

# Optimizacija dizajna pedale kočnice korištenjem softvera za 3D modeliranje i simulacije naprezanja

---

**Domić, Ivan**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2023**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Pula / Sveučilište Jurja Dobrile u Puli**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:137:103476>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-24**



*Repository / Repozitorij:*

[Digital Repository Juraj Dobrila University of Pula](#)



Sveučilište Jurja Dobrile u Puli  
Tehnički fakultet u Puli



**Ivan Domić**

**Optimizacija dizajna pedale kočnice korištenjem softvera za 3D modeliranje i  
simulacije naprezanja**

Diplomski rad

Pula, rujan, 2023.

Sveučilište Jurja Dobrile u Puli  
Tehnički fakultet u Puli



**Ivan Domić**

**Optimizacija dizajna pedale kočnice korištenjem softvera za 3D modeliranje i  
simulacije naprezanja**

Diplomski rad

**JMB: 0069080456, redovan student**

**Studijski smjer: Konstruiranje i mehatronika**

**Predmet: Mehatronika**

**Znanstveno područje: Tehničke znanosti**

**Znanstveno polje: Strojarsvo**

**Znanstvena grana: Opće strojarstvo (konstrukcije)**

**Mentor: doc.dr.sc. Davor Stanić v. pred**

Pula, rujana, 2023.

## **ZAHVALA**

*Zahvaljujem se svome mentoru, doc.dr.sc. Davoru Staniću, na ukazanom povjerenju i pomoći prilikom izrade ovog diplomskog rada. Također se zahvaljujem svim nastavnicima i osoblju Tehničkog fakulteta u Puli na prenesenom znanju i ugodnom studiranju. Zahvaljujem se i svojoj obitelji na nesebičnoj potpori i vjeri u mene tijekom studiranja.*

doc.dr.sc. Davor Stanić v. pred.  
(Ime i prezime nastavnika)

Mehatronika  
(Predmet)



Tehnički fakultet u Puli

**Sveučilište Jurja Dobrile u Puli**  
**TEHNIČKI FAKULTET U PULI**  
**ZADATAK TEME DIPLOMSKOG RADA**

**Pristupniku/ci**

Ivan Domić

**MBS:** 0069080456

Studentu/ci stručnog studija Tehničkog fakulteta u Puli izdaje se zadatak za završni rad – tema diplomskog rada pod nazivom:

**Optimizacija dizajna pedale kočnice korištenjem softvera za 3D modeliranje i simulacije naprezanja**

Sadržaj zadatka: Upotrebom namjenskog softvera kroz izradu 3D modela pedale kočnice i optimizaciju oblika pokazati uspješnost takvoga načina rada i ostvarene prednosti. Istražiti i izvesti optimalan dizajn pedale i simulirati potrebna opterećenja kroz iteracije u razvoju. Odabrati zadovoljavajući materijal na bazi polimera i implementirati ga u model. Dobivene rezultate simulacija naprezanja prikazati u tablicama i donijeti zaključak.

Rad obraditi sukladno odredbama Pravilnika o diplomskom radu Sveučilišta u Puli.

**Strojarstvo redovni**

Datum: 10.09.2023.

Potpis nastavnika



## IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

Ja, dolje potpisani Ivan Domić, kandidat za magistra inženjera strojarstva ovime izjavljujem da je ovaj Diplomski rad rezultat isključivo mogega vlastitog rada, da se temelji na mojim istraživanjima te da se oslanja na objavljenu literaturu kao što to pokazuju korištene bilješke i bibliografija. Izjavljujem da niti jedan dio Diplomskog rada nije napisan na nedozvoljeni način, odnosno da je prepisan iz kojega necitiranog rada, te da ikoji dio rada krši bilo čija autorska prava. Izjavljujem, također, da nijedan dio rada nije iskorišten za koji drugi rad pri bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili radnoj ustanovi.

Student

U Puli, 07.09.2023.



## IZJAVA O KORIŠTENJU AUTORSKOG DJELA

Ja, Ivan Domić dajem odobrenje Sveučilištu Jurja Dobrile u Puli, kao nositelju prava iskorištavanja, da moj diplomski rad pod nazivom Optimizacija dizajna pedale kočnice korištenjem softvera za 3D modeliranje i simulacije naprezanja

koristi na način da gore navedeno autorsko djelo, kao cjeloviti tekst trajno objavi u javnoj internetskoj bazi Sveučilišne knjižnice Sveučilišta Jurja Dobrile u Puli te kopira u javnu internetsku bazu završnih radova Nacionalne i sveučilišne knjižnice (stavljanje na raspolaganje javnosti), sve u skladu s Zakonom o autorskom pravu i drugim srodnim pravima i dobrom akademskom praksom, a radi promicanja otvorenoga, slobodnoga pristupa znanstvenim informacijama.

Za korištenje autorskog djela na gore navedeni način ne potražujem naknadu.

U Puli, 07.09.2023.

Potpis

## Sadržaj

1. Uvod .....	1
1.1. Hipoteza rada .....	2
1.2. Predmet istraživanja .....	3
1.3. Problem istraživanja .....	3
1.4. Ciljevi rada .....	3
1.5. Metodologija rada .....	3
1.6. Struktura rada .....	3
2. Teoretska podloga teme .....	5
3. Hidraulički kočioni sustav .....	10
3.1. Glavni kočioni cilindar .....	12
3.2. Pojačivač sile kočenja .....	14
3.3. Kočione cijevi i ulje .....	16
3.4. Kočiona kliješta i pločice .....	19
3.5. Kočioni disk .....	22
3.6. Kočioni bubanj .....	23
3.7. Pedalni sklop .....	25
4. Dinamika vozila .....	30
5. Softver za 3D modeliranje i simulacije naprezanja .....	39
5.1. Općenito .....	42
5.2. Autodesk Inventor .....	48
5.3. Autodesk Fusion 360 .....	54
6. Metoda konačnih elemenata .....	59
7. Pedala kočnice .....	63
7.1. Značajke .....	71
7.2. Testiranje presjeka profila .....	77
7.3. Izrada 3D modela .....	86



7.4. Optimizacija oblika .....	104
7.5. Analiza rezultata .....	112
8. Zaključak .....	115
Literatura .....	117
Popis slika .....	119
Popis tablica .....	122
Popis simbola, oznaka i mjernih jedinica .....	123
Sažetak i ključne riječi .....	127
Abstract and keywords .....	128

## 1.Uvod

Pedala kočnice je sastavni dio većine današnjih vozila. Nožna izvedba klasične pedale kočnice služi kao poveznica između osobe koja upravlja vozilom i početnog djelovanja kočionog sustava.

Napretkom tehnologije dolazi do sve kompleksnijih, sigurnijih i boljih sustava. Povećava se broj elemenata, kao i primjene raznih elektroničkih uređaja u sustavu. Težnjom ka stalnom napretku i optimizaciji sustava, razvoj komponenti dovodi do sve složenijeg dizajna i postupaka izrade. Takvi elementi, iako poboljšani, povećali su troškove i vrijeme izrade.

Budući da se vozila razvijaju u smjeru visoke energetske osviještenosti i sa ciljem da imaju što bolju korisnost, dolazi do implementacije kompleksnijih oblika. Ti oblici su vidljivi već na prvi pogled vanjštine vozila sa svrhom poboljšanja aerodinamičnosti, ali i sigurnosti u vidu raznih mogućih situacija i potreba za zaustavljanjem vozila.

Današnja tehnologija je omogućila i razne pametne sustave signalizacije, sigurnosti i očitavanja podataka u stvarnome vremenu. Kompleksnost dizajna se prenijela i na unutrašnjost vozila, kako bi pružila bolju sigurnost, funkcionalnost i moderna rješenja za korisnike. Sve te nove dodatne komponente, uz sve svoje prednosti, unose problem dodatne težine vozila. Taj problem se u autoindustriji vječito rješava i optimizira implementacijom lakših materijala i posebnim oblicima komponenti radi olakšavanja.

Generalna pretpostavka je da je u cilju zamijeniti sve moguće teže materijale sa lakšima (gdje to sigurnost po ljudski život dozvoljava). Konstantno se radi na razvoju novih inačica materijala kako bi se pospješila njihova svojstva, omogućivši im na taj način dodatnu upotrebu. Upravo tu je upotrebu pronašla plastika u raznim izvedbama.

Prednosti plastike su smanjenje mase, omjer čvrstoće i mase, oblikovnost, fizička i mehanička svojstva i dostupnost. Naravno, u autoindustriju se radi o brojnim kompozitima na bazi polimera. Upotreba ovakvih materijala je godinama u porastu, te upravo prelazi 20 % ukupne mase vozila. Potrebno je i razmotriti težnju proizvođača ka upravljivosti vozila. Oduvijek je bilo govora o idealnoj raspodjeli težine (50:50) i najoptimalnijem dizajnu za vozača. Moderna vozila imaju sve veći problem gravitirati prema tome, upravo zbog sve veće implementacije dodatnih sustava i opreme (pretežno u prednjem dijelu vozila). Zbog te situacije, proizvođači automobila pokušavaju smanjiti težinu što više komponenti u tom dijelu i okreću se ka spomenutim

polimerima. Trenutno brojni proizvođači rade na razvoju lakše, bolje i isplativije pedale kočnice. Rješenja se trenutno implementiraju u skuplje modele orijentirane performansama, ali je neizbježna potpuna implementacija uz trend povećavanja mase vozila uslijed unaprjeđivanja funkcionalnosti.

Postoje razne tehnologije za rad sa polimernim kompozitima, uz trenutnu imperativ upotrebe ubrizgavanja u kalupu tj. injekciono prešanje (*eng. Injection moulding*). Spomenuta metoda ubrizgava termoplastične ili termoaktivne polimere u kalup i proizvodnju dijelova. Na taj način se, nakon hlađenja, dobije gotov proizvod koji uz manju obradu ide u upotrebu. U odnosu na klasične načine proizvodnje, ovakav način je znatno brži, povoljniji i predvidljiviji za visoko serijsku proizvodnju. Glavna prednost je minimalan gubitak materijala, budući da se radi o aditivnoj metodi i ne dolazi do velike količine uklonjenog materijala (kao kod metalnih sirovina) ili kompleksnijih i opasnijih proizvodnih procesa kao kod lijevanja metala. Za postizanje željenih osobina moguće je raditi višekomponentne sklopove, koji imaju umetke ili dodatke u strukturi.

Još jedna prednost napretka tehnologije je mogućnost simuliranja i testiranja komponenti, ali i cijeloga procesa putem softvera. Na taj način se gotovo sve probne faze obave digitalnim putem i ostvaraju znatne uštede i brži izlazak proizvoda na tržište. Posljednjih godina je vidljiv i porast upotrebe algoritama i umjetne inteligencije za rješavanje velikog broja slučajeva i stvaranje što idealnijeg modela. U toj kategoriji treba spomenuti optimizaciju oblika i generativni dizajn.

### **1.1.Hipoteza rada**

Suvremena tehnologija i razvoj strogo namjenskih softvera pružaju velike mogućnosti da se inače vrlo skupi procesi razvoja i istraživanja u automobilske industriji optimiziraju vremenski i troškovno i na taj način održe konkurentnim. U ovom radu će se detaljno objasniti primjer optimizacije dizajna pedale kočnice uz korištenje softvera za 3D modeliranje i simulaciju.

## **1.2.Predmet istraživanja**

Glavni predmeti istraživanja su mogućnosti dizajna pedale kočnice, prednosti upotrebe softvera i simuliranje dobivenih rješenja.

Sporedni predmeti su rad kočionog sustava, ergonomija, dinamika vozila i popratne komponentne.

## **1.3.Problem istraživanja**

Promatrani problem je dokazivanje prednosti upotrebe materijala na bazi polimera u odnosu na klasične metalne izvedbe pedale kočnice. Optimiziranje dizajna i usporedbe simulacija mogućih izvedbi, te zadovoljavanje zadanih uvjeta.

## **1.4.Ciljevi rada**

Cilj rada je proučavanje rada kočionog sustava i njegovih komponenti, dinamike vozila i softverskih mogućnosti u svrhi konstruiranja i simuliranja pedale kočnice sa boljim i povoljnijim karakteristikama u odnosu na klasičnu izvedbu.

## **1.5.Metodologija rada**

U izradi rada korištene su brojne metode, a neke od njih su: deskripcija, analiza, komparacija, eksperimentiranje, mjerenje itd. ...

## **1.6.Struktura rada**

Rad je strukturiran kroz sedam glavnih poglavlja. Počinje sa uvodnim poglavljem koje sadržava hipotezu rada, predmet istraživanja, problem istraživanja, ciljeve rada, metodologiju rada i strukturu rada.

Drugo poglavlje prikazuje teoretsku podlogu teme i uvod u samu tematiku.

Treće poglavlje detaljno opisuje hidraulički kočioni sustav i njegove komponentne poput: glavnog kočionog cilindra, pojačivača sile kočenja, kočionih cijevi i ulja, kočionih kliješta i pločica, kočionog diska, kočionog bubnja i pedalnog sklopa.

Četvrto poglavlje opisuje i prikazuje dinamiku vozila, kao i algebarske zapise, grafikone, raspodjele sila i potrebna objašnjenja.

Peto poglavlje obuhvaća uvod i rad softvera, detaljnije o korištenom softveru i pregled značajki, mogućnosti i primjene.

Šesto poglavlje je bazirano na metodi konačnih elemenata.

Sedmo poglavlje prikazuje razradu i konstruiranje pedale kočnice. Sadržava i opisuje ključne točke i geometrijske/funkcionalne veličine, modeliranje i simulaciju osnovnih profila u fazi prije početka izrade kvalitativnog modela, usvajanje najpovoljnije opcije za zadani slučaj, početno modeliranje i simulacije. Dalje prikazuje optimizaciju modela i dodatne simulacije, te usporedbe i analize dobivenih rezultata.

Dodatna poglavlja obuhvaćaju zaključak, literaturu, popis slika, popis tablica, popis simbola, oznaka i mjernih jedinica i sažetak.

## 2. Teoretska podloga teme

Prema automobilskom priručniku baziranom na ISO 611(1) i DIN 70023(2) standardima, kočiona oprema su svi kočioni sustavi čija je funkcija smanjiti brzinu kretanja vozila, dovođenje vozila u stanje mirovanja ili zadržavanje vozila u mjestu nakon zaustavljanja. [1]

Povijesno se pojava kočionih sustava javlja upotrebom komada drveta i polugom, početkom 20. stoljeća počinju prva testiranja implementacije pedale kočnice koja bi svojom aktivacijom djelovala na kočioni bubanj zadnje osovine preko fleksibilne komponente od nehrđajućeg čelika. Nakon toga su gotovi svi proizvođači implementirali vanjske kočnice na oba zadnja kotača. Kroz nadolazećih 40 do 50 godina implementirane su razne varijacije kako bi se povećala trajnost kočnica i izbjegla učestala zamjena na svakih 300 do 1.500 km, sve do trenutka uvođenja zatvorenog (unutrašnjeg) kočionog sustava koji je bio otporniji na vanjske utjecaje. Sredinom 20. stoljeća, gotovo svi Europski proizvođači počeli su implementirati kočione diskove i sa napretkom snage automobila, dolazi do spoznaje da je za stvaranje dovoljne zaustavne sile potrebno imati kočnice na svim kotačima. Moderna vozila počinju sa upotrebom hidrauličkog kočionog sustava koji funkcionira tlačenjem kočione tekućine, počevši od vozačevog djelovanja na pedalu kočnice, pa do guranja fluida kroz cijevi, cilindre i konačno do aktivacije kočnica. Djelovanje kočnice ima svrhu stvaranja trenja kako bi se smanjila kinetička energija koju je potrebno transformirati u drugi oblik.[2]

U današnjim se vozilima upotrebljavaju dvije izvedbe kočionih sustava, izvedba sa kočionim diskom i kočionim bubnjem. Bubanj izvedba je povoljnija, ali ima i kraću trajnost uz nešto kompliciranije održavanje (reparaciju). Striktno takav način kočenja bi bio neefikasan i neekonomičan. Izvedba sa kočionim diskovima ima daleko veću primjenu u modernim vozilima i preuzima većinu zadatka na sebe zbog znatno veće efektivnosti. Ta izvedba je i skuplja, ali neophodna za siguran i izdržljiv rad. [3]

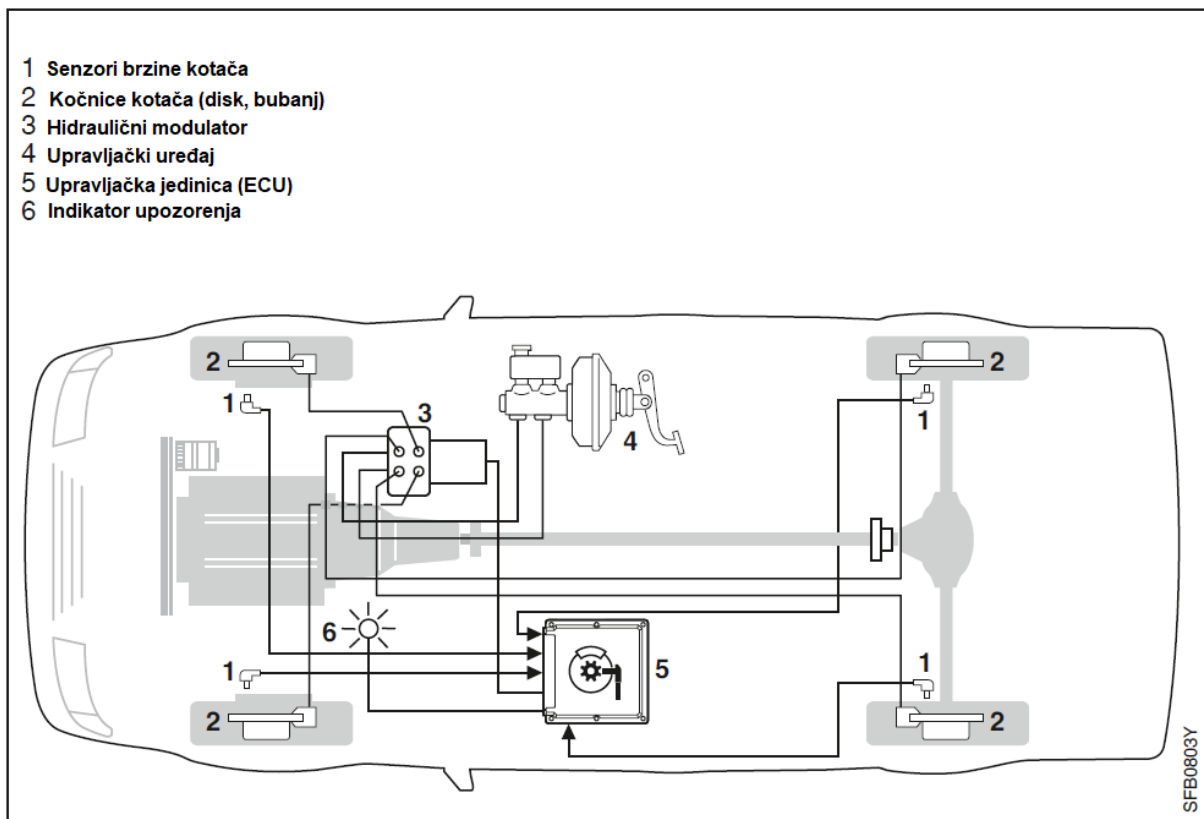
Kočioni sustavi za civilna vozila i laka komercijalna vozila su regulirani prema zahtjevima različitih direktiva i ustanova. Neki od primjera su sljedeći: 71/320/EEC(1), ECE R13(2), ECE R13-H(3) i u Njemačkoj §41 StVZO(4). Ovim načinom su regulirani funkcionalnost, utjecaj i metode ispitivanja sustava. Sustav se dijeli na radni-kočioni sustav, parking-kočioni sustav i sekundarni-kočioni sustav.

Radni-kočioni sustav je sustav koji omogućava vozaču da postepeno utječe na brzinu kretanja vozila tijekom normalne vožnje ili da dovede vozilo u stanje mirovanja. Sustav je dizajniran kao asistirani energetska kočioni sustav, što znači da radnju započinje vozač pritiskom pedale kočnice. Dalje se sila prenosi na kočnice kotača preko glavnog kočionog cilindra do dva međusobno nezavisna hidraulička prijenosnika. Radni-kočioni sustav djeluje na sva četiri kotača.

Parking-kočioni sustav je zadužen za ručnu kočnicu. Ručna kočnica je nezavisni kočioni sustav koji zadržava vozilo mirnim u stanju mirovanja, čak i neravnoj podlozi bez vozača u vozilu. Mehanizam za zadržavanje je integriran u kočnice kotača. Zakonski normativi zahtijevaju da parking kočnica mora imati stalnu povezanost između upravljačkog uređaja i kočnice na kotaču. To je najčešće ostvareno putem direktnog spoja ili kabla. Parking kočnica se aktivira od strane vozača i nalazi se kao poluga ili tipka u njegovoj blizini, a u nekim slučajevima i kao nožna pedala. U slučaju elektronski upravljanje parking kočnice, pritezanje i otpuštanje kočnice regulirano je elektroničkom sklopkom (tipkom). Radni i parking sustavi su opremljeni zasebnim, individualnim upravljačkog i prijenosnim uređajima. Parking kočnica može i najčešće djeluje na samo jednu osovinu (dva kotača). Utjecaj na zadržavanje vozila se izračunava prema normama i uzima se u obzir maksimalna masa vozila (sa teretom). Uzima se u obzir nagib ceste od 20 ili 12 % ukoliko je vozilo povezano na ne zakočenu prikolicu.

Sekundarni-kočioni sustav djeluje u slučaju kvara. Kvar može biti curenje fluida ili oštećenje cijevi. Važno je zadržati mogućnost rada kočionog sustava kako bi se postiglo barem sekundarno kočenje koje mora pružiti isti iznos upravljačke sile na upravljačkom uređaju. Kočenje mora imati utjecaj od 50 ili 44 % i zadržati se u traci kretanja pri djelovanju sekundarnog kočenja. Sustav sekundarnog kočenja ne treba biti nezavisni treći sustav, već dodatak na radni-kočioni sustav ili postepena aktivacija parking kočnice. [1]

Slika 1: Dvokružni hidraulički kočioni sustav



Izvor: Autor modificirao prema odabranom izvoru [1]

Slika 1 prikazuje primjer dvokružnog hidrauličkog sustava. Ovakav sustav se primjenjuje na većini modernih automobila i sadrži istaknute komponente. Dvokružni sustav ima međusobno nezavisne dijelove prednjeg i zadnjeg dijela kočionog sustava. Senzori na kotačima očitavaju brzine vrtnje svakog kotača zasebno, a njihovom usporedbom prepoznaju trenutke nepravilnog ponašanja tj. proklizavanja. U tom slučaju se ta informacija unutar upravljačke jedinice obrađuje i šalje sustavu da izvrši potrebne radnje. Upravljačka jedinica daje informaciju hidrauličnom modulatoru na kojem kotač je potrebna radnja i pomoću usmjeravanja ulja na željeno crijevo – vrši se rad na kočnici kotača. Indikator upozorenja služi da bi obavijestio vozača u slučaju neke nepravilnosti sa sustavom. Vozač upravlja kočionim sustavom vršenjem dodira tj. pritiskanjem nožne pedale kočnice koja je dio upravljačkog uređaja.[1]



Upravljački uređaj sastoji se od pedale kočnice, pojačivača sile kočenja, glavnog kočionog cilindra i ekspanzijske posude. Ovakvo rješenje upravljačkog uređaja omogućava osjetljivost sustava na silu vozača. Odabranim komponentama i omjerima ostvaren je omjer kojim svaka osoba koja upravlja vozilom može svojom nogom pružiti dovoljno sile kako bi se vozilo pravovremeno zaustavilo.

Dizajn pedale kočnice se konstantno razvija sa ciljem veće izdržljivosti i manje mase. Sila koju vozač vrši nad pedalom se multiplicira ovisno o prijenosnom omjeru poluge tj. pedale kočnice. Izlazna sila koja djeluje na pojačivač sile kočenja ovisi o ulaznoj sili i geometrijskim veličinama same pedale. Važne veličine su udaljenost papučice od točke zakretanja (*eng. Pivot point*) i udaljenost od točke zakretanja do izlazne šipke ili potisne poluge (*eng. Output rod*). [3]

Prema specifikacijama tvrtke General Motors, maksimalno opterećenje u iznosu od 2.700 N je izvršeno nad pedalom kočnice u „paničnom opterećenju“. Eksperimentalni podatci o čvrstoći su vrlo važni u konstruiranju i dizajnu. Uspješnom izvedbom pedale kočnice od polimernih kompozita ostvarila bi se umanjena težina, bolja potrošnja goriva, veća sloboda u dizajniranju, poboljšani izgled i otpornost na korodiranje. Odabir materijala na bazi polimera za ovakvu primjenu ovisi o brojnim mehaničkim, fizičkim i kemijskim svojstvima. Odabrani materijal mora biti podložan metodi ubrizgavanja u kalup u velikim serijama za smanjenje troškova proizvodnje. Odabrani materijal mora imati i nizak specifični omjer težine i čvrstoće u usporedbi sa metalnim izvedbama. Testiran je velik broj kompozita na bazi polimera, a primjerenima su se pokazale izvedbe materijala ojačane sa kratkim staklenim vlaknima. Izvedbe sa dugačkim vlaknima nisu zadovoljile zbog mogućnosti njihovog miješanja i preklapanja uglova. Prema tome, najbolje su se pokazali poliamidi ili najloni (*eng. Nylon*), zbog niske gustoće i manje težine, u izvedbi sa kratkim vlaknima. Takvi materijali imaju veliku udarnu čvrstoću, što je važno kod pedale kočnice. Nakon uzimanja u obzir ostalih vrijednosti poput istezanja materijala i sličnih svojstava, najlon sa kratkim staklenim vlaknima je odabran kao dostatan materijal za izradu. [4]

2020. godine razvijena je i puštena u proizvodnju pedala kočnice u potpunosti izrađena od polimera. Proizvod je razvijen od strane tvrtke Boge Rubber & Plastics Group, a ideja kojom su se vodili je sljedeća: jednostavno napraviti manje ili tanje papučice također ne bi uspjelo, jer postoje praktična ograničenja u pogledu veličine i oblika papučice kočnice, a da ne spominjemo izazovne specifikacije performansi zbog

njezine kritične prirode za sigurnost. Ono što je imalo najviše smisla bilo je pronalaženje načina za bolju kontrolu orijentacije vlakana kako bi se optimizirala lokalna svojstva u područjima dijela koji su imali najveća vršna opterećenja, pružajući mogućnosti za smanjenje debljine stijenke u manje kritičnim područjima. Uspješno je konstruirana pedala kočnice (slika 2) koja je 50 do 55 % lakša od standardne metalne i čija je proizvodnja puno brža i efikasnija.

Slika 2: Kompozitna pedala kočnice



Izvor: <https://www.compositesworld.com/articles/thermoplastic-composite-structure-replaces-metals-on-safety-critical-brake-pedals>, pristupljeno 10.3.2023. [5]

Kako bi svi uvjeti bili zadovoljeni, ova pedala kočnice sastoji se iz tri komponente. Svi materijali korišteni imaju matrice crnog poliamida 6 (PA 6), često upotrebljavanog polimera u autoindustriji. Postavljanjem tri različite izvedbe materijala na točna mjesta, postignuti su zadani zahtjevi svojstava proizvoda. Optimizacijom je smanjena potrošnja materijala, nominalna debljina stijenke, vrijeme ciklusa i trošak proizvodnje. Ovakav proizvod pruža bolje uvjete za upravljanje vozilom, ostvaruje bolja svojstva od čelika i ostavlja mogućnost potpunog recikliranja na kraju životnog vijeka. [6]

### 3. Hidraulički kočioni sustav

Moderne sustave kočenja definiraju njihove radne izvedbe tj. načini rada.

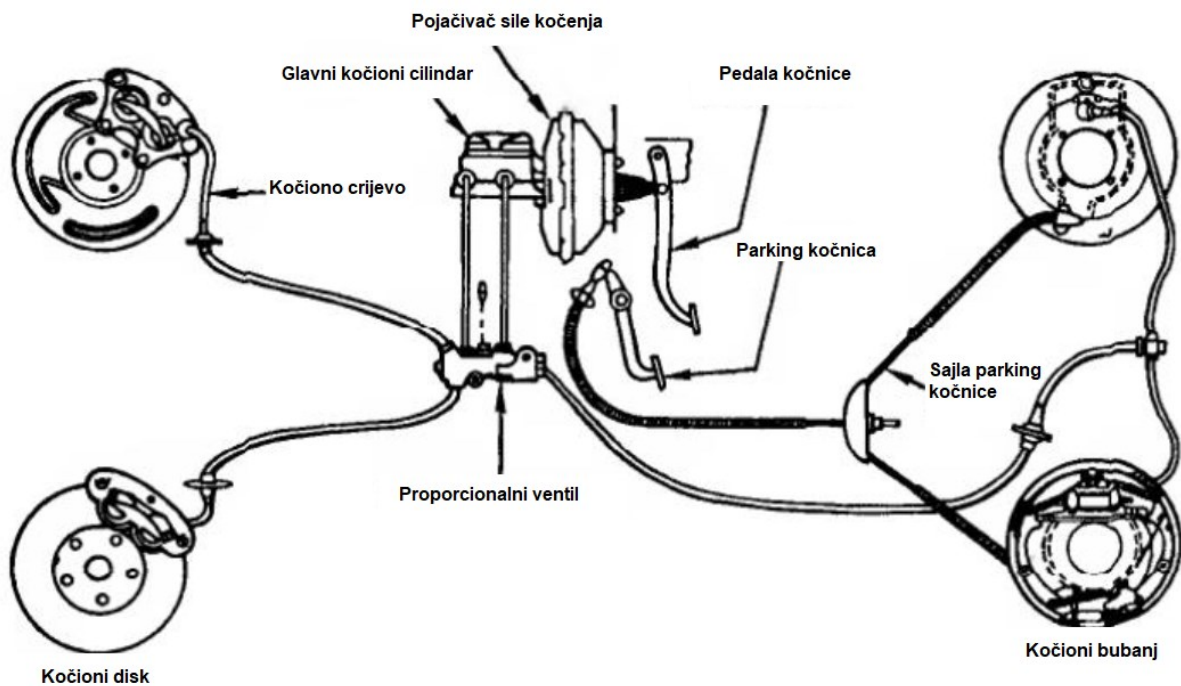
Sustav zračnog kočenja vrši rad tako što tlači zrak iz atmosfere i pohranjuje ga unutar spremnika. Prije ulaska u spremnik, zrak prolazi kroz filter i isušivač. Puštanjem tog zraka u sustav, dolazi do pomaka klipa kroz cilindar i stvaranja sila na kočionoj čeljusti. Stvaranjem sile trenja između kočione obloge i bubnja, vozilo usporava.

Sustav mehaničkog kočenja radi na principu primjene sile na pedalu kočnice koja se prenosi do konačnog elementa – kočionog bubnja ili diska putem mehaničkih komponenti. Komponente tog sustava su žice, osovine i bregaste osovine korištene za prijenos gibanja i sila kako bi se vozilo usporilo. Brzina kočenja ili usporavanje ovise o površinskom trenju i upotrebljavanoj sili.

Sustav električnog kočenja koristi elektromehaničke aktuator kontrolirane od strane elektroničkih upravljača. Sustav prenosi informaciju upravljačkoj jedinici kada je pritisnuta pedala kočnice i vrši skup nužnih radnji koje su potrebne za početak kočenja.

Kombinacijom prethodno navedenih sustava, u modernom automobilu, koristi se hidraulički kočioni sustav. Kao što i naziv naznačuje, kretanje fluida i promjene u tlaku stvaraju nužne pomake i prijenose sila za djelovanje komponenti sustava. Pritiskanje pedale kočnice od strane vozača, stvara povećanje tlaka u glavnom kočionom cilindru i rasprostranjuje fluid (ulje) kroz sustav putem kočionih crijeva do klipa u kočionim kliještima čiji pomak gura kočione pločice prema disku i/ili prema kočionoj o čeljusti i oblozi u slučaju bubanj kočnica (slika 3). [3]

Slika 3: Hidraulički kočioni sustav



Izvor: Autor modificirao prema odabranom izvoru [7]

Pedala kočnice služi kao inicijator u sustavu kočenja. Ona započinje rad u sustavu na upravljačkoj jedinici stvarajući silu, koja se prenosi sa pedale kočnice do pojačivača sile kočenja. Ovisno o dizajnu, ta sila se uvećava četiri do deset puta i djeluje na klip unutar glavnog kočionog cilindra. Upravljačka sila se na taj način pretvara u tlak fluida, koji pod jakim kočenjem dolazi do raspona od 100 do 160 bara. [1]

### 3.1. Glavni kočioni cilindar

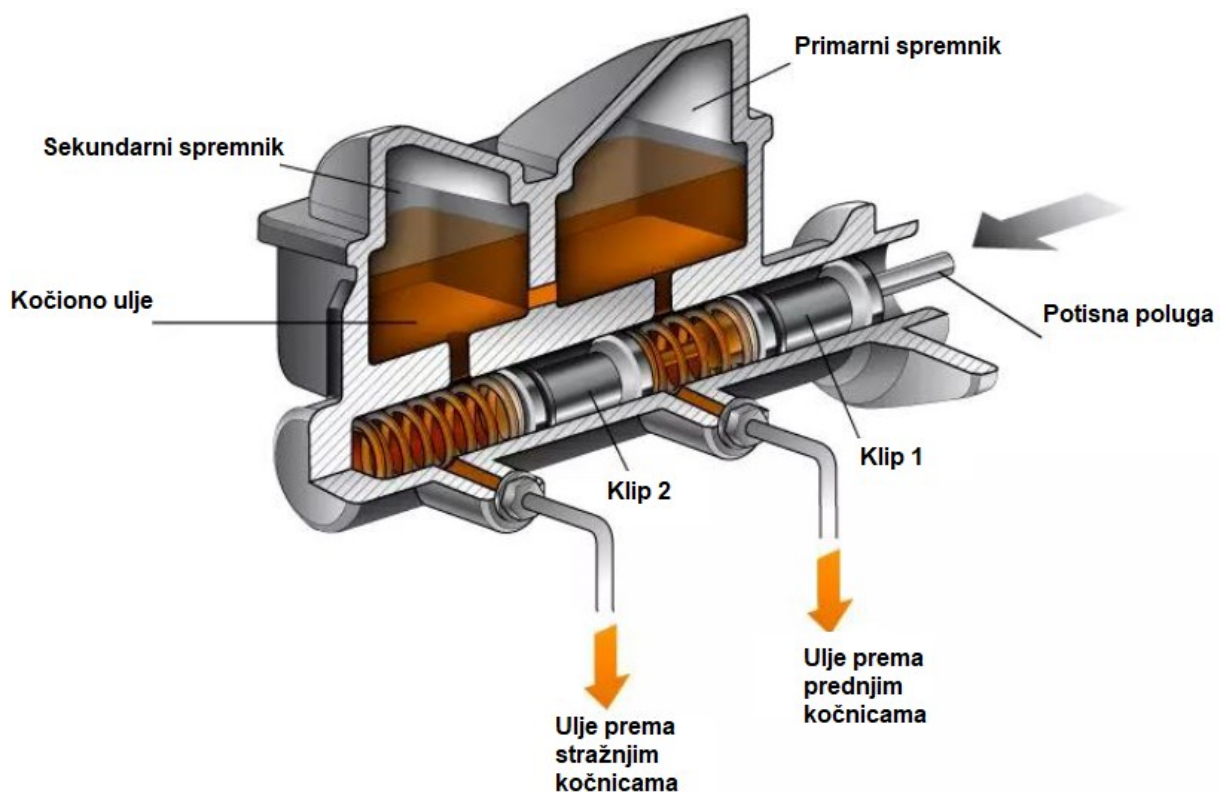
Važna komponenta hidrauličkog kočionog sustava, koja ima ulogu pretvoriti prenesenu silu u veće tlakove fluida prema kočionim kliještima.

Glavna podjela je sljedeća:

- Jednokružni glavni kočioni cilindar
- Dvokružni glavni kočioni cilindar

Pojednostavljeni prikaz komponentne je na slici 4.

Slika 4: Pojednostavljeni prikaz – glavni kočioni cilindar



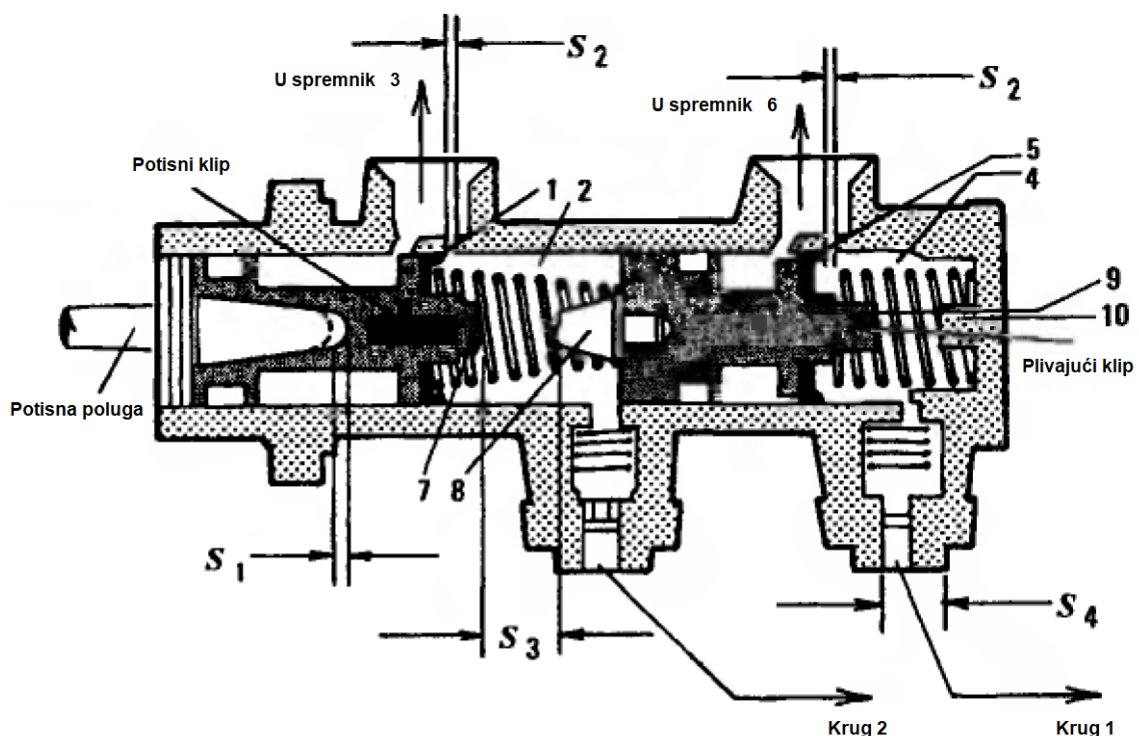
Izvor: Autor modificirao prema odabranom izvoru [3]

Kao što je prikazano na slici, glavni kočioni cilindar ima spremnike za ulje koji su najčešće izrađeni od plastike i moraju biti pozicionirani tako da im utjecaj gravitacijskih sila ne prouzroči otkrivanje otvora i ulazak zraka u sustav. Volumen rezervoara mora biti dovoljnog kapaciteta i u slučaju maksimalne potrošenosti kočionih pločica (potreban veći pomak). Cilindar je zrako nepropusni spremnik unutar kojega se kreće klip, a najčešće su izrađeni od lijevanog željeza ili aluminija. Sam klip ima ulogu

tlačenja fluida unutar cilindra i stvaranja velikih tlakova. U sustavu se nalaze i povratne opruge, koje omogućavaju povratak u prvobitna stanja i vraćanje pedale kočnice. Ventili se nalaze na ulazu i izlazu iz spremnika tj. cilindra. Fluid koji se koristi u ovakvom sustavu je kočiono ulje oznake DOT. [3]

Pomak pedale kočnice je različit u jednokružnom i dvokružnom sustavu. Također, dolazi i do promjene u slučaju otkazivanja jednog sustava u dvokružnom sustavu. Te pojave su povezane sa putem koji pedala mora prijeći kako bi stvorila dovoljno potiska i aktivirala sustav. Dvokružni „tandem“ sustav je prikazan na sljedećoj slici:

Slika 5: Dvokružni glavni kočioni cilindar



Izvor: Autor modificirao prema odabranom izvoru [7]

Način rada je principijelno isto kao kod jednokružnog, u ovom slučaju potisna poluga pogura potisni klip i zatvara otvor (1) koji spaja komoru (2) sa spremnikom (3). Nastavljanjem pomaka pedale kočnice, stvara se dodatno povećanje tlaka u komori (2) i prenosi na plivajući klip i komore (4). Plivajući klip se pomiče i otvor (5) koji spaja spremnik (6) se zatvara. U tom trenutku se fluid zbog stlačenosti upućuje prema krugovima 2 i 1. Potreban pomak pedale ovisi o pomaku potisnog klipa, a on ovisi o pomaku plivajućeg klipa. [7]

### 3.2. Pojačivač sile kočenja

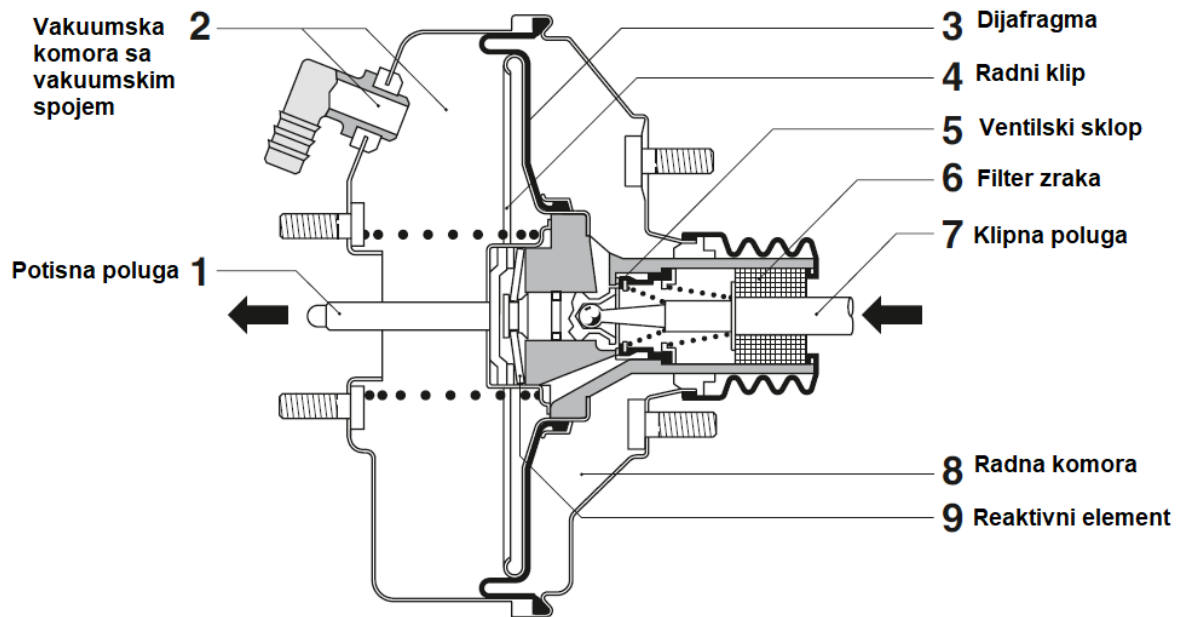
Sustav pojačivača sile kočenja omogućava vozaču da usporava vozilo sa prihvatljivim razinama djelovanja silom na pedalu kočnice. Implementacijom pojačivača znatno se povećava sigurnost vozača i ugođaj vožnje. Potrebno je zadovoljiti sljedeće kriterije:

- Pojačivač sile kočenja mora biti dovoljno osjetljiv za modularno kočenje sa malim djelovanjem sile. Manje od 13 do 22 N bi trebalo biti potrebno za iniciranje rada pojačivača.
- Potrebno je da vozač osjeti povratnu informaciju od strane sustava radi pravovremene procjene trenutnog utjecaja njegovog kočenja na usporavanje vozila.
- Vrijeme odziva pojačivača bi trebalo biti manje od 0,1 sekunde da dostigne točku zasićenja u slučaju nagle primjene kada pedala kočnice putuje 1 m/s.
- Ugladana tranzicija iz pojačanja sile kočenja u manualno kočenje od točke zasićenja kako bi vozač nastavio povećavati djelovanje na pedalu kočnice u slučaju hitnoće.
- Visoke razine pouzdanosti radi izbjegavanja zbunjenosti vozača i ugrožavanja sigurnosti.
- Male dimenzije i težina kako bi se omogućila optimalna lokacija unutar motornog prostora. [7]

Izvedbe pojačivača sile kočenja ovise o njihovoj izvedbi i načinu rada, a glavna podjela je na vakumski, hidraulički, električni i hidro-električni. Zbog jednostavne konstrukcije i dostupnosti vakumskog spoja od motora, najčešće se upotrebljavaju vakumski pojačivači.

