

# Topološko optimiranje nosača sjedala prototipnog vlaka

---

**Borić, Andro**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2022**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:040550>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-09-27**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Andro Borić**

Zagreb, 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

Zagreb, 2022.

Mentor :

Prof. dr.sc. Damir Godec

Andro Borić

0069072996

*Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.*

*Ovom prilikom želio bih se zahvaliti mentoru rada Prof. dr.sc. Damiru Godecu na pomoći oko odabira teme i izrade rada, Tomislavu Breškom na pomoći oko odabira teme i izrade rada.*

*Zahvaljujem se svojoj obitelji na financijskoj i moralnoj podršci, svojoj djevojci na motivaciji i podršci te prijateljima. Njima posvećujem ovaj rad.*

*Andro Borić*



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite

Povjerenstvo za diplomske radove studija strojarstva za smjerove:

proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment,  
inženjerstvo materijala te mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa:	602-14/22-6/1
Ur. broj:	15-1703-22-

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **ANDRO BORIĆ**

Mat. br.: 0069072996

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Topološko optimiranje nosača sjedala prototipnog vlaka**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Topology optimisation of the seat bracket of prototype train**

Opis zadatka:

Jedan od ciljeva održivosti pri razvoju suvremenih transportnih sredstava je manji CO<sub>2</sub> otisak, a njega se postiže između ostalog i smanjenjem potrošnje energije prilikom korištenja transportnog sredstva. Uz to se sve veća pozornost posvećuje sigurnosti u primjeni transportnog sredstva. U tu svrhu se pri razvoju pojedinih komponenata transportnih sredstava nastoji smanjiti masa tih komponenata uz očuvanje ili čak i poboljšanje njihovih performansi i sigurnosti. Jedan od snažnih alata u takvim procesima razvoja proizvoda je topološko optimiranje. Proces optimiranja poznat je već dulje vrijeme, no rezultat optimiranja često je vrlo kompleksna geometrija proizvoda, koju nije moguće ostvariti primjenom tradicionalnih proizvodnih tehnologija. Pojava aditivnih tehnologija s druge strane omogućuje izradu vrlo kompleksne, topološki optimirane geometrije proizvoda koja uz minimalni utrošak materijala rezultira optimalnim performansama.

U okviru rada potrebno je:

- 1) Prikazati osnovna načela i korake procesa topološkog optimiranja, te dati pregled raspoloživih računalnih programa za topološko optimiranje.
- 2) Dati pregled mogućnosti primjene aditivnih tehnologija za izradu topološki optimiranih proizvoda s posebnim naglaskom na primjenu u transportnoj tehnici.
- 3) Na konkretnom primjeru nosača sjedala prototipa putničkog vlaka optimirati konstrukciju u cilju udovoljavanja sigurnosnim zahtjevima, pri čemu treba predvidjeti različite orijentacije sjedala u vagonu vlaka. Pri tome uzeti u obzir kriterij minimiranja mase nosača sjedala i zadržati njegovu nosivost i stabilnost neovisno o orijentaciji sjedala.
- 4) Prilikom oblikovanja nosača sjedala predvidjeti kojom bi se aditivnom tehnologijom izrađivao topološki optimirani nosač te primijeniti specifična pravila oblikovanja uvjetovana tom aditivnom tehnologijom.
- 5) Donijeti zaključke o dobivenim rezultatima.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

29. rujna 2022.

Rok predaje rada:

1. prosinca 2022.

Predviđeni datum obrane:

12. prosinca do 16. prosinca 2022.

Zadatak zadao:

prof. dr. sc. Damir Godec

Predsjednica Povjerenstva:

