru djelovanja kao na kidalici kao što je izmjereno eksperimentalnim ispitivanjem dobiva se rezultat prikazan na slici 5.4.4.



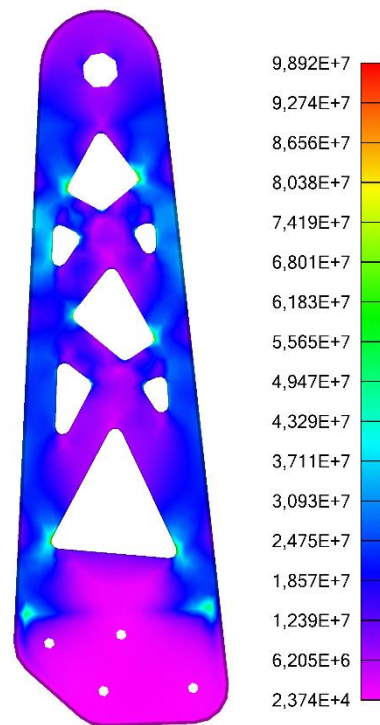
Slika 5.4.4. Numerička analiza eksperimenta običnog uzorka

Ovdje je vidljivo kako su kritične točke na mjestu pored stezanja kao i u području gdje je u stvarnom slučaju i došlo do loma. Također vrijednost vlačne čvrstoće je 13.09% veća u odnosu na propisanu za taj materijal. Odstupanje može nastupiti zbog greške u mjernoj opremi, umrežavanju, programu za numeričku analizu i raznih drugih faktora. Odnos sila i pomaka je proporcionalan što se vidi na grafu koji je relativno linearan (slika 5.4.5.).



Slika 5.4.5. Graf sile i pomaka kroz vrijeme

Kod numeričke analize optimiziranog dijela prikazanog na slici 5.4.6. do najvećeg napreznja dolazi na mjestu loma eksperimentalnog uzorka. Ovo ukazuje na to da je pomoću programa za numeričku analizu moguće s velikom sigurnošću predvidjeti kritične točke na dijelovima.



Slika 5.4.6. Numerička analiza esperimenta optimiziranog uzorka

Kada je utvrđeno da se rezultati numeričke i eksperimentalne analize podudaraju, ponovljena je analiza iz poglavlja 5.3. s ciljem dobivanja maksimalne sile koju komad može podnijeti. Kroz nekoliko iteracija analize utvrđeno je da običan komad može podnijeti 950 N odnosno 800 N za optimiziranu verziju. Tako da se sa sigurnošću može zaključiti da će nastavak za prikolicu sa 100% ispunje podnijeti opterećenje prikolice od 50 kg.

## 6. ZAKLJUČAK

Električni romobili su osobna prijevozna sredstva koja koriste električnu energiju kao primarni izvor energije. Njihova upotreba postaje sve popularnija zbog energetske učinkovitosti, ekološke prihvatljivosti i ekonomičnosti. Jedna od ključnih tehnologija koje je moguće koristiti u proizvodnji električnih romobila je 3D ispis. To je revolucionarna tehnologija koja je promijenila inženjersku industriju, omogućujući inženjerima da proizvode precizne i složene dizajne koje tradicionalne metode proizvodnje ne mogu postići. U ovom radu naglasak je stavljen na proces 3D ispisa, ekstrudiranje materijala zbog njegove velike raširenosti.

Numerička analiza je ključni segment inženjerstva koji igra važnu ulogu u osiguravanju sigurnosti i pouzdanosti konstrukcija. Femap je moćan softver za numeričku analizu koji omogućuje inženjerima da analiziraju složene dizajne, simuliraju uvjete u stvarnom svijetu i predvide potencijalne kritične točke konstrukcija. Primjenom ove tehnologije zajedno s 3D ispisom moguće je napraviti kompleksne funkcionalne dijelove uz smanjenje troškova proizvodnje.