Vakumski pojačivači (slika 6) smanjuju potrebnu silu sa upravljačkog uređaja za kočione operacije, ali imaju i dobru osjetljivost radi povratne informacije vozača i osjećaja djelovanja. Koriste negativni tlak stvoren od strane benzinskog motora tijekom usisnog takta ili vakuum (0,5 do 0,9 bara) stvoren od strane vakuum pumpe na dizel ili električnim vozilima.

Slika 6: Vakuumski pojačivač sile kočenja



Izvor: Autor modificirao prema odabranom izvoru [1]

Kada vozač ne upotrebljava kočnicu, vakuumska komora i radna komora su povezale preko ventilskog sklopa. Budući da je vakuumska komora povezana na vakuumski spoj, obje komore su pod djelovanjem vakuuma. Prilikom početka kočenja, klipna poluga se pomakne i dolazi do prekida spoja između vakuumske i radne komore, a vakuumska komora je blokirana. Nastavkom gibanja klipne poluge, otvara se ulazni kanal u ventilskom sklopu i atmosferski zrak ispunjava radnu komoru. Tlak u radnoj komori postaje veći od vakuumske i služi kao dijafragma na stvarnom dijafragma disku koji je spojen na ventilski sklop. Latica se pomiče zajedno sa diskom i ostvaruje lakši rad pedale kočnice. Maksimalni tlak ovisi o efektivnoj površini dijafragme ili klipa. Kada kočenje završi, ulazni kanal u ventilski sklop se zatvara i dolazi do ponovnog povezivanja vakuumske i radne komore, ostvarujući jednak tlak (vakuum). Dodatno, svaki ovakav sustav posjeduje vakuumski nepovratni ventil između izvora vakuuma i pojačivača. Ventil je u otvorenom položaju za vrijeme rada izvora vakuuma, a zatvara se kada isti izostane (gašenje motora). To omogućava zadržavanje vakuuma u pojačivaču i njegovu funkcionalnost nakon gašenja automobila (za nekoliko primjena). [1]



### 3.3. Kočione cijevi i ulje

Hidraulički medij prenosi i pretvara silu kočionog sustava u hidraulički tlak, koji se usmjerava prema kotačima kroz sustav cijevi. Sustavi poput ABS i dinamični kontrolni sustav mogu dodatno regulirati tlak fluida na svakom kotaču, prema potrebi.

Osnovni zahtjev hidrauličkog medija za kočioni sustav je jako niska stlačivost. Tekuće stanje ulja mora biti zadržano kroz cijeli proces rada. Dodatno, zbog mogućnosti proboja vode u kočioni sustav, posebno kroz fleksibilne kočione cijevi dolazi do potrebe za svojstvom upijanja vode. Ukoliko ulje ne upije vodu, postoji opasnost od formiranja mjehurića vode na temperaturama iznad 100 °C. Posljedica toga je stvaranje zračne blokade tj. nemogućnosti sustava da povećava tlak unutar cijevi pritiskanjem pedale kočnice zbog stlačivanja vodene pare. Zbog toga se danas koriste ulja koja su potpuno kompatibilna sa vodom u sustavu. Mineralna ulja, često korištena u prošlosti, su danas zamijenjena sa sintetičkim kočionim uljima na bazi glikola.

Kočiona ulja mora zadovoljavati razne zahtjeve i standarde od kojih su neki: SAE J1703(1), FMVSS 116(3), SAE J1704(2), ISO 4925(4), JIS K2233(5) itd. ...

Klasifikacija kočionih tekućina (ulja) sa različitim kemijskim bazama je sljedeća:

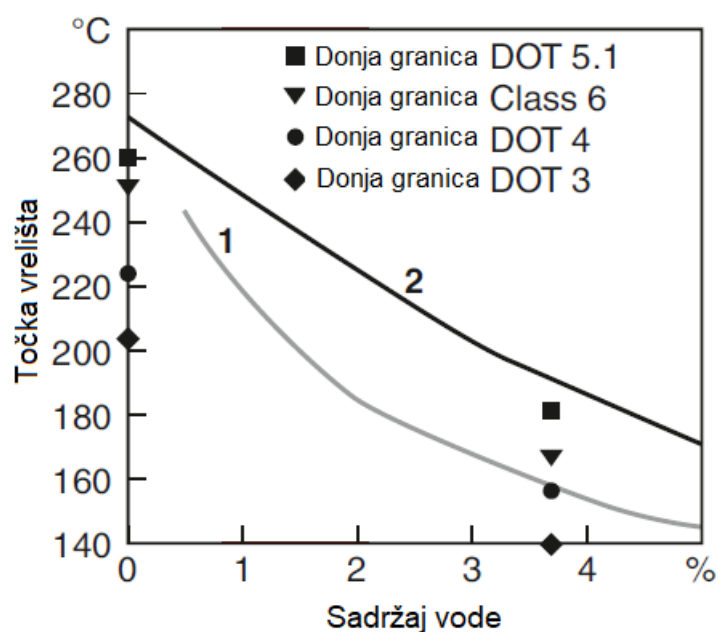
Tablica 1: Klasifikacija kočionih tekućina

Klasifikacija	Baza				Silikon	Mineralna ulja
	Etilen-glikol					
Predložena boja	Bezbojna do jantarna				Ljubičasta	Zelena
FMVSS 116	DOT 3	DOT 4		DOT 5.1	DOT 5	
ISO 4925 klasa	3	4	6	5-1		ISO 7308
SAE	J 1703	J 1704	J 1704		J 1705	
JIS K2233 klasa	3	4	6	5		
Suha točka vrelišta [°C] Mokra točka vrelišta [°C]	> 205 > 140	> 230 > 155	> 250 > 165	> 260 > 180	> 260 > 180	> 235
Viskoznost na -40 °C [mm <sup>2</sup> /s]	< 1500	< 1800 (DOT) < 1500 (SAE, ISO, JIS)	< 750	< 900	< 900	< 2000

Izvor: Autor modificirao prema odabranom izvoru [1]

Tablica 1 prikazuje ključne osobine različitih izvedbi kočionih tekućina. Točka vrelišta (vrenja) je važna osobina zbog povišenih temperatura u trenucima dugog i jakog kočenja. Te temperature dostižu i 200 °C pri kojima bi bez visokog vrelišta nastali zračni mjehurići. Suha točka vrenja se odnosi na tekućinu unutar sustava, gdje je sadržaj vode tipično manji od 0,2 %. Prednost modernijih ulja je sposobnost upijanja nastale ili pridošle vode, ali uzima se u obzir povećanje sadržaja vode u ulju od 1 do 1,5 % godišnje. Povećanjem sadržaja vode dolazi do snižavanja točke vrelišta i potencijalne opasnosti. Mokra točka vrelišta označava stanje ulja nakon dvije do tri godine upotrebe kada njegov sadržaj vode može dostići više od 3 % (slika 7).

Slika 7: Utjecaj sadržaja vode na točku vrelišta kod kočionih tekućina

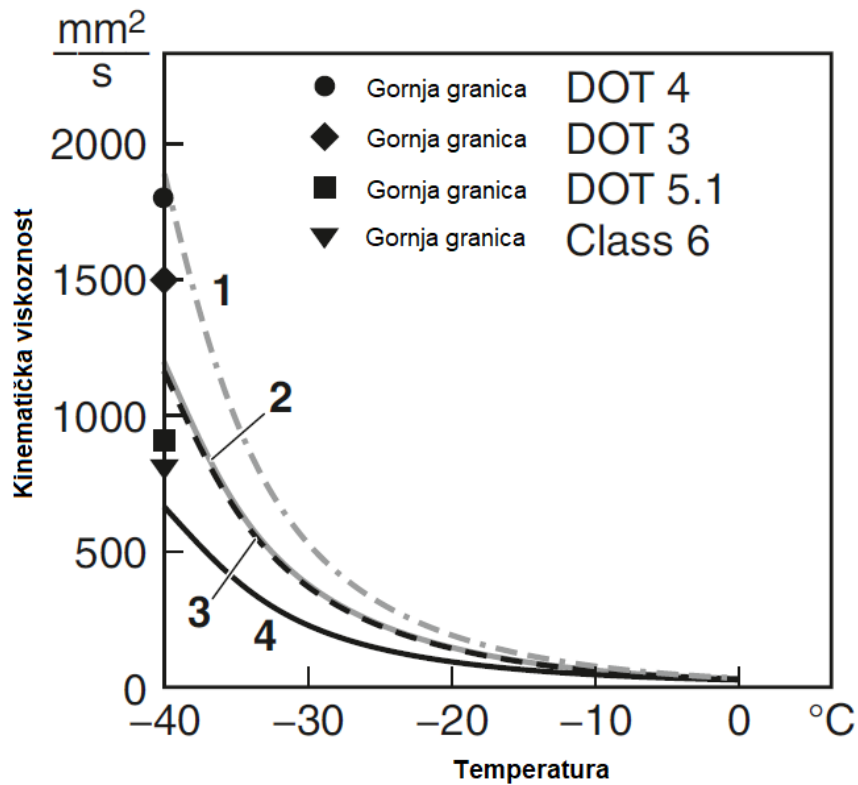


Izvor: Autor modificirao prema odabranom izvoru [1]

Oznaka 1 predstavlja SAE referentne kočione tekućina, a oznaka 2 moderne kočione tekućine.

Također, jedna od karakteristika ovih tekućina je i zaštita od korozije. Potrebno je i voditi računa o ovisnosti viskoznosti o temperaturi, ali i sadržaju vode (slika 8). Generalno vrijedi da snižavanje temperature za 1 K, dovodi do povećanja viskoznosti za oko 10%. Na hladnijim temperaturama, viskoznost se povećava dodatno za 10 % kod povećanja sadržaja vode od 1%.

Slika 8: Ovisnost viskoznosti o temperaturi i sadržaju vode



Izvor: Autor modificirao prema odabranom izvoru [1]

U promatranom slučaju uspoređena su SAE ulja sa 5% sadržaja vode i bez (1 i 2) i moderne kočione tekućine sa 5% sadržaja vode i bez (3 i 4).

Zaključno, ISO 4925 definira noviju i kvalitetniju klasu kvalitete pod nazivom „Class 6“ bolje kvalitete od „DOT4“ i karakterizira ju vrlo niska viskoznost (slika 7). Daljnji razvoj nastavlja trend povećanja mokre točke vrelišta i smanjenje viskoznosti u hladnijim uvjetima. [1]

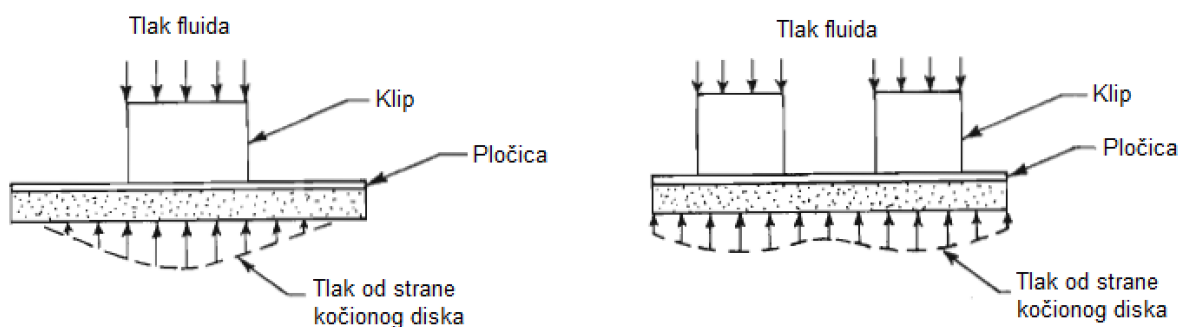
### 3.4. Kočiona kliješta i pločice

Kočiona kliješta primjenjuju se uz pripadajuće kočione diskove i sadržavaju odgovarajuće kočione pločice. U kliještima se nalazi hidraulički klip koji pomiče pločicu prema površini diska. Postoje različite izvedbe s obzirom na dizajn, materijal, strukturu i broj klipova. Sva kliješta dijele isti princip rada, a to je da prilikom aktivacije pedale kočnice i protjecanja fluida u sustavu prema kliještima, taj fluid gura klip i pločicu kako bi se ostvarilo usporavanje. Kliješta su većinom izrađena od lijevanog željeza ili aluminijskih legura (AlSi7Mg03 sa toplinskom obradom za osobne automobile višeg cjenovnog ranga). Primjenom aluminijskih legura ostvarena je ušteda od gotovo 50 % težine kliješta.

Postoje fiksna i plivajuća (klizajuća) kočiona kliješta. Fiksna kliješta najčešće imaju jedan ili dva klipa sa obje strane diska, dok plivajuća izvedba ima klip (klipove) samo sa jedne strane. Osim razlike u montaži i radu, plivajuća kliješta rade pomak suprotno kretanju klipa (slika 10). Plivajuća kliješta omogućavaju bolje hlađenje i imaju manje slobodnih komponentni, ali dolazi do nejednakog trošenja pločica. [8]

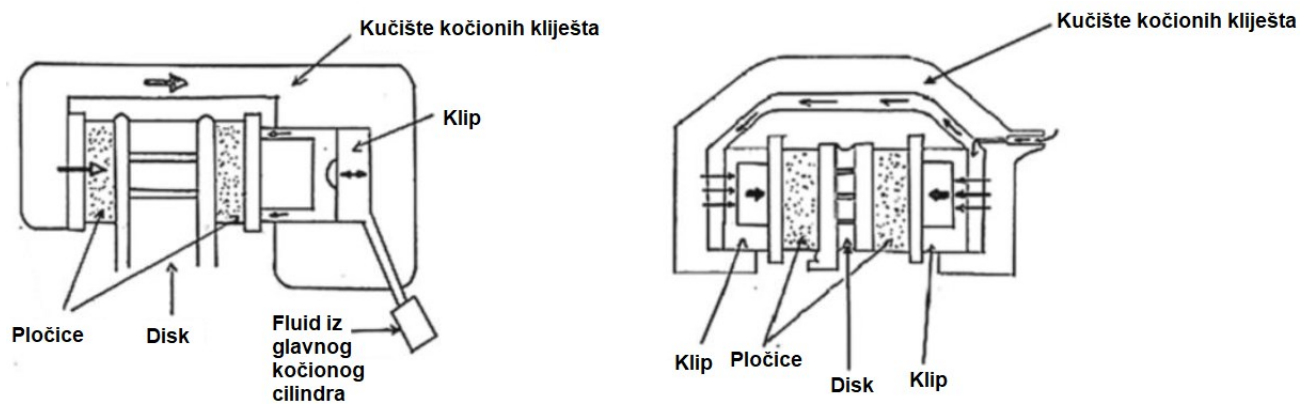
Ovisno o izvedbi i broju klipova u kočionim kliještima, javljaju se drugačije raspoređeni tlakovi koji su nužni za stvaranje sile trenja i zaustavljanje:

Slika 9: Usporedba stvaranja tlaka kod kliješta sa jednim ili dva klipa



Izvor: Autor modificirao prema odabranom izvoru [8]

Slika 10: Usporedba izvedbe plutajućih i fiksnih kočionih kliješta

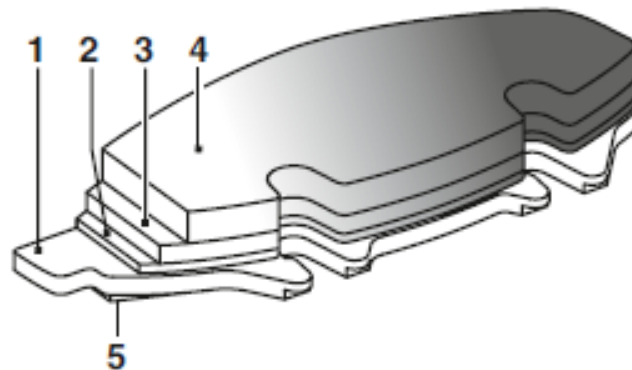


Izvor: Autor modificirao prema odabranom izvoru [8]

Upotrebom fiksne izvedbe omogućena je veća uniformnost i raspodjela tlaka po površini kočione pločice. Taj bi tlak trebao biti manji od  $1.200 \text{ N/cm}^2$ . [7]

Kočiona pločica se sastoji od više komponenti sa ciljem ostvarivanja što bolje funkcionalnosti (slika 11).

Slika 11: Kočiona pločica



Izvor: Dietsche, K.-H. i dr.: „Automotive Handbook“, Robert Bosch GmbH, Karlsruhe, 2022. [1]

Nosač (čelična pločica) služi kao potpora kod djelovanja između diska i pločice za što bolje prijanjanje na podlogu (1). Važno je da bude unutar dimenzijskih tolerancija zbog smanjenja buke i dovoljne čvrstoće materijala kako bi se izbjegle plastične deformacije. Dodatno je ugrađena i protu zvučna komponentna (5). Adhezivni sloj (2) je apliciran na nosač, a na njega srednji sloj same pločice (3). Potom se dodaje tami sloj (4) od praha ili granulata u zagrijanoj presi na temperaturama od 130 do 170 °C. [1]

Kompoziti za kočione pločice prema grupama sirovina u Europi su sljedeći:

- Metali – 10 do 15 %
- Veziva – 15 do 20 %
- Punila – 20 do 50 %
- Abrazivi – 2 do 5 %
- Maziva – 2 do 10 %
- Organska vlakna – 2 do 5 %
- Grafit i koks – 10 do 25 %

Europski normativi zahtijevaju sve veće korištenje ne-metalnih pločica i u navedenom sastavu predlažu korištenje keramičkih izvedbi sa znatno manjim stvaranjem metalne prašine. [1]

### 3.5. Kočioni disk

Najveća i najteža komponentna u kočionom sustavu sa disk kočnicom je upravo kočioni disk. To je kružna metalna ploča sa dvije strojno obrađene površine za što bolje prijanjanje sa kočionom pločicom. Imaju važnu ulogu u usporavanju vozila, na način da se kinetička energija vozila pretvara u toplinsku energiju putem trenja. Cilj je što brže preuzimanje i otpuštanje topline. Ovisno o upotrebi i kriterijima hlađenja, postoje različite izvedbe diskova (slika 12).

Slika 12: Različite izvedbe kočionih diskova



Izvor: Sweed, E.M.: „Design and finite element analysis of formula student braking system“, Escola Superior de Tecnologia e Gestão of Instituto Politécnico de Bragança, Bragança, 2021 [3]

Standardni disk punog oblika nema prazan prostor između svojih površina za interno odvođenje topline. Ventilirajući disk ima lopatice između površina diska koje usmjeravaju zrak od sredine diska prema vanjskom rubu, sa ciljem odvođenja topline. Bušene izvedbe imaju otvore za odvođenje nakupina kao posljedica kočenja i vode. Rezana izvedba ima sličnu svrhu uz dodatnu pogodnost poravnjanja pločice za što bolju efikasnost i iskoristivost površine kočionih pločica. [3]

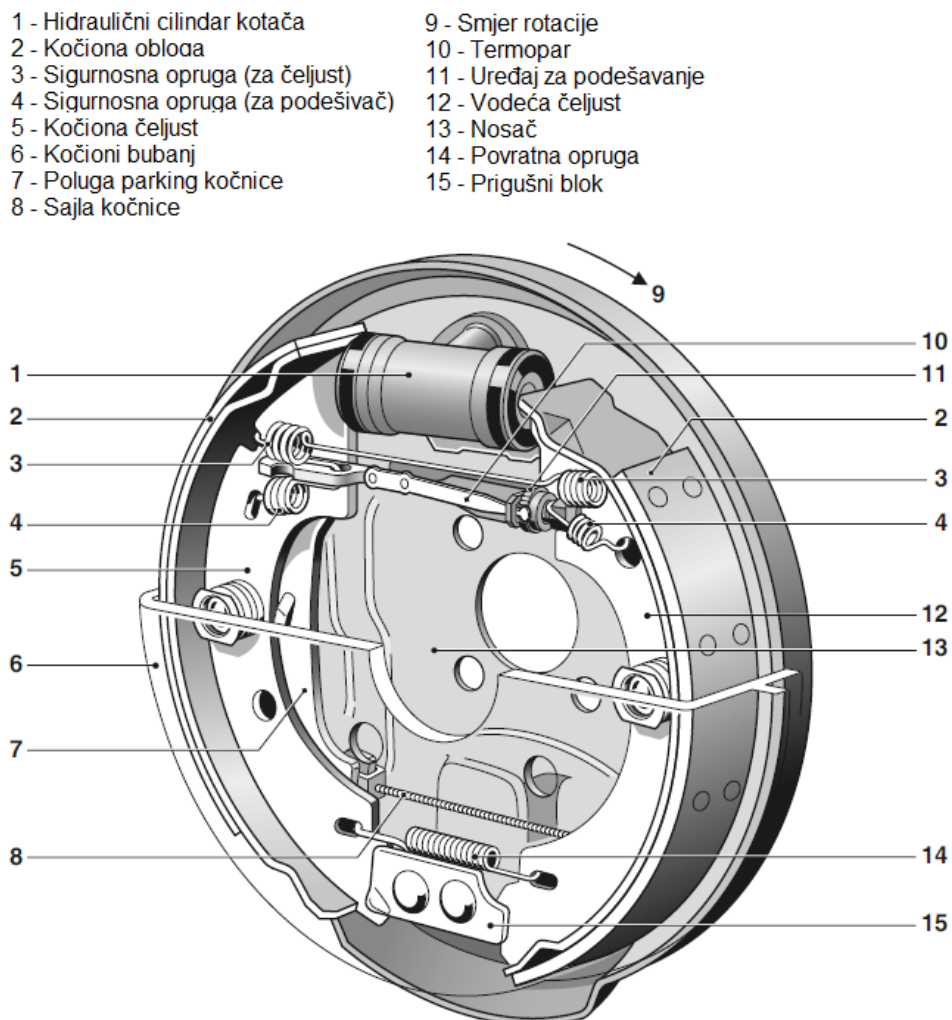
Najčešće se koriste izvedbe na bazi lijevog željeza zbog dobrih svojstava poput tvrdoće materijala, otpornosti na trošenje, čvrstoće i toplinskog širenja. Znatno skuplja i lakša izvedba se ostvaruje upotrebom karbonskih i keramičkih materijala.

### 3.6. Kočioni bubanj

Kočioni bubanj je radijalni tip kočnice sa dvije kočione obloge. Stvaraju silu kočenja na unutrašnjoj okruglini pomoću trenja. Postoje dvije različite izvedbe s obzirom na pomicanje kočionih obloga, a to su fiksne i klizne.

Zbog zatvorenog dizajna dolazi do bržeg zagrijavanja, te se zbog toga ovakav tip kočnica primjenjuje na zadnjim kotačima manjih gradskih automobila sa prednjim pogonom. Na sljedećoj slici je prikazan kočioni bubanj sa integriranom parking kočnicom:

Slika 13: Kočioni bubanj fiksne izvedbe sa integriranom parking kočnicom



Izvor: Autor modificirao prema odabranom izvoru [1]

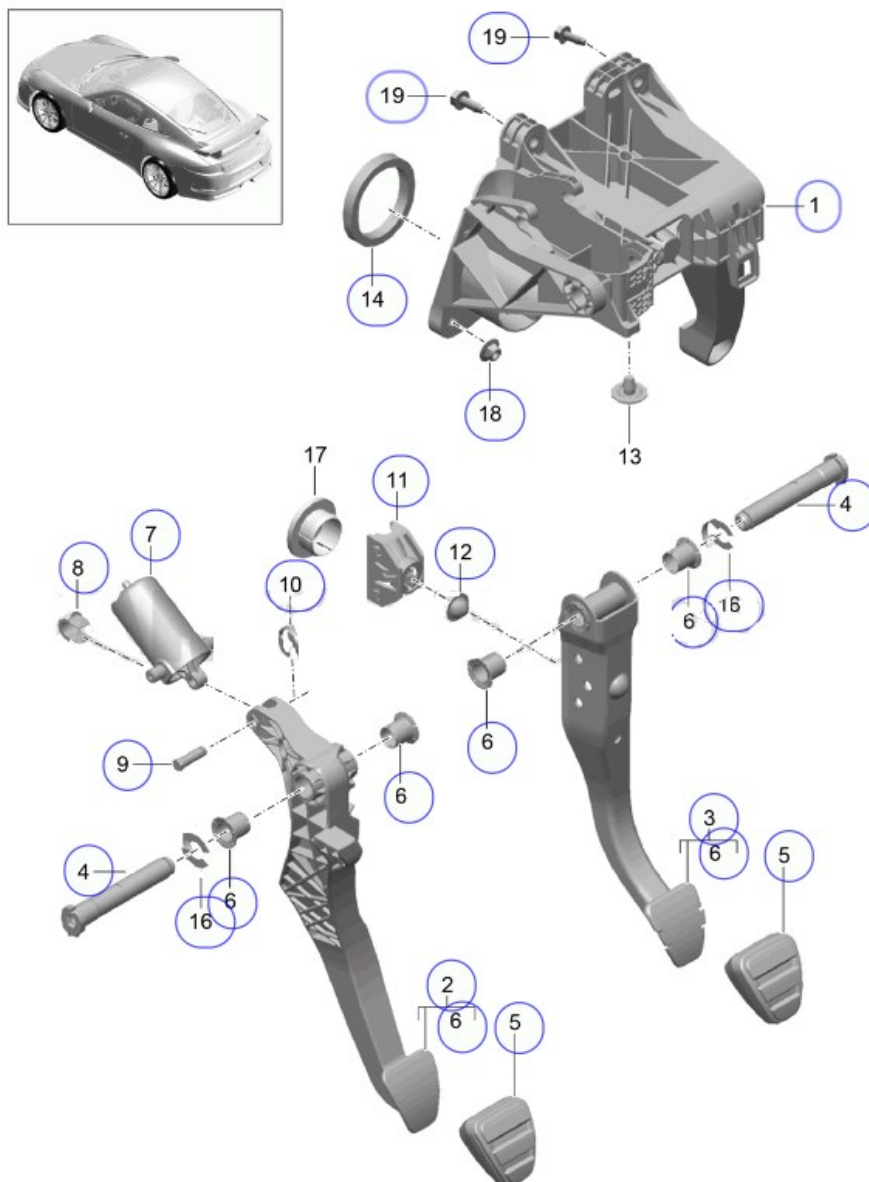


Tijekom vožnje su kočione čeljusti i bubanj razdvojene pomoću sigurnosnih opruga. Tijekom kočenja i primjenom sile na pedalu kočnice, stvara se tlak u hidrauličkom sustavu koji aktivira dva cilindra i njihovim pomakom započinje zaustavljanje. Zaustavljanje se vrši pretvaranjem hidrauličkog tlaka u mehaničku silu, a ta sila rezultira dodirivanjem vodeće i prateće čeljusti (i obloge) sa kočionim bubnjem. Vodeća obloga obavlja veći dio kočenja i time je ona podložnija trošenju. Kako bi se zadržala trajnost, ta obloga ima deblji sloj ili je duže izvedbe.

### 3.7. Pedalni sklop

Pedalni sklop je sastavni dio svakog automobila i ima ulogu nosaču pedala i svih popratnih komponenti za funkcioniranje sustava. Unutar sklopa se nalaze nosači i pedale odgovorne za kočenje i akceleraciju, a u nekim izvedbama i pedala kvačila. Češće je slučaj da pedala kvačila bude montirana na zasebni sklop ili da nije prisutna u slučaju modela sa automatskim mjenjačem. Na slici 15 je vidljiv primjer jednog takvog pedalnog sklopa i njegovih komponenti:

Slika 14: Pedalni sklop primjer – Porsche 911 GT3 991

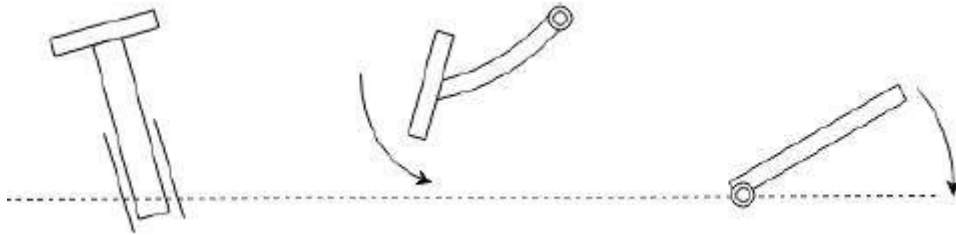


Izvor: Autor modificirao prema odabranom izvoru [9]

Nosač ili baza pedalnog sklopa je najčešće izrađen iz aluminijske legure postupkom visokotlačnog lijevanja odljevka (*eng. High Pressure Die Casting*) ili HPDC. Pedale se ovisno o primjeni, modelu i faktorima izrađuju od čelika, aluminija ili plastike.

Pedale mogu biti izvedene na sljedeća tri načina:

Slika 15: Izvedbe pedala



Izvor: Xi, Y.: „Understanding the Automotive Pedal Usage and Foot Movement Characteristics of Older Drivers“, Clemson University, Clemson, 2015. [10]

Najčešće se za pedalu kočnice koristi izvedba sa točkom okreta na vrhu (u sredini).

Prema SAE standardima, regulirana je pozicija, veličina i međusobni odnos između pedala. SAE J1100 definira dimenzije motornih vozila i procedure za određivanje istih. U sljedećoj tablici su prikazane preporuke dimenzija vezanih za pedale, papučice i nožni prostor vozila, prema SAE standardu:

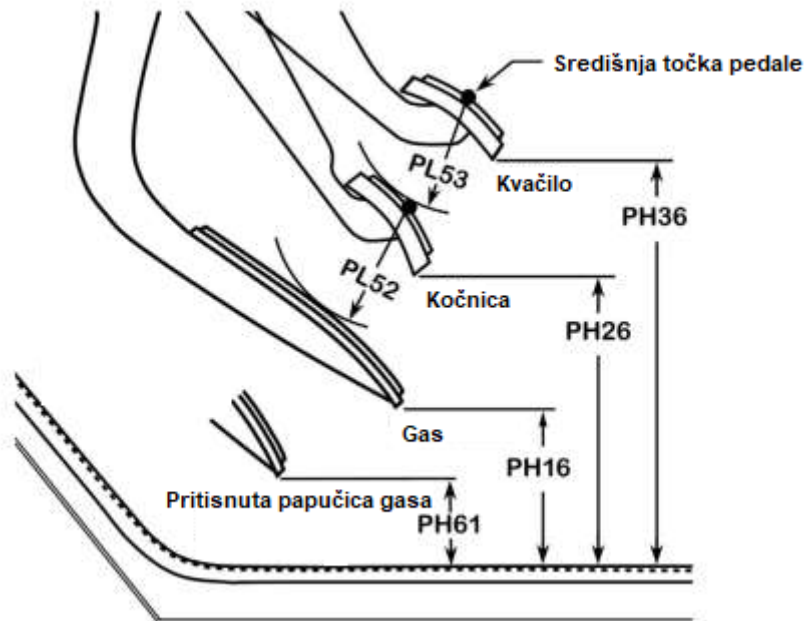
Tablica 2: Dimenzije pedala i nožnog prostora korištene u SAE standardima

Oznaka	Veličina
PL1	Gas do kočnice (prekorak)
PL52	Kočnica do gasa (odstupanje)
PL53	Kvačlo do kočnice (odstupanje)
PW11	Širina papučice gasa
PW13	Prostor kočnice
PW17	Gas - prostor do desnog ruba
PW21	Kočnica do gasa (razmak)
PW22	Širina papučice kočnice
PW23	Kočnica do kvačila (lateralno odstupanje)
PW27	Prostor gasa
PW32	Kvačilo do kočnice (razmak)
PW33	Širina papučice kvačila
PW42	Kočnica - prostor do lijevog ruba
PW43	Kvačilo - prostor do lijevog ruba
PW47	Širina nožnog prostora
PW82	Referentna točka stopala (BOFRP) do središnje linije kočnice (C/L)
PW83	BOFRP do C/L kvačila
PW92	C/L vozača do desnog ruba papučice kočnice
PW98	C/L vozača do BOFRP
PH11	Visina papučice gasa
PH16	Prostor između papučice gasa i poda
PH22	Visina papučice kočnice
PH26	Prostor između papučice kočnice i poda
PH33	Visina papučice kvačila
PH36	Prostor između papučice kvačila i poda
PH61	Hod papučice gasa

Izvor: Autor modificirao prema odabranom izvoru [10]

Prema podacima iz standarda, određuju se pozicije i dimenzije papučica, ali i njihov hod.

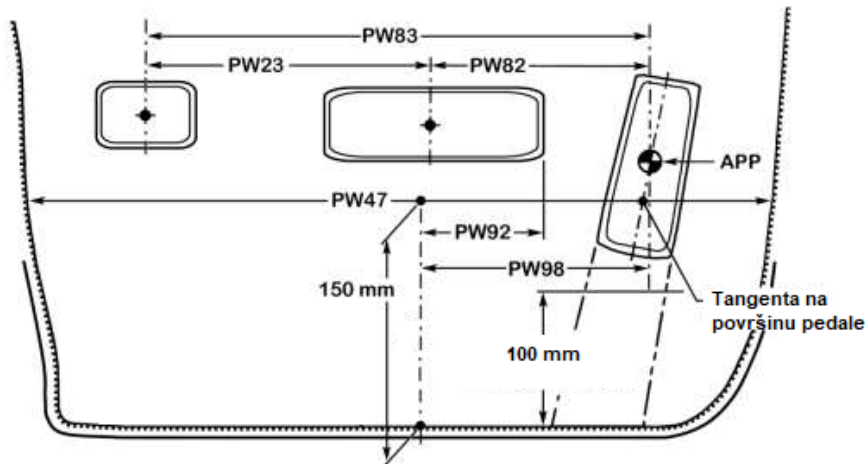
Slika 16: Visina pedala i udaljenost od poda



Izvor: Autor modificirao prema odabranom izvoru [10]

Zbog sigurnijeg i preciznijeg upravljanja, pedale su pozicionirane na različitim visinama. Odstupanja u visini postoje kako bi se izbjeglo slučajno pritiskanje, a njihova udaljenost je određena s obzirom na uračunatu udaljenost najpovoljnijeg prekoraka (prebacivanja stopala sa jedne papučice na drugu) za vozače.

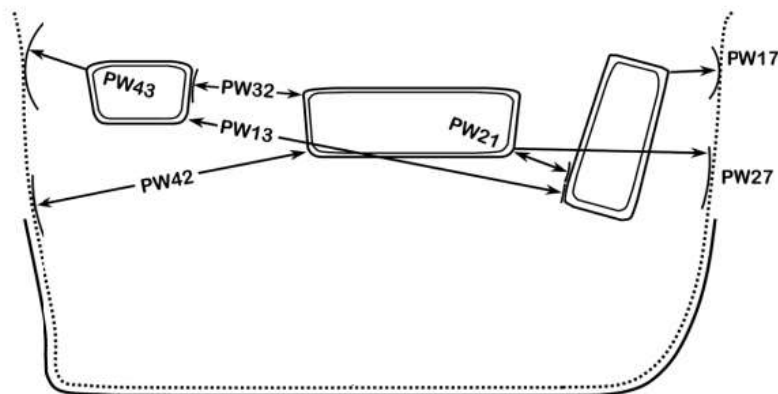
Slika 17: Udaljenosti pedala i odnos prema vozaču



Izvor: Autor modificirao prema odabranom izvoru [10]

Pedale i papučice moraju biti pravilno distancirane jedna od druge i od ruba, kako bi postojalo dovoljno prostora za nesmetani rad stopala. Također, određuje se i nagib papučica zbog što boljeg nalijeganja stopala. Vidljivo je i kutno odstupanje papučice gasa u odnosu na kočnicu.