prof. dr. sc. Biserka Runje

## SADRŽAJ

<b>SADRŽAJ</b> .....	I
<b>POPIS SLIKA</b> .....	III
<b>POPIS TABLICA</b> .....	V
<b>POPIS OZNAKA</b> .....	VI
<b>SAŽETAK</b> .....	VII
<b>SUMMARY</b> .....	VIII
<b>1. UVOD</b> .....	1
<b>2. ADITIVNA PROIZVODNJA</b> .....	2
<b>2.1 Procesni lanac aditivne proizvodnje</b> .....	3
<b>2.2 Prednosti aditivne proizvodnje</b> .....	5
2.2.1. Složenost dijela.....	5
2.2.2. Sklopovi.....	7
2.2.3. Konsolidacija dijelova.....	7
2.2.4. Personalizacija proizvoda.....	8
2.2.5. Smanjenje mase.....	8
2.2.6. Proizvodnja na zahtjev.....	10
<b>3. TOPOLOŠKO OPTIMIRANJE</b> .....	11
<b>3.1. Vrste topološkog optimiranja</b> .....	11
3.1.1. Topološko optimiranje diskretnih struktura.....	12
3.1.2. Kontinuirano topološko optimiranje.....	13
<b>3.2. SIMP model</b> .....	18
<b>3.3. Topološko optimiranje kao alat za konstruiranje</b> .....	21
<b>3.4. Topološko optimiranje u transportnoj industriji</b> .....	23
<b>4. TOPOLOŠKO OPTIMIRANJE I ADITIVNA PROIZVODNJA</b> .....	29
<b>5. TOPOLOŠKO OPTIMIRANJE NOSAČA SJEDALA VLAKA</b> .....	33

---

<b>5.1. Izbor materijala</b> .....	33
<b>5.2. Analiza modela sjedala</b> .....	34
<b>5.3. Tijek rada</b> .....	37
5.3.1. Početna analiza .....	37
5.3.2. Topološko optimiranje nosača.....	40
5.3.3. Definiranje rubnih uvjeta.....	43
5.3.4. Topološko optimiranje u „Altair Inspire“ .....	45
<b>6. REZULTATI</b> .....	48
<b>6.1. Usporedba rezultata</b> .....	48
<b>6.2. Izrada CAD modela</b> .....	54
<b>7. PRIPREMA ZA ADITIVNU PROIZVODNJU</b> .....	56
<b>8. ZAKLJUČAK</b> .....	59
<b>LITERATURA</b> .....	60



## POPIS SLIKA

<b>Slika 1: Razlika između substraktivne (lijevo) i aditivne proizvodnje (desno) [1].....</b>	<b>2</b>
<b>Slika 2: a) CAD model b) STL male rezolucije c) STL srednje rezolucije d) STL visoke rezolucije modificirano prema [1] .....</b>	<b>3</b>
<b>Slika 3: procesni lanac za 3D ispis modificirano prema [1] .....</b>	<b>4</b>
<b>Slika 4: proizvod složene geometrije napravljen korištenjem AM [1] .....</b>	<b>5</b>
<b>Slika 5: Siemens komora izgaranja plinske turbine [1].....</b>	<b>6</b>
<b>Slika 6: 3D ispisani implantat za ruku [1].....</b>	<b>8</b>
<b>Slika 7: Okvir sjedala zrakoplova [1] .....</b>	<b>9</b>
<b>Slika 8: Lanac opskrbe danas [1].....</b>	<b>10</b>
<b>Slika 9: Lanac opskrbe budućnosti [1] .....</b>	<b>10</b>
<b>Slika 10: Tipovi konstrukcije modificirano prema [3] .....</b>	<b>12</b>
<b>Slika 11: NURBS krivulja [3].....</b>	<b>14</b>
<b>Slika 12: "Bubble method" metoda [3] .....</b>	<b>15</b>
<b>Slika 13: Domena [3].....</b>	<b>16</b>
<b>Slika 14: 0-1 raspodjela materijala [3] .....</b>	<b>17</b>
<b>Slika 15: SIMP model [3].....</b>	<b>21</b>
<b>Slika 16: Topološko optimiranje okvira satelita [6] .....</b>	<b>22</b>
<b>Slika 17: Procijenjena vrijednost tržišta materijala u avionskoj industriji .....</b>	<b>24</b>
<b>Slika 18: Udjeli emisija stakleničkih plinova s obzirom na područje upotrebe .....</b>	<b>25</b>
<b>Slika 19: Topološki optimirana vilica ovjesa automobila [12].....</b>	<b>26</b>
<b>Slika 20: Topološko optimiranje grede pod torzijskim opterećenjem [12].....</b>	<b>26</b>
<b>Slika 21: Apsorbirana energija-masa model [12].....</b>	<b>27</b>
<b>Slika 22: Rešetkasti model [12] .....</b>	<b>27</b>
<b>Slika 23: Količina suporta prije i nakon i TO [13] .....</b>	<b>30</b>
<b>Slika 24: Savijanje slojeva [14] .....</b>	<b>30</b>
<b>Slika 25: "Slonova noga" [14] .....</b>	<b>31</b>
<b>Slika 26: Konstrukcija vlaka od aluminija [18].....</b>	<b>34</b>
<b>Slika 27: Model sjedala u ravnini nacрта .....</b>	<b>35</b>
<b>Slika 28: Model sjedala u ravnini tlocrta .....</b>	<b>35</b>
<b>Slika 29: Model sjedala u ravnini bokocrta .....</b>	<b>36</b>
<b>Slika 30: Postavljanje support-a .....</b>	<b>37</b>
<b>Slika 31: Ikona "Apply Force/Pressure/Torque/Support" .....</b>	<b>38</b>