U ovom radu izrađen je model električnog romobila Xiaomi korištenjem softvera SolidWorks. Model je potom podvrgnut numeričkoj analizi pomoću Femapa kako bi se procijenio strukturni integritet dizajna. Analiza je otkrila područja koja je potrebno poboljšati kako bi se osigurala sigurnost i pouzdanost vozila. Također provedena je numerička analiza i optimizacija prednje vilice te spojne cijevi vilice i podloge romobila izrađenih od 3D pisanih materijala kako bi se utvrdila njihova funkcionalnost. Rezultati numeričke analize pokazali su da su dijelovi strukturno čvrsti i mogu izdržati naprezanja povezana s njihovom namjenom.

U svrhu testiranja rezultata dobivenih numeričkom analizom modeliran je nastavak za prikolicu električnog romobila koji je zatim izrađen na 3D pisaču i vlačno testiran na kidalici. Izrađene su 2 varijante nastavka za prikolicu. Originalna verzija modelirana u CAD programu i njena optimizirana inačica dobivena je topološkom optimizacijom. Obje su izrađene sa 100 i 25% ispune. Pokazalo se da varijante sa 100% ispune mogu podnijeti zadano opterećenje dok one s 25% više ne zadovoljavaju postavljene zahtjeve. Usporedbom rezultata vlačnog testa na kidalici i numeričke analize donesen je zaključak da se numeričkom analizom može s velikom sigurnošću predvidjeti mjesta na kojima bi moglo doći do loma konstrukcije, što može pomoći inženjerima da unaprijede dizajn i izbjegnu potencijalne probleme u konstrukciji. Osim toga, pokazalo se da 3D pisani dijelovi mogu biti pouzdana alternativa tradicionalnim dijelovima u konstrukciji električnih romobila. Kao takvi, 3D pisani dijelovi mogu pružiti razne prednosti, uključujući bržu izradu prototipova i manje troškove proizvodnje.

## LITERATURA

- [1] S Interneta, <https://www.electricscooterinsider.com/electric-scooters/reviews/segway-ninebot-max-review/>, 27. veljače 2023.
- [2] Novović, R.: „About electric scooters (kick scooters)“, s Interneta, <https://bike.bikegremlin.com/8479/electric-scooters/#1>, 11. veljače 2023.
- [3] Mihaylova, N.: „How Hard Is It To Make Electric Scooters Lightweight?“, <https://unagiscooters.com/eu/scooter-articles/how-hard-it-is-to-make-e-scooters-lightweight/>, 19. veljače 2023.
- [4] S Interneta, <https://apolloscooters.co/blogs/news/electric-scooter-history-how-it-all-started>, 27. veljače 2023.
- [5] S Interneta, <https://electric-scooter.guide/guides/definitive-guide-electric-scooters/>, 11. veljače 2023.
- [6] Khande, M., i dr.: „Design and Development of Electric scooter“, International Research Journal of Engineering and Technology, svibanj 2020.
- [7] Baker, B.: „What are 18650 batteries?“, s Interneta, <https://www.fogstar.co.uk/blogs/fogstar-blog/what-are-18650-batteries>, 27. veljače 2023.
- [8] S Interneta, <https://www.nkon.nl/de/blog/18650battery/>, 27. veljače 2023.
- [9] S Interneta, <https://electric-scooter.guide/guides/electric-scooter-batteries/>, 11. veljače 2023.
- [10] S Interneta, <https://escooternerds.com/how-do-electric-scooters-work/>, 27. veljače 2023.
- [11] S Interneta, <https://fluidfreeride.com/products/apollo-phantom>, 27. veljače 2023.
- [12] Trajkovski, M.: „Solid vs Pneumatic Tires for your Electric Scooter – When To Choose Each?“, s Interneta, <https://escooternerds.com/solid-vs-pneumatic-tires-electric-scooter/>, 27. veljače 2023.
- [13] S Interneta, <https://escooternerds.com/electric-scooter-motors/>, 19. veljače 2023.
- [14] S Interneta, <https://swagtron.com/news/how-do-electric-bikes-and-electric-scooters-work/>, 27. veljače 2023.
- [15] S Interneta, <https://www.mechstudies.com/electric-scooter-definition-parts-working-battery-charging/>, 27. veljače 2023.
- [16] S Interneta, <https://www.omc-stepperonline.com/de/support/was-ist-ein-burstenloser-gleichstrommotor-und-wie-funktioniert-er>, 19. veljače 2023.
- [17] S Interneta, <https://simplymoving.com.ph/blog/parts-of-an-electric-scooter/>, 27. veljače 2023.
- [18] Heath, J.: „How To Fold An Electric Scooter? Step-By-Step Guide“, s Interneta, <https://electricwheelers.com/how-to-fold-an-electric-scooter/>, 27. veljače 2023.
- [19] S Interneta, <https://3dprinting.com/what-is-3d-printing/>, 27. veljače 2023.
- [20] S Interneta, <https://www.rcoeng.com/blog/the-coolest-products-made-by-low-volume-production-in-2021>, 11. veljače 2023.
- [21] Hoffman, T.: „3D Printing: What You Need to Know“, s Interneta, <https://www.pcmag.com/news/3d-printing-what-you-need-to-know>, 27. veljače 2023.
- [22] S Interneta, <https://engineeringproductdesign.com/knowledge-base/vat-photopolymerization/>, 27. veljače 2023.
- [23] S Interneta, <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/vat-photopolymerisation/>, 27. veljače 2023.
- [24] S Interneta, <https://www.hubs.com/guides/3d-printing/>, 27. veljače 2023.
- [25] S Interneta, <https://make.3dexperience.3ds.com/processes/3D-printing>, 27. veljače 2023.