Slika 18: Međusobni odnosi i razmaci papučica



Izvor: Autor modificirao prema odabranom izvoru [10]

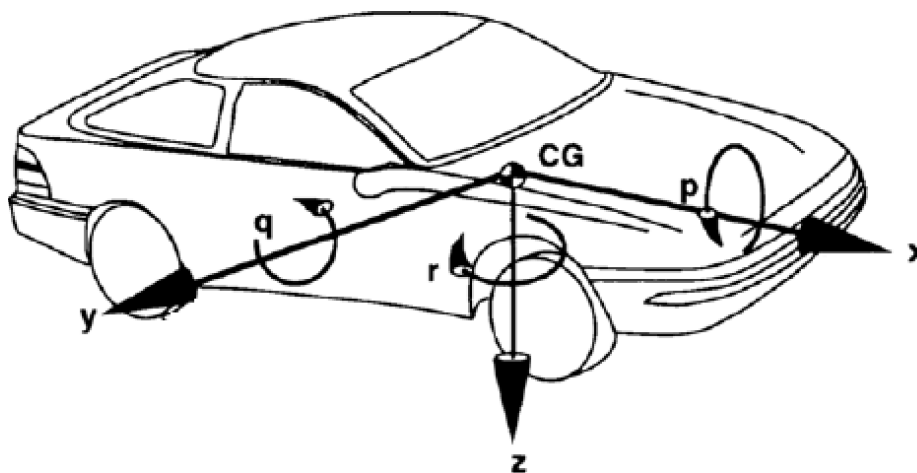
Međusobne udaljenosti i razmaci od ruba nožnog prostora su definirane kako bi se moglo vršiti nesmetano upravljanje vozilom i prebacivanje noge sa jedne papučice na drugu.

## 4. Dinamika vozila

Dinamika vozila razmatra kretanje vozila na površini ceste. Promatraju se akceleracija i kočenje, vožnja i skretanje. Ponašanje uslijed te dinamike je određeno djelovanjem sila na vozilo. Sile se stvaraju od strane gravitacije, aerodinamike i guma. Proučava se vozilo i njegove komponentne, kao i njihova reakcije na djelovanje spomenutih sila.

Vozilo se može opisati kao nakupina mase raznih komponentni pod stijenkom vanjskog dijela vozila. Za većinu osnovnih analiza promatra se kretanje svih komponenti kao cjeline. Na primjer, prilikom kočenja – cijelo vozilo usporava kao cjelina i može se predstaviti kao jedna nakupina mase sa svojim centrom gravitacije. Važno je odrediti prihvatljiva svojstva mase vozila i njegove inercije. Za proučavanje kretanja vozila, potrebno je odvojiti „tijelo“ vozila i kotače vozila. U tom slučaju razlikuju se kao opružena i neopružena masa vozila.

Slika 19: Fiksni koordinatni sustav vozila



Izvor: Autor modificirao prema odabranom izvoru [11]

Fiksni koordinatni sustav vozila, prikazan na slici 19, definira kretanje vozila po osima u desnorukom pravokutnom koordinatnom sustavu. Ishodište se nalazi u točki CG koja je ujedno i centar gravitacije. Prema SAE sustavu, koordinate su sljedeće [11]:

x – Kretanje po longitudinalnoj osi (prema naprijed)

y – Kretanje po lateralnoj osi (prema desno)

z – Kretanje po vertikalnoj osi (prema dolje)

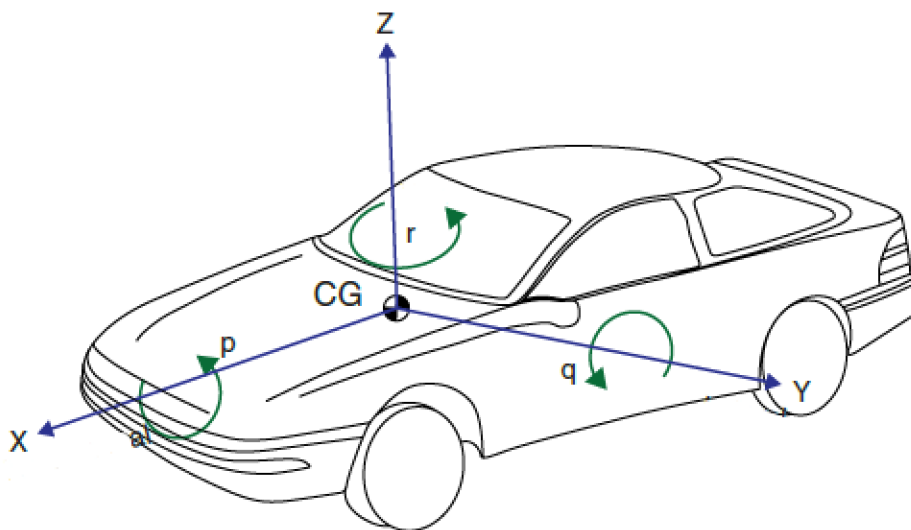
$p$  – Brzina kotrljanja oko x-osi

$q$  – Brzina nagiba oko y-osi

$r$  – Brzina skretanja oko z-osi

Također se često upotrebljava i izvedba sustava sa pozitivnom Z-osi koja gleda prema gore i X-osi koja gleda prema naprijed. Rezultat toga je Y-os čija je pozitivna strana usmjerena od lijeve strane vozila:

Slika 20: Fiksni koordinatni sustav vozila – alternativna izvedba



Izvor: Autor modificirao prema odabranom izvoru [11]

Alternativna izvedba se razlikuje po rasporedu samih osi, a time i pozitivnim dijelovima u odnosu na dio vozila. U ovom slučaju su koordinatne opisane na sljedeći način:

x – Kretanje po longitudinalnoj osi (prema naprijed)

y – Kretanje po lateralnoj osi (prema lijevo)

z – Kretanje po vertikalnoj osi (prema gore)

$p$  – Brzina kotrljanja oko X-osi (pozitivan iznos prema desno)

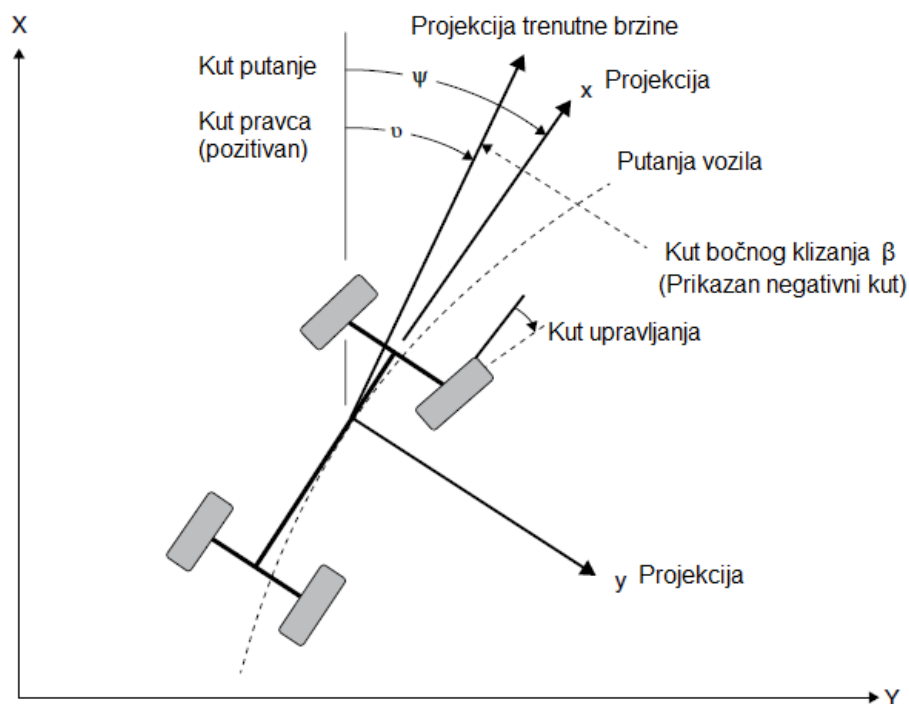
$q$  – Brzina nagiba oko Y-osi (pozitivan iznos prema dolje)

$r$  – Brzina skretanja oko Z-osi (pozitivan iznos prema lijevo)



Kretanje je vozila je dalje opisano sa kretanjima i brzinama kretanja već spomenutih veličina u fiksnom koordinatnom sustavu vozila, ali se kretanje uspoređuju sa zemljanim fiksnim koordinatnim sustavom. Zemljani fiksni koordinatni sustav se uzima u obzir na mjestu gdje je promatrano kretanje započelo i poštuje pravila desnorukog pravokutnog koordinatnog sustava. Koordinatne i smjerovi pozitivnih osi su u skladu sa SAE fiksnim koordinatnim sustavom (slika 19) za osi x i y (kretanje prema naprijed i u desno) [11].

Slika 21: Vozilo u zemljanom fiksnom koordinatnom sustavu



Izvor: Autor modificirao prema odabranom izvoru [11]

Kutovi koji opisuju odnose u kretanju sa slike su:

$\psi$  – Kut putanje (kut između x i X u ravnini tla)

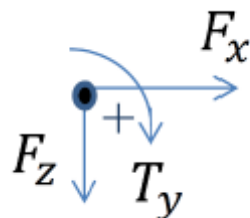
$\nu$  - Kut pravca (kut između vektora brzine vozila i X-osi)

$\beta$  - Kut bočnog klizanja (kut između x-osi i vektora brzine vozila)

Za međusobni odnos fiksnog koordinatnog sustava vozila i zemljanog fiksnog koordinatnog sustava, definirani su Eulerovi kutovi. Njih se određuje pomoću tri rotacije. Sa početkom u zemljanom koordinatnom sustavu, sustav se prvo rotira oko z-osi (skretanje). Nakon toga se rotira oko y-osi (nagib) i konačno oko x-osi (kotrljanje). Važno je držati se slijeda rotacija zbog kasnijeg ponašanja vozila uslijed Eulerovih kutova. [11]

Djelovanje vanjskih sila na vozilo se može opisati kao jedinstveni vektor sile koji se sastoji od sljedećih komponenti:

Slika 22: Komponentne sile



Izvor: Sweed, E.M.: „Design and finite element analysis of formula student braking system“, Escola Superior de Tecnologia e Gestão of Instituto Politécnico de Bragança, Bragança, 2021 [3]

Uzdužna (longitudinalna) sila –  $F_x$  prikazuje komponentnu vektora sile uzduž x-osi, a bočna (lateralna) sila –  $F_y$  je komponentna vektora sile u smjeru y-osi. Normala sile –  $F_z$  prikazuje komponentnu vektora sile u smjeru z-osi.

Na primjer, sila povezana sa naprezanjem gume djeluje prema gore i zbog toga je negativna u ovakvom koordinatnom sustavu. Odlukom norme SAEJ670e, ta sila se definira kao normala sile usmjerena prema dolje i vertikalne sila koja joj je inverzna. Time je pojednostavljen i otklonjen problem negativne vrijednosti.

Za opisivanje i analizu dinamike vozila, kao osnova se koristi drugi Newtonov zakon. Principi ovog zakona vrijede za oba sustava, translacijski i rotacijski. Translacijski sustav je opisan pomoću mase tijela i njene akceleracije u zadanom smjeru. Taj iznos je jednak iznosu vanjskih sila koja djeluju na tijelo (u istom smjeru), uz pretpostavku da je masa fiksirana.

$$F_x = m * a_x \quad (4.1)$$

Gdje je:

$F_x$  – Sile u smjeru x-osi

$m$  – Masa tijela

$a_x$  – Akceleracija u smjeru x-osi

Kod rotacijskog sustava se proučava umnožak momenta inercije i rotacijskog ubrzanja tijela uzduž određene osi. Taj umnožak je jednak momentu na toj osi.

$$T_x = I_{xx} * a_x \quad (4.2)$$

Gdje je:

$T_x$  – Momenti oko x-osi

$I_{xx}$  – Moment inercije oko x-osi

$a_x$  – Akceleracija oko x-osi

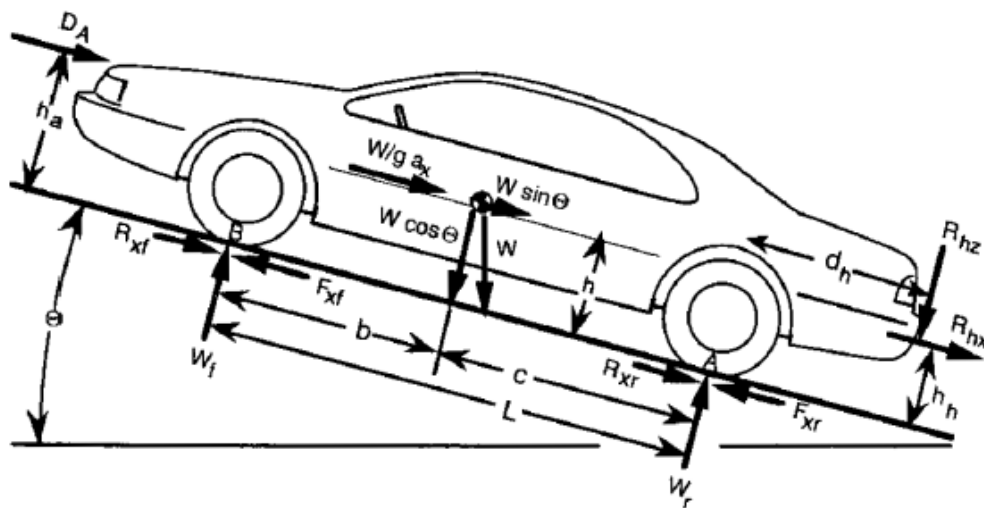
Određivanjem ograničenja oko promatranog tijela, može se primijeniti drugi Newtonov zakon. Pri svakoj interakciji sa vanjskim uvjetima, potrebne sile i/ili momenti su zamijenjeni, uključujući djelovanje gravitacijskih sila. Na taj način se ostvaruje dijagram slobodnog tijela kako bi se vizualizirale primijenjene sile i momenti, kao i njihove reakcije na tijelo. [3]

Sljedeća važna stavka za pravilno zaustavljanje vozila je dinamičko opterećenje osovina. Promatrajući raspodjelu masu ostvaruje se pravilna raspodjela opterećenja po kotačima. Vozilo neće dostići maksimalno usporavanje uz pomoć kočnica do trenutka kada su na sva četiri kotača tj. gume istovremeno dosegle vrhunac trenja. Nepravilna raspodjela prouzročiti će blokiranje jednog kraja prijevremeno i smanjiti

sposobnost kočenja, pa čak i gubitak kontrole nad vozilom. Cilj je dovesti obje osovine do faze blokiranja istovremeno.

Izjednačavanje djelovanja kočnica na prednjoj i stražnjoj osovini ostvaruje se pravilnom raspodjelom tlakova kočenja. Time se optimizira rad kočnica na oba kraja, kako bi se prilagodile maksimalnim silama trenja za zadani slučaj. Trenutno opterećenje kočenjem i vrhunac koeficijenta kočenja su glavni pokazivači vrhunca sile prijanjanja guma na osovinu. Kada stražnja osovina koči, dinamičko opterećenje se prenosi na prednju osovinu i stvara statičko opterećenje na osovini, kao i doprinos dodatnih dinamičkih opterećenja. [3]

Slika 23: Utjecaji na vozilo



Izvor: Gillespie, T.D.: „Fundamentals of Vehicle Dynamics“, Society of Automotive Engineers, Warrendale, 2021. [11]

$W$  – Težina u točki centra gravitacije

$W_f$  – Težina na prednjem kotaču

$W_r$  – Težina na stražnjem kotaču

$F_{xf}$  – Sila trenja na prednjem kraju

$F_{xr}$  – Sila trenja na stražnjem kraju

$R_{xf}$  – Otpor kotrljanju na prednjem kraju

$R_{xr}$  – Otpor kotrljanju na stražnjem kraju

$R_{hr}$  – Uzdužno opterećenje u stanju povlačenja prikolice

$R_{hz}$  – Vertikalno opterećenje u stanju povlačenja prikolice

$D_A$  – Aerodinamično opterećenje na visini  $h_a$

Kao što je prikazano na slici 23, svaka osovina preuzima statičko opterećenje uz dodatno preneseno opterećenje sa jedne osovine na drugu – kao rezultat djelovanja drugih sila na vozilo. Opterećenje prednje osovine se može odrediti dodavanjem momenata oko točke A (ispod stražnjih guma). Ukoliko vozilo nema iznos nagiba tj. nagib kao komponentna (slika 19) je jednak nuli, onda će i suma momenata u točki A biti jednaka nuli [3].

$$W_f L + D_A h_a + \frac{W}{g} a_x h + R_{hx} h_h + R_{hz} d_h + W h \sin \theta - W c \cos \theta = 0 \quad (4.3)$$

Vožnja uzbrdo korespondira pozitivnim kutom  $\theta$ . Pomoću izraza pod 4.3 moguće je izvući  $W_f$  i prema sličnoj izvedenici za točku B, dobije se i  $W_r$  [11]. Opterećenja na osovinama tada glase:

$$W_f = (W c \cos \theta - R_{hx} h_h - R_{hz} d_h - \frac{W}{g} a_x h - D_A h_a - W h \sin \theta) / L \quad (4.4)$$

$$W_r = (W b \cos \theta + R_{hx} h_h + R_{hz} (d_h + L) + \frac{W}{g} a_x h + D_A h_a + W h \sin \theta) / L \quad (4.5)$$

Statičko opterećenje se određuje kada je vozilo nepomično na ravnoj podlozi. Zbog toga je kut  $\theta$  jednak nuli, pa i varijable  $R_{hx}$ ,  $R_{hz}$ ,  $a_x$  i  $D_A$  postaju jednake nuli. Prema tome onda vrijedi [11]:

$$W_{fs} = W \frac{c}{L} \quad (4.6)$$

$$W_{fr} = W \frac{b}{L} \quad (4.7)$$

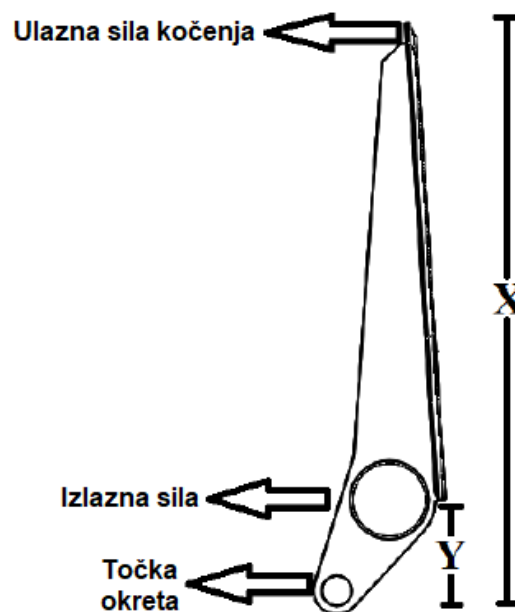
Dalje onda slijedi da je dinamičko opterećenje [3]:

$$W_f = W \frac{c}{L} + \frac{h}{L} \frac{W}{g} D_x = W_{fs} + W_d \quad (4.8)$$

$$W_r = W \frac{c}{L} - \frac{h}{L} \frac{W}{g} D_x = W_{fs} - W_d \quad (4.9)$$

Kako bi se savladalo potrebno opterećenje, sustav kočenja započinje sa djelovanjem pritiskom na pedalu kočnice. Prednost i svojstvo pedale kočnice je da ona, poput poluge, uveličava djelovanje sile od strane stopala vozača. Mehanička prednost pedale kočnice ili omjer pedale za sustav kočenja bez pojačivača sile kočenja je unutar 5:1, a u sustavima sa pojačivačem unutar 3:1 omjera. Omjer pedale proizlazi iz njezinih dimenzija:

Slika 24: Omjer pedale



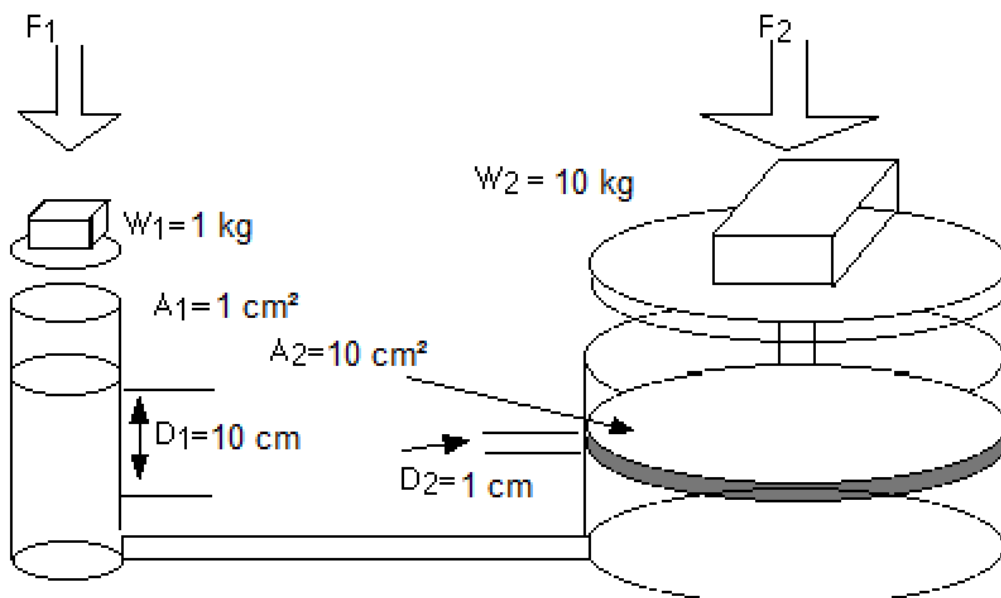
Izvor: Autor modificirao prema odabranom izvoru [3]

Omjer pedale je opisan kao omjer udaljenosti između točke ulazne sile kočenja do točke okreta (X) i točke izlazne sile do točke okreta (Y), kao što je prikazano na slici 24. Izraz za izračunavanje izlazne sile je sljedeći [3]:

$$F_{izlaz} = F_{ulaz} * \text{Omjer pedale} \quad (4.10)$$

Također, još jedno važno svojstvo dinamičkog sustava vozila i kočionog sustava je nestlačivost fluida. Prema Pascalovom zakonu, fluidi poput vode ili ulja, koriste se u hidrauličkim sustavima za prijenos silu unutar fluida sa jednog mjesta na drugo. Rad na bazi ovog zakona je moguć zbog njegove definicije, da je tlak fluida u zatvorenom sustavu jednak na svim mjestima. To znači da djelovanjem pedale kočnice i povećanjem tlaka u glavnom kočionom cilindru, tlak se jednoliko povećava i u cijelom sustavu. Glavna značajka, kao i kod pedale kočnice, je umnožavanje ulazne sile. Na primjeru automobilske dizalice bi to izgledalo ovako:

Slika 25: Automobilska dizalica



Izvor: Autor modificirao prema odabranom izvoru [3]

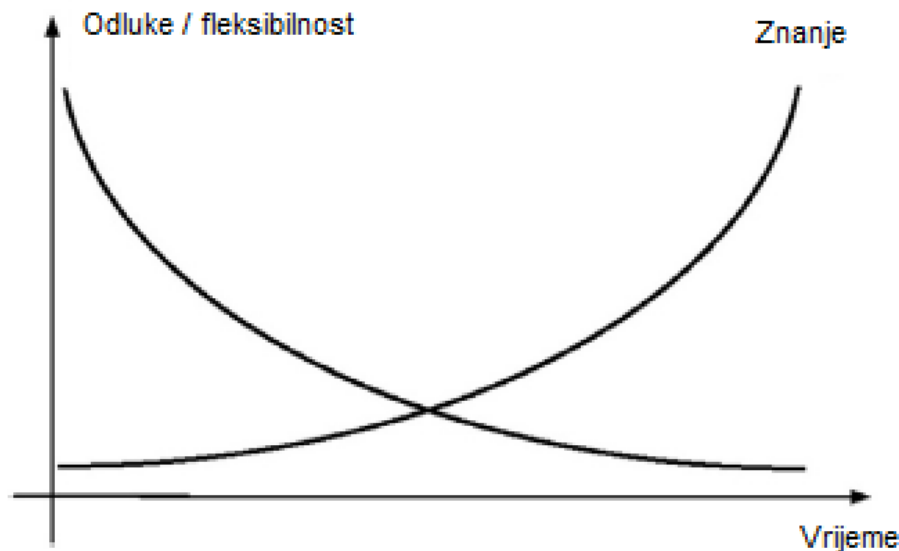
Kao što je prikazano na slici 25, djelovanje težine (sile) u iznosu od 1 kg na klip površine  $1 \text{ cm}^2$  ostvaruje se pomak klipa 10 cm. Istisnuti fluid prisilnim ulaskom u drugi dio dizalice, djeluje na klip površine  $10 \text{ cm}^2$  i težine 10 kg te pomiče ga za 1 cm. To potvrđuje spomenuti Pascalov zakon i konstanti tlak unutar zatvorenog sustava. Prikazani primjer bi imao omjer 10:1, a to proizlazi iz sljedećeg zapisa:

$$\text{Omjer} = \frac{D_1}{D_2} = \frac{A_2}{A_1} \quad (4.11)$$

## 5. Softver za 3D modeliranje i simulacije napreznja

Razvoj i izrada svakog proizvoda prolazi kroz problem poznatiji kao „paradoks dizajna“. Do toga dolazi zbog razlike između znanja inženjera i fleksibilnosti broja odluka koje može donijeti kroz razvojni ciklus. [12]

Slika 26: Paradoks dizajna



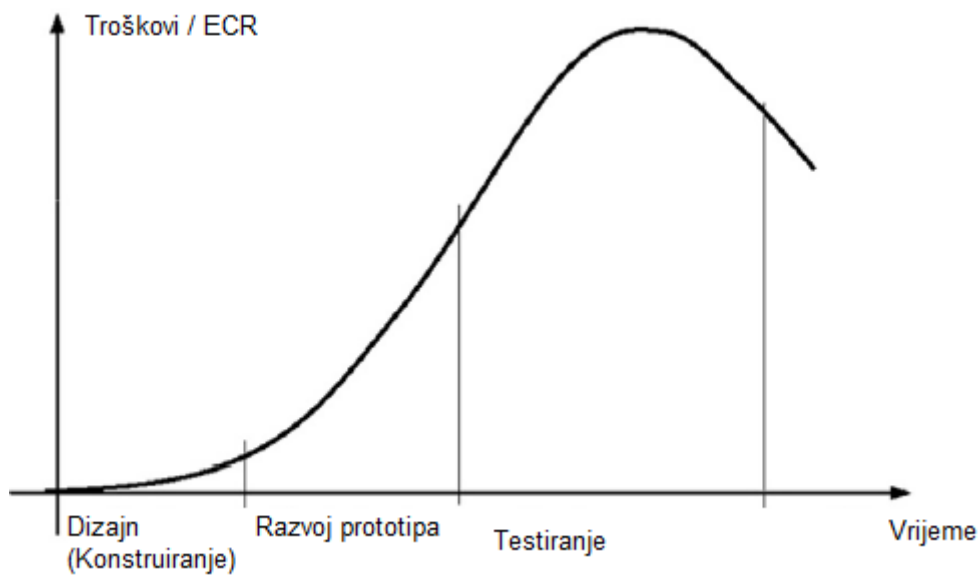
Izvor: Autor modificirao prema odabranom izvoru [12]

Slika opisuje razvojni proces jednog proizvoda i problematiku kroz razvoj. Važne i velike odluke se donose u početnoj fazi razvoja, kada je razumijevanje proizvoda znatno manje. Posljedica toga je da su promjene potrebne u kasnijem dijelu razvoja, puno učestalije. To je posljedica boljeg shvaćanja proizvoda i ispravljanje početnih pogrešaka.

U konvencionalnom razvoju proizvoda, konstruiranje (dizajn) i proizvodnja su često razdvojeni. Zbog toga dolazi do problema u procesu početka proizvodnje i ispravljanja dizajna koji nije optimiziran mogućnostima proizvodnje. Takvim pristupom, razvoj proizvoda postaje duži, skuplji i javlja se mogućnost kompromisa na kvaliteti zbog kašnjenja. Troškovi i broj zahtjeva inženjerskih promjena (*eng. Number of engineering changes*) ili ECR se koriste kao mjerilo za nadzor procesa.



Slika 27: Konvencionalni razvojni ciklus proizvoda

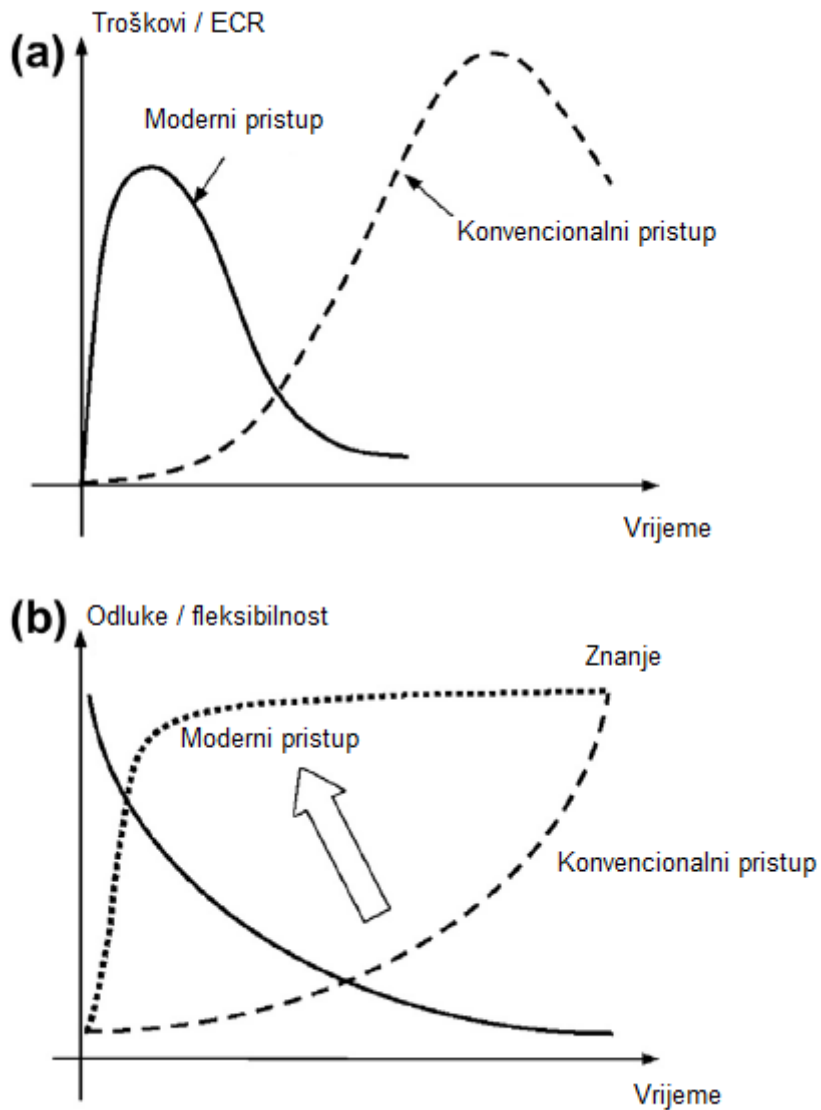


Izvor: Autor modificirao prema odabranom izvoru [12]

U konvencionalnom procesu, prema slici 27, poznato je da se oko 8% budžeta proizvoda ulaže u fazu dizajna. U ranim fazama, sam dizajn određuje oko 80 % troškova životnog vijeka proizvoda, te je zbog toga izrazito važan. [12]

Razvojem tehnologije i softvera, stvorena je mogućnost vrlo povoljne implementacije novih metoda i pomagala u taj proces. Digitalne opcije razvoja, ne zamjenjuju ranije spomenuti pristup. Njihova upotreba je omogućila implementaciju svih zamisli i ideja kroz virtualno (digitalno) i fizičko prototipno razvijanje, kao i kvantitativne metode za donošenje odluka u vezi konstruiranja. Implementacijom digitalnog pristupa stvara se mogućnost za razvoj proizvoda bolje kvalitete po manjoj cijeni. Sa velikom količinom podataka i saznanja dobivenih iz simulacije, donose se bolje odluke za daljnji razvoj. Napretkom računala i softvera, sve više fizičkih testova je zamijenjeno računalnim simulacijama. Rezultat toga je smanjenje troškova, ali i velike vremenske uštede.

Slika 28: Moderni razvojni ciklus proizvoda



Izvor: Autor modificirao prema odabranom izvoru [12]

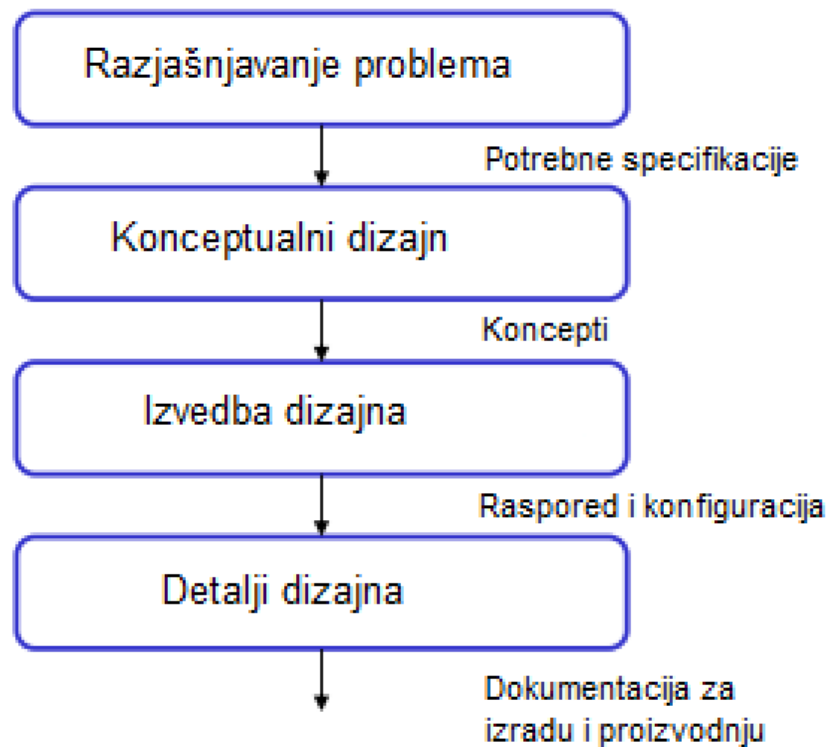
Slika 28 prikazuje prednosti implementacije spomenutih modernih metoda razvoja i upotrebe softvera za modeliranje i simulacije prema sljedećim usporedbama:

- Usporedba troškova i trajanja za konvencionalni i moderni pristup
- Usporedba znanja (saznanja) o proizvodu za konvencionalni i moderni pristup

## 5.1. Općenito

Oblikovanje s pomoću računala ili CAD (*eng. Computer-Aided Design*) služi za stvaranje nacрта ili 3D oblika na računalu unutar prostorno definiranih veličina. Osim toga, omogućava vizualizaciju i simulacije. Proces konstruiranja je sljedeći:

Slika 29: Proces konstruiranja



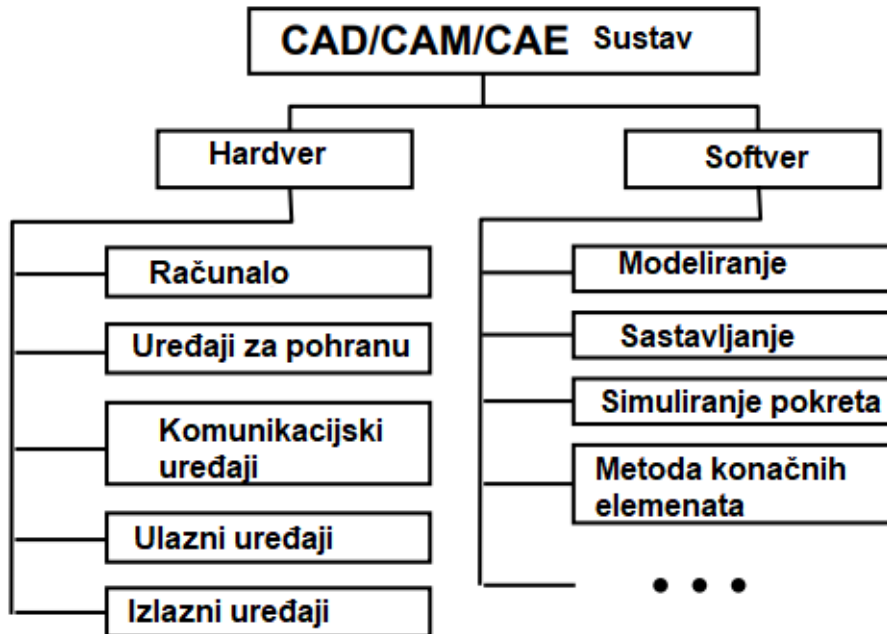
Izvor: Autor modificirao prema odabranom izvoru [13]

Podjela prema primjeni i području razmatranja se dijeli na oblikovanje (*eng. Design*), proizvodnju (*eng. Manufacturing*) i inženjerstvo (*eng. Engineering*). Prema tome su osmišljene glavne opisne definicije [13]:

- CAD – tehnologija koje se bave upotrebom računala kao pomoć u stvaranju, izmjenama, analizi i optimizaciji za konstruiranje.
- CAM – tehnologije koje se bave upotrebom računala za planiranje, vođenje i kontrolu proizvodnih procesa i operacija.
- CAE – tehnologije koje se bave upotrebom računala za analiziranje CAD geometrije, simulaciju modela i praćenje ponašanja u zadanim uvjetima.

Komponentne spomenutih sustava se dijele hardverske i softverske:

Slika 30: Komponentne CAD/CAM/CAE sustava



Izvor: Autor modificirao prema odabranom izvoru [13]

Hardverski dio, osim standardnih komponenti, može sadržavati i dodatne specifične uređaje koji pomažu u radu. Često korišteni dodatni ulazni uređaji su miševi osmišljeni za upotrebu u 3D aplikacijama i skeneri koji ubrzavaju početnu fazu rada (slika 31).

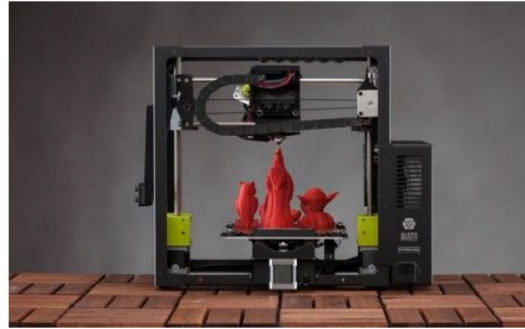
Slika 31: Dodatni ulazni uređaji – primjeri



Izvor: Autor modificirao prema odabranom izvoru [13]

Dok su izlazni uređaji puno rasprostranjeniji, ovisno o primjeni i potrebama. Na primjer, za ispis velikih nacрта ili dokumentacije i 3D printer:

Slika 32: Dodatni izlazni uređaji – primjeri



Izvor: Autor modificirao prema odabranom izvoru [13]

Za neke primjene se koristi i integrirani ulazno/izlazni uređaj uz pomoć virtualne stvarnosti kako bi se dobio osjećaj za prostor i uvidjeli potencijalni problemi.

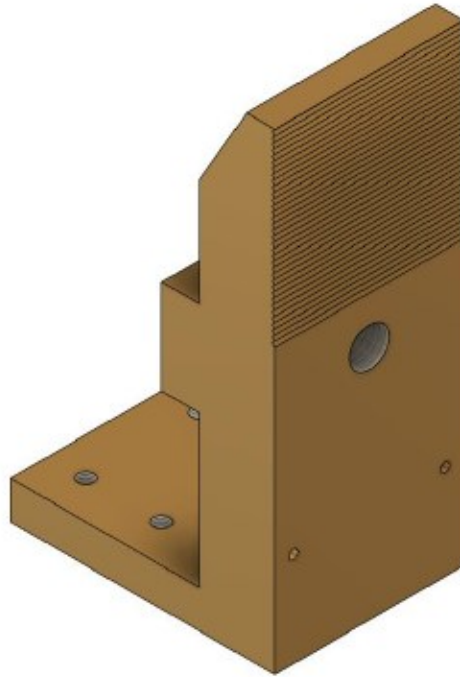
Slika 33: Integrirani ulazno/izlazni uređaj – virtualna stvarnost



Izvor: Autor modificirao prema odabranom izvoru [13]

Sa strane softvera se sve više okreće ka topologiji od gore prema dolje, kreiranjem modela pa stvaranjem nacрта iz njega. Na taj način se olakšava rad i pristup, pa i izmjena, zasebnih komponenti. Kao što je prikazano na slici 30, komponentne sklopa je prvo potrebno modelirati i kasnije sklopiti.