<b>Slika 32: Sile</b> .....	39
<b>Slika 33: von Mises- početna analiza- smjer kretanja vlaka</b> .....	39
<b>Slika 34: von Mises- orijentacija okomita na smjer kretanja vlaka</b> .....	40
<b>Slika 35: Domena</b> .....	41
<b>Slika 36: Koordinate provrta</b> .....	42
<b>Slika 37: Ikona za dodavanje/oduzimanje materijala</b> .....	42
<b>Slika 38: Ikona za particioniranje</b> .....	42
<b>Slika 39: Particionirani dio nosača</b> .....	43
<b>Slika 40: Rubni uvjeti uležištenja konstrukcije</b> .....	44
<b>Slika 41: Rubni uvjeti opterećenja</b> .....	45
<b>Slika 42: Ikona "Shape controls"</b> .....	45
<b>Slika 43: Maksimiranje krutosti</b> .....	46
<b>Slika 44: Minimiranje mase</b> .....	47
<b>Slika 45: Maksimiranje krutosti (5%)</b> .....	48
<b>Slika 46: Minimiranje mase (F=3)</b> .....	49
<b>Slika 47: Minimiranje mase (F=4)</b> .....	49
<b>Slika 48: von Mises- Maksimiranje krutosti (5%)- smjer kretanja vlaka</b> .....	50
<b>Slika 49: von Mises- Maksimiranje krutosti (5%)-okomit na smjer kretanja vlaka</b> .....	51
<b>Slika 50: von Mises- Minimiranje mase (F=3)- smjer kretanja vlaka</b> .....	51
<b>Slika 51: :von Mises- Minimiranje mase (F=3)- smjer okomit na smjer kretanja vlaka</b>	52
<b>Slika 52: von Mises- Minimiranje mase (F=4)- smjer kretanja vlaka</b> .....	52
<b>Slika 53: von Mises- Minimiranje mase (F=4)- smjer okomit na smjer kretanja vlaka</b> ..	53
<b>Slika 54: Fit NURBS</b> .....	54
<b>Slika 55: CAD model</b> .....	55
<b>Slika 56: SLS [15]</b> .....	56
<b>Slika 57: Parametri printera</b> .....	57
<b>Slika 58: Grafički parametri orijentacije modela</b> .....	57
<b>Slika 59: Simulacija isprintanog dijela</b> .....	58

**POPIS TABLICA**

<b>Tablica 1: Mehanička svojstva aluminija .....</b>	<b>33</b>
<b>Tablica 2: Model sjedala, masa .....</b>	<b>36</b>
<b>Tablica 3: Definirane sile .....</b>	<b>38</b>
<b>Tablica 4: Postavljanje rubnih uvjeta opterećenja .....</b>	<b>44</b>
<b>Tablica 4: Optimiranje nosača .....</b>	<b>48</b>
<b>Tablica 5: Analize optimiranja nosača .....</b>	<b>50</b>