- [26] S Interneta, <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-3d-printing>, 27. veljače 2023.
- [27] S Interneta, <https://all3dp.com/1/types-of-3d-printers-3d-printing-technology/>, 27. veljače 2023.
- [28] S Interneta, <https://3dprintingindustry.com/3d-printing-basics-free-beginners-guide>, 27. veljače 2023.
- [29] S Interneta, <https://www.creality.com/products/ender-3-3d-printer>, 27. veljače 2023.
- [30] Zhang, X., Liou, F.: „Additive Manufacturing“, Elsevier, 2021.
- [31] Molitch-Hou, M., i dr.: „Additive Manufacturing“, Elsevier, 2018.
- [32] S Interneta, <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/>, 27. veljače 2023.
- [33] Casini, M.: „Construction 4.0“, Elsevier, 2022.
- [34] Pouzada, A.: „Design and Manufacturing of Plastics Products“, Elsevier, 2021.
- [35] Sing, S., i dr.: „Rapid Prototyping of Biomaterials (Second Edition)“, Elsevier, 2020.
- [36] Meštrović, M.: „Metoda konačnih elemenata“, Zagreb, 2020.
- [37] „Historijski razvoj, principi i primjena metoda konačnih elemenata“, S Interneta, <https://unze.ba/am/mkpr/MKE%201.pdf>, 29. veljače 2023.
- [38] Brnić J., Čanađija M.: „Analiza deformabilnih tijela metodom konačnih elemenata“, Tehnički fakultet Sveučilišta u Rijeci, Rijeka, 2009.
- [39] Salmeron-Sanchez, M.: „Volume Mesh Generation and Finite Element Analysis of Trabecular Bone Magnetic Resonance Images“, s Interneta, [https://www.researchgate.net/figure/Most-common-solid-elements-used-in-Finite-Element-volume-meshing\\_fig1\\_5845286](https://www.researchgate.net/figure/Most-common-solid-elements-used-in-Finite-Element-volume-meshing_fig1_5845286), 27. veljače 2023.
- [40] S Interneta, <https://www.priceboon.com/product/xiaomi-electric-scooter-pro2/>, 27. veljače 2023.