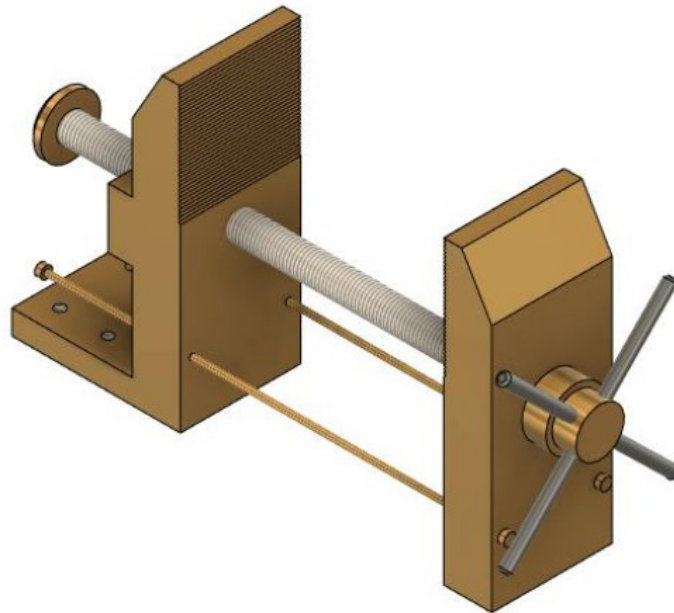
Slika 34: Primjer modela – škripac



Izvor: Autor - obrada podataka

Na slici je prikazan jedan dio sklopa tj. jedan model. Taj model, uz ostale druge modele, kasnije je sastavljen u sklop za koji je namijenjen:

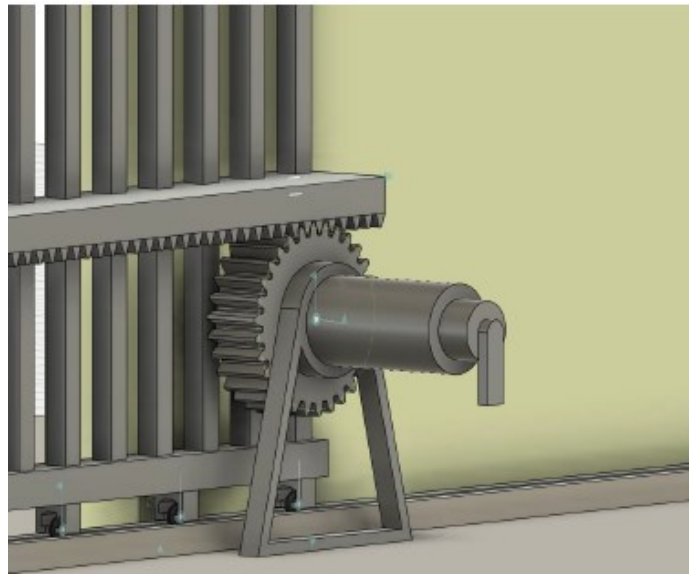
Slika 35: Primjer sklopa – škripac



Izvor: Autor - obrada podataka

Kompleksniji sustavi imaju mnoštvo sklopova u sebi, pa tako neki sklopovi postanu pod sklopovi većih sklopova itd. ... Odnos pod sklopova i većih sklopova ne mora biti zavisian, ali i može biti.

Slika 36: Primjer višestrukih sklopova



Izvor: Autor - obrada podataka

Na slici 36 je prikazan primjer jednog sklopa koji u sebi ima mnoštvo pod sklopova. Svaki pod sklop u sebi sadrži pojedinačne elemente tj. modele.

Važno je odabrati softver koji sadrži potrebne mogućnosti za zadanu slučaj ili ispunjava širi spektar funkcionalnosti za potrebe poslovanja (šira primjena). Sljedeća tablica prikazuje pregled mogućnosti nekih od najkorištenijih softvera:

Tablica 3: Pregled mogućnosti najkorištenijih softvera

	Izrada nacrta	Parametarsko modeliranje/ sastavljanje	Integrirane simulacije	Integrirana proizvodnja
Siemens PLM NX Catia Pro-Engineer	●	●	●	●
SolidWorks Autodesk Inventor Solid Edge	●	●	●	
AutoCAD	●			

Izvor: Autor modificirao prema odabranom izvoru [13]



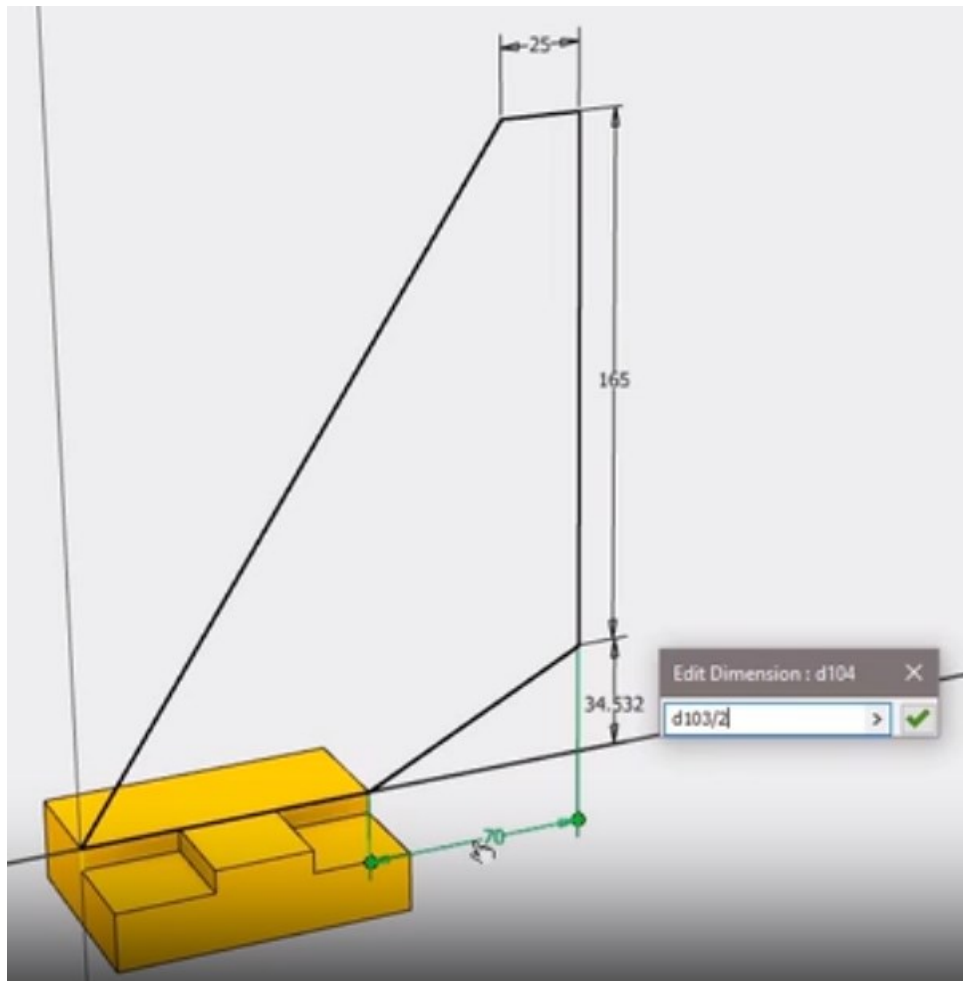
## 5.2. Autodesk Inventor

Autodesk Inventor je softver razvijen od strane tvrtke Autodesk za primjenu u 3D konstruiranju, simulacijama, izradi dokumentacije i vizualizaciji. Softver je prvi put pušten u upotrebu 1999.g., a posljednjih godina se nove verzije objavljuju jednom godišnje (uz unaprjeđenja u međufazi). Za potrebe pomoći u izradi ovog diplomskog rada koristiti će se verzija Inventor Professional 2023.

Softver omogućava spoj parametarskog, direktnog, slobodnog i ograničenog načina konstruiranja. Sadrži razne alate poput: razvijanja metala (listova), konstruiranje okvira/nosača za zavarivanje, izrada i razvođenje cijevi, prezentiranje, vizualizaciju, simulacije i slično. [14]

Najčešće upotrebljavane značajke su parametarsko modeliranje, sastavljanje modela i izrada nacрта. Parametarsko modeliranje omogućava ograničavanje skica, dimenzija i upotrebu formula kao parametara. Na taj način se naknadne korekcije i izmjene mogu napraviti numerički, a model osvježiti sa novim izmjenama.

Slika 37: Autodesk Inventor – parametarsko modeliranje

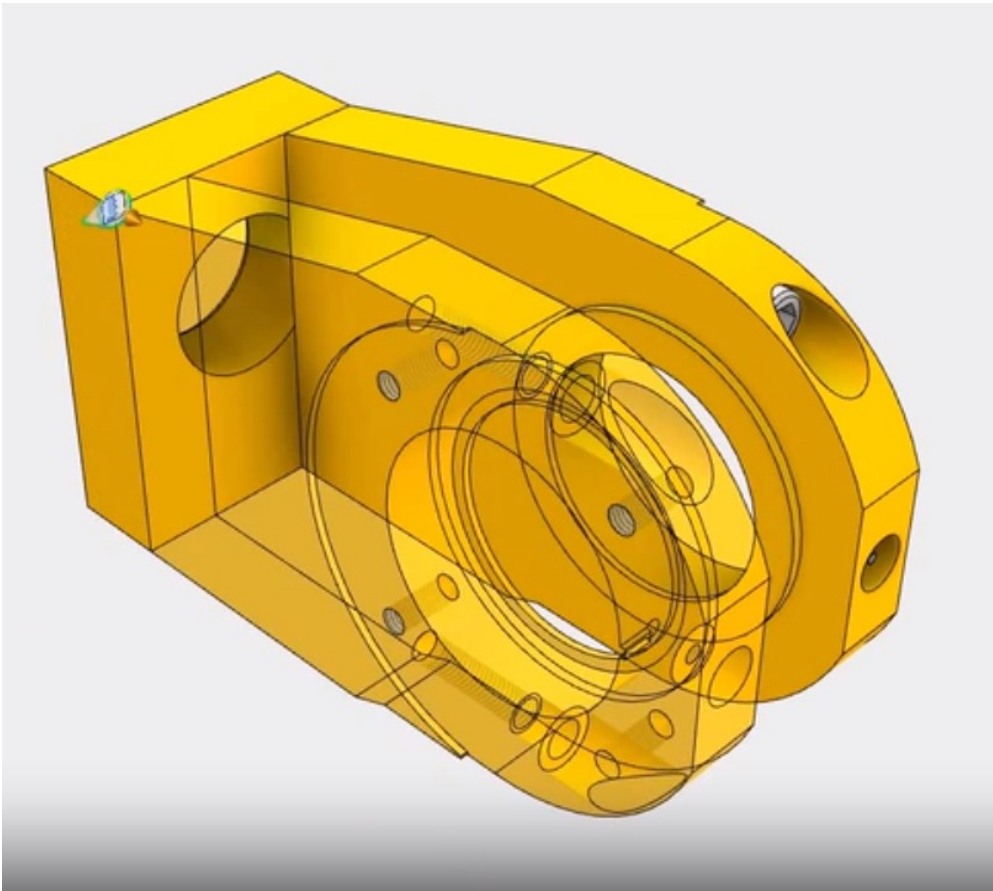


Izvor: <https://www.autodesk.com/products/inventor/overview>, pristupljeno 9.8.2023.

[14]

Sastavljanje modela u sklop je odličan način za provjeru funkcionalnosti i podudaranja dimenzija. Funkcija sastavljanja omogućava postavljanje ograničenja i međusobnih odnosa između različitih modela. Spojevi modela mogu biti čvrsti, klizni, rotacijski i slično. Sastavljeni sklop se može kao jedna cjelina dalje implementirati u ostatak dizajna. Korišteni modeli se mogu osvježiti unutar sklopa, ukoliko se izvrše izmjene nad njima na izvornom modelu. Također, postoji i dostupna baza podataka gotovih modela, dostupnih za upotrebu, koja se sastoji od mnoštva osnovnih elemenata poput vijaka, matica i sličnog.

Slika 38: Autodesk Inventor - sastavljanje modela

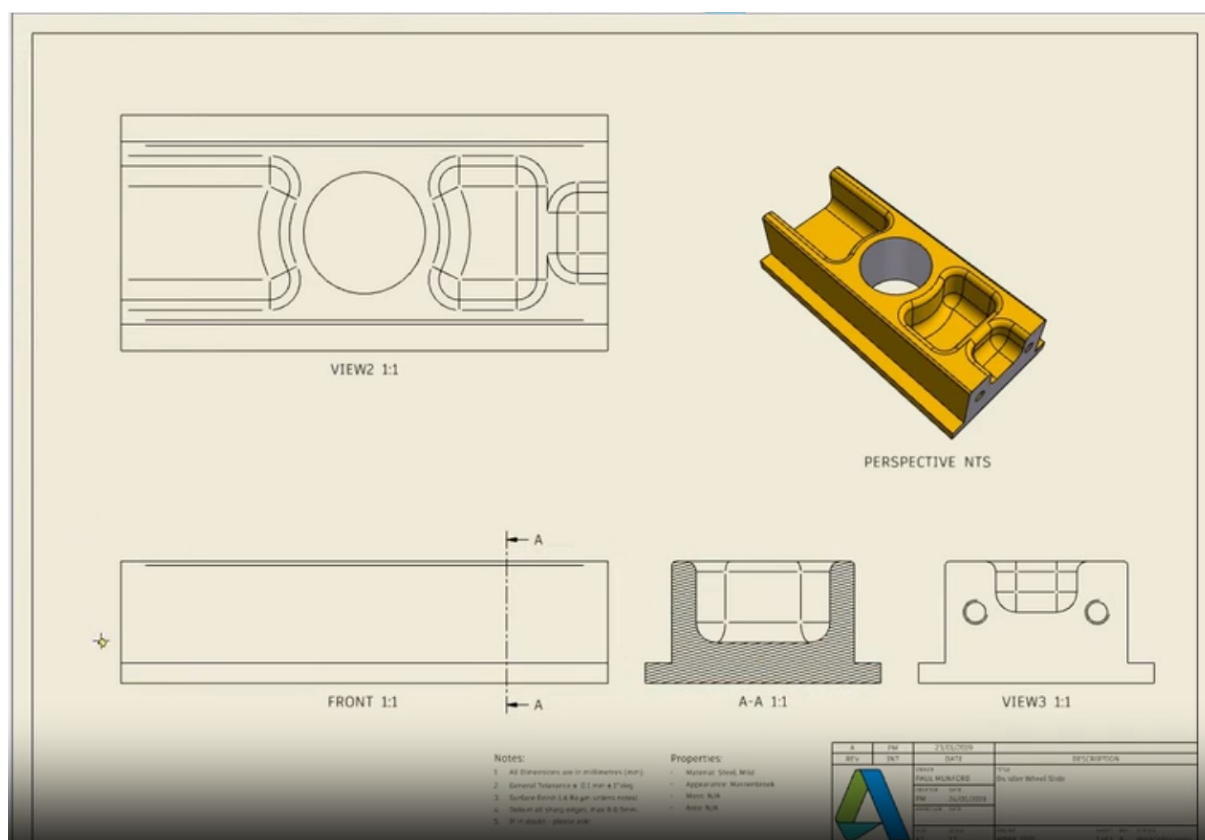


Izvor: <https://www.autodesk.com/products/inventor/overview>, pristupljeno 9.8.2023.

[14]

Izrada nacrtu prema konstruiranim modelima i sklopovima je relativno brza i omogućava prikaz različitih pogleda za nacrtu i dokumentaciju.

Slika 39: Autodesk Inventor – izrada nacrtu



Izvor: <https://www.autodesk.com/products/inventor/overview>, pristupljeno 9.8.2023.

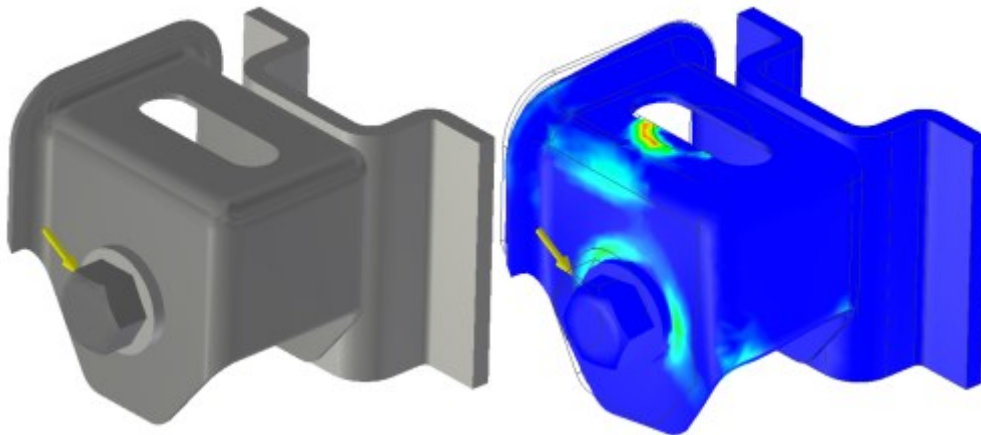
[14]

Softver pruža i mogućnosti simulacija nad modelom. Najčešće upotrebljavane simulacije su dinamička simulacija, simulacije naprezanja i animacije.

Dinamička simulacija omogućava primjenu sila na model za potrebe procjene kretanja komponente, njegove brzine i ubrzanja.

Simulacije naprezanja omogućavaju brzu provjeru dijelova ili detaljnu analizu cijelog modela. Na ovaj način se može pronaći i uvidjeti najbolje alternative za određeni dio ili sklop. Simulacijama u ranoj fazi postiže se zadovoljavajući dizajn bez kasnijih pojava loma ili deformiteta.

Slika 40: Autodesk Inventor – simulacije naprezanja



Izvor: <https://help.autodesk.com/view/INVENTOR/2024/ENU/?guid=GUID-61F01A5D-7E54-45A1-9698-7BB11F0AEE94>, pristupljeno 9.8.2023. [15]

Na slici je prikazan primjer simulacije naprezanja, područja sa „toplijim“ bojama poput narančaste i crvene indiciraju moguća područja pucanja ili deformiranja (kritična područja) prema zadanim uvjetima.

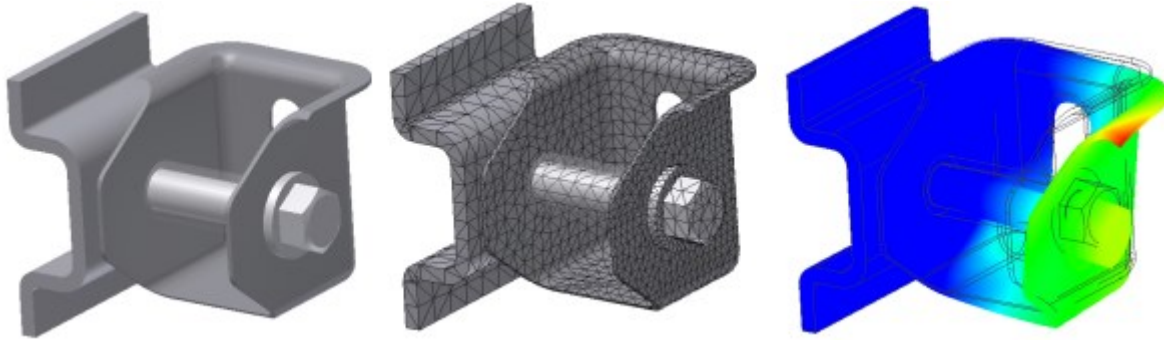
Okruženje za simulacije naprezanja je osmišljeno za upotrebu na modelima sa izotropnim materijalima tj. materijali čija su fizikalna i mehanička svojstva jednaka u svim točkama i smjerovima. [15] Koriste se dvije vrste simulacija naprezanja, a to su statička analiza i modalna analiza. Statička analiza provjerava opterećenja na strukturu, a modalna analiza prirodnu frekvenciju i pomicanje krutih tijela.

Nakon pokretanja simulacije nad zadanim modelom i odabira željenih parametara, pokreće se simulacija koja:

- Stvara slučajeve
- Izvršava geometrijsko modeliranje
- Izvršava detekciju dodirnih mjesta
- Generira mreže
- Rješava model za svaku točku

Nakon završetka simulacije, rezultati se prikazuju u grafičkom obliku (slika 41) kao zbir rezultata dobiven metodom konačnih elemenata prema kombinaciji definiranih parametara.

Slika 41: Autodesk Inventor – primjer rezultata simulacije



Izvor: <https://help.autodesk.com/view/INVNTOR/2024/ENU/?guid=GUID-61F01A5D-7E54-45A1-9698-7BB11F0AEE94>, pristupljeno 9.8.2023. [15]

Tipični proces simulacije naprezanja je sljedeći [15]:

1. Postaviti zahtjeve (iz propisanih normi za ispitivanje) – pretpostaviti ponašanje promatranog tijela uslijed djelovanja realnih naprezanja ili broja dinamičkih ciklusa naprezanja.
2. Pred procesiranje – definirati materijal i rubne uvjete (opterećenja i ograničenja) i specificirati dodirne uvjete, kao i željene parametre mreže.
3. Rješavanje – započeti simulaciju rješavanja matematičke reprezentacije modela i generirati rješenje. Za dobivanje rezultata, model se dijeli u manje elemente, a rješavač zbraja njihova individualna ponašanja, kako bi dobio pretpostavku ponašanja cijelog modela tj. sustava.
4. Naknadna obrada – prikaz i evaluacija rezultata.
5. Pregled očekivanja – proučavanje rješenja simulacije i poboljšanje početnih uvjeta.
6. Zaključak – Simulacija je završena ukoliko su očekivanja ispunjena i nema potrebe za poboljšanjem. U slučaju uočavanja poboljšanja pod točkom 5, nastaviti sa iteracijama.

### 5.3. Autodesk Fusion 360

Autodesk Fusion 360 je Autodesk-ov proizvod novije generacije. Osmišljen je da bude jak program za potrebe modeliranja. Njegova prednost je što sadrži integrirane, parametarske i svojstvene module u programu. Fusion 360 je prvi 3D CAD, CAM i CAE alat svoje vrste. Pruža mogućnost rada u timu, spajanja na digitalni oblak i mnoge druge oblike komunikacije.

Alati koje sadrži ovaj program omogućavaju brz i lagan rad, kao i otkrivanje novih ideja modeliranja. Potreban je pristup internetu za potpunu funkcionalnost i korištenje svih funkcija zbog rada na digitalnom oblaku (*eng. Cloud*). [16]

Ovo je odličan alat za studente, pojedince i firme koji žele razvijati stvari sami. Cijena programa je pristupačna u odnosu na njegove alternative. Sam rad je moguć i u modu bez interneta uz lokalno spremanje, koje je kasnije potrebno prebaciti na oblak za nastavak. Također, ovaj program pruža razne varijacije izrade dijelova. Postoji mogućnost izrade pojedinačnih tijela, izrade više tijela u jednom dijelu pa i izrade sklopova zasebno ili sa integriranim komponentama.

Slika 42: Autodesk Fusion 360 – koncept

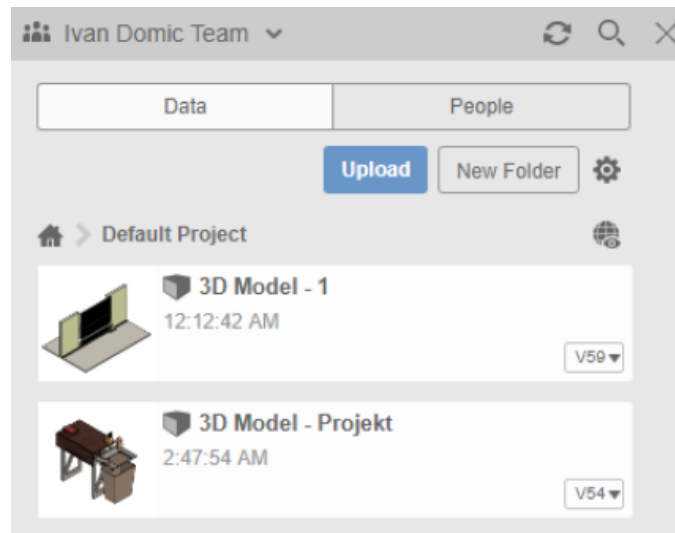


Izvor: Gaurav, V.; Samar, M.: „Autodesk Fusion 360 Black Book (2nd Edition) – Colored“, CAD/CAM/CAE Works, Gurgaon, 2018. [16]

Slika 42 prikazuje sam koncept ovog programa. Kao što je i prikazano, omogućeno je modeliranje, testiranje i proizvodnja istovremeno. Upravljanje datotekama i raditi u programu sa bilo koje lokacije koja ima pristup internetu, a razmjena podataka i suradnja je omogućena pomoću timova i dijeljenja u oblaku. Također, moguće je sortirati datoteke i dodijeliti ih na određeni projekt.

Izbornik programa prikazuje trenutne projekte i pruža umanjeni prikaz modela za lakše raspoznavanje unutar određenog tima (slika 43).

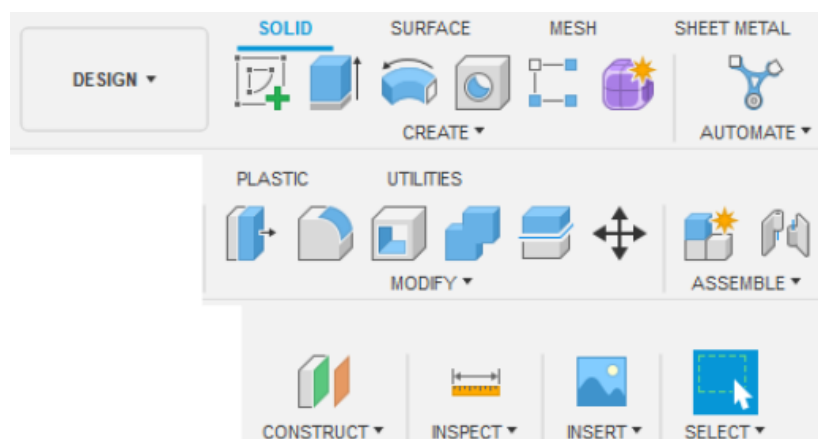
Slika 43: Autodesk Fusion 360 – primjer timskog okruženja i pristupu projektima



Izvor: Autor - obrada podataka

Slično kao i Autodesk Inventor, ovaj softver pruža mogućnosti sučelja tj. mogućnosti promjene radnog prostora. Autodesk Fusion 360 pruža mogućnosti dizajniranja, animacije, simulacije, izrade nacрта i mnogih drugih. Najčešće upotrebljavana okruženja su za konstruiranje i simulacije.

Slika 44: Autodesk Fusion 360 – alatna traka u konstrukcijskom okruženju



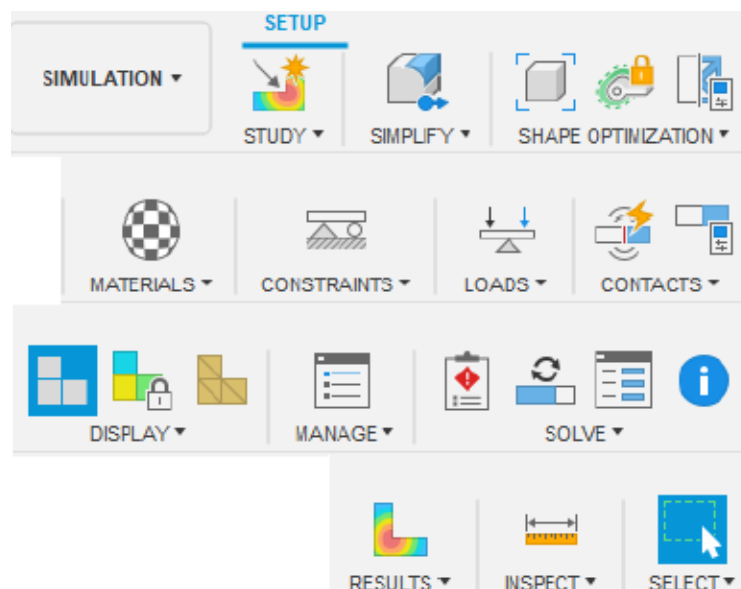
Izvor: Autor - obrada podataka



Na slici 44 je prikazana alatna traka u dizajn (konstrukcijskom) okruženju. Vidljivo je da sadrži mogućnosti stvaranja nove skice (nacrt), upravljanjem te skice i stvaranje 3D tijela, kao i drugih opcija za kreiranje modela. Sadrži i poseban modul za rad sa metalnim tijelima, za savijanje i oblikovanje. Uz to postoje i posebni moduli za plastične komponente i njihovi dodatci. Konstruirani model dalje je moguće modificirati, ograničavati ga odnosima i dodavati ga u sklopove.

Za potrebe ovoga rada na sljedećoj slici je prikazana i alatna traka od radnog prostora za simuliranje koji je potreban za optimizaciju oblika i razne druge simulacije nad modelom:

Slika 45: Autodesk Fusion 360 – alatna traka u simulacijskom okruženju

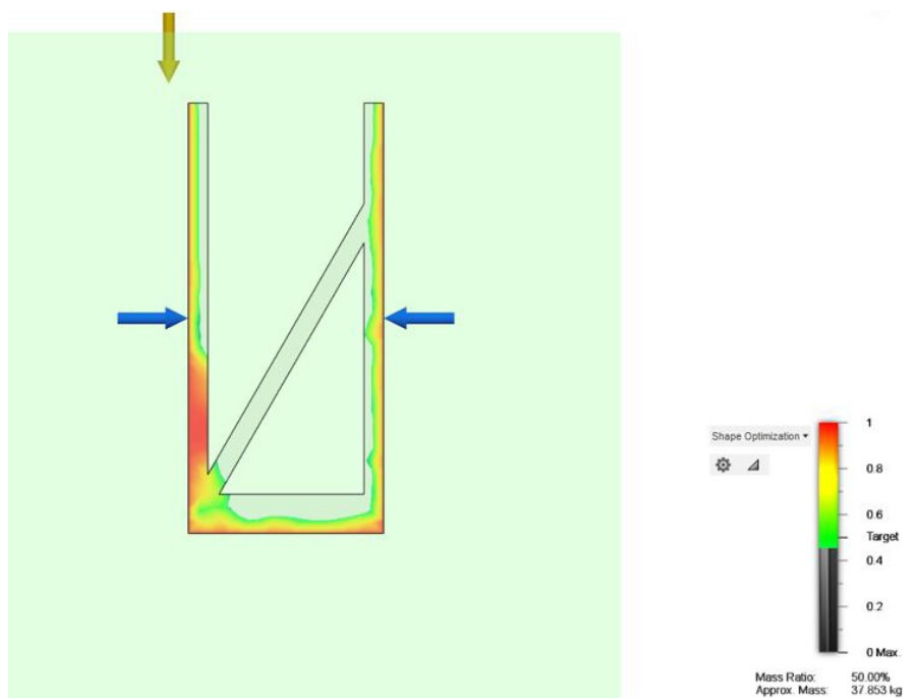


Izvor: Autor - obrada podataka

Simulacijsko okruženje pruža mogućnost kreiranja nove studije u kojoj se bira promatrano tijelo, postavljaju mreža, ograničenja, opterećenja na tijelo, materijal, kontakti površina i dijelova, prikaz i drugi dodatci prilikom simuliranja. Simulacija ima razne već spomenute opcije od kojih treba istaknuti optimizaciju oblika i pojednostavljivanje. Promatrani model je potrebno pojednostavniti kako bi se iz njega izbacili svi dijelovi koji ne pridonose na važnosti rezultata. To se radi zbog same mreže i brzine izvođenja. Dio za optimizaciju oblika dalje omogućava primjenu rezultata na odabrano tijelo i postavljanje parametara koliko je potrebno olakšati dio. Također, sadrži i druge opcije poput ograničavanja dijelova koji trebaju ostati nepromijenjeni zbog njihove geometrijske ili druge važnosti.

Postavljanjem simetrične ravnine određuje se željeno djelovanje, a prilikom podešavanja simulacije je potrebno postaviti željeno olakšavanje dijela. Izvršavanjem simulacije pod željenim opterećenjima, dobiven je grafički rezultat optimizacije oblika:

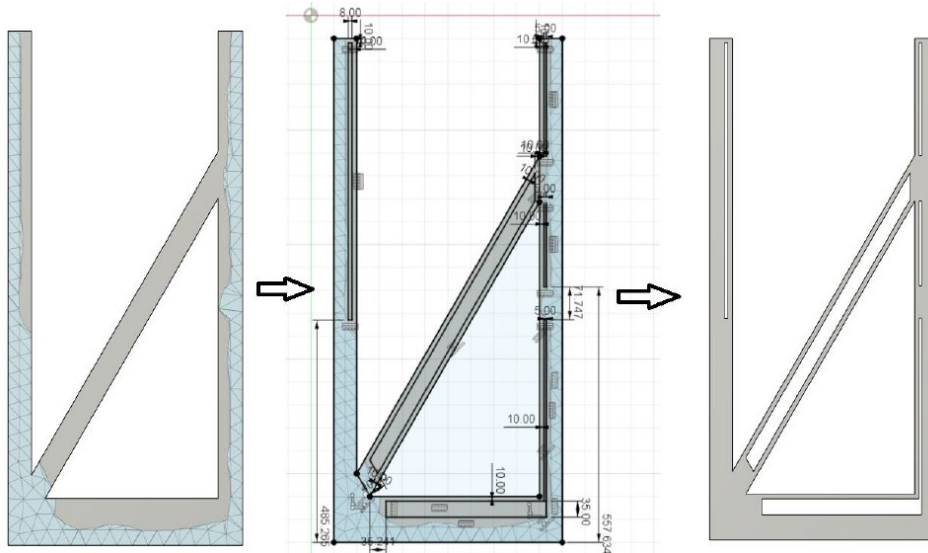
Slika 46: Autodesk Fusion 360 – primjer simulacija i optimizacije oblika



Izvor: Autor - obrada podataka

Dobiveni rezultat je moguće prikazati na modelu i koristiti točne bridove prikazane na simulaciji ili optimizirati ih na jednostavnije oblike zbog proizvodnje i zadržavanja svih vanjskih bridova. U slučaju sa slike je zadan slučaj koji bi zadovoljio željena opterećenja, a pri tome smanjio početnu masu za 50 %. Nakon daljnje optimizacije i prijenosa na model, ostvareno je smanjenje mase od 45 % uz znatno pogodniji dizajn:

Slika 47: Autodesk Fusion 360 – primjer implementacije rješenja i rezultat



Izvor: Autor - obrada podataka

## 6. Metoda konačnih elemenata

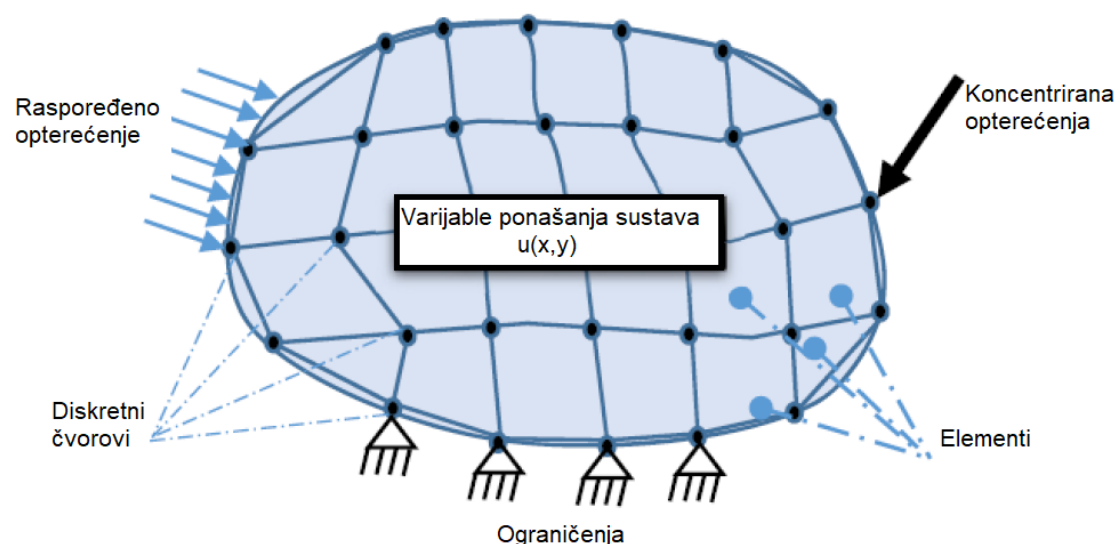
Metoda konačnih elemenata pripada u područje numeričkih metoda. To su metode koje se često koriste za rješavanje parcijalnih diferencijalnih jednadžbi. Rješenja koja proizlaze iz tih jednadžbi moraju biti konzistentna, stabilna i konvergentna. Najčešće numeričke metode su sljedeće [3]:

- Metoda konačnih elemenata – FEM (*eng. Finite Element Method*)
- Metoda rubnih elemenata – BEM (*eng. Boundary Element Method*)
- Metoda konačnih volumena – FVM (*eng. Finite Volume Method*)
- Metoda konačnih razlika – FDM (*eng. Finite Difference Method*)

Metoda konačnih elemenata ili FEM je najkorištenija numerička metoda. Ova metoda ima odličnu uspješnost u rješavanju parcijalnih diferencijalnih jednadžbi unutar kompleksnih domena koje su promjenjive u vremenu. Primjena je česta kod linearnih, nelinearnih, dinamičkih i sličnih metoda.

Rješavanje problema sustava se vrši pomoću diskretizacije problema. Time se problem pojednostavljuje, a svaki čvor je okružen elementima. Izračuni se vrše po čvorovima, a vrijednosti elemenata se interpoliraju. Sljedeća slika opisuje diskretizaciju:

Slika 48: Diskretizacija

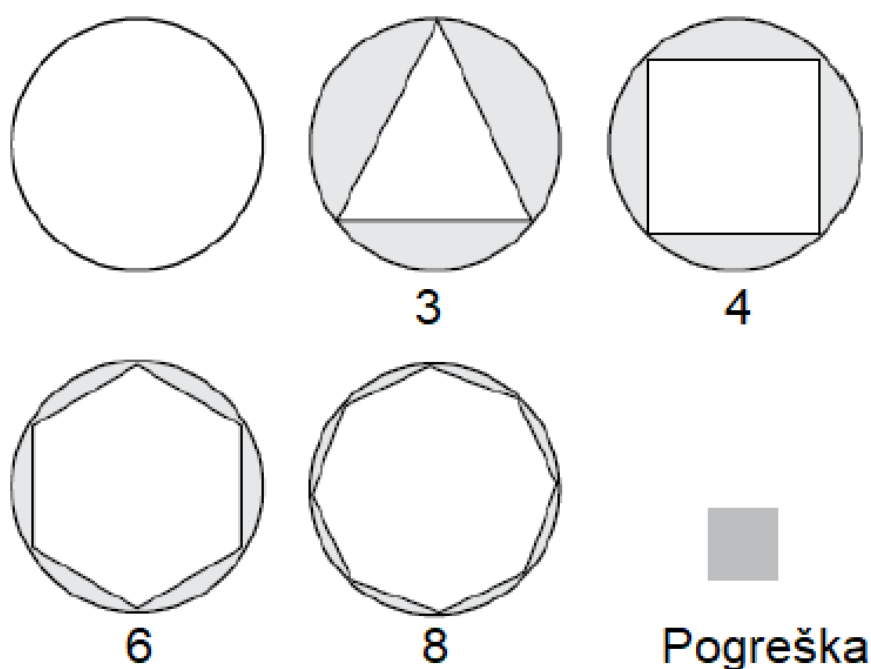


Izvor: Autor modificirao prema odabranom izvoru [3]

Stupnjevi slobode su ključan dio simulacija, opisuju minimalnu količinu elemenata potrebnih za lokaciju i stanje jedinice u prostoru. Ukupan broj stupnjeva slobode u mreži modela je jednak broju čvorova pomnožen sa brojem stupnjeva slobode po čvoru. Treba napomenuti da nemaju svi elementi šest stupnjeva slobode po čvoru. Broj stupnjeva slobode također varira ovisno o tipu elementa (koliko dimenzija sadrži) i vrsti simulacije. Na primjer, elementi u strukturalnoj analizi imaju šest stupnjeva slobode po čvoru. Tih šest stupnjeva po čvoru sadrže tri translacije, tri rotacije i nepoznat odmak. [17]

Nakon što je sustav diskretiziran, predstavljaju ga elementi i čvorovi. Elementi su pod domene, a čvorovi skup kutova (uglova) koji predstavljaju elemente. Varijable ponašanja sustavu se koriste za karakteriziranje ponašanje pojedinih jediniki. Povećanjem broja linija i točki računanja postižu se manje pogreške:

Slika 49: Broj čvorova i elemenata

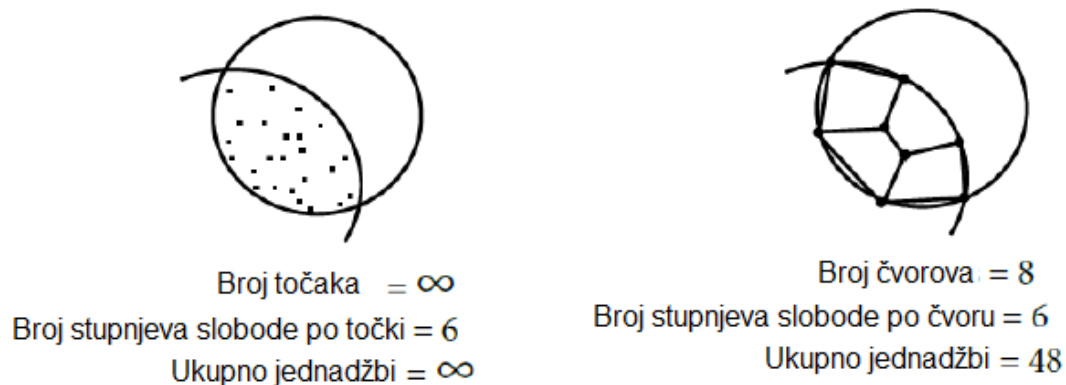


Izvor: Autor modificirao prema odabranom izvoru [17]

Kao što je prikazano na slici 49, brojevi ispod primjera prikazuju broj linija, a osjenčano područje prikazuje pogrešku. Međutim, stvaranjem mreže sa velikim brojem čvorova nije najoptimalnije rješenje, zbog vremena potrebnog za rješavanja takvog sustava ovisno o broju čvorova i elemenata. [17] Potrebno je odabrati optimalnu „gustoću“ mreže sa zadovoljavajućim odstupanjem unutar racionalne vremenske domene izračunavanja rješenja.