## POPIS OZNAKA

<i>Oznaka:</i>	<i>Značenje:</i>	<i>Mjerna jedinica:</i>
$A_0$	-početni poprečni presjek konstrukcije	[m <sup>2</sup> ]
$E$	-Youngov modul elastičnosti materijala	[MPa]
$E_0$	-Youngov modul elastičnosti osnovnog materijala (str 19)	[MPa]
$\varepsilon$	-omjer produljenja konstrukcije i njene duljine	[-]
$F$	-Sila koja djeluje na konstrukciju	[N]
$F_k$	-faktor sigurnosti	[-]
$F_{hx}, F_{hy}$	-Horizontalna sila po poprečnoj i uzdužnoj osi	[N]
$F_{vx}, F_{vy}$	-Vertikalna sila po poprečnoj i uzdužnoj osi	[N]
$L_0$	-početna duljina konstrukcije	[mm]
$\Delta L$	-produljenje konstrukcije	[mm]
$m$	-masa	[kg]
$\sigma$	-naprezanje	[MPa]
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	-glavna naprezanja.	[MPa]
$p$	-faktor kazne	[-]
$\chi$	-funkcija raspodjele materijala	[-]
$\nu$	-Poissonov omjer ili koeficijent	[-]
$\Omega$	-domena	[-]

## SAŽETAK

Diplomski rad bavi se metodom topološkog optimiranja na praktičnom primjeru nosača sjedala vlaka. Topološko optimiranje provedeno je pomoću računalnog programa „Altair Inspire“. Radom se razmatra uporaba aditivne proizvodnje u svrhu realizacije kompleksne strukture koja se dobiva topološkim optimiranjem.

Nakon uvoda, drugo poglavlje rada opisuje proces aditivne proizvodnje, uspoređuje ga sa substraktivnom proizvodnjom, te spominje vezu između aditivne proizvodnje i topološkog optimiranja.

Treće poglavlje rada detaljno opisuje smisao, proces i upotrebu topološkog optimiranja. Uključuje matematičku podlogu, vrste optimiranja, računalne programe i niz prednosti koje topološko optimiranje može ponuditi u transportnoj industriji.

U četvrtom poglavlju se povezuju aditivna proizvodnja i topološko optimiranje, u koracima se opisuje princip rada i na koje stvari je potrebno pripaziti kada se materijal obrađuje postupcima aditivne proizvodnje.

U petom poglavlju je na praktičnom primjeru topološkog optimiranja nosača sjedala prikazan i objašnjen proces topološkog optimiranja. U šestom poglavlju se nalazi detaljan prikaz rezultata dobivenim topološkim optimiranjem u računalnom programu „Altair Inspire“.

Ključne riječi: aditivna proizvodnja, topološko optimiranje, vlak

## **SUMMARY**

The master thesis deals with the topology optimization method on the practical example of train seat support. Topology optimization was performed using the computer program "Altair Inspire". The paper considers the use of additive manufacturing for the purpose of realizing a complex structure obtained by topology optimization.

After the introduction, the second chapter of the paper describes the process of additive manufacturing, compares it with subtractive manufacturing, and mentions the connection between additive manufacturing and topology optimization.

The third chapter of the paper describes in detail the meaning, process and use of topology optimization. It includes the mathematical background, types of optimizations, computer programs, and a number of advantages that topology optimization can offer in the transportation industry.

In the fourth chapter, additive manufacturing and topology optimization are connected, the working principle is described in steps and what behaviour the material has when processed by additive manufacturing procedures.

In the fifth chapter, the process of topology optimization is shown and explained on the practical example of topology optimization of seat supports. In the sixth chapter, there is a detailed presentation of the results obtained by topology optimization in the "Altair Inspire" computer program.

Key words: additive manufacturing, topology optimisation, train

## **1. UVOD**

Cilj ovog rada je objediniti sve više prisutnu tehnologiju aditivne proizvodnje, sa metodom optimizacije, topološkim optimiranjem. Metodom topološkog optimiranja moguće je razviti proizvod, a aditivnom proizvodnjom moguće ga je proizvesti. Aditivna proizvodnja je sušta suprotnost konvencionalnoj proizvodnji, prilikom koje se skida materijal, dok se aditivnom proizvodnjom dodaje materijal, te se tako sloj po sloj „gradi“ željeni objekt. Takva vrsta proizvodnje je specifična, jer je moguće dobiti proizvod iz jednog komada, bez obzira na složenost tog komada. S obzirom na trendove na tržištu, raste broj varijanti i kompleksnost proizvoda, sa naglaskom na personalizaciji proizvoda, a pri tome se smanjuje vrijeme proizvodnje, aditivna proizvodnja je sadašnjost i budućnost u mnogim granama industrije.