## POPIS SLIKA

Slika 2.1. Električni romobil [1].....	2
Slika 2.1.1. Patent za vozilo s vlastitim pogonom [4].....	4
Slika 2.2.1. Konstrukcija električnog romobila.....	6
Slika 2.3.1. Baterija električnog romobila [7].....	7
Slika 2.3.2. 18650 litij-ionska ćelija [9].....	8
Slika 2.4.1. Disk kočnice električnog romobila [11].....	9
Slika 2.5.1. Pneumatske (lijevo) i pune (desno) gume [12].....	10
Slika 2.6.1. Motor integriran u kotač [14].....	11
Slika 2.7.1. Istosmjerni motor bez četkica [16].....	12
Slika 2.7.2. Shema istosmjernog motora bez četkica [16].....	12
Slika 2.8.1. Kontroler motora [5].....	14
Slika 2.10.1. Upravljač [17].....	15
Slika 2.11.1. Stup upravljača sa sklopivim mehanizmom [18].....	16
Slika 3.1. Proizvodi izrađeni 3D ispisom [20].....	18
Slika 3.2. Model podijeljen na slojeve.....	19
Slika 3.1.1. Postupak fotopolimerizacije [23].....	21
Slika 3.2.1. Proces raspršivanja materijala [25].....	22
Slika 3.3.1. Proces ekstrudiranja materijala [25].....	23
Slika 3.3.2. Ender 3 3D pisač [29].....	24
Slika 3.4.1. Proces laserskog taljenja [31].....	25
Slika 3.4.2. EBM proces [31].....	26
Slika 3.6.1. Laminiranje [30].....	27
Slika 3.7.1. Taloženje usmjerenim izvorom energije [31].....	29
Slika 4.1. Diskretizacija na konačne elemente [37].....	30
Slika 4.2.1. Dvodimenzionalni elementi [37].....	34
Slika 4.3.1. Trodimenzionalni elementi [39].....	35
Slika 5.1. Xiaomi Mi Electric Scooter pro 2 [40].....	38
Slika 5.1.1. Xiaomi Mi Electric Scooter pro 2 model.....	39
Slika 5.1.2. Osnovne dimenzije električnog romobila.....	40
Slika 5.2.1. Početno sučelje programa Femap.....	41
Slika 5.2.2. Uvoz geometrije.....	42
Slika 5.2.3. Uvezeni model.....	42



Slika 5.2.4. Odabir materijala.....	43
Slika 5.2.5. Definiranje materijala .....	43
Slika 5.2.6. Odabir svojstva .....	44
Slika 5.2.7. Odabir komponenti za mesh .....	45
Slika 5.2.8. Definiranje gustoće mreže .....	45
Slika 5.2.9. Umrežavanje geometrije .....	46
Slika 5.2.10. Mreža konačnih elemenata.....	46
Slika 5.2.11. Odabir ograničenja.....	47
Slika 5.2.12. Postavljanje ograničenja .....	47
Slika 5.2.13. Definiranje ograničenja.....	48
Slika 5.2.14. Definiranje sile.....	49
Slika 5.2.15. Pozicija opterećenja .....	49
Slika 5.2.16. Pokretanje analize .....	50
Slika 5.2.17. Obrada podataka .....	51
Slika 5.2.18. Ukupna translacija romobila .....	52
Slika 5.2.19. Ukupno naprezanje romobila .....	52
Slika 5.2.1.1. Rezultat topološke optimizacije vilice .....	53
Slika 5.2.1.2. Geometrija optimizirane vilice.....	54
Slika 5.2.1.3. Romobil s originalnom vilicom izrađenom od PLA.....	55
Slika 5.2.1.4. Električni romobil s optimiziranom vilicom.....	55
Slika 5.2.2.1. Nosač izrađen od PLA .....	56
Slika 5.2.2.2. Topološka optimizacija nosača vilice .....	57
Slika 5.2.2.3. Model po uzoru na optimizaciju .....	57
Slika 5.2.2.4. Romobil s optimiziranim nosačem vilice.....	58
Slika 5.3.1. Nastavak za prikolicu.....	59
Slika 5.3.2. Raspodjela ograničenja i opterećenja.....	60
Slika 5.3.3. Rezultati analize originalnog dizajna .....	61
Slika 5.3.4. Optimiziran dizajn nastavka za prikolicu.....	61
Slika 5.3.5. Rezultat analize optimizirane geometrije nastavka za prikolicu.....	62
Slika 5.4.1. Ispisani modeli nastavka za prikolicu .....	63
Slika 5.4.2. Ispitivanje na kidalici .....	64
Slika 5.4.3. Uzorci nakon ispitivanja .....	65
Slika 5.4.4. Numerička analiza eksperimenta običnog uzorka .....	66
Slika 5.4.5. Graf sile i pomaka kroz vrijeme.....	67
Slika 5.4.6. Numerička analiza esperimenta optimiziranog uzorka.....	67