Metoda konačnih elemenata koristi mrežu kako bi diskretizirala neprekidnu domenu promatranog slučaja, smanjujući pri tome broj nepoznanica na zadovoljavajući broj. Osim toga, mreža omogućava aproksimaciju rješenja sustava pomoću razdvajanja modela na grupu manjih pod modela.

Slika 50: Ovisnost broja jednadžbi o parametrima mreže



Izvor: Autor modificirao prema odabranom izvoru [17]

Slika 50 prikazuje ovisnost i važnost parametara mreže. Iako se mreža generira automatski, često je potrebna manualna korekcija određenih dijelova. [17] Naknadno su u softveru ugrađene opcije za ispravljanje najčešćih nepravilnosti mreže. Problematična područja su preklapanja materijala, otvori u modelu itd. ...

Sve primarne karakteristike konačnih elemenata su dio matrice krutosti, koja sadrži sve podatke o geometriji i ponašanju materijala elementa. Time je određen pomak čvora pod utjecajem sila i momenata. Sastavni dio rješavanja problema statičkog naprezanja je jednadžba linearnog statičkog naprezanja:

$$[F] = [K][D] \quad (6.1)$$

Gdje je:

[F] – Matrica sila

[K] – Matrica pomaka

[D] – Matrica krutosti

Kod rješavanja ovakvog slučaja, sila i krutost su poznati a pomak je nepoznanica. Ovime vrijedi da je potrebno postaviti matricu krutosti u zadanom obliku (reda, kvadra ili tetraedra). Stvaranjem mreže i rješavanjem pomaka čvorova izračunavaju se naprezanja. Pojam matrice krutosti proizlazi iz njene upotrebe u simulaciji i metodi konačnih elemenata, kao otpor elemenata na promjenu pri djelovanju vanjskih sila. [3]

Primjena softvera za rješavanje mreže konačnih elemenata je nužna zbog mogućnosti postojanja više stotina tisuća stupnjeva slobode. Simulacije nad modelima vrše izračunavanje matrica krutosti, sastavljanje globalne matrice krutosti i rješavanje problema. Svakako, potrebno je uz to definirati uvjete i parametre željenog slučaja, kao i odabrati postavke mreže.

## 7. Pedala kočnice

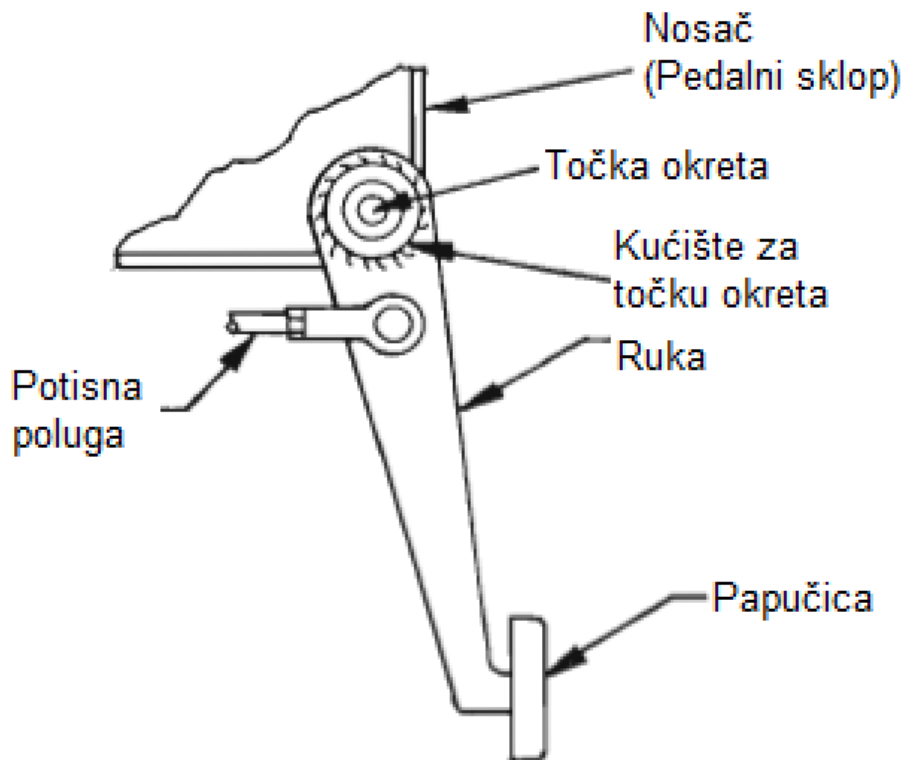
Pedala kočnice je sastavni dio kočionog sustava automobila. Ona se u autoindustriji specificira kao sigurnosti element, posebno označen u dokumentaciji. Time je pedala kočnice jedan od najvažnijih elemenata kočionog sustava, budući da za nju vrijede posebni propisi i metode ispitivanja. Neispravnost pedale kočnice može prouzročiti nepravilan rad ili opasnost po vozača (i putnike). Pedala kočnice mora ispunjavati sljedeće uvjete:

- Ne smije doći do puknuća ili trajnih deformacija uslijed djelovanja najvećeg opterećenja od strane vozača.
- Mora imati zadovoljavajuću čvrstoću i ne savijati se pod težim kočenjem.
- Mora biti oslobođena nepotrebnog trenja.
- Mora imati pravilno odabran omjer s obzirom na glavni kočioni cilindar.
- Mora ispunjavati uvjete za vozača i komponente kočionog sustava.

Pedala kočnice se sastoji od ruke, pločice (papučice) i dodataka za točku okreta (*eng. Pivot*). Pedala je povezana na zglobni spoj (*eng. Linkage*) koji prenosi silu i kretanje prema glavnom kočionom cilindru. Zglobni spoj može biti jednostavna potisna poluga (slika 51) ili kompleksnija izvedba sa više elemenata. [8]



Slika 51: Pedala kočnice – komponente



Izvor: Autor modificirao prema odabranom izvoru [8]

Ruka pedale mora biti čvrsta i zbog toga je robusnije izvedbe u odnosu na ostale, kako bi podnijela djelovanje sile vozača. Kod standardnih vozila opće namjene, ruka je izrađena od ravne ploče ili kao izvedenica jednoga od standardnih profila. Kod vozila namijenjenih posebno za utrivanje koristi se napredniji i kompleksniji dizajn. Nekada je rješenje bio cjevasti presjek izveden sa debljom stijenkom, a danas su to maksimalno olakšani i optimizirani elementi.

Slika 52: Izvedbe pedala kočnice kod vozila za utrke



Izvor: Autor modificirao prema odabranom izvoru [18]

Na slici 52 su prikazane dvije izvedbe pedala kočnice kod vozila za utrke. Sa lijeve strane je prikazan primjer pedale koja se montira sa gornje strane, sličnije onima u standardnom automobilu. Sa desne strane je prikazana pedala koja se montira u podnicu vozila. Izvedbe sa primjera su znatno kompleksnijeg dizajna i primjene, a izrađene su od aluminija. Dodatna prednost je i promjenjivi omjer pedale u ovakvim izvedbama koji može varirati od 5-7:1. [18]

Slika 53: Izvedba pedale kočnice za cestovne automobile



Izvor: <https://prussianmotors.com/brakes/> , pristupljeno 14.08.2023. [19]

Na slici 53 je prikazana izvedba standardne pedale kočnice iz vozila BMW (E30) čija je proizvodnja završila 1993.g.. Jasno je vidljiva razlika u dizajnu i kompleksnosti, kao i napredak tehnologije izrade. Kod vozila za opću primjenu, standardnih automobila, razlika u odnosu na prošlost nije toliko drastična. Na primjer, više od 20 godina kasnije – pedala kočnice kod vozila BMW I3 izgleda ovako:

Slika 54: Izvedba pedale kočnice za cestovne automobile - 2



Izvor: <https://prussianmotors.com/brakes/> , pristupljeno 14.08.2023. [19]

Najveća razlika u dizajnu je u pedalnom sklopu, koji je znatno olakšan i implementaciji magnetskog senzora pozicije pedale kočnice. U odnosu na prethodne izvedbe (slika 53), u modernijim vozilima ovaj senzor aktivira svjetlosnu signalizaciju prilikom kočenja, ali i šalje informacije u stvarnom vremenu o poziciji kočnice. Na taj način se vrši dodatan korak sigurnosti vozila i nadzire ispravnost kočionog sustava. Tek u prethodnih dvije do tri godine je vidljiv početak implementacije drastično promijenjenih i unaprijeđenih pedala kočnice od plastike i kompozita (slika 2).

Papučica na dnu ruke pedale kočnice je osmišljena za prianjanje potplatu obuće vozača i svojim dimenzijama odgovara svim vozačima. Širina papučice mora biti dostatna za ugodan i lagan rad. Papučice kod automatskih vozila i vozila sa većim

nožnim prostorom često budu širih dimenzija, jer im to prostor dozvoljava. Dodatni sloj koji se nalazi iznad proširenog donjeg dijela (papučice) je izrađen od gume kako bi postojalo trenje između potplata i papučice, bez neočekivanog proklizavanja stopala. Dodatni gumeni sloj je također zamjenjiv, a njegov dizajn ima predviđene utore za odvođenje vode ili sličnih tvari koje bi uzrokovale opasnost pri radu.

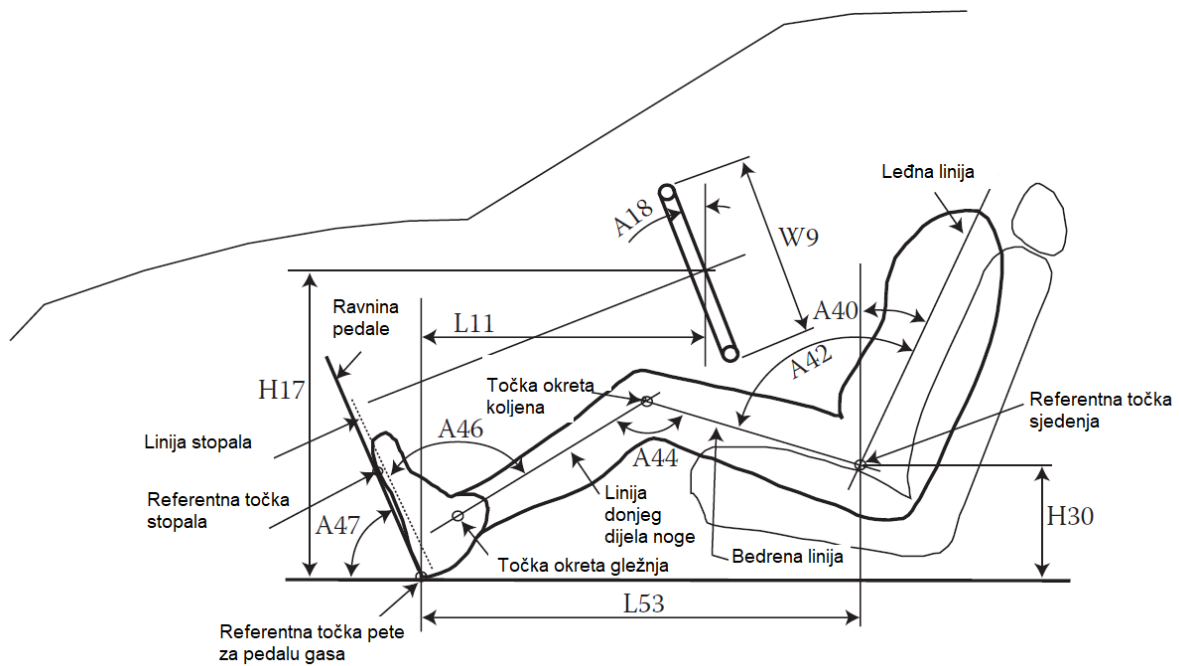
Točka okretanja pedale sadrži plastičnu ili brončanu čahuru kako bi se smanjilo trenje. Plastične izvedbe su često korištene u cestovnim automobilima, kako bi se smanjio trošak proizvodnje i zbog manjka potrebe za podmazivanjem. [8]

Omjer pedale određuje kolika je sila potrebna od strane vozača za postizanje željene sile kočenja. Na taj način se ostvaruje mehanička prednost, a generalno se omjer za cestovna vozila kreće oko 5:1. Za određivanje omjera pedale, potrebno je odraditi niz testova i simulacija. Takve metode zahtijevaju mjerenje sila, pokreta i geometrije pedale kočnice, ali i zglobnih spojeva na izlazu iz pedale. Omjer je prethodno opisan izrazom 4.10 .

Uz dobar dizajn i izvedbu pedale kočnice, važna je i njena pozicija. Pozicija pedale kočnice u neutralnom položaju i u radu (sve do pozicije maksimalnog potiska) moraju ispunjavati ergonomske uvjete zbog sigurnosti, ali i zbog ugodnosti i zdravlja vozača. Za ispunjavanje ovih uvjeta potrebno je razmotriti sljedeće:

- Utjecaj odnosa vozačeve reakcije i pozicije sjedenja, držanja, uzoraka ponašanja i amplitude pokreta prilikom pritiskanja pedale.
- Odnos između dizajna pedale, kao i svih relevantnih ulaznih podataka i stvarne reakcije vozača.

Slika 55: Referentne točke i dimenzije interijera

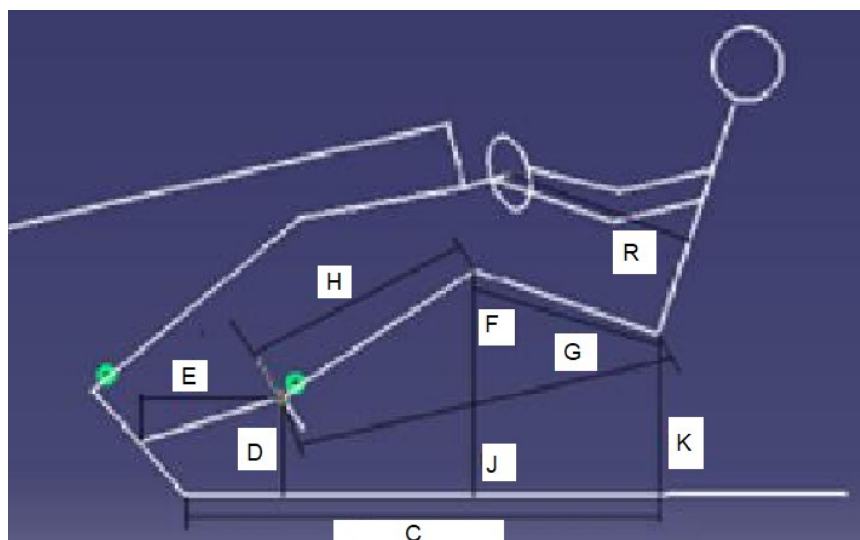


Izvor: Autor modificirao prema odabranom izvoru [20]

Referentne točke i dimenzije sa slike 55 su definirane prema brojnim SAE standardima i određuju dimenzije poput referentne točke dodira stopala sa pedalom, nagibe pedala, liniju stopala, referentnu točku sjedenja, pravilnu poziciju koljena i leđa itd. ...[20]

Pomoću tih točaka se promatra ergonomski faktor koji utječe na vozača, a utjecaju su na: antropometriju vozača, poziciju sjedenja, pokrete u vožnji, dodirna područja stopala i pedala i ostali dugotrajni utjecaji. Važne dimenzije za konstruiranje pedale kočnice i njen utjecaj na vozača su predstavljene na sljedeći način:

Slika 56: Ključne ergonomske dimenzije



Izvor: Autor modificirao prema odabranom izvoru [21]

Sljedeća tablica prikazuje podatke o navedenim dimenzijama. Promatrana vozila su manji gradski automobili i izmjerene su vrijednosti za referentnog muškarca (M) i ženu (Ž). Referenti modeli su visine 183 i 153 cm.

Tablica 4: Ključne ergonomske dimenzije - vrijednosti

Dim.	GM Beat		Maruti Wagnor		Tata ind-vista		Honda i20		Srednja vrijednost	
	M	Ž	M	Ž	M	Ž	M	Ž	M	Ž
C	810	715	820	615	800	708	830	680	815	680
D	140	170	160	180	140	170	130	160	160	170
E	240	240	250	250	260	260	310	310	265	265
F	470	420	480	410	485	410	510	460	490	425
G	890	760	860	740	890	720	895	730	880	735
H	470	460	530	460	588	450	592	510	545	400
J	420	380	430	380	430	390	450	380	450	380
K	280	238	440	360	460	370	480	370	380	334
R	680	450	700	480	680	530	650	480	670	490

Izvor: Autor modificirao prema odabranom izvoru [21]

Posljednji stupac u tablici sadrži izračunate srednje vrijednosti spomenutih dimenzija. Važno je uzeti te vrijednosti u obzir zbog funkcionalnosti pedale u kasnijoj upotrebi.

## 7.1. Značajke

Dobar kočioni sustav sadrži elemente koji mu omogućavaju maksimalno usporavanje pri djelovanju sile od 340 N. Taj iznos je dovoljan za sve potencijalne vozače, a kod primjene za utrkivanje potrebno djelovanje često bude više od toga, oko 450 N. Iznosi potrebni za usporavanje su postavljeni na manju razinu zbog mogućnosti slabljenja kočnice ili kvarova na sustavu, koji bi prouzročili potrebu za jačim djelovanjem. Kod vozila sa pomagalima snage, taj iznos zna biti postavljen i na 220 N.

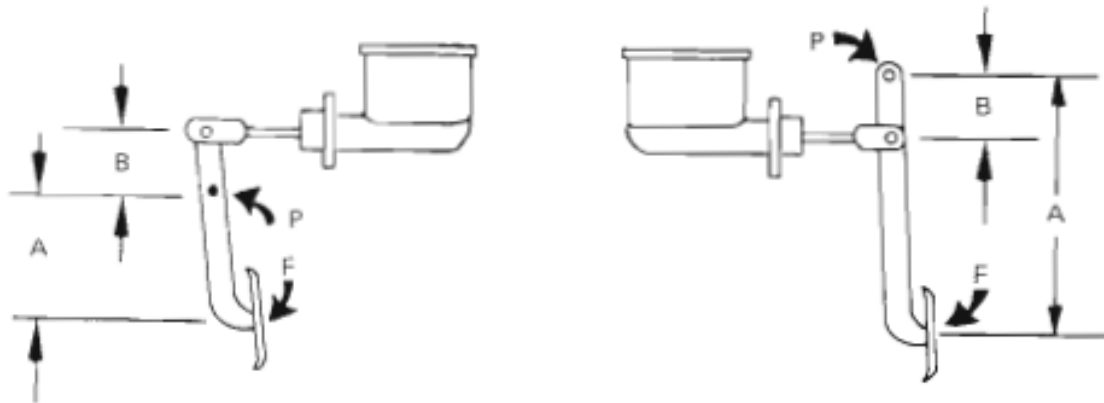
Međutim, maksimalna sila na pedalu kočnice iznosi 1.350 N za veću i snažnu osobu. To se događa pri naglom pritiskanju kočnice i stvara dodatna naprezanja na pedalu zbog iznosa sile, ali i brzine djelovanja. Većina pedala su konstruirane da mogu izdržati dvostruku vrijednost od iznosa maksimalne sile – 2.700 N.

Sigurnosni faktor za pedalu kočnice je omjer iznosa sile kod kojega dolazi do puknuća i iznosa maksimalne sile kočenja. Time je određena potrebna čvrstoća pucanja, koja bi na ovakvom primjeru bila određena pomoću faktora sigurnosti. Najčešće se uzimaju faktori sigurnosti iznosa tri ili šest (3 ili 6).

Dodatna naprezanja koja treba pretpostaviti su djelovanja bočnih sila na pedalu kočnice. Ona nastaju zbog pozicije stopala i kuta pod kojim je postavljen donji dio noge (i stopalo). Preporuča se pretpostaviti djelovanje bočne sile u iznosu od 150 N. [8]



Slika 57: Omjer pedale kočnice



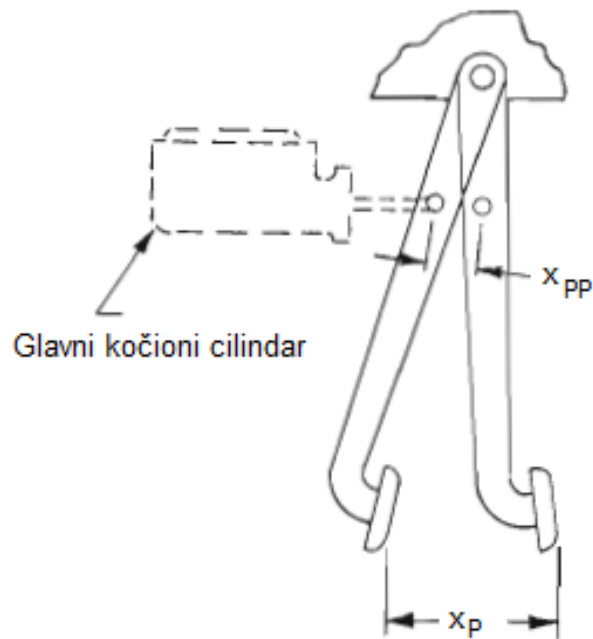
Izvor: Puhn, F.: „Brake Handbook“, Hp Books, Tucson, 1985. [8]

Na slici 57 su prikazane ključne geometrijske veličine za određivanje omjera. Prikazane su dvije izvedbe promatranih veličina (A i B) ovisno o poziciji točke okreta (P). Prikazana sila (F) predstavlja djelovanje vozača na pedalu kočnice.

Omjer pedale na cestovnim automobilima iznosi od 3:1 do 4,5:1 kod sustava sa pojačivačem sile kočenja i ostalim pomagalicama. Na primjer, sustav bez pojačivača nadoknađuje to sa većim omjerom. Na takvom sustavu bi prijenosi omjer bio 7:1. [8]

Uz standardno izračunavanje omjera pedale (izraz 4.10) gdje je omjer ovisan o odnosu sile na pedali i izlaznoj sili na potisnoj poluzi, omjer se može odrediti i proučavanjem pomaka. Pomaci koji se mjere su pomak pedale i pomak točke na ruci pedale kočnice, u kojoj počinje potisna poluga:

Slika 58: Omjer pedale – pomak



Izvor: Autor modificirao prema odabranom izvoru [8]

$$\text{Omjer pedale} = \frac{x_P}{x_{PP}} \quad (7.1)$$

Gdje je:

$x_P$  – Pomak pedale

$x_{PP}$  – Pomak potisne poluge (pomak klipa unutar glavnog kočionog cilindra)

Za ovakav način mjerenja, potrebno je precizno pozicionirati pedalu u točku gdje potisna poluga počinje pomicati klip u glavnom kočionom cilindru. Prije toga je potrebno ispustiti fluid iz kočionog sustava i označiti početnu poziciju. Pomicanjem pedale kroz cijeli hod i mjerenjem pomaka klipa unutar glavnog kočionog cilindra, određuje se omjer pedale. [8]

Budući da je pomak pedale limitiran prostorom i geometrijom vozača, pomak pedale je većinom limitiran na 152 mm. Pomak pedale bi trebao biti manji od toga kako bi se zadovoljili sigurnosni i ergonomski faktori. Cilj je da pomak pedale bude što je moguće kraći, a da pri tome bude dovoljno osjetljiv za postepeno zaustavljanje. Ukoliko nije moguće ostvariti pomak pedale manji od navedenog, potrebno je izmijeniti sustav dodavanjem većih kočnica, pojačivača sile kočenja ili sličnog.

Uz spomenute geometrijske karakteristike, važno je razmotriti i odabir materijala prije početka konstruiranja. Kriterij odabira materijala je baziran na čvrstoći, omjeru težine, mehaničkim, fizičkim i kemijskim svojstvima. Potrebno je razmotriti i dostupnost materijala, kao i korozijsku otpornost zbog same uloge i primjene u sustavu (sigurnost). Materijal koji se odabere mora biti podložan masovnoj proizvodnji i odgovarajućim metodama. [22] Sljedeći materijali se koriste za izradu pedale kočnice:

Tablica 5: Svojstva čelika

<b>Materijali</b> <b>Svojstva</b>	<b>FE-410</b>	<b>E-34</b>	<b>D-513</b>	<b>EDD-1079</b>
Youngov modul [MPa]	$2 \cdot 10^5$	$2,06 \cdot 10^5$	$2,1 \cdot 10^5$	$2,2 \cdot 10^5$
Vlačna čvrstoća [MPa]	387,79	450,79	367,69	340,53
Poissonov omjer	0,315	0,34	0,35	0,34
Gustoća [Kg/m <sup>3</sup> ]	7.890	7.890	7.890	7.890
Granica razvlačenja [MPa]	283,78	360	205,13	334,16
Otpornost na koroziju	Dobra	Dobra	Dobra	Dobra

Izvor: Autor modificirao prema odabranom izvoru [22]

Tablica 5 sadrži svojstva više vrsta čelika koji se koriste u izradi pedale kočnice. Predstavljena su najvažnija svojstva poput vlačne čvrstoće (*eng. Tensile strength*), gustoće materijala i granice razvlačenja (*eng. Yield strength*).

Upotrebom aluminija u odnosu na čelik ostvaruje se ušteda na težini određenih dijelova. Materijali na bazi aluminija su korišteni prema različitim svojstvima i uputama proizvođača. Na primjer, dodatni kemijski procesi prilikom pečenja boje koji omogućavaju stvrdnjavanje starenjem i time povećavaju tvrdoću materijala. U sljedećoj tablici su prikazana svojstva aluminijskih izvedbi:

Tablica 6: Svojstva aluminija

<b>Materijali Svojstva</b>	<b>Al99</b>	<b>AlCuMg1</b>	<b>AlSi(6009)</b>	<b>AlZnMg(7075)</b>
Youngov modul [MPa]	$7 \cdot 10^4$	$7,2 \cdot 10^4$	$6,9 \cdot 10^4$	$7,1 \cdot 10^4$
Vlačna čvrstoća [MPa]	140	370	340	530
Poissonov omjer	0,3	0,32	0,29	0,31
Gustoća [ $\text{Kg/m}^3$ ]	2.710	2.800	2.710	2.850
Granica razvlačenja [MPa]	120	230	228	450
Otpornost na koroziju	Dobra	Dobra	Dobra	Dobra
Produljenje [%]	30	14	24	8
Zamor materijala [MPa]	65	-	117	-
Temperatura taljenja [ $^{\circ}\text{C}$ ]	660	510	650	640

Izvor: Autor modificirao prema odabranom izvoru [22]

Kao što je prethodno opisano u početku rada, postoji alternativni materijal koji bi mogao zamijeniti aluminij i ostvariti dodatne uštede na težini i brzini izrade. Za ovakvu primjenu se koriste poliamidi (najloni) sa kratkim staklenim vlaknima u različitim postotcima. Izvedba sa kratkim vlaknima je najlakša među spomenutim materijalima i ima najmanju gustoću. Također, sljedeći najloni imaju najveću udarnu čvrstoću, važno svojstvo za pedalu kočnice.

Tablica 7: Svojstva najlona

<b>Materijali Svojstva</b>	<b>PP GF30</b>	<b>PA6 GF30</b>	<b>PA66 GF30</b>	<b>ABS GF30</b>
Staklena vlakna [%]	30	30	30	30
Youngov modul [MPa]	$5 \cdot 10^3$	$9,5 \cdot 10^3$	$1,5 \cdot 10^4$	$6 \cdot 10^3$
Vlačna čvrstoća [MPa]	75	190	160	80
Poissonov omjer	0,315	0,34	0,35	0,34
Gustoća [Kg/m <sup>3</sup> ]	1.140	1.400	1.370	1.190
Apsorpcija vlage [%]	0,35	0,35	0,35	0,35
Otpornost na koroziju	Dobra	Dobra	Dobra	Dobra

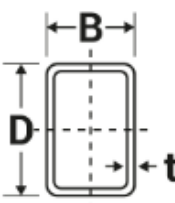
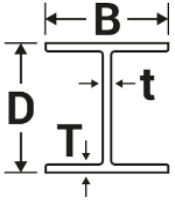

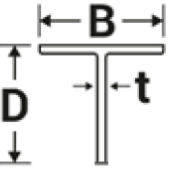
Izvor: Autor modificirao prema odabranom izvoru [22]

Tablica 7 prikazuje moguć odabir kompozita za izradu pedale kočnice. U nastavku rada će se usporediti i obrazložiti odabir između PA6 i PA66 kompozita prema dobivenih rezultatima simulacije. Spomenuta dva materijala imaju najbolje vrijednosti vlačne čvrstoće i ostalih svojstava, a svaki od njih može potencijalno biti ušteda težine i brzine izrade.

## 7.2. Testiranje presjeka profila

Prije početka izrade pedale kočnice, potrebno je odraditi početna testiranja i odabrati najpovoljniji presjek profila za zadane uvjete. Za potrebe ovoga rada, kao osnova će se promatrati četiri osnovna profila.

Tablica 8: Dimenzije testnih profila

Profil	"1"	"2"	"3"	"4"
				
<b>D</b>	40	30	40	30
<b>B</b>	30	40	30	40
<b>T=t</b>	3	3	3	3

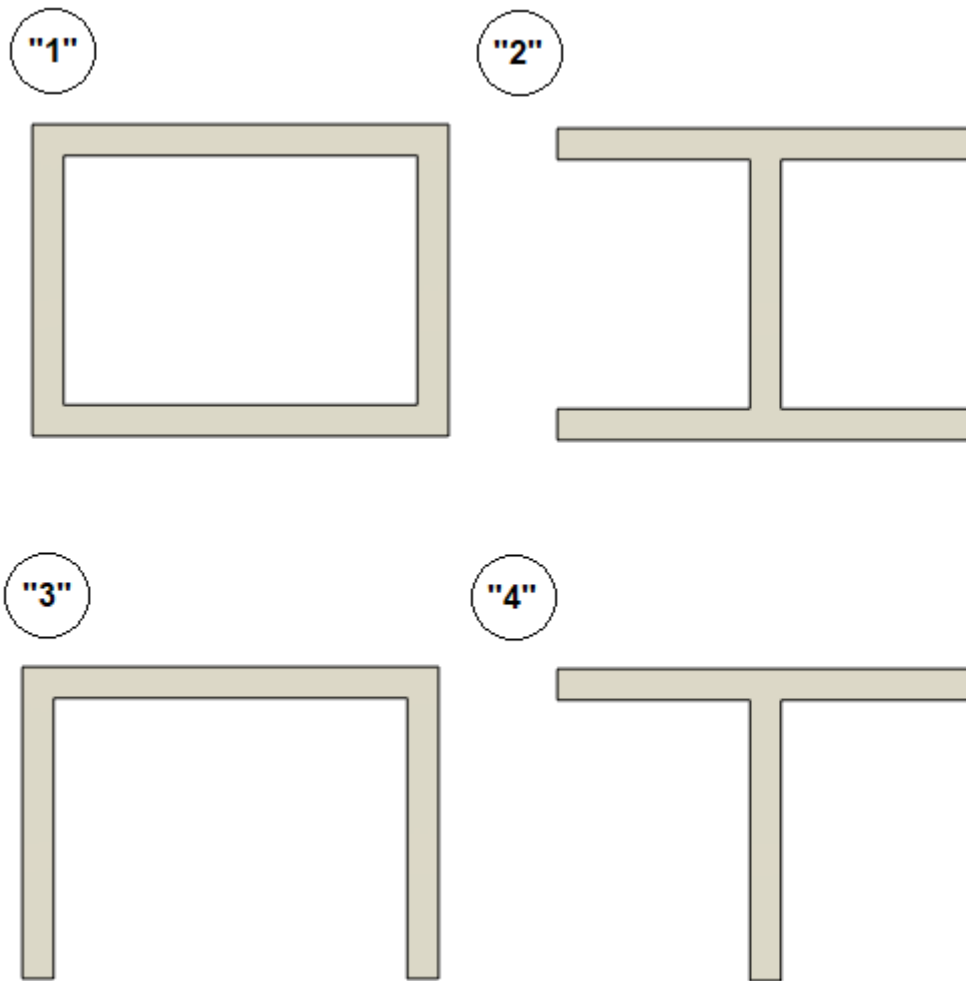
Izvor: Autor modificirao prema odabranom izvoru [23]

Tablica 8 prikazuje odabrane testne profile. Profili okvirno odgovaraju dimenzijama ruke pedale kočnice i služiti će kao pokazatelj za odabir i pomoć u konstruiranju. Na sljedećim profilima će se provesti niz osnovnih testiranja:

- "1" – Pravokutni profil
- "2" – I profil
- "3" – U profil
- "4" – T profil

Najprije je potrebno konstruirati četiri testna modela prema dimenzijama profila, radi jednostavnosti i preliminarne faze – u obliku greda. Duljina svih testnih modela će biti 250 mm.

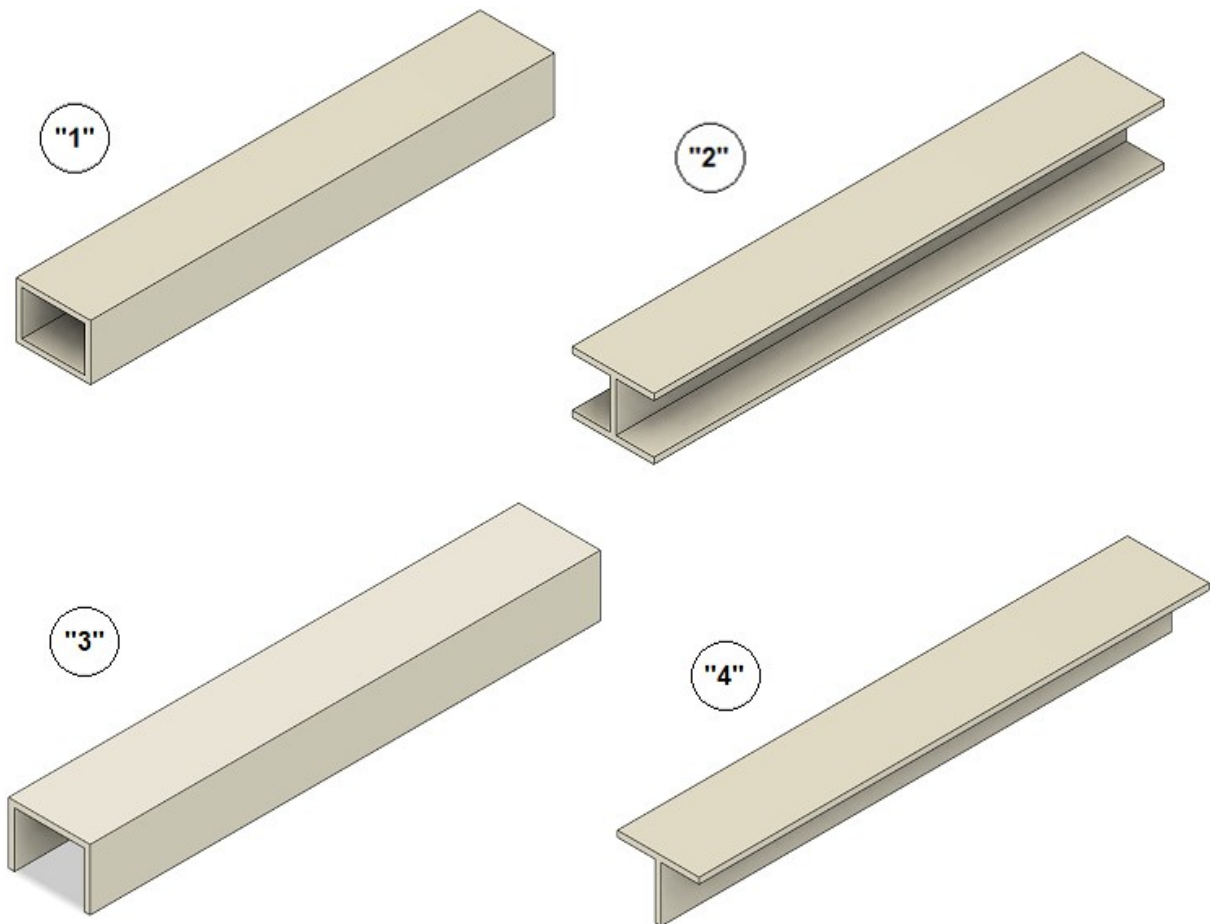
Slika 59: Modeli testnih profila



Izvor: Autor - obrada podataka

Na slici su prikazani presjeci spomenutih profila iz kojih je stvoren 3D model za daljnji rad.