Topološko optimiranje je optimizacijska metoda koja izmjenom topologije objekta, minimira masu objekta, a zadržava mehanička svojstva tog objekta upotrebom metode konačnih elemenata. Optimiranje se provodi putem računala, s pomoću komercijalnih računalnih programa. Rezultat topološkog optimiranja je često presložene topologije da bi ga se moglo proizvesti konvencionalnim metodama proizvodnje, što ga čini vrlo interesantnim za aditivnu proizvodnju.

S pomoću topološkog optimiranja, moguće je dobiti konstrukciju koja je lakša od konkurentnih konstrukcija, čime se smanjuju troškovi nabave materijala, troškovi i vrijeme proizvodnje.

## 2. ADITIVNA PROIZVODNJA

Aditivna proizvodnja (AM- „*additive manufacturing*“) je proces stvaranja nekog objekta/proizvoda slojevitim dodavanjem materijala (sloj po sloj). Takav način oblikovanja je suprotan od substraktivne proizvodnje, u kojoj se objekt stvara rezanjem tj. oduzimanjem čvrstog bloka materijala dok se ne skine sav potreban materijal tj. oblikuje konačni proizvod. Aditivna proizvodnja može se odnositi na bilo koji proces stvaranja proizvoda dodavanjem materijala, kao što je oblikovanje, ali se praktično odnosi na trodimenzionalni ispis (3D ispis) jer je taj pojam manje apstraktan za opću javnost. Proces počinje od ničega i ispisuje sloj po sloj, na svaki prethodni sloj dok se ne oblikuje konačni volumen. Ovisno o korištenoj tehnologiji, debljina sloja može varirati od svega par mikrometara do 0,25 milimetara.



Slika 1: Razlika između substraktivne (lijevo) i aditivne proizvodnje (desno) [1]

Takva proizvodnja je prvi put korištena za razvoj prototipova 1980-ih, no ti objekti uglavnom nisu bili funkcionalni. Tada je takav proces proizvodnje bio korišten za brzu izradu prototipa, jer je omogućio da se u kratkom vremenu napravi fizički model konačnog proizvoda, bez klasičnog, konvencionalnog procesa postavljanja i troškova koji su uključeni u stvaranje prototipa. Kako se aditivna proizvodnja razvijala, njezina se upotreba proširila na brzu izradu alata, koji su korišteni za izradu kalupa za konačne proizvode. Od početka 21. stoljeća, aditivna proizvodnja se koristila za stvaranje funkcionalnih proizvoda. U današnje vrijeme, velike tvrtke

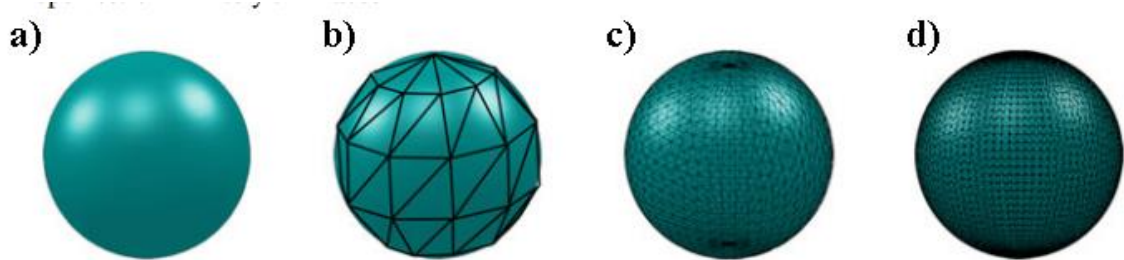


poput „Boeinga“ i „General Electrica“ počele su koristiti aditivnu proizvodnju kao sastavni dio svojih proizvodnih sustava.