## POPIS TABLICA

Tablica 5.2.1. Svojstva materijala .....	44
Tablica 5.4.1 Dobivene sile i pomaci .....	66

## SAŽETAK

U ovom diplomskom radu objašnjeno je korištenje numeričkih metoda za ispitivanje 3D ispisanih polimernih dijelova u konstrukciji električnih romobila. Opisana je metoda konačnih elemenata kao numerička tehnika koja se koristi za simulaciju ponašanja konstrukcija u različitim uvjetima te kako ona može pomoći inženjerima da optimiziraju dizajn i materijale konstrukcije. Zatim je objašnjena konstrukcija električnih romobila i njegovih dijelova obično izrađenih od aluminija. Prikazane su prednosti primjene tehnologije 3D ispisa za proizvodnju ovih dijelova, kao što su smanjeno vrijeme isporuke, otpad i troškove. Također su detaljno opisani procesi 3D ispisa, uključujući ekstrudiranje materijala korišteno u praktičnom dijelu rada.

U praktičnom dijelu napravljene su simulacije električnog romobila u FEM softveru pod nazivom Femap, koji je omogućio predviđanje kako će se romobil ponašati pod različitim uvjetima. Napravljen je 3D ispis 2 verzije nastavka romobila za prikolicu na kojima su provedeni laboratorijski eksperimenti koji su zatim uspoređeni sa simulacijama u Femap-u. Cilj rada je pokazati potencijal tehnologije 3D ispisa u proizvodnji dijelova za električne romobile.

Ključne riječi: električni romobil, 3D ispis, metoda konačnih elemenata, polimer, simulacija, optimizacija, numerička metoda

## **SUMMARY**

In this thesis, the use of numerical methods for testing 3D printed polymer parts in the construction of electric kick scooters is explained. The finite element method is described as a numerical technique used for simulating the behavior of structures in different conditions, and how it can help engineers optimize the design and materials of the construction. The construction of electric kick scooters and its parts, commonly made of aluminum, is then explained. The advantages of using 3D printing technology for the production of these parts are presented, such as reduced delivery time, waste, and costs. The 3D printing processes are also detailed, including the material extrusion used in the practical part of the thesis.

In the practical part, simulations of the electric kick scooter were performed using the FEM software called Femap, which allowed predicting how the kick scooter would behave under different conditions. Two versions of the kick scooter trailer extension were 3D printed, and laboratory experiments were conducted on them, which were then compared to simulations in Femap. The goal of the thesis is to demonstrate the potential of 3D printing technology in the production of parts for electric kick scooters.

Keywords: electric scooter, 3D printing, finite element method, polymer, simulation, optimization, numerical method