Slika 60: Modeli testnih profila – 2



Izvor: Autor - obrada podataka

Slika prikazuje gotove modele testnih profila, duljine 250 mm. Svim modelima je dodijeljen materijal dostupan u bazi podataka materijala (Fusion 360 Material Library). Odabran je materijal pod nazivom „Nylon 6“ koji spada u skupinu poliamida i ima sljedeća svojstva:



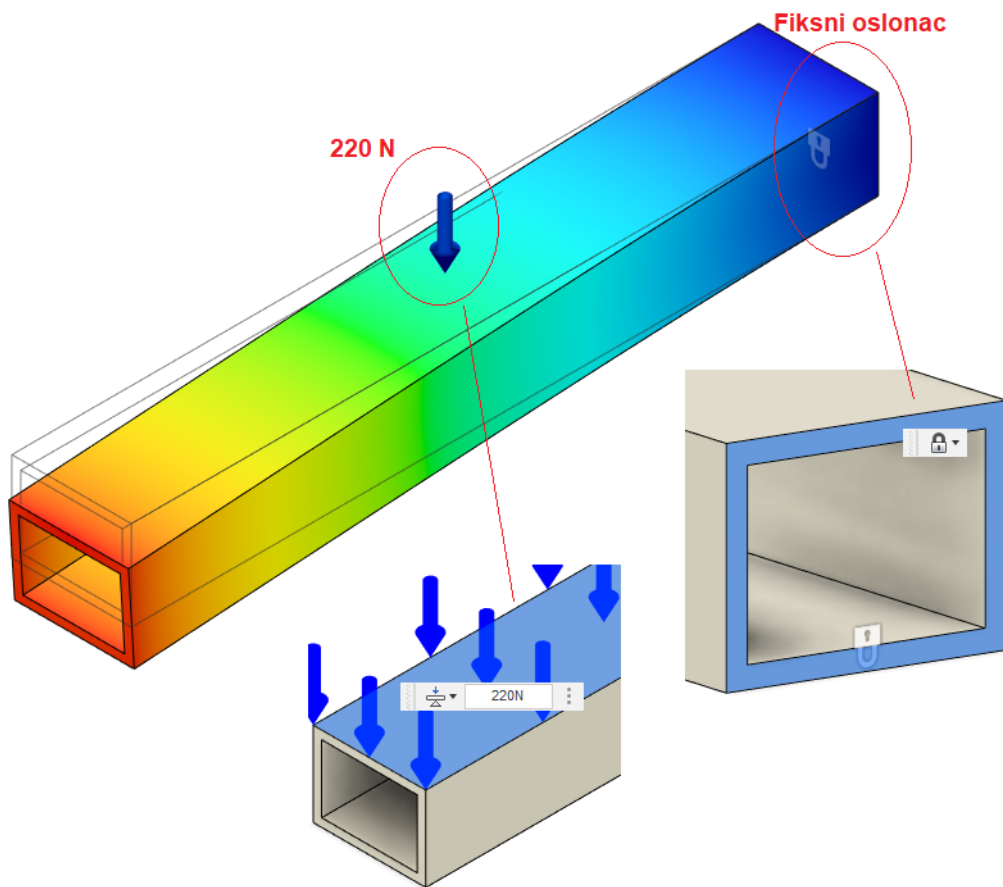
Tablica 9: Svojstva odabranog materijala

<b>Materijal</b> <b>Svojstva</b>	<b>Nylon 6</b> <b>(PA6)</b>
Youngov modul [MPa]	2,758*10 <sup>3</sup>
Vlačna čvrstoća [MPa]	75,7
Poissonov omjer	0,35
Gustoća [Kg/m <sup>3</sup> ]	1.119
Granica razvlačenja [MPa]	70,4
Otpornost na koroziju	Dobra

Izvor: Autor - obrada podataka

Za početak simulacije je potrebno postaviti početne uvjete, za sva četiri profila to su sila koja djeluje okomito na gornji dio grede i fiksni oslonac na stražnjem dijelu:

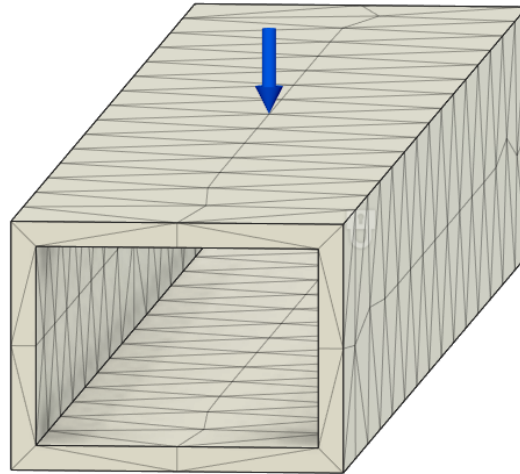
Slika 61: Početni uvjeti i ograničenja



Izvor: Autor - obrada podataka

Nakon postavljenih opterećenja i ograničenja, generira se mreža. U ovom slučaju mreža je paraboličnog tipa elemenata i u načinu rada za obične modele tj. tijela. Mreža za profil "1" sadrži 1.489 čvorova i 721 element:

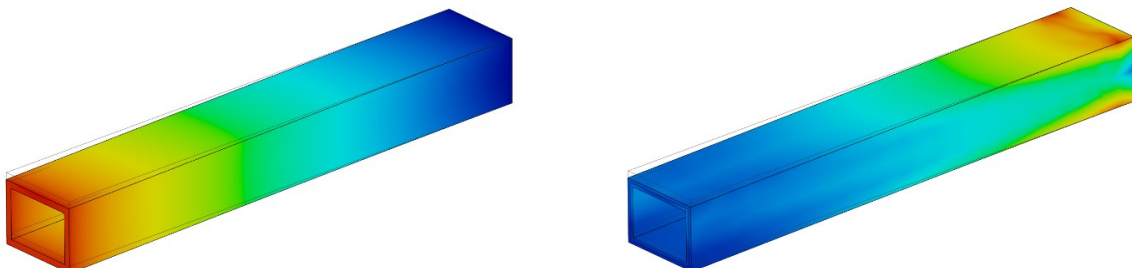
Slika 62: Generirana mreža



Izvor: Autor - obrada podataka

Nakon izvršene simulacije, softver prikazuje rezultate grafički uz napomene o ključnim vrijednostima. Za detaljan pregled i informacije, moguće je preuzeti kompletan izvještaj. U ovom slučaju su najvažniji rezultati pomaka tijela i ekvivalentnog naprezanja (Von Misses). Na sljedećim slikama će biti prikazani grafički rezultati za sva četiri promatrana profila, a numerička detaljnija usporedba u tablici nakon slika:


Slika 63: Rezultati simulacije – “1”

[mm] 0  3.209[MPa] 0.022  7.932

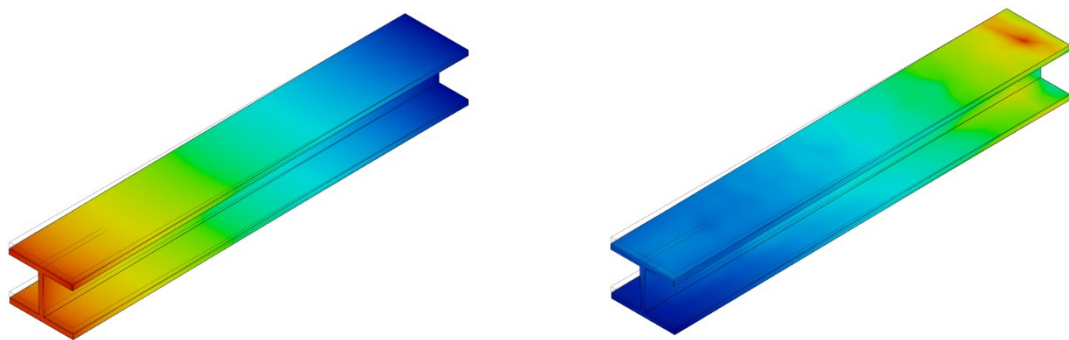
Izvor: Autor - obrada podataka

Na slici 63 je prikazan rezultat simulacije za profil "1", a istaknuti su pomak tijela (lijevo) i ekvivalentna naprezanja (desno). Grafički prikaz omogućava vidljivost minimalnih i maksimalnih vrijednosti prema bojama (od hladnijih prema toplijima) i ne ovisi o samom iznosu nego o rasponu tog iznosa. Za preciznije informacije o rasponu, iznad modela se nalaze vrijednosti. Vrijednosti za pomak su izražene u mm, a za naprezanja u MPa.

Slika 64: Rezultati simulacije – "2"

[mm] 0  3.591


[MPa] 0.009  9.626



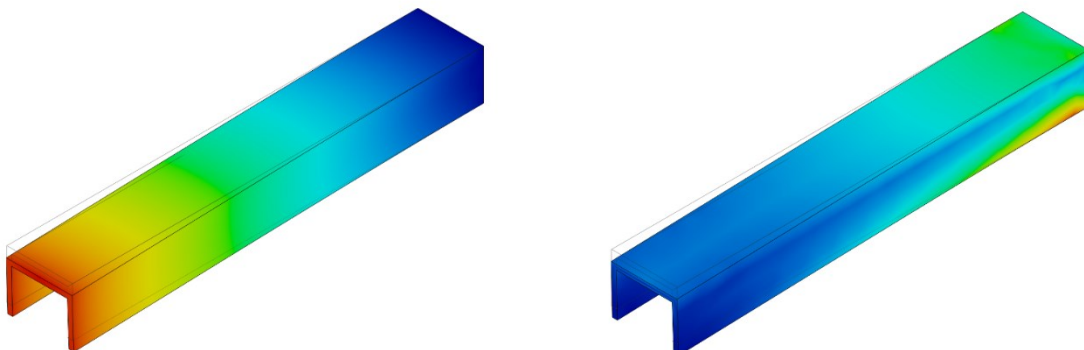
Izvor: Autor - obrada podataka

Profil "2" ima minimalno veći pomak i nešto više od 20 % veća ekvivalentna naprezanja u odnosu na prethodni, ali je njegova konstrukcija lakša.

Slika 65: Rezultati simulacije – "3"

[mm] 0  6.257

[MPa] 0.01  19.98



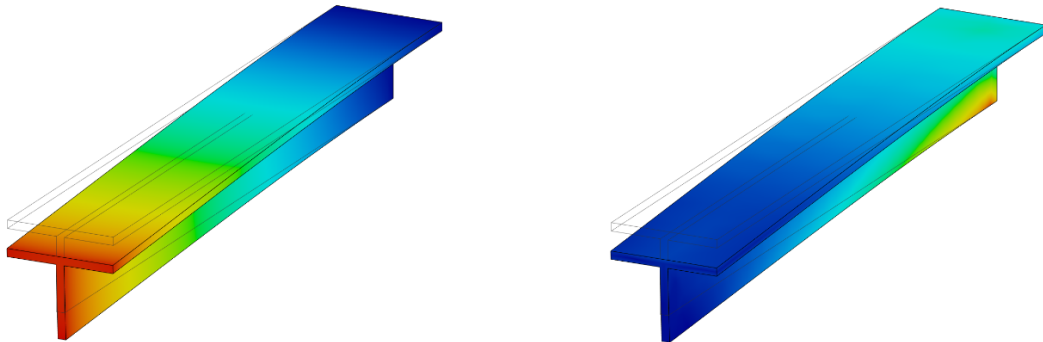
Izvor: Autor - obrada podataka

Profil "3" ima vidljivo veći pomak tijela i više nego dvostruka napreznja.

Slika 66: Rezultati simulacije – "4"

[mm] 0  10.08

[MPa] 0.02  38.06



Izvor: Autor - obrada podataka

Profil "4" ima znatno veća ekvivalentna napreznja i najveći pomak u odnosu na prethodne.

Za daljnji odabir najpovoljnijeg profila i nastavak konstruiranja, potrebno je proučiti sve rezultate. Rezultati su prikazani u sljedećoj tablici:

Tablica 10: Rezultati simulacije profila

Rezultati	"1"	"2"	"3"	"4"
Masa modela [g]	107,52	87,36	78,96	56,28
Minimalan pomak [mm]	0	0	0	0
Maksimalan pomak [mm]	3,209	3,591	6,257	10,08
Minimalno ekvivalentno napreznje [MPa]	0,02247	0,009356	0,009416	0,01897
Maksimalno ekvivalentno napreznje [MPa]	7,932	9,626	19,98	38,06
Minimalan faktor sigurnosti	8,876	7,313	3,524	1,85
Maksimalan faktor sigurnosti	15	15	15	15

Izvor: Autor - obrada podataka

U tablici 10 su prikazani dobiveni rezultati nakon izvršavanja prethodno opisane simulacije. Prema dobivenim rezultatima, može se naslutiti da su profili "1" i "2" jedini zadovoljavajući. Posljednji korak prije odabira je usporedba dobivenih vrijednosti. Budući da je profil "2" preliminarno procijenjen kao najpogodniji, on će poslužiti kao referentna vrijednost za usporedbu.

Tablica 11: Analiza rezultata simulacije profila

Rezultati	"1"	"2"	"3"	"4"
Masa modela [g]	1,23	1	0,90	0,64
Minimalan pomak [mm]	1	1	1	1
Maksimalan pomak [mm]	0,89	1	1,74	2,81
Minimalno ekvivalentno naprezanje [MPa]	2,40	1	1,01	2,03
Maksimalno ekvivalentno naprezanje [MPa]	0,82	1	2,08	3,95
Minimalan faktor sigurnosti	1,21	1	0,48	0,25
Maksimalan faktor sigurnosti	1	1	1	1

Izvor: Autor - obrada podataka

Tablica 11 pokazuje vrijednosti dobivenih rezultata u odnosu na preliminarno odabrani profil "2". Sve vrijednosti su uspoređene sa vrijednostima odabranom profila i iz toga proizlaze koeficijenti rezultata. Budući da profili "3" i "4" imaju veći pomak promatranog tijela (modela) i znatno veća ekvivalentna naprezanja, potrebno je proučiti međusobni odnos profila "1" i "2". Zanemarujući minimalan pomak i maksimalan faktor sigurnosti (jer su kod svih profila jednaki), dolazi se do sljedećih zaključaka za profil "1" u odnosu na profil "2":

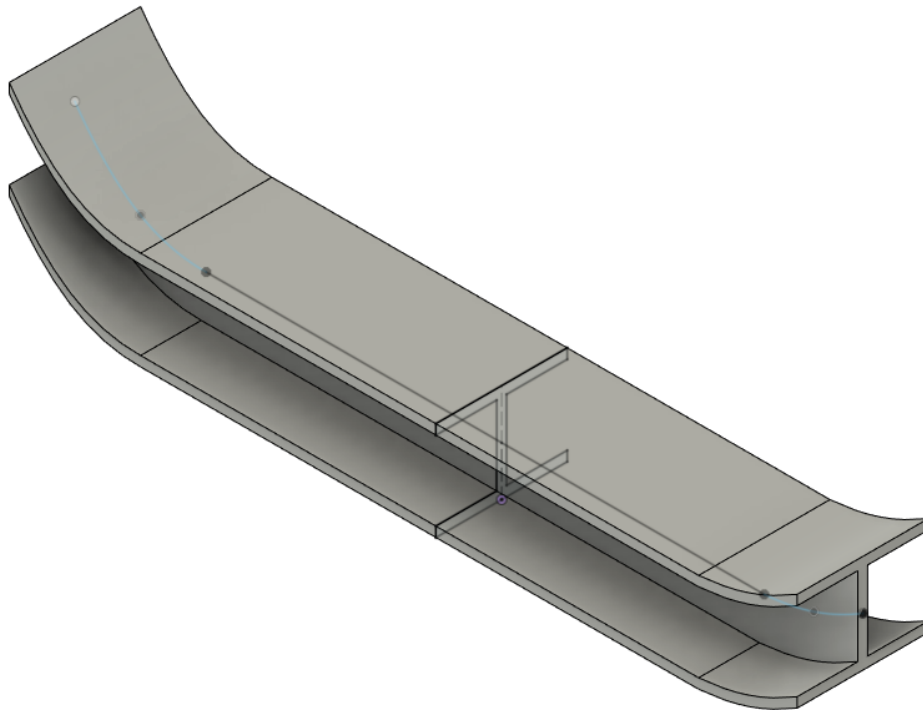
- Maksimalan pomak je 11% manji.
- Minimalno ekvivalentno naprezanje je 140 % veće.
- Maksimalno ekvivalentno naprezanje je 18 % manje.
- Minimalan faktor sigurnosti je 21 % veći.
- Masa modela je 23 % veća.

S obzirom na prihvatljive razlike u maksimalnom naprezanju, faktoru sigurnosti i maksimalnome pomaku (jer se radi o malim iznosima), a u cilju smanjenja mase krajnjeg modela i dodatne optimizacije – odabire se profil “2”. Odabrani profil ima potencijal biti lakši u odnosu na profil “1”, kod kojega je znatno veće minimalno ekvivalentno naprezanje, ima manje kritičnih područja.

### 7.3. Izrada 3D modela

Izrada modela pedale kočnice započinje od prethodno odabranog presjeka profila (slika 60 – profil “2”). Nakon kreiranja početne skice i krivulje, koja služi kao vodič za stvaranje 3D modela pomoću odabranog profila, konstruiran je sljedeći početni model:

Slika 67: Početni model



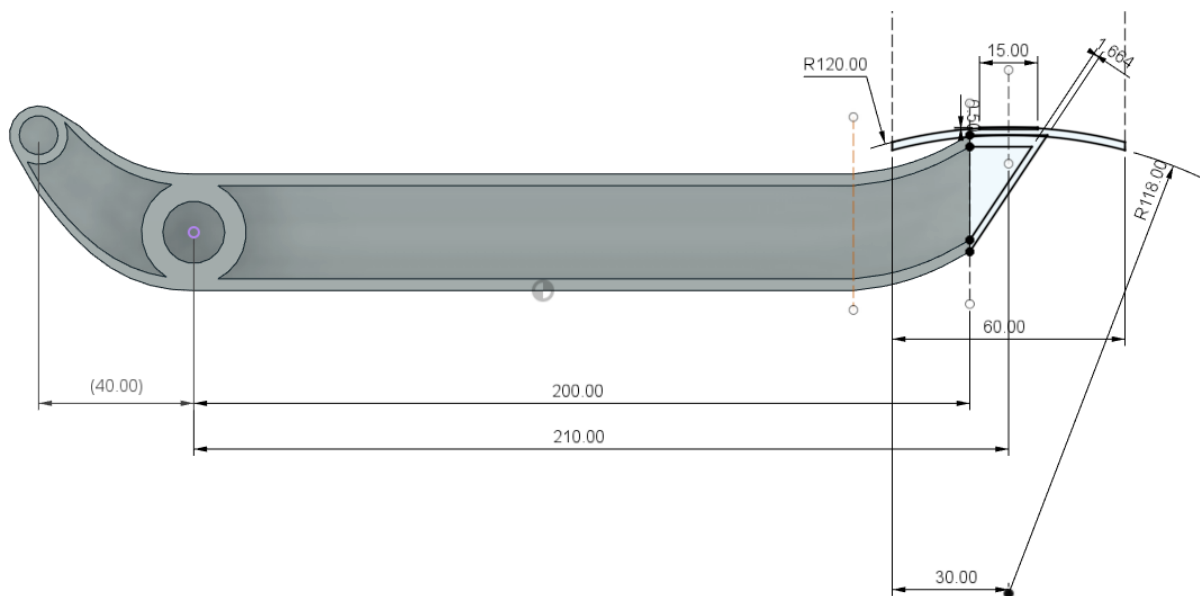
Izvor: Autor - obrada podataka

Nakon toga su dodane važne geometrijske i funkcionalne značajke poput rupa za točku okreta i potisnu polugu, kao i dio za papučicu pedale. Na sljedećoj slici su prikazane neke od tih dimenzija. Omjer pedale u ovom slučaju ovisi o dvije promatrane veličine (slika 68).

$$\text{Omjer pedale} = \frac{250}{40} = 6,25 \quad (7.2)$$

Prema dimenzijama modela, omjer pedale iznosi 6,25:1, a dobiven je iz omjera udaljenosti točke okreta i potisne poluge i udaljenosti od referentne točke stopala (središte papučice) do točke okreta (40 i 250 mm). Po potrebi je moguće implementirati zvonastu polugu (prije pojačivača sile kočenja) za dodatno korigiranje omjera. Primjerice, implementacijom zvonaste poluge sa omjerom 1,25:1 bi se ostvario konačni omjer od 5:1.

Slika 68: Dimenzije i omjer

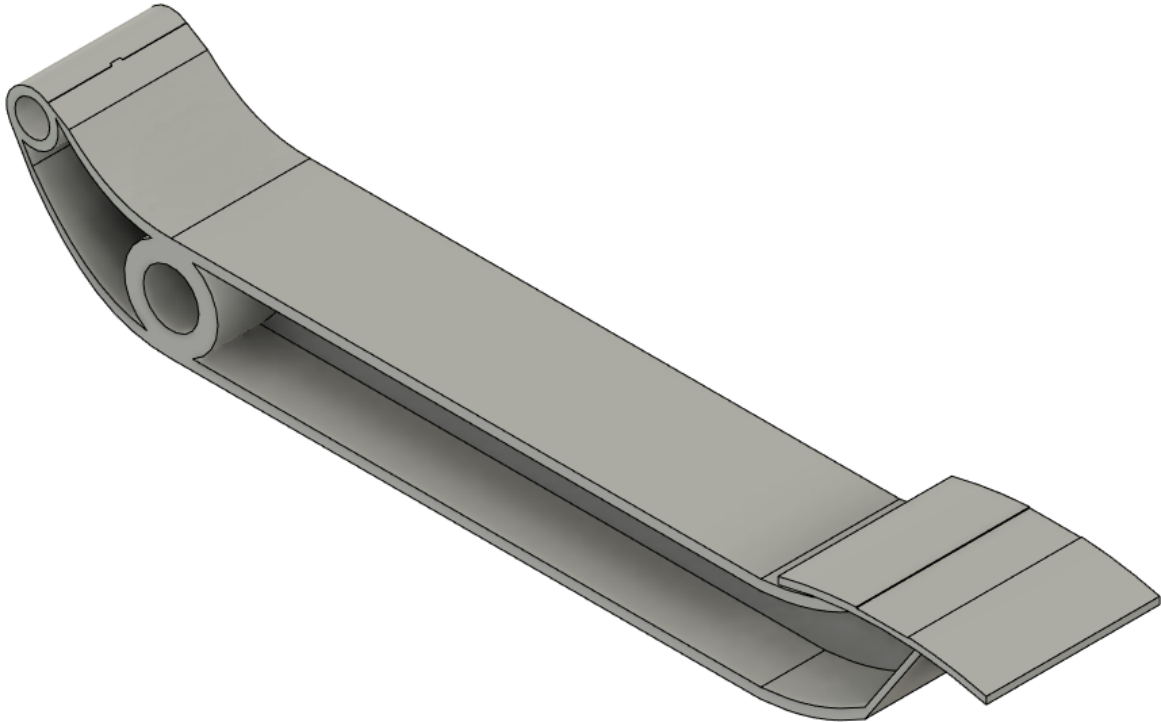


Izvor: Autor - obrada podataka



Ostale važne dimenzije koje su definirane u ovoj fazi su radijus papučice i debljina papučice, kao i utor na papučici za kasnije dodavanje gumenog dodatka. Nakon toga je dobivena prva iteracije kompletne pedale kočnice:

Slika 69: 3D model – prva iteracija

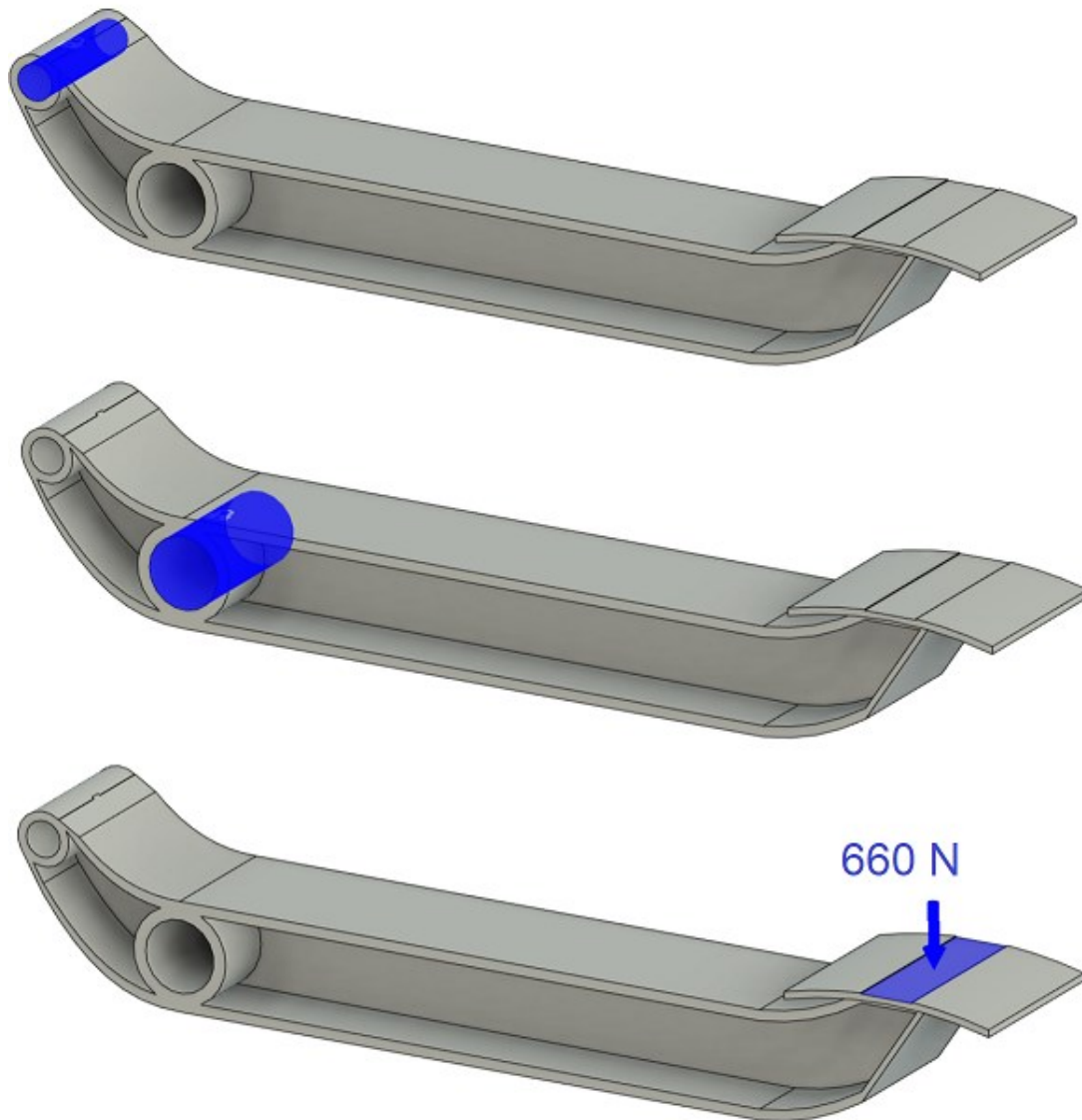


Izvor: Autor - obrada podataka

Prva iteracija je imala masu u iznosu od 0,113 kg. Ovaj model će služiti kao baza za daljnje testiranje i modifikacije kroz simulacije. Vršanjem simulacija nad modelom pokazati će se slabe točke, kritična područja i potencijalne izmjene. Jasno je da će se u slučaju dodavanja dijelova masa povećati, ali je konačni ishod obećavajući uz spomenuti (malen) početni iznos.

Prva statička simulacija naprezanja je postavljena na način da je kretanje ograničeno pomoću dva fiksna ograničenja, a sila koja djeluje na pedalu je trostruko većeg iznosa (660 N) u odnosu na testiranje presjeka profila. Sila djeluje okomito u središte papučice (referentnu točku stopala).

Slika 70: Uvjeti simulacije naprezanja – 1

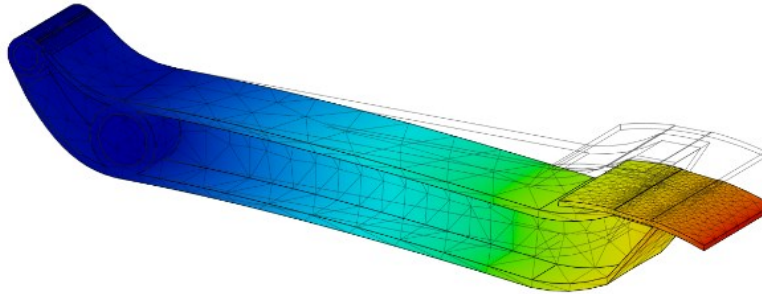



Izvor: Autor - obrada podataka

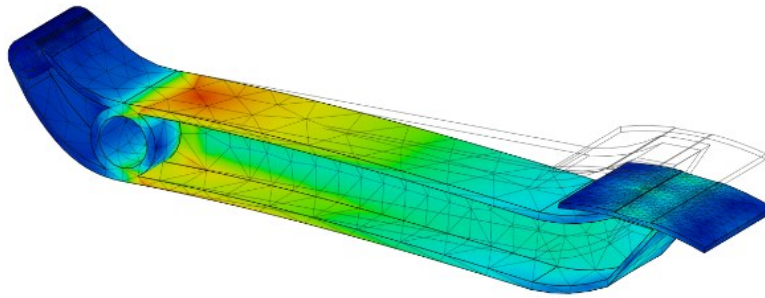
Prva simulacija je pokazala potrebu za daljnjom nadogradnjom i ojačanjem pojedinih dijelova pedale kočnice. U trenutno prikazanoj fazi testiranja, korišten je materijal opisan u tablici 9 (Nylon 6). Referentna vrijednost koja se uzima kao pokazatelj uspješnosti je faktor sigurnosti, budući da je on kalkuliran na bazi naprezanja. Cilj je otkloniti slaba mjesta i točke, te postepeno povećavati opterećenje na model. Kao što je spomenuto, prva iteracija modela zahtijeva daljnju nadogradnju zbog nižeg iznosa faktora sigurnosti (minimalna vrijednost na dijelu modela iznosi 1,67). Svakako je korisno vidjeti gdje se nalaze područja koja je potrebno ojačati.

Slika 71: Simulacija napreznja – 1

[mm] 0  20.2



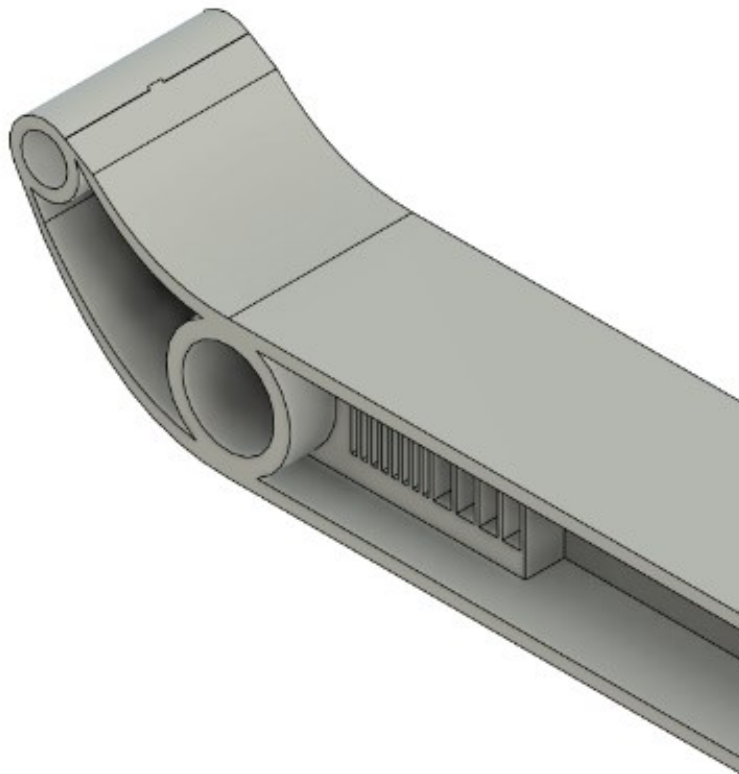
[MPa] 0  42.5



Izvor: Autor - obrada podataka

Daljnijm testiranjem i simuliranjem, konstruirana su sljedeća ojačanja prema rezultatima iz prve simulacije.


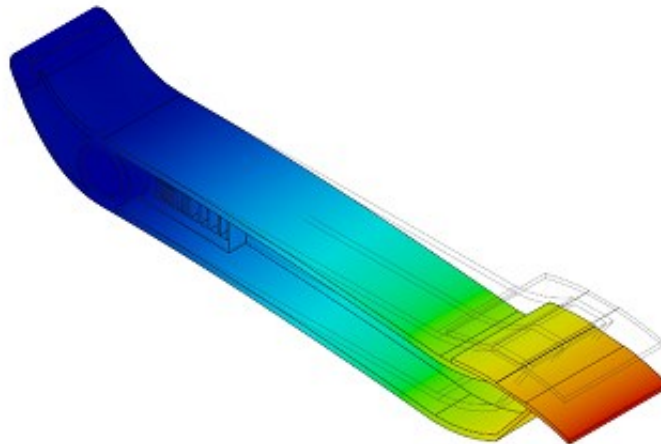

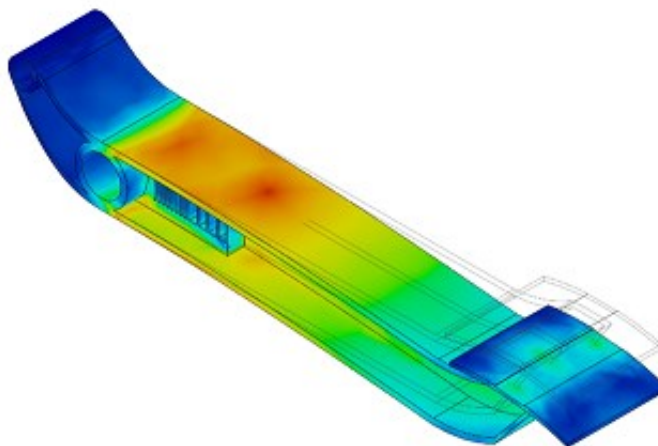
Slika 72: Nadogradnja modela



Izvor: Autor - obrada podataka

Na slici je prikazana konstruirana nadogradnja modela, a rezultati na novom modelu pri istim uvjetima kao u prošloj simulaciji su sljedeći:

Slika 73: Simulacija naprezanja – 2

[mm] 0  17.65[MPa] 0  32.56

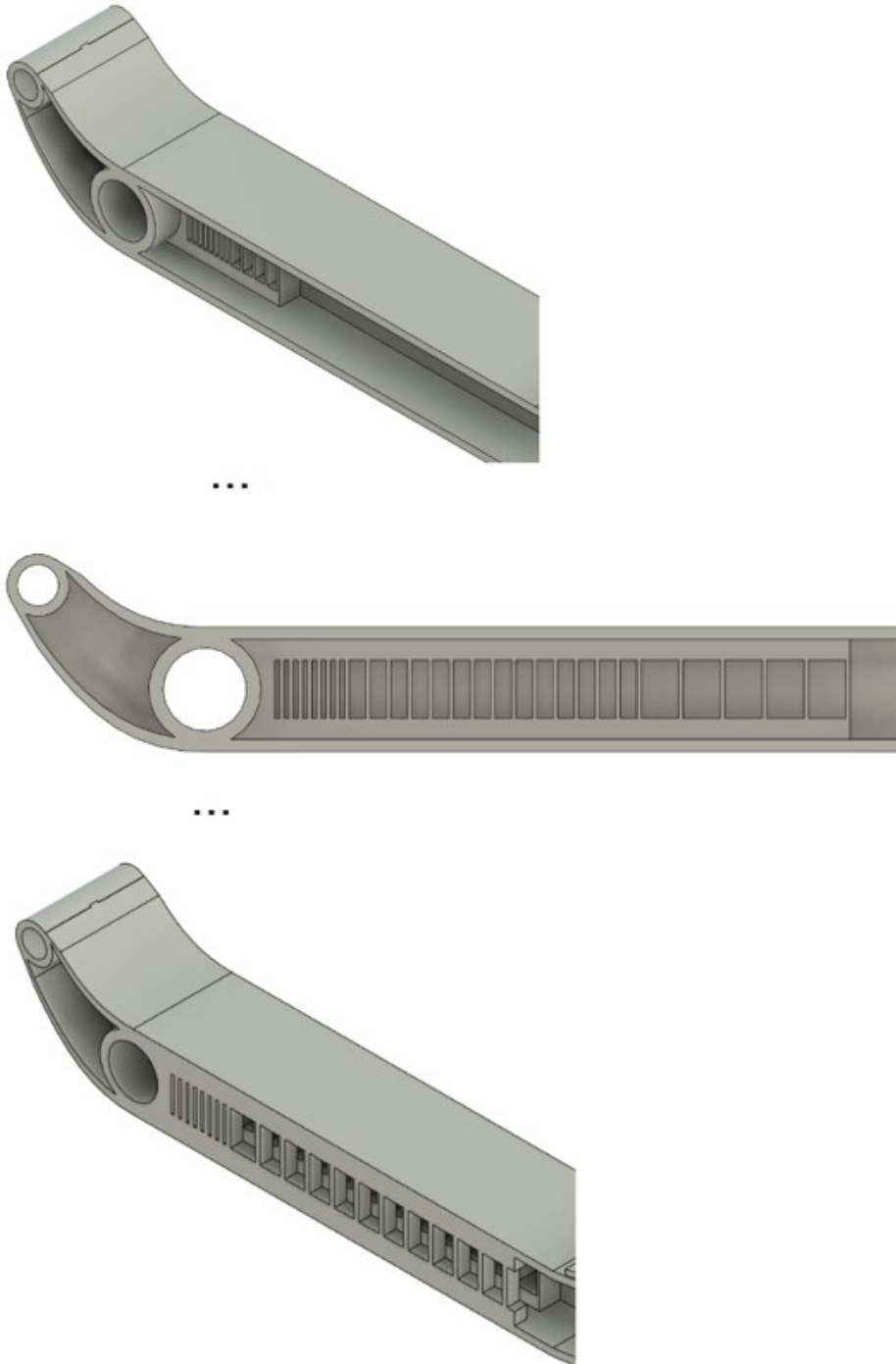
Izvor: Autor - obrada podataka

Kao i kod prethodnih simulacija, na slici su prikazani rezultati prema pomaku i ekvivalentnom naprezanju tijela. Pokazatelj uspješnosti je i dalje faktor sigurnosti, koji u ovoj iteraciji iznosi 2,162 (najmanja vrijednost).

Kao što je prethodno opisano u radu, model bi trebao izdržati sve moguće ishode u vožnji, a to bi u konačnici iznosilo 2.700 N. Ta sila se može sastojati od zbroja sile koja djeluje okomito na pedalu kočnice i bočne sile koja se može pojaviti u nekontroliranim hitnim uvjetima. Prema tome je potrebno nastaviti sa ojačanjem pedale kako bi izdržala jedinstveno ili zbrojno opterećenje.

Dizajn i konstrukcija pedale su se razvijali kroz brojne iteracije, prema rezultatima simulacija, na sljedeći način:

Slika 74: Razvoj modela kroz iteracije

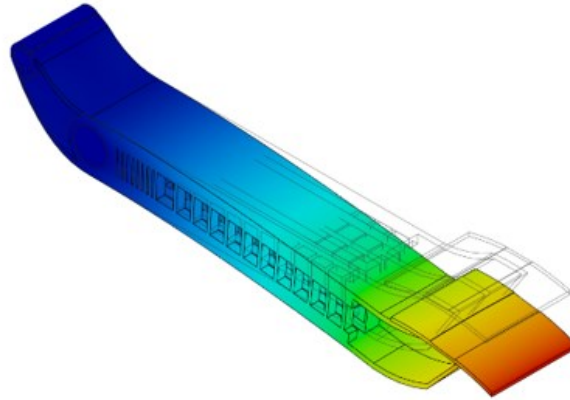



Izvor: Autor - obrada podataka

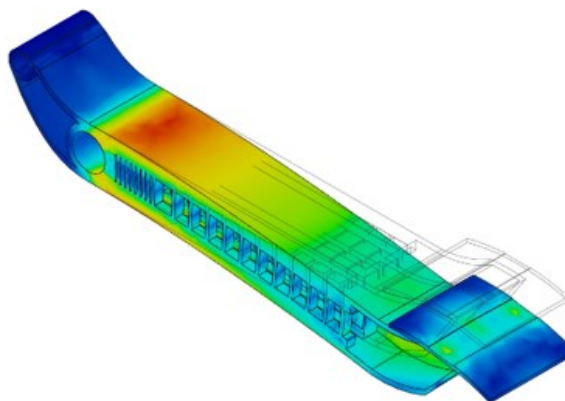
Sljedeći korak u simulaciji je bio povećati iznos sile sa 660 na 1.320 N. Tadašnja iteracija modela je ostvarila sljedeće rezultate:

Slika 75: Simulacija napreznja – 3

[mm] 0  26.46



[MPa] 0  52.46

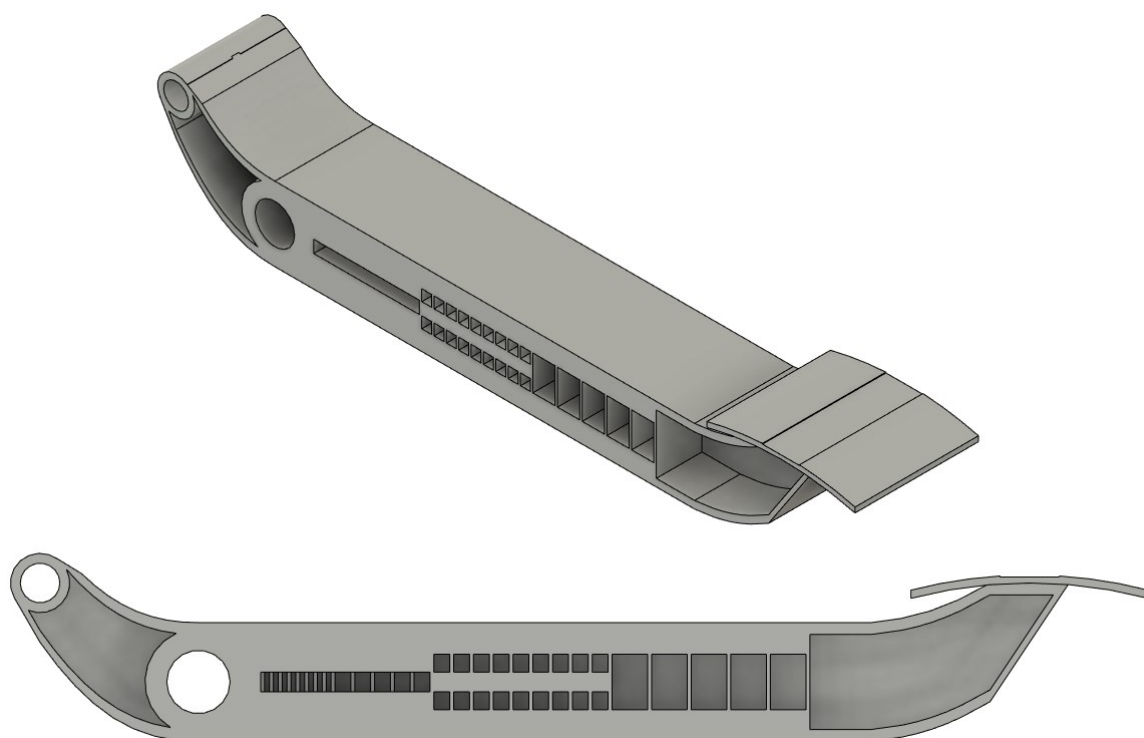


Izvor: Autor - obrada podataka

Pri povećanom napreznju je ostvaren faktor sigurnosti od 1,342, što znači da pedala kočnice i dalje na zadovoljava konačni cilj od 2.700 N. Sljedećim nizom iteracija će se pokušati smanjiti pomak prednjeg dijela pedale, kako bi se i taj parametar doveo unutar zadovoljavajućeg područja.

Nizom iteracija i proučavanjem rezultata simulacija, kritičnih točki i ugroženih područja, konstruirano je sljedeće rješenje:

Slika 76: Dodatno modificirani model



Izvor: Autor - obrada podataka

Slika 76 prikazuje dodatno modificiran model prema rezultatima simulacija. Međutim, kako bi se postigao željeni faktor sigurnosti – izvršena je izmjena materijala.



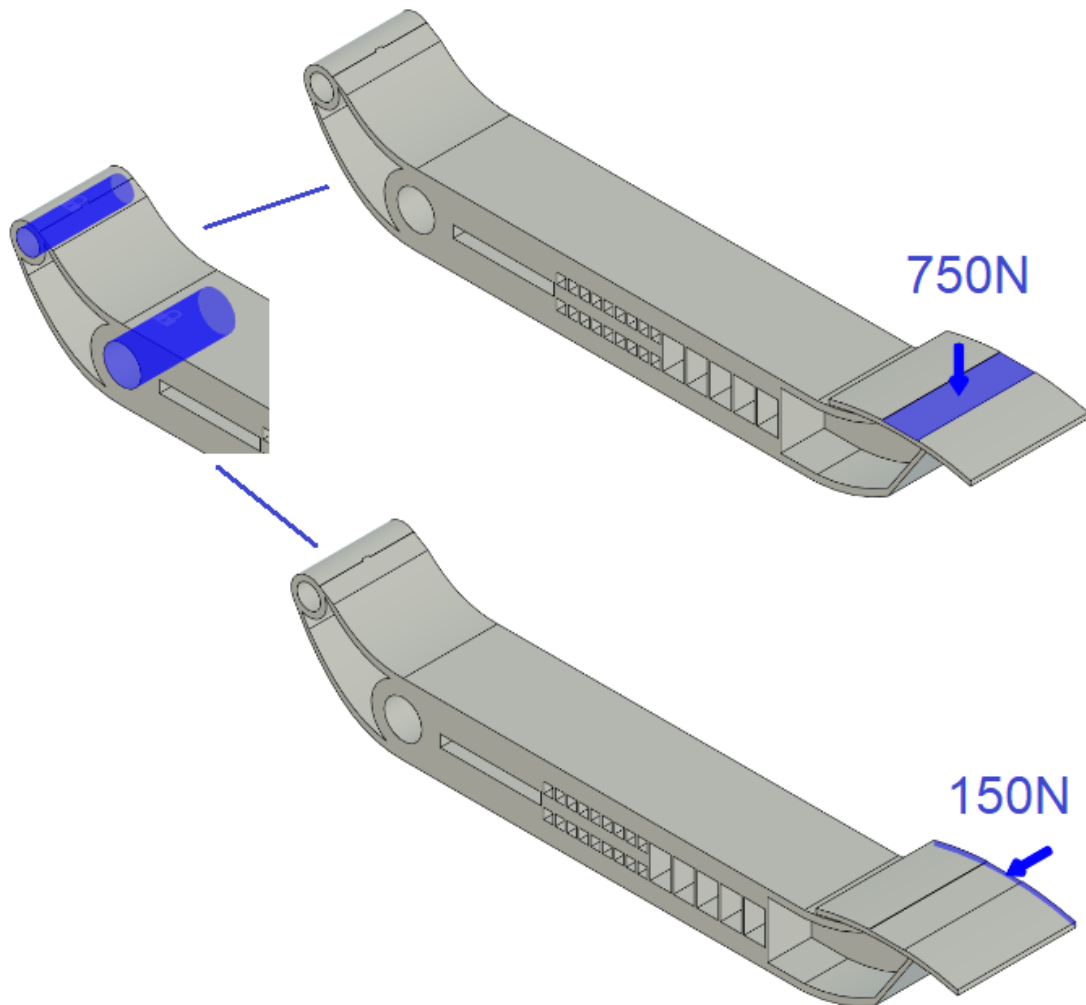
Tablica 12: Nylon 6/6

<b>Materijal</b> <b>Svojstva</b>	<b>Nylon 6/6</b> <b>(PA66)</b>
Youngov modul [MPa]	$2,93 \cdot 10^3$
Vlačna čvrstoća [MPa]	82,75
Poissonov omjer	0,35
Gustoća [Kg/m <sup>3</sup> ]	1.130
Granica razvlačenja [MPa]	82,75
Otpornost na koroziju	Dobra

Izvor: Autor - obrada podataka

Upotrebom materijala prema tablici 12, koji je dostupan u Fusion 360 bazi materijala, izvršena je sljedeća simulacija nad novom iteracijom modela. Ispitan je i utjecaj bočne sile uz dosadašnju okomitu na model.

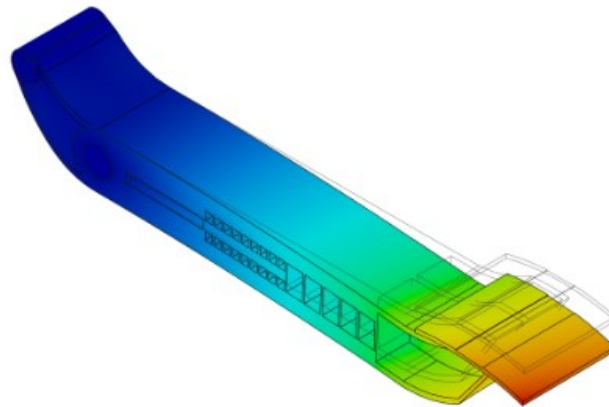
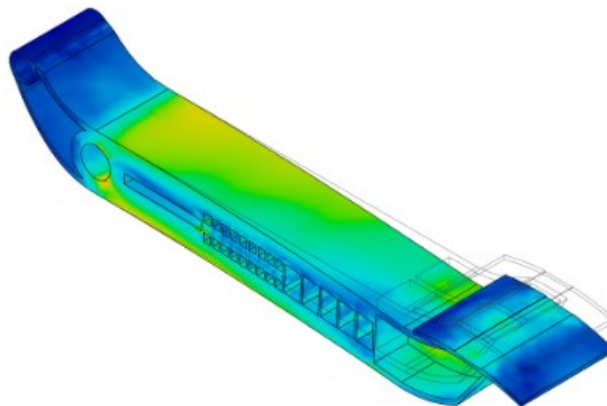
Slika 77: Simulacija naprezanja sa novim materijalom



Izvor: Autor - obrada podataka

Kao što je prikazano na slici, simulacija naprezanja sa novim materijalom sadrži ista fiksna ograničenja, ali sadrži i utjecaj moguće bočne sile na model. Cilj je postići faktor sigurnosti koji bi potvrdio izdržljivost pedale na ukupnu sili od 2.700 N (minimalni iznos faktora u ovom slučaju bi trebao biti iznosa 3). Rezultati simulacije nisu zadovoljili zadani uvjet:

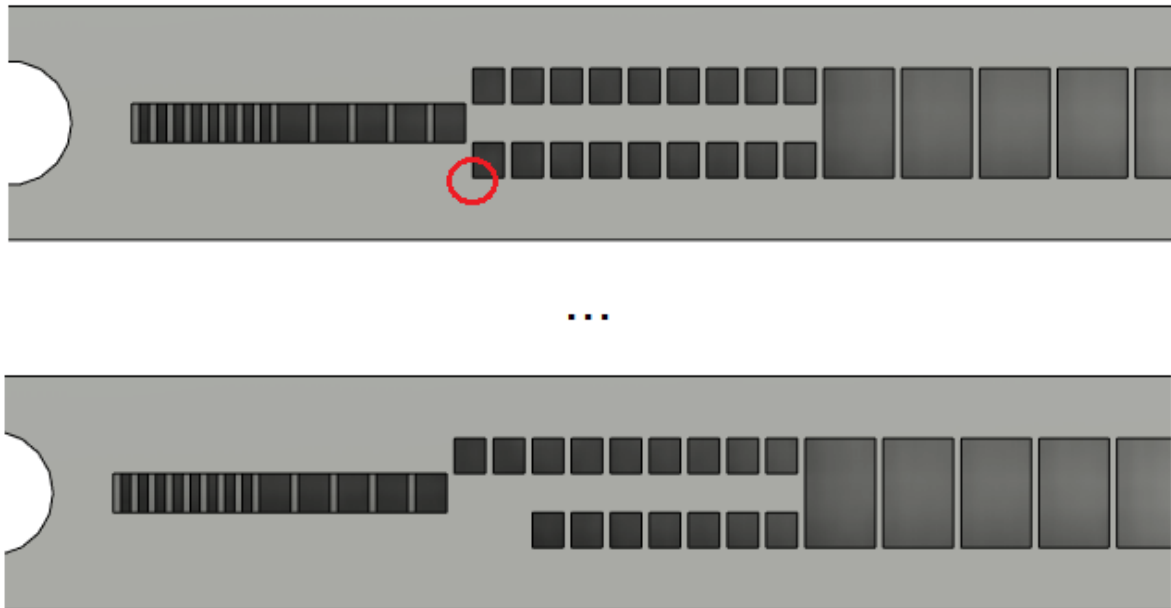
Slika 78: Simulacija napreznja – 4

[mm] 0  13.73[MPa] 0  36.09

Izvor: Autor - obrada podataka

Četvrta prikazana simulacija prikazuje napredak u smanjenom pomaku i ekvivalentnom napreznju, ali je ostvaren faktor sigurnosti iznosa 2,293. Izmjena materijala je donijela napredak i na tragu toga se nastavlja izrada modela. Implementacijom bočne sile su otkrivena nova kritična područja pedale kočnice. Najkritičniji je bio brid unutar male pregrade na ruci pedale:

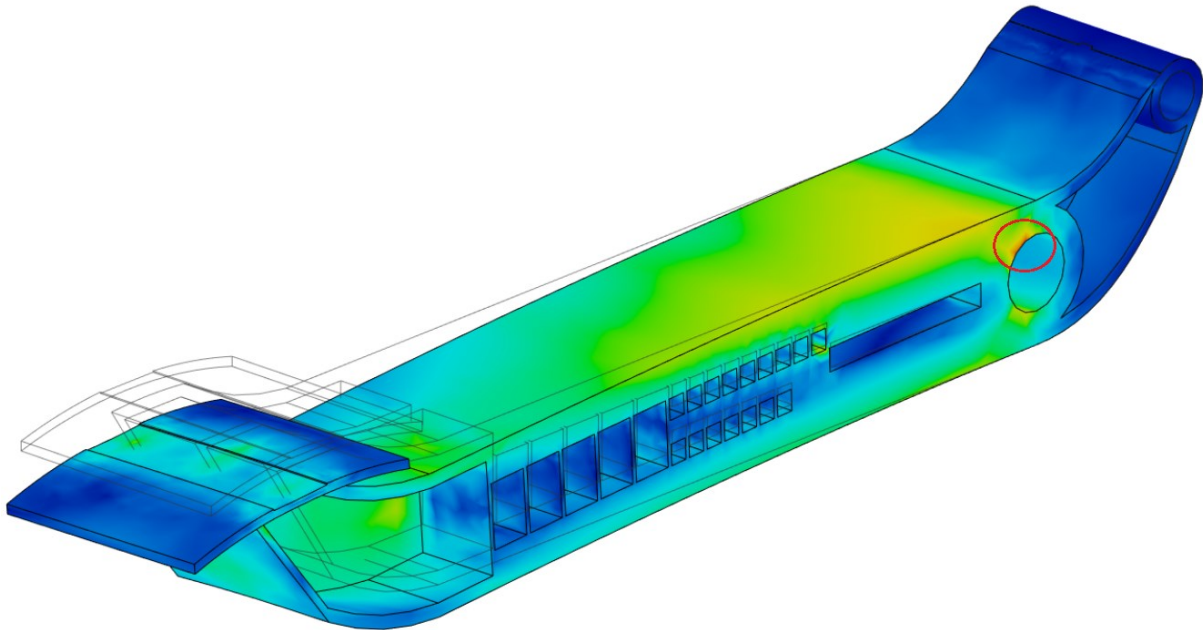
Slika 79: Otklanjanje kritičnog područja



Izvor: Autor - obrada podataka

Nakon otklanjanja najproblematičnijeg područja, ponavlja se simulacija kako bi se otkrilo sljedeće najslabije područje. Rezultati ponovljene simulacije su prikazali sljedeći problem:


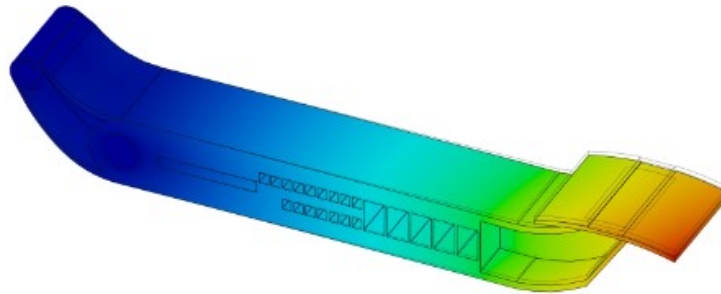
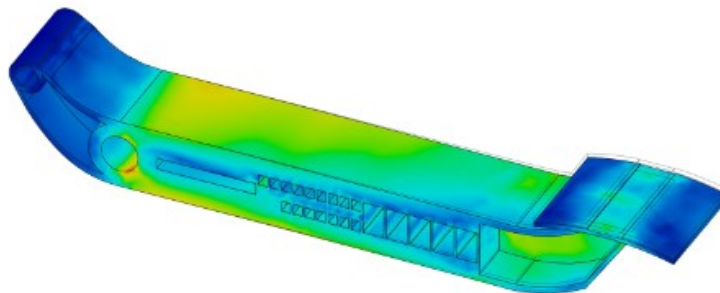
Slika 80: Simulacija napreznja – 5



Izvor: Autor - obrada podataka

Prilikom ponovljene simulacije, najmanji iznos faktora sigurnosti se povećao na 2,378. Kroz sljedeće iteracije se ponavljao isti problem prevelikog napreznja na rubnom dijelu kod rupe za potisnu polugu. Izmjena veličine rupe je ostvarivala manje promjene na faktoru sigurnosti, ali je rezultat uvijek gravitirao ka iznosu 2. Sljedeći korak je ponovna promjena materijala budući da je konstruirana pedala zadovoljavala uvjete na svim mjestima osim istaknutog problema. Odabire se sljedeći materijal, koji je implementiran u softver. Učitani su parametri materijala PA66 GF30 iz tablice 7. Radi se o PA66 materijali (kao i u prethodnoj iteraciji), ali sa boljim svojstvima zbog sadržavanja 30 % staklenih vlakana. Najveća prednost su znatno veća vlačna čvrstoća i granica razvlačenja. Implementacija ovog materijala pruža bolji uvid u stvarne rezultate, budući da se upravo ovaj i slične izvedbe materijala koriste u izradi plastičnih pedala. Osim novog materijala, model i uvjeti simulacije ostaju nepromijenjeni. Rezultati simulacije su sljedeći:

Slika 81: Simulacija napreznja – 6

[mm] 0  2.662[MPa] 0  34.8

Izvor: Autor - obrada podataka

Rezultat simulacije je pokazao velik napredak u smanjenju pomaka tijela i ostvario zadovoljavajući faktor sigurnosti, čiji je minimalan iznos 3,88 za zadani slučaj. Budući da se radilo o simulaciji sa kombiniranim silama (okomita i bočna) ukupnog iznosa 900 N, potrebno je napraviti završne simulacije sa konačnim iznosima.

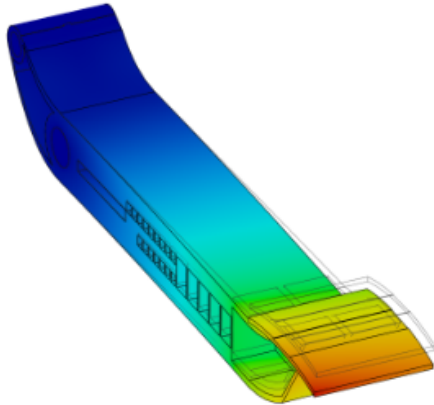
Prvo se izvršila simulacija sa trostrukim iznosima sila u odnosu na prethodnu (kombinirani iznosi sila), a potom i jednostruka okomita sila:

- 1) Okomita sila (2.250 N) + Bočna sila (450 N) (slika 82)
- 2) Okomita sila (2.700 N) (slika 83)

Rezultati posljednjih provjera (simulacija) su sljedeći:

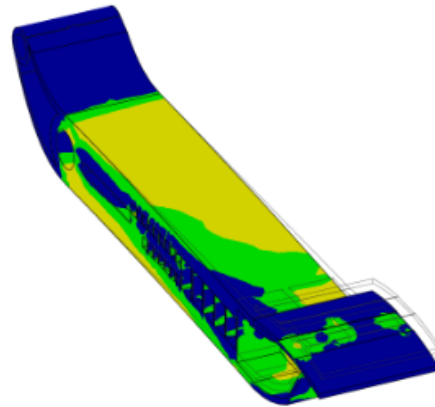
Slika 82: Simulacija naprezanja – 7.1

[mm] 0  7.985

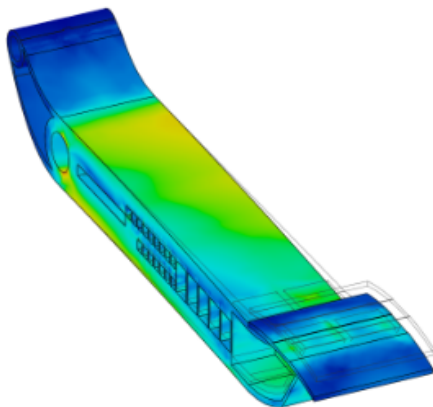


Faktor sigurnosti

0  8

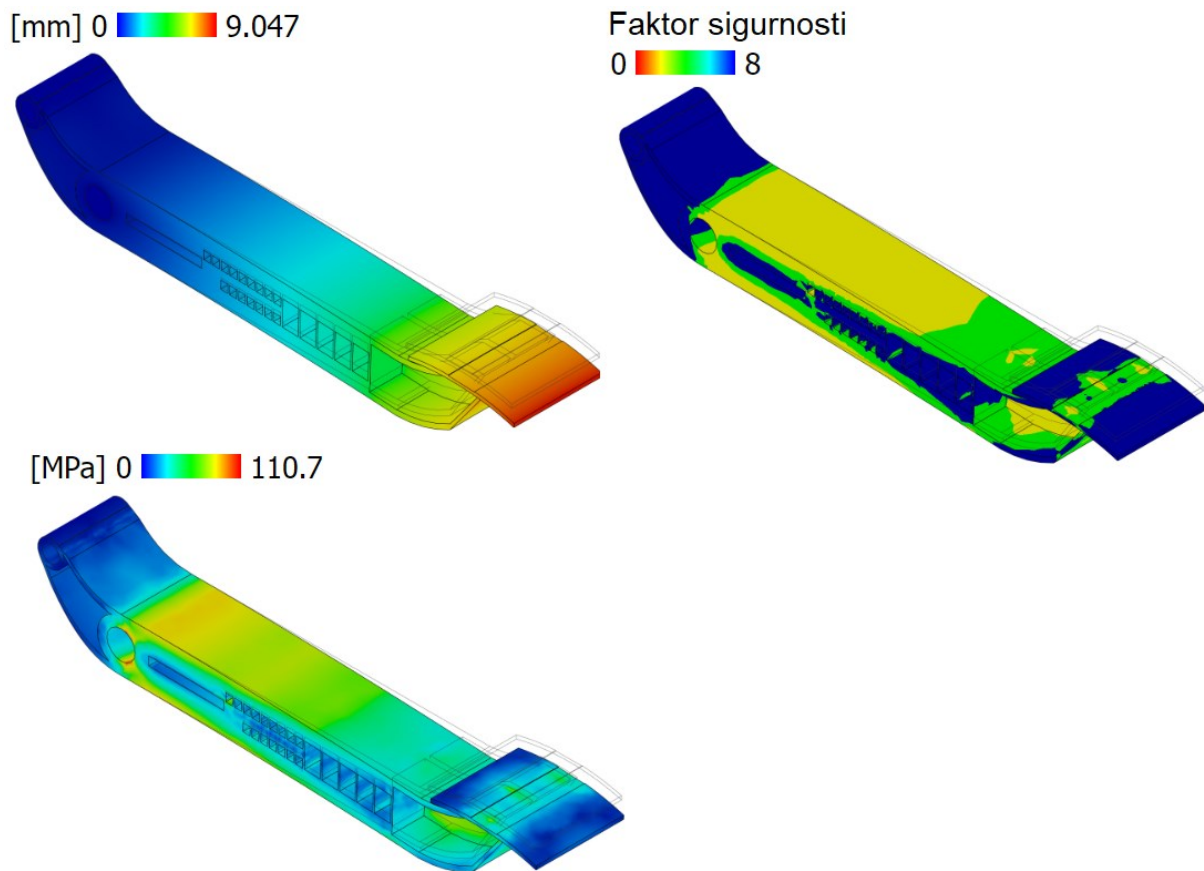


[MPa] 0  104.4



Izvor: Autor - obrada podataka

Slika 83: Simulacija napreznja – 7.2



Izvor: Autor - obrada podataka

Simulacije pokazuju uspješnost ove iteracije i zadovoljavaju početne uvjete u obje izvedbe raspodjele sila. Minimalni faktori sigurnosti iznose 1,293 i 1,219 pri maksimalnom mogućem opterećenju pedale kočnice.

Budući da posljednje odabran materijal ima najveću gustoću i da posljednja iteracija ima najveći volumen zbog modificiranja i ojačavanje pojedinih dijelova pedale, masa tijela iznosi 0,256 kg. To bi značilo da se masa tijela povećala za više od 125 % kroz iteracije, ali je i dalje znatno manja od klasične pedale kočnice.

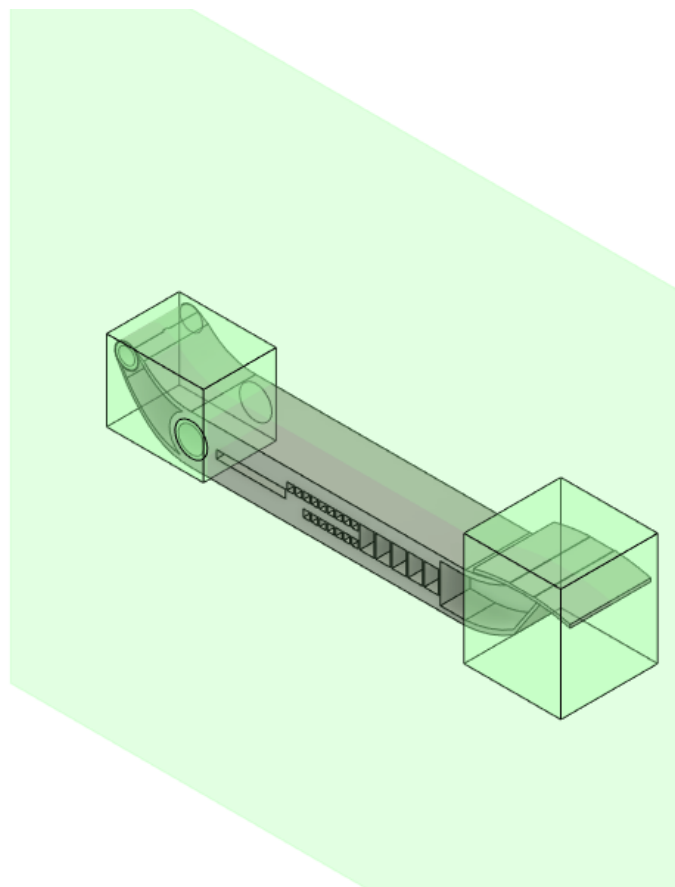


#### 7.4. Optimizacija oblika

Prijašnji model, koji je zadovoljio sve postavljene uvjete, je moguće dodatno optimizirati i uštedjeti na težini komponentne u vozilu. Naravno, ušteda se ostvaruje i u proizvodnji kroz manju potrošnju materijala. Kako bi se izvršila optimizacija oblika, potrebno je postaviti određena ograničenja i zadane uvjete.

Prvo je potrebno postaviti opterećenja pod kojima se vrši optimizacija, a postavljeni uvjeti su jednaki kao u prethodnoj simulaciji sa dva fiksna ograničenja i jednostrukom okomitom silom maksimalnog iznosa od 2.700 N. Nakon toga se postavljaju željeni rezultati koje optimizacija treba postići. U ovom slučaju je to maksimalno zadržavanje čvrstoće i pokušati smanjiti masu za 20 %. Treba naglasiti kako je naknadno moguće podesiti uštedu mase i pratiti koji postotak koliko utječe na strukturu. Također, prije početka je važno odrediti ravninu simetrije djelovanja (kako bi obje strane bile jednako optimizirane) i zaštititi određena područja. Potrebno je zaštititi obje rupe zbog njihove geometrijske i funkcionalne važnosti, kao i oba kraja pedale.

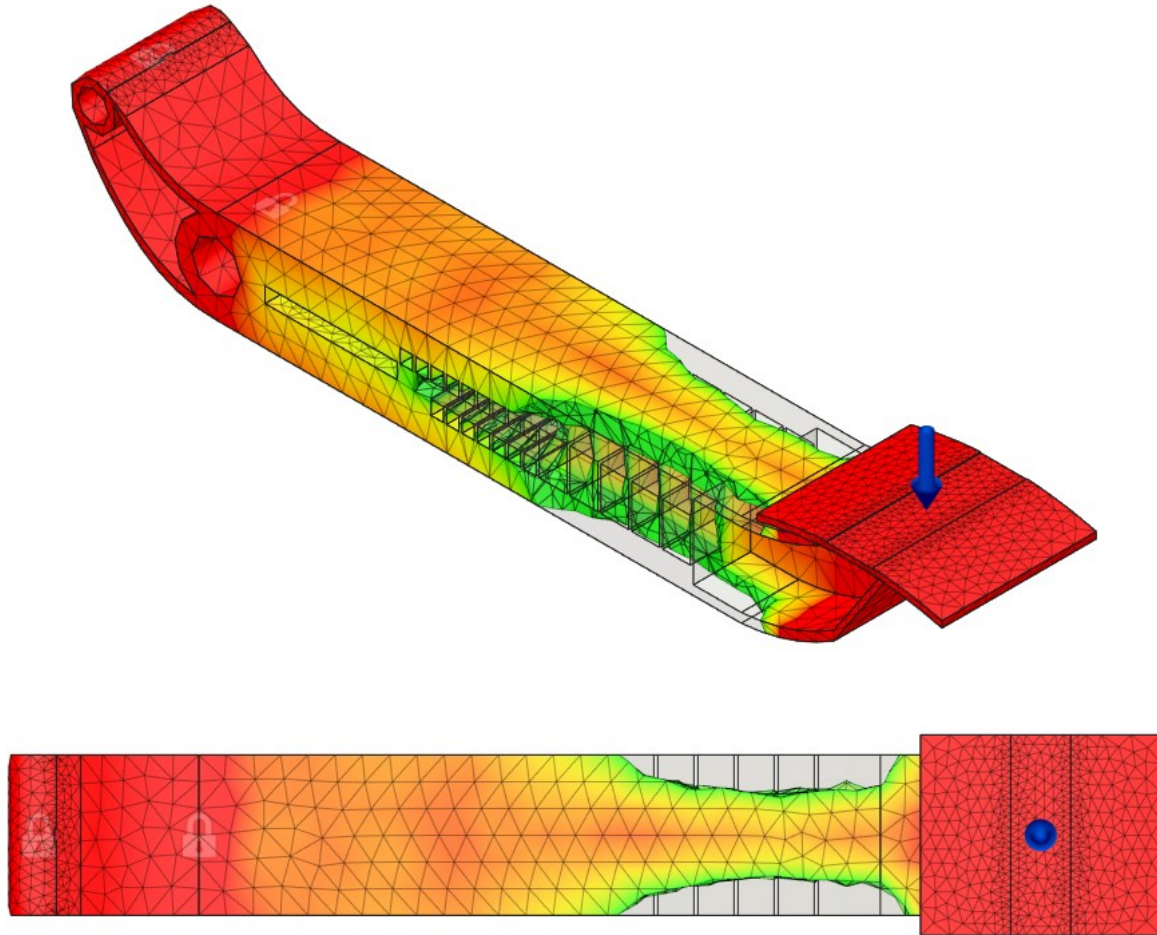
Slika 84: Postavljanje ograničenja za optimizaciju oblika



Izvor: Autor - obrada podataka

Nakon postavljanja ograničenja i ostalih uvjeta, izvršava se simulacija optimizacije oblika. Optimizacija oblika je prikazala sljedeći mogući rezultat:

Slika 85: Rezultat optimizacije oblika

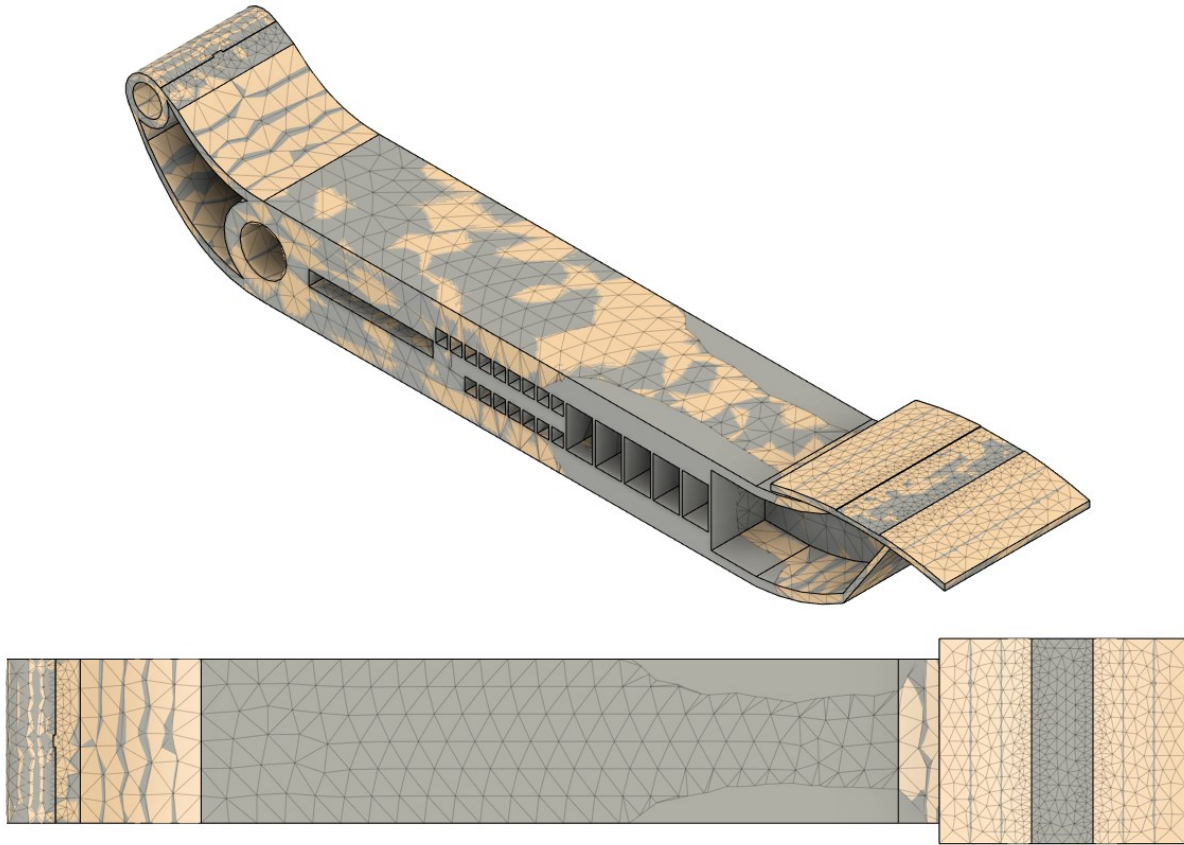


Izvor: Autor - obrada podataka

Rezultat sa slike je maksimalna moguća ušteda mase, a da se pri tome zadrže svi postavljeni uvjeti. Prikazani rezultat bi smanjio masu tijela na 0,227 kg, pri čemu bi ušteda mase iznosila 11,76 %.

Dobiveni rezultat je moguće izvesti kao mrežu na konstrukcijski model i prema njoj izvršiti uklanjanje određenih dijelova:

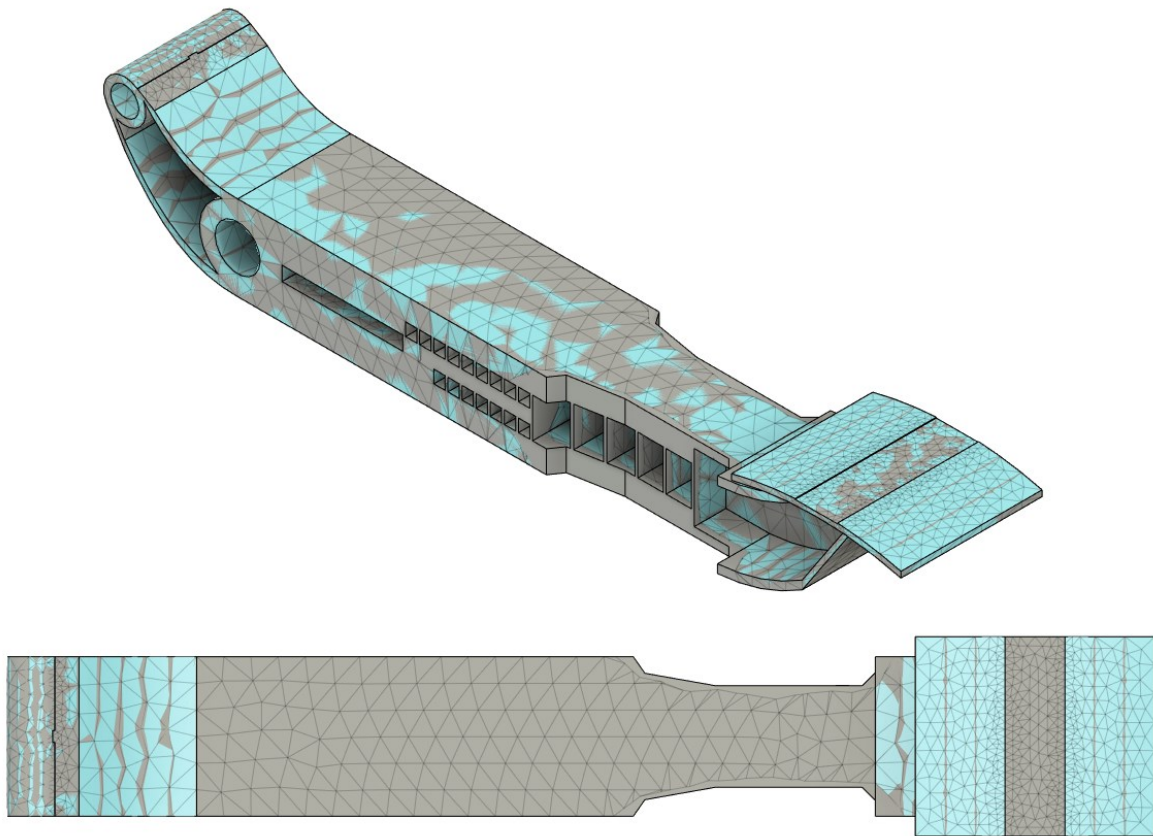
Slika 86: Izvoz mreže na model



Izvor: Autor - obrada podataka

Mrežu koja je izvezena na model je moguće projicirati i koristiti za kreiranje nove skice. Novostvorena skica ne prati u potpunosti bridove mreže, već je dodatno pojednostavljena zbog jednostavnijeg dizajna, upotrebe i izrade.

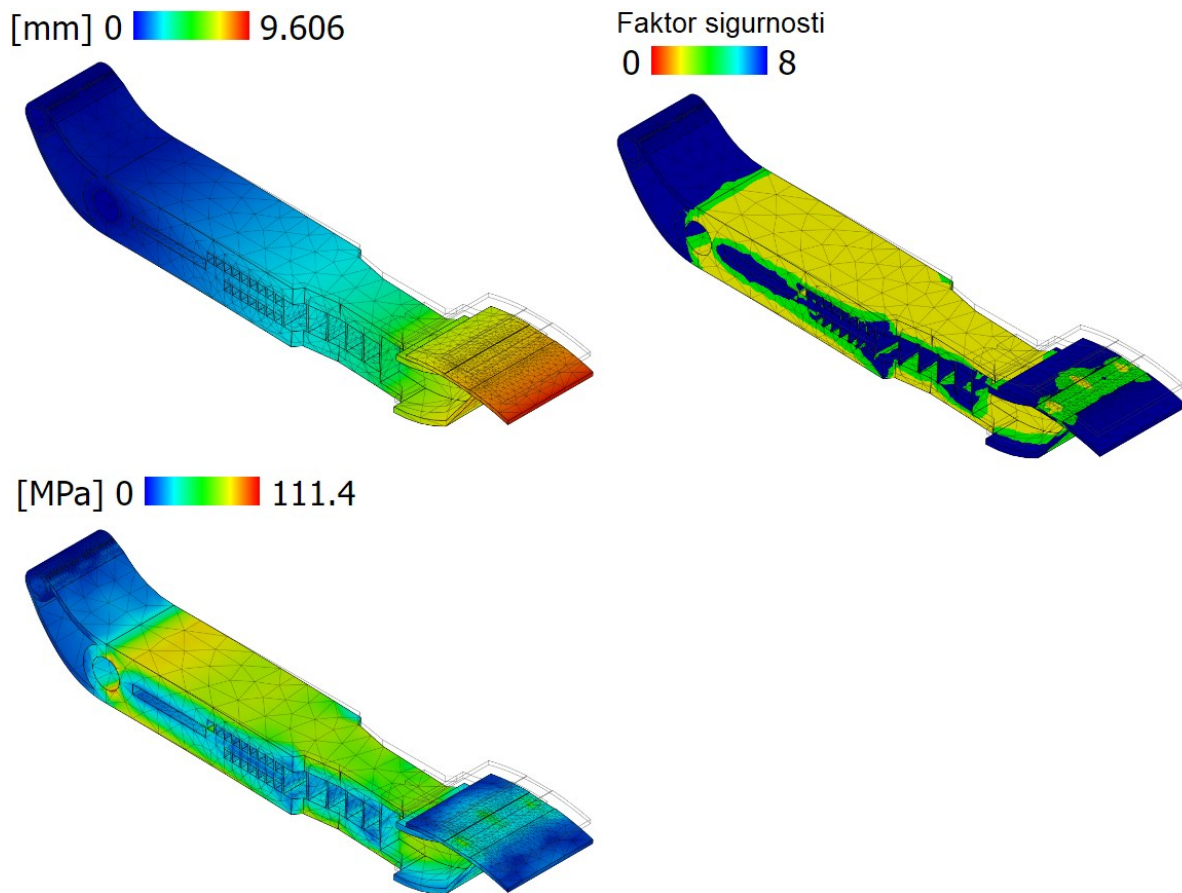
Slika 87: Uklanjanje dijelova pedale



Izvor: Autor - obrada podataka

Na slici 87 je prikazan odnos mreže i stvarno uklonjenih dijelova pedale kočnice. Nakon optimizacije i uklanjanja dijelova, nova masa tijela iznosi 0,241 kg. Optimizacijom je ostvarena ušteda od 6,22 %. Budući da je uklonjeno manje volumena od predloženog i održao se optimalan oblik, optimizacija je uspješna i na veći broj proizvedenih komada će se ostvariti nezanemariva ušteda. Nakon optimizacije je potrebno ponovno sprovesti simulaciju naprezanja i potvrditi da uklonjeni dijelovi nisu utjecali na funkcionalnost komponentne. Postavljeni uvjeti simulacije su jednaki kao i prethodni, a rezultati su sljedeći:

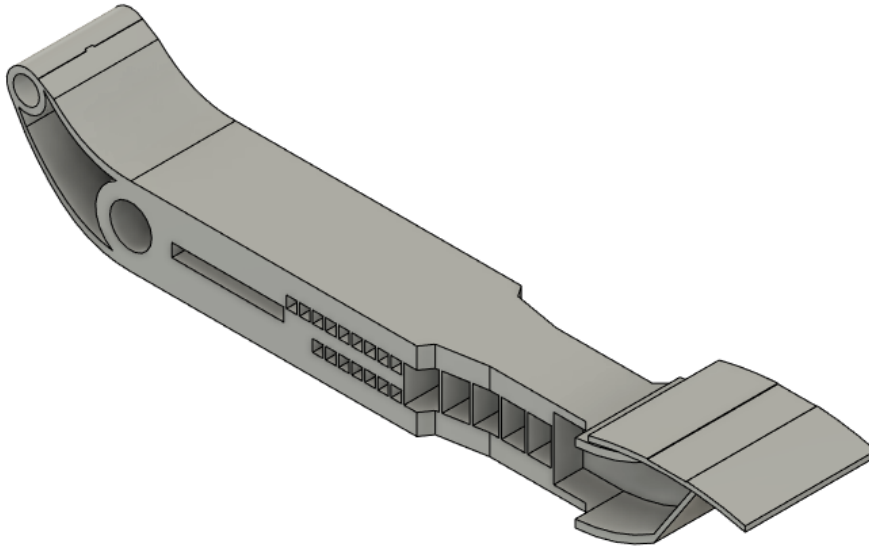
Slika 88: Kontrolna simulacija naprezanja - 8



Izvor: Autor - obrada podataka

Kontrolna simulacija je pokazala ispravnost pedale kočnice i zadovoljavanje uvjeta nakon optimizacije. Ostvaren je minimalan faktor sigurnosti od 1,212 pri djelovanju okomite sile na papučicu pedale u iznosu od 2.700 N. Konačni izgled pedale kočnice, nakon optimizacije je prikazan na sljedećoj slici.

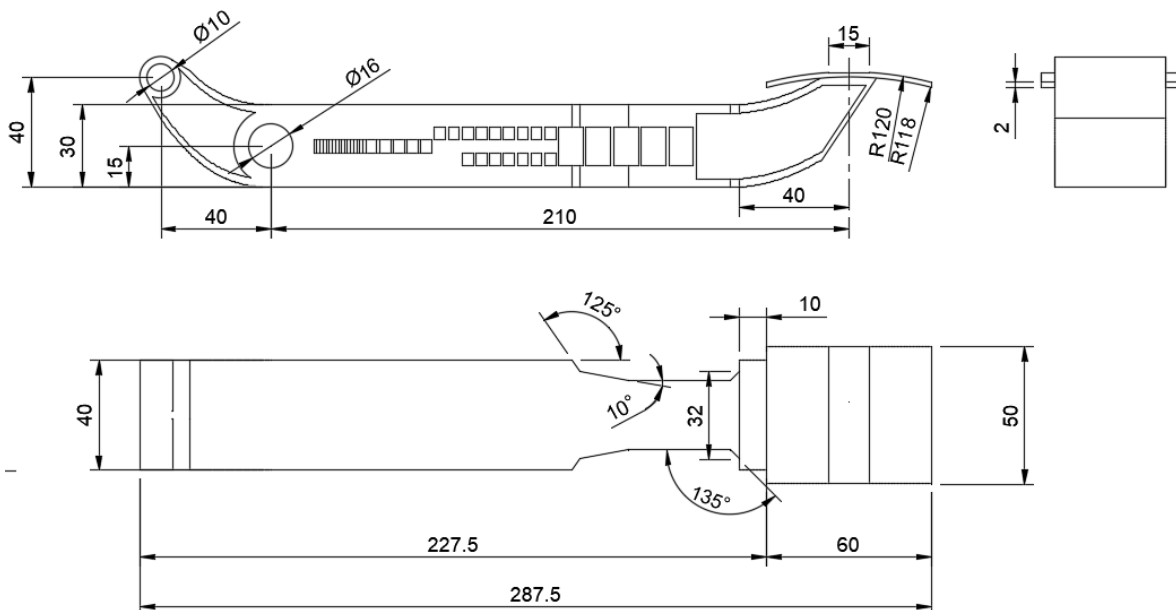
Slika 89: Završni izgled pedale kočnice



Izvor: Autor - obrada podataka

Uz očuvanje ključnih dimenzija poput omjera pedale, dimenzija papučice i sličnih – na slici se nalaze neke od ostalih dimenzija koje utječu na same gabarite pedale i njen prostor (poziciju) u prostoru vozila.

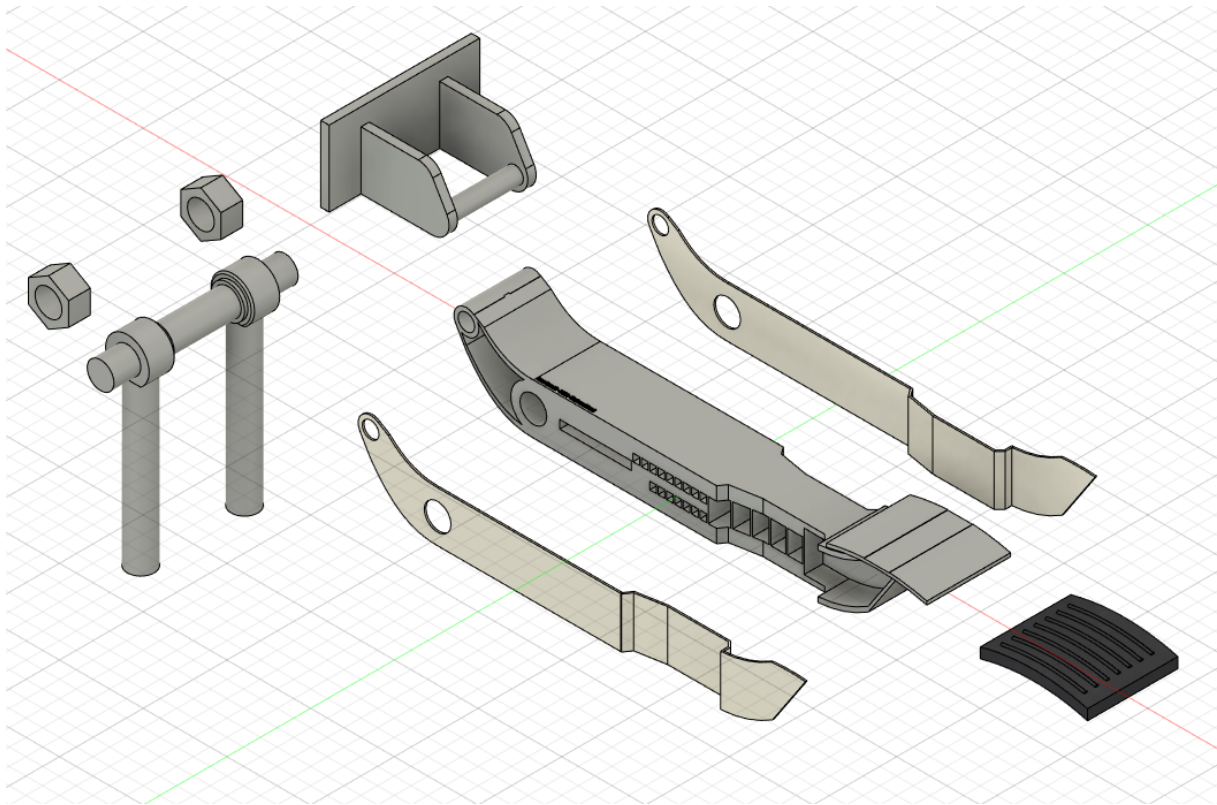
Slika 90: Dimenzije pedale kočnice



Izvor: Autor - obrada podataka

Kao što je prethodno napomenuto u radu, važno je očuvati funkcionalnost i dizajn radi kasnije upotrebe i popratnih dijelova. Za potrebe ovog rada su konstruirane i dodatne komponente kako bi se prikazale sve značajke dizajna.

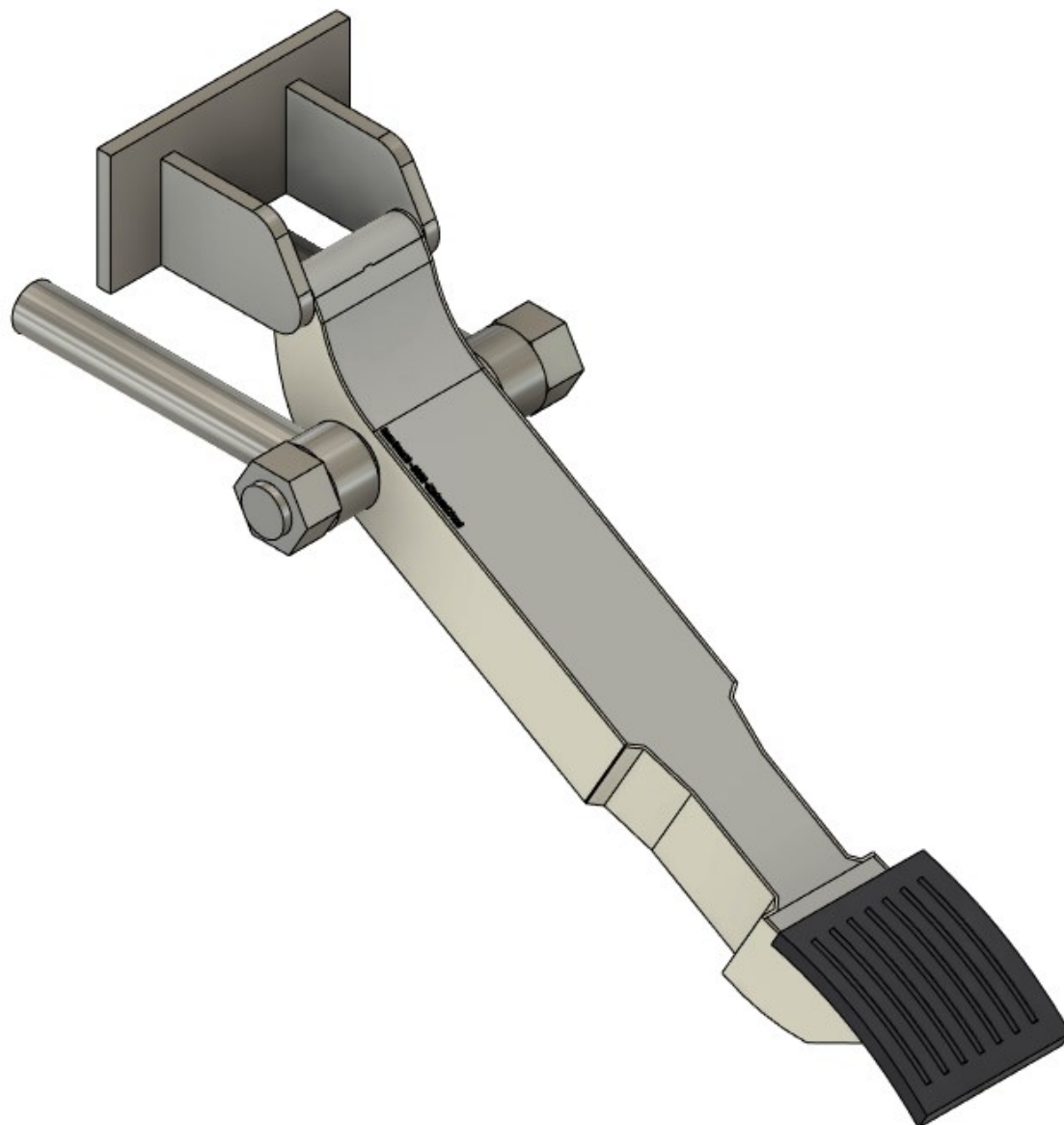
Slika 91: Sklop pedale kočnice i dodatne komponente



Izvor: Autor - obrada podataka

Na slici su prikazane dodatne komponente od kojih su za pedalu kočnice konstruirani odgovarajući bočni profili i gumena papučica sa odgovarajućim oblikom. Bočni profili služe za vizualni efekt i estetiku proizvoda, kao i sprječavanje nakupljanja taloga unutar pedale. Preostali dijelovi poput nosača (pedalnog sklopa) i potisnih poluga su prisutni isključivo kao pomoćne pokazne komponente. Na sljedećoj slici je prikazan primjer izgleda pedale kočnice u upotrebi:

Slika 92: Pokazni primjer upotrebe pedale kočnice



Izvor: Autor - obrada podataka



## 7.5. Analiza rezultata

Razvoj pedale kočnice i ostvareni rezultati prema iteracijama (simulacijama) prikazani su u tablicama ispod. Na taj način je vidljiv utjecaj kompleksnosti modela (povećanje mase) i ostvarenih rezultata, kao i napredak po iteracijama. Također, jasno je vidljiv i utjecaj odabranog materijala koji je različit u tri faze razvoja.

Tablica 13: Rezultati izvršenih simulacija

Sim.	$F_{zs}$ [N]	$F_{ys}$ [N]	$x_{maks.}$ [mm]	$EN_{maks.}$ [MPa]	$FS_{min.}$	Mat.	m [kg]
1	660	0	20,200	42,500	1,670	PA6	0,113
2	660	0	17,650	32,560	2,162	PA6	0,123
3	1.320	0	26,460	52,460	1,342	PA6	0,175
4	750	150	13,730	36,090	2,293	PA66	0,210
5	750	150	13,630	34,800	2,378	PA66	0,212
6	750	150	2,662	34,800	3,880	PA66 GF30	0,256
7.1	2.250	450	7,985	104,400	1,293	PA66 GF30	0,256
7.2	2.700	0	9,047	110,700	1,219	PA66 GF30	0,256
8	2.700	0	9,606	111,400	1,212	PA66 GF30	0,241

Izvor: Autor - obrada podataka

Gdje su:

Sim. – Oznaka simulacije

$F_{zs}$  – Iznos okomite sile (po z-osi)

$F_{ys}$  – Iznos bočne sile (po y-osi)

$x_{maks.}$  – Iznos maksimalnog pomaka

$EN_{maks.}$  – Iznos maksimalnog ekvivalentnog naprezanja

$FS_{min.}$  – Iznos minimalnog faktora sigurnosti

Mat. – Korišteni materijal u simulaciji

m – Masa tijela

$F_{ref.}$  – Iznos referentne sile

Tablica 13 prikazuje rezultate, ali i uvjete svake simulacije. Zajednički uvjet svim simulacijama su postavljena fiksna ograničenja na dva mjesta (slika 77) i površine na koje djeluje sila. Prema obrađenoj literaturi i osobnim saznanjima, testiranja su vršena kao višekratnici od početne testne sile (220 N) ili prema maksimalnom opterećenju od 2.700 N. Maksimalno opterećenje je simulirano kao jednostruka sila ili kao zbroj iznosa okomite i bočne sile. Okomita sila djeluje na pravcu z-osi prema dolje, pa je njen iznos negativan u odnosu na poziciju modela. Uneseni apsolutni iznos i iznosi u tablici su prikazani sa pozitivnim vrijednostima. Isti slučaj vrijedi i za bočnu silu koja djeluje na pravcu y-osi. Pomak je uvijek prikazan kao pozitivna vrijednost i promatra se njegova maksimalna amplituda, a maksimalno ekvivalentno naprezanje je iznos naprezanja u najkritičnijoj točki. Prema tome se izračunava i faktor sigurnosti, čija najmanja vrijednost određuje iznos koji je dostupan u svim točkama.

Vidljiva su poboljšanja u svakoj od prve tri iteracije (s obzirom na opterećenje) i smanjenje pomaka, kao i ekvivalentnog naprezanja. Nakon toga slijedi izmjena materijala na nešto izdržljiviju izvedbu kako bi se nastavila poboljšanja. Sljedeće dvije simulacije ostvaruju dodatna poboljšanja i otklanjaju kritična područja, kako bi bio moguć daljnji napredak kroz iteracije. Na tragu prethodne izmjene materijala i poboljšanja faktora sigurnosti, ponovno se mijenja materijal u izvedbu sa 30 % staklenih vlakana koji ostvaruje zadovoljavajuće rezultate. Posljednje četiri simulacije pokrivaju oba slučaja raspodjele sila i potvrđuju ispravnost pedale kočnice. Posljednja simulacije je završna provjera nakon izvršene optimizacije oblika, što je vidljivo i na smanjenju mase tijela. Pri posljednjoj simulaciji su rezultati prikazali blago pogoršanje na promatranim parametrima, ali je to opravdano zbog uklonjenog materijala. Uštedena težina i materijal ostvaruju dodatne uštede za proizvodnju, a pedala pri tome nije znatno izgubila svoja svojstva. Važno je uvidjeti da je pedala u posljednjoj iteraciji ispravna i zadovoljava sve parametre, od kojih je najvažniji faktor sigurnost veći od jedan pri maksimalnom opterećenju od 2.700 N.

Kako bi se rezultati mogli jasno usporediti, sve simulacije su svedene na jednaku referentnu silu.

Tablica 14: Rezultati svedeni na iznos referentne sile

Sim.	F <sub>ref.</sub> [N]	x <sub>maks.</sub> [mm]	EN <sub>maks.</sub> [MPa]	FS <sub>min.</sub>	Mat.	m [kg]
1	2.700	82,636	173,864	0,408	PA6	0,113
2	2.700	72,205	133,200	0,528	PA6	0,123
3	2.700	54,123	107,305	0,656	PA6	0,175
4	2.700	41,190	108,270	0,764	PA66	0,210
5	2.700	40,890	104,400	0,793	PA66	0,212
6	2.700	7,985	104,400	1,293	PA66 GF30	0,256
7.1	2.700	7,985	104,400	1,293	PA66 GF30	0,256
7.2	2.700	9,047	110,700	1,219	PA66 GF30	0,256
8	2.700	9,606	111,400	1,212	PA66 GF30	0,241

Izvor: Autor - obrada podataka

Prema rezultatima iz tablice 14 jasno je vidljiv napredak modela kroz iteracije uz konstanto povećanje mase, osim posljednje optimizirane izvedbe. Konačna masa tijela iznosi 0,241 kg što je u usporedbi sa ostalim izvedbama, koje se upotrebljavaju u autoindustriji, znatno manje. Prosječna pedala kočnice trenutno u upotrebi teži 0,72 kg što je višestruko više od promatrane plastične izvedbe. Prema tome nova pedala kočnice teži svega 33,48 % metalne izvedbe. Ovime je ostvaren ušteda od 66,52 % težine na pedali kočnice, a da su pri tome u potpunosti očuvana funkcionalnost i sigurnost za upotrebu.

## 8. Zaključak

U ovom radu opisan je postupak izrade 3D modela pedale kočnice primjenom softvera i njegova važnost u unaprjeđenju konstruiranja i dizajna. Upotrebom softvera je omogućeno konstruirati velik broj iteracija proizvoda i redovito provjeravati njegovu uspješnost. Simulacijama naprezanja je moguće provjeriti ispravnost, izdržljivost i kvalitetu dizajna, što je ujedno i predmet istraživanja. Rezultatima simulacija se uviđaju kritične točke i područja koje je potrebno ispraviti u sljedećoj iteraciji. Na taj način se proces od ideje do proizvodnje drastično umanjuje, a samim time i troškovi. Također, primjenom plastičnih kompozita i sličnih materijala koji se ubrizgavaju u kalup (ili izrađuju aditivnim metodama), omogućena je znatno veća kompleksnost dizajna u odnosu na klasičnu proizvodnju. Uz višestruko testiranje, simulacije i izmjene na modelu, postiže se proizvod koji ispunjava sve zadane uvjete, ima dobra svojstva i funkcionalan je. Budući da je pedala kočnice sastavni dio hidrauličkog kočionog sustava, objašnjena je i prikazana njena važnost, dimenzije, pozicija i omjer pedale. Prikazane su razne izvedbe pedale kočnice, kao i svojstva materijala koji se koriste za izradu.

Konstruiranjem ove pedale kočnice je prikazana njena funkcionalnost i sposobnost da plastična pedala kočnice izdrži djelovanje svih potrebnih sila. Posljednje iteracije su zadovoljile uvjete pomoću upotrebe PA66 GF30 materijala i time dokazale mogućnost upotrebe plastičnih kompozita. Odabrana izvedba ima bolja svojstva zbog sadržavanja staklenih vlakana u iznosu od 30 %. Uspješnost ove izvedbe je riješila problem istraživanja vezan za upotrebu plastičnih materijala, a zatim je potvrđeno i zadovoljavanje postavljenih uvjeta. Pedala je izdržala postavljeni slučaj od 2.700 N maksimalne sile pri naglom kočenju, kao i kombinirane iznose sile od 2.250 i 450 N. Pedala kočnice koja je zadovoljila sve postavljene uvjete je u konačnici imala težinu od 0,256 kg, te je ista dodatno optimizirana pomoću optimizacije oblika. Optimizacijom oblika su očuvani svi važni dijelovi za funkcionalnost, a uklonjen je dio pedale koji nije značajno utjecao na istu. Optimizacijom su ostvarene dodatne uštede, pa je završna težina pedale nakon optimizacije 0,241 kg. Ovim modelom i radom su prikazane mogućnosti upotrebe softvera u razvojnoj fazi i sve prednosti takvoga načina rada. Pedala kočnice je ostvarila uštedu od 66,52 % težine u odnosu na prosječnu metalnu izvedbu koja je trenutno u upotrebi.

Dobiveni rezultati prikazuju mogućnost vremenske i troškovne optimizacije razvojnog i istraživačkog procesa stvaranja jedne pedale kočnice, kao i sve prednosti takvoga načina rada uz pomoć suvremenih softvera. Tim rezultatima je potvrđena hipoteza rada i prethodno sprovedena optimizacija dizajna pedale kočnice uz korištenje softvera za 3D modeliranje i simulacije naprezanja.

## Literatura

- [1] Dietsche, K.-H. i dr.: „Automotive Handbook“, Robert Bosch GmbH, Karlsruhe, 2022.
- [2] Sharma, A.; Marwah, A.K.: „Braking Systems : Past, Present & Future“, MIT Ujjain, Ujjain, 2013.
- [3] Sweed, E.M.: „Design and finite element analysis of formula student braking system“, Escola Superior de Tecnologia e Gestão of Instituto Politécnico de Bragança, Bragança, 2021.
- [4] Sapuan, S.M. i dr.: „CONCEPTUAL DESIGN OF AN AUTOMOTIVE COMPOSITE BRAKE PEDAL“, Suranaree J. Sci. Technol. 12(3):173-177, Serdang, 2005.
- [7] Limpert, R.: „Brake Design and Safety, Second Edition“, Society of Automotive Engineers, Warrendale, 1999.
- [8] Puhn, F.: „Brake Handbook“, Hp Books, Tucson, 1985.
- [10] Xi, Y.: „Understanding the Automotive Pedal Usage and Foot Movement Characteristics of Older Drivers“, Clemson University, Clemson, 2015.
- [11] Gillespie, T.D.: „Fundamentals of Vehicle Dynamics“, Society of Automotive Engineers, Warrendale, 2021.
- [12] Chang, K.-H.: „Design Theory and Methods using CAD/CAE: The Computer Aided Engineering Design Series“, Academic Press, Cambridge, 2015.
- [16] Gaurav, V.; Samar, M.: „Autodesk Fusion 360 Black Book (2nd Edition) – Colored“, CAD/CAM/CAE Works, Gurgaon, 2018.
- [17] Gokhale, N.S. i dr.: „Practical finite element analysis“, Finite To Infinite, Pune, 2008.
- [20] Bhise, V.D.: „Ergonomics in the Automotive Design Process“, CRC Press, Boca Raton, 2011.
- [21] Dhande, K.K. i dr.: „Design and Analysis of Composite Brake Pedal: An Ergonomic Approach“, Int. J. Mech. Eng. & Rob. Res., Rowland Heights ,2014.
- [22] Dhande, K.K. i dr.: „Conceptual Design and Analysis of Brake Pedal Profile“, Int. J. Mech. Eng. & Rob. Res., Rowland Heights ,2014.

## Literatura s interneta

- [5] <https://www.compositesworld.com/articles/thermoplastic-composite-structure-replaces-metals-on-safety-critical-brake-pedals>, pristupljeno 10.3.2023.
- [6] <https://www.compositesworld.com/articles/real-time-assessment-of-thermoset-composites-curing>, pristupljeno 10.3.2023.
- [9] <https://partsouq.com/en/catalog/genuine>, pristupljeno 3.8.2023.
- [13] [https://community.wvu.edu/~bpbettig/MAE455/Lecture\\_1\\_CAD\\_intro.pdf](https://community.wvu.edu/~bpbettig/MAE455/Lecture_1_CAD_intro.pdf), pristupljeno 8.8.2023.
- [14] <https://www.autodesk.com/products/inventor/overview>, pristupljeno 9.8.2023.
- [15] <https://help.autodesk.com/view/INVNTOR/2024/ENU/?guid=GUID-61F01A5D-7E54-45A1-9698-7BB11F0AEE94>, pristupljeno 9.8.2023.
- [18] <https://www.wilwood.com/Pedals/Index>, pristupljeno 13.08.2023.
- [19] <https://prussianmotors.com/brakes/>, pristupljeno 14.08.2023.
- [23] <https://www.tamworthsteel.co.uk/products/>, pristupljeno 2.7.2023.

## Popis slika

Slika 1: Dvokružni hidraulički kočioni sustav.....	7
Slika 2: Kompozitna pedala kočnice .....	9
Slika 3: Hidraulički kočioni sustav .....	11
Slika 4: Pojednostavljeni prikaz – glavni kočioni cilindar.....	12
Slika 5: Dvokružni glavni kočioni cilindar .....	13
Slika 6: Vakuumski pojačivač sile kočenja .....	15
Slika 7: Utjecaj sadržaja vode na točku vrelišta kod kočionih tekućina.....	17
Slika 8: Ovisnost viskoznosti o temperaturi i sadržaju vode .....	18
Slika 9: Usporedba stvaranja tlaka kod kliješta sa jednim ili dva klipa .....	19
Slika 10: Usporedba izvedbe plutajućih i fiksnih kočionih kliješta .....	20
Slika 11: Kočiona pločica .....	20
Slika 12: Različite izvedbe kočionih diskova .....	22
Slika 13: Kočioni bubanj fiksne izvedbe sa integriranom parking kočnicom .....	23
Slika 14: Pedalni sklop primjer – Porsche 911 GT3 991 .....	25
Slika 15: Izvedbe pedala.....	26
Slika 16: Visina pedala i udaljenost od poda .....	28
Slika 17: Udaljenosti pedala i odnos prema vozaču .....	29
Slika 18: Međusobni odnosi i razmaci papučica .....	29
Slika 19: Fiksni koordinatni sustav vozila.....	30
Slika 20: Fiksni koordinatni sustav vozila – alternativna izvedba.....	31
Slika 21: Vozilo u zemljanom fiksnom koordinatnom sustavu.....	32
Slika 22: Komponentne sile .....	33
Slika 23: Utjecaji na vozilo .....	35
Slika 24: Omjer pedale .....	37
Slika 25: Automobilaska dizalica.....	38
Slika 26: Paradoks dizajna .....	39
Slika 27: Konvencionalni razvojni ciklus proizvoda .....	40
Slika 28: Moderni razvojni ciklus proizvoda .....	41
Slika 29: Proces konstruiranja .....	42
Slika 30: Komponentne CAD/CAM/CAE sustava .....	43
Slika 31: Dodatni ulazni uređaji – primjeri.....	43
Slika 32: Dodatni izlazni uređaji – primjeri .....	44



Slika 33: Integrirani ulazno/izlazni uređaj – virtualna stvarnost.....	44
Slika 34: Primjer modela – škripac .....	45
Slika 35: Primjer sklopa – škripac.....	46
Slika 36: Primjer višestrukih sklopova.....	47
Slika 37: Autodesk Inventor – parametarsko modeliranje.....	49
Slika 38: Autodesk Inventor - sastavljanje modela.....	50
Slika 39: Autodesk Inventor – izrada nacрта.....	51
Slika 40: Autodesk Inventor – simulacije naprezanja.....	52
Slika 41: Autodesk Inventor – primjer rezultata simulacije .....	53
Slika 42: Autodesk Fusion 360 – koncept.....	54
Slika 43: Autodesk Fusion 360 – primjer timskog okruženja i pristupu projektima....	55
Slika 44: Autodesk Fusion 360 – alatna traka u konstrukcijskom okruženju .....	55
Slika 45: Autodesk Fusion 360 – alatna traka u simulacijskom okruženju .....	56
Slika 46: Autodesk Fusion 360 – primjer simulacija i optimizacije oblika .....	57
Slika 47: Autodesk Fusion 360 – primjer implementacije rješenja i rezultat.....	58
Slika 48: Diskretizacija.....	59
Slika 49: Broj čvorova i elemenata .....	60
Slika 50: Ovisnost broja jednadžbi o parametrima mreže .....	61
Slika 51: Pedala kočnice – komponente .....	64
Slika 52: Izvedbe pedala kočnice kod vozila za utrke .....	65
Slika 53: Izvedba pedale kočnice za cestovne automobile .....	66
Slika 54: Izvedba pedale kočnice za cestovne automobile - 2.....	67
Slika 55: Referentne točke i dimenzije interijera .....	69
Slika 56: Ključne ergonomske dimenzije .....	70
Slika 57: Omjer pedale kočnice .....	72
Slika 58: Omjer pedale – pomak.....	73
Slika 59: Modeli testnih profila .....	78
Slika 60: Modeli testnih profila – 2 .....	79
Slika 61: Početni uvjeti i ograničenja .....	81
Slika 62: Generirana mreža .....	82
Slika 63: Rezultati simulacije – “1“ .....	82
Slika 64: Rezultati simulacije – “2“ .....	83
Slika 65: Rezultati simulacije – “3“ .....	83
Slika 66: Rezultati simulacije – “4“ .....	84

Slika 67: Početni model .....	86
Slika 68: dimenzije i omjer .....	87
Slika 69: 3D model – prva iteracija .....	88
Slika 70: Uvjeti simulacije naprezanja – 1.....	89
Slika 71: Simulacija naprezanja – 1 .....	90
Slika 72: Nadogradnja modela.....	91
Slika 73: Simulacija naprezanja – 2.....	92
Slika 74: Razvoj modela kroz iteracije .....	93
Slika 75: Simulacija naprezanja – 3.....	94
Slika 76: Dodatno modificirani model .....	95
Slika 77: Simulacija naprezanja sa novim materijalom .....	97
Slika 78: Simulacija naprezanja – 4.....	98
Slika 79: Otklanjanje kritičnog područja .....	99
Slika 80: Simulacija naprezanja – 5.....	100
Slika 81: Simulacija naprezanja – 6.....	101
Slika 82: Simulacija naprezanja – 7.1 .....	102
Slika 83: Simulacija naprezanja – 7.2.....	103
Slika 84: Postavljanje ograničenja za optimizaciju oblika .....	104
Slika 85: Rezultat optimizacije oblika.....	105
Slika 86: Izvoz mreže na model.....	106
Slika 87: Uklanjanje dijelova pedale .....	107
Slika 88: Kontrolna simulacija naprezanja - 8.....	108
Slika 89: Završni izgled pedale kočnice .....	109
Slika 90: Dimenzije pedale kočnice .....	109
Slika 91: Sklop pedale kočnice i dodatne komponente.....	110
Slika 92: Pokazni primjer upotrebe pedale kočnice .....	111

## Popis tablica

Tablica 1: Klasifikacija kočionih tekućina .....	16
Tablica 2: Dimenzije pedala i nožnog prostora korištene u SAE standardima .....	27
Tablica 3: Pregled mogućnosti najkorištenijih softvera .....	47
Tablica 4: Ključne ergonomske dimenzije - vrijednosti.....	70
Tablica 5: Svojstva čelika.....	74
Tablica 6: Svojstva aluminija.....	75
Tablica 7: Svojstva najlona .....	76
Tablica 8: Dimenzije testnih profila .....	77
Tablica 9: Svojstva odabranog materijala .....	80
Tablica 10: Rezultati simulacije profila .....	84
Tablica 11: Analiza rezultata simulacije profila .....	85
Tablica 12: Nylon 6/6 .....	96
Tablica 13: Rezultati izvršenih simulacija.....	112
Tablica 14: Rezultati svedeni na iznos referentne sile .....	114

## Popis simbola, oznaka i mjernih jedinica

### Popis kratica

Kratice	Izvorni naziv	Opis kratice
3D	<i>Three-dimensional space</i>	Trodimenzionalni prostor
ABS	<i>Anti-lock Braking System</i>	Sustav protiv blokiranja kotača
BEM	<i>Boundary Element Method</i>	Metoda rubnih elemenata
BOFRP	<i>Ball of Foot Reference Point</i>	Referentna točka stopala
CAD	<i>Computer-Aided Design</i>	Oblikovanje s pomoću računala
CAE	<i>Computer-Aided Engineering</i>	Inženjerstvo s pomoću računala
CAM	<i>Computer-Aided Manufacturing</i>	Proizvodnja s pomoću računala
DIN	<i>Deutsches Institut für Normung</i>	Njemački institut za normiranje
DOT	<i>Department of Transportation</i>	Ministarstvo prometa
DVM	<i>Finite Difference Method</i>	Metoda konačnih razlika
ECE	<i>Economic Commission for Europe</i>	Gospodarska komisija
ECR	<i>Number of engineering changes</i>	Broj inženjerskih promjena
EEC	<i>European Economic Community</i>	Europska ekonomska zajednica
FEM	<i>Finite Element Method</i>	Metoda konačnih elemenata
FMVSS	<i>Federal Motor Vehicle Safety Standards</i>	Savezni sigurnosni standardi motornih vozila
FVM	<i>Finite Volume Method</i>	Metoda konačnih volumena
HPDC	<i>High Pressure Die Casting</i>	Visokotlačno lijevanje odljevka
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>	Međunarodna organizacija za standardizaciju
JIS	<i>Japanese Industrial Standards</i>	Japanski industrijski standardi
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>	Društvo automobilskih inženjera
StVZO	<i>Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung</i>	Njemački zakon o cestovnom prometu

## Popis oznaka

Oznaka	Mjerna jedinica	Opis oznake
ABS	-	Akrilonitril butadien stiren
[D]	-	Matrica krutosti
[F]	-	Matrica sila
[K]	-	Matrica pomaka
a	m/s <sup>2</sup>	Akceleracija
A	%	Produljenje
A <sub>1</sub>	cm <sup>2</sup>	Površina klipa 1
A <sub>2</sub>	cm <sup>2</sup>	Površina klipa 2
Al	-	Aluminij
a <sub>x</sub>	m/s <sup>2</sup>	Akceleracija u smjeru x-osi
B	mm	Širina profila
Cu	-	Bakar
D	mm	Visina profila
D <sub>1</sub>	cm	Pomak klipa 1
D <sub>2</sub>	cm	Pomak klipa 2
D <sub>A</sub>	N	Aerodinamično opterećenje na visini h <sub>a</sub>
E	MPa	Youngov modul
EN <sub>maks.</sub>	MPa	Iznos maksimalnog ekvivalentnog naprezanja
Fe	-	Željezo
F <sub>izlaz</sub>	N	Iznos izlazne sile
F <sub>ref.</sub>	N	Iznos referentne sile
FS <sub>min.</sub>	-	Iznos minimalnog faktora sigurnosti
F <sub>ulaz</sub>	N	Iznos ulazne sile
F <sub>x</sub>	N	Vektor longitudinalne sile
F <sub>xf</sub>	N	Sila trenja na prednjem kraju
F <sub>xr</sub>	N	Sila trenja na stražnjem kraju
F <sub>y</sub>	N	Vektor lateralne sile
F <sub>ys</sub>	N	Iznos bočne sile (po y-osi)
F <sub>z</sub>	N	Vektor normale sile
F <sub>zs</sub>	N	Iznos okomite sile (po z-osi)
GF	%	Staklena vlakna
I <sub>xx</sub>	kgm <sup>2</sup>	Moment inercije oko x-osi
m	kg	Masa tijela
M	%	Apsorpcija vlage
Mat.	-	Korišteni materijal u simulaciji
Mg	-	Magnezij
Omjer	-	Prijenosni omjer automobilske dizalice

Omjer pedale	-	Prijenosni omjer pedale kočnice
p	m/s	Brzina kotrljanja oko x-osi
PA6	-	Poliamid 6
PA66	-	Poliamid 66
PH11	mm	Visina papučice gasa
PH16	mm	Prostor između papučice gasa i poda
PH22	mm	Visina papučice kočnice
PH26	mm	Prostor između papučice kočnice i poda
PH33	mm	Visina papučice kvačila
PH36	mm	Prostor između papučice kvačila i poda
PH61	mm	Hod papučice gasa
PL1	mm	Prekorak sa gasa do kočnice
PL52	mm	Odstupanje od kočnica do gasa
PL53	mm	Odstupanje od kvačila do kočnice
PP	-	Polipropilen
PW11	mm	Širina papučice gasa
PW13	mm	Prostor kočnice
PW17	mm	Gas - prostor do desnog ruba
PW21	mm	Razmak od kočnice do gasa
PW22	mm	Širina papučice kočnice
PW23	mm	Lateralno odstupanje od kočnice do kvačila
PW27	mm	Prostor gasa
PW32	mm	Razmak od kvačila do kočnice
PW33	mm	Širina papučice kvačila
PW42	mm	Kočnica - prostor do lijevog ruba
PW43	mm	Kvačilo - prostor do lijevog ruba
PW47	mm	Širina nožnog prostora
PW82	mm	Referentna točka stopala do središnje linije kočnice
PW83	mm	Referentna točka stopala do središnje linije kvačila
PW92	mm	Središnja linija vozača do desnog ruba papučice kočnice
PW98	mm	Središnja linija vozača do referentne točka stopala
q	m/s	Brzina nagiba oko y-osi
r	m/s	Brzina skretanja oko z-osi
R <sub>hr</sub>	N	Uzdužno opterećenje u stanju povlačenja prikolice
R <sub>hz</sub>	N	Vertikalno opterećenje u stanju povlačenja prikolice
R <sub>m</sub>	MPa	Vlačna čvrstoća
R <sub>xf</sub>	N	Otpor kotrljanju na prednjem kraju
R <sub>xr</sub>	N	Otpor kotrljanju na stražnjem kraju
Si	-	Silicij
Sim.	-	Oznaka simulacije
T	Nm	Moment sile
T	mm	Debljina profila

$t$	mm	Debljina profila
$T_x$	Nm	Moment sile oko x-osi
$W$	N	Težina u točki centra gravitacije
$W_f$	N	Težina na prednjem kotaču
$W_{fr}$	N	Težina na stražnjem kotaču pri statičkom opterećenju
$W_{fs}$	N	Težina na prednjem kotaču pri statičkom opterećenju
$W_r$	N	Težina na stražnjem kotaču
$x$	mm	Kretanje po longitudinalnoj osi
$x_{maks.}$	mm	Iznos maksimalnog pomaka
$x_P$	mm	Pomak pedale
$x_{pp}$	mm	Pomak potisne poluge
$y$	mm	Kretanje po lateralnoj osi
$z$	mm	Kretanje po vertikalnoj osi
$Zn$	-	Cink
$\beta$	°	Kut bočnog klizanja
$\theta$	°	Kut nagiba
$\Theta$	°C	Temperatura taljenja
$\nu$	°	Kut pravca
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	Gustoća
$\sigma$	MPa	Zamor materijala
$\sigma_{0,2}$	MPa	Granica razvlačenja
$\nu$	-	Poissonov omjer
$\psi$	°	Kut putanje

## **Sažetak i ključne riječi**

Pedala kočnice je ključni i sigurnosni element u kočionom sustavu vozila i ona mora biti funkcionalna pod djelovanjem sila od 2.700 N kod jakog kočenja. Pedala omogućava lakše djelovanje kod ispravnog omjera pedale kočnice, a može biti izrađena od različitih materijala: čelika, aluminijske ili plastičnih kompozita. U posljednje vrijeme se zbog tendencije za što lakšim komponentama vrlo aktivno razvijaju plastične komponente kao zamjenski materijal za metalne dijelove. Najnovija stavka na toj listi je i pedala kočnice.

U ovome radu su detaljno opisane sve važne komponentne hidrauličkog kočionog sustava i metodologija izrade 3D modela pedale kočnice. Konstruirani 3D model je optimiziran uz pomoć softvera za simulacije i optimizaciju oblika i testiran za maksimalnu funkcionalnost uz uštedu mase. Konačni dizajn pedale kočnice je za 66,52 % manji u odnosu na masu prosječne metalne pedale.

*Ključne riječi: hidraulički kočioni sustav, pedala kočnice, 3D modeliranje, simulacije naprezanja i optimizacija oblika.*



## **Abstract and keywords**

The brake pedal is a key and safety component in a vehicle's braking system, and it must be functional under force loads of 2.700 N under heavy braking. The pedal allows for easier action by having the correct pedal ratio, and it can be made of different materials: steel, aluminum or plastic composites. Recently, due to the tendency to use lighter components, plastic components have been actively developed as a replacement material for metal parts. The latest item on that list is the brake pedal.

This thesis describes all the important components of the hydraulic brake system and the methodology for creating a 3D model of the brake pedal. The constructed 3D model was optimized with the help of software for simulations and shape optimization and tested for maximum functionality with mass savings. The final design of the brake pedal is 66,52 % less compared to the weight of the average metal pedal.

*Keywords: hydraulic brake system, brake pedal, 3D modelling, stress simulations and shape optimization.*