## 2.1 Procesni lanac aditivne proizvodnje

Za izradu proizvoda korištenjem aditivne proizvodnje, na početku se mora izraditi virtualni 3D CAD model (CAD-konstruiranje pomoću računala). Moguće je koristiti gotovo svaki CAD softver koji postoji na tržištu. CAD model mora biti u obliku potpuno zatvorenog volumena, npr. model kocke mora imati svih 6 ploha i ne smije imati praznine na bridovima. U slučaju da jedna ploha nedostaje, ili volumen sadrži praznine, to predstavlja beskonačno tanku površinu koja se ne može 3D ispisati.

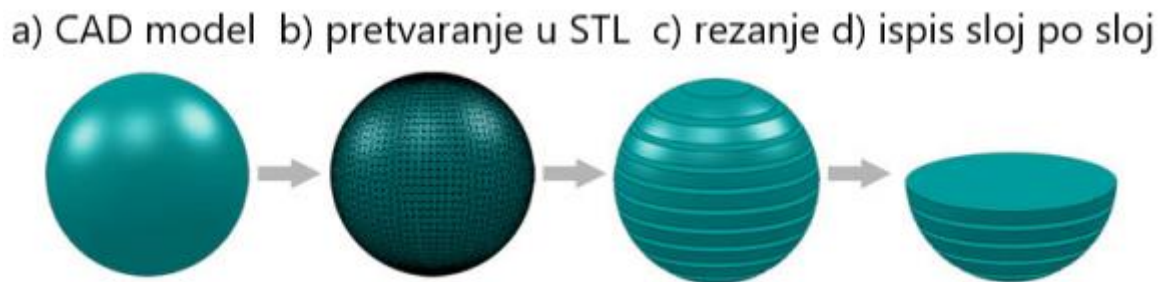
Po završetku konstruiranja, softver prevodi CAD datoteku u format koji stroj za aditivnu proizvodnju razumije. Najčešće se koristi STL datoteka tj. „*standard tessellation language*“ (standardni jezik trokuta). Takav format pretvara CAD datoteku u trianguliranu datoteku, tj. „prostor“ popuni s velikim brojem trokuta. Što je veća razlučivost datoteke, to je više generiranih trokuta i bolja kvaliteta modela (slika 2). STL koristi trokute za aproksimaciju oblika i volumena objekta.



Slika 2: a) CAD model b) STL male rezolucije c) STL srednje rezolucije d) STL visoke rezolucije modificirano prema [1]

Danas se sve više koriste novi formati kao AMF tj. „*additive manufacturing file format*“ i 3MF tj. „*3D manufacturing format*“ kao unaprjeđenje STL-a, uključujući dodatne informacije, kao što su boja i tekstura uz mogućnost korištenja zakrivljenih trokuta, kako bi se poboljšala kvaliteta modela.

STL datoteka se otvara u softveru stroja za AM, model se postavlja na virtualnu *build* platformu, tj. na platformu na kojoj će se model ispisati. Potrebno je izabrati najprikladniju orijentaciju, jer ona utječe na kvalitetu obrađene površine, krutost ispisanog objekta te na vrijeme 3D ispisa. Neki procesi proizvode visoko anizotropne dijelove (materijali koji imaju značajke da njihova fizikalna svojstva nisu jednaka za različite smjerove), koji imaju nedostatke između slojeva objekta. Drugi procesi koriste potporni materijal (suport) kako bi ispis dijelova koji strše, tj. dijelova koji su nagnuti manje od  $45^\circ$  u odnosu na ravninu stola, bio moguć. Tada softver stroja za AM reže model u STL datoteci na tanke slojeve, te omogućuje operateru postavljanje parametara kao što su razlučivost ispisa (debljina sloja), materijal, brzinu, uzorke ispune itd. Kada su parametri postavljeni, stroj počne raditi dio/objekt načelom sloj po sloj.



Slika 3: procesni lanac za 3D ispis modificirano prema [1]

Nakon što je stroj završio ispis dijela, dio se uklanja sa radne površine stroja te ide na „*post-processing*“ (naknadna obrada). Naknadna obrada uključuje čišćenje zaostalog praha ili smole, uklanjanje suporta, te ponekad uključuje daljnju obradu dijela ukoliko površina zahtjeva finiju završnu obradu koju stroj za AM na kojem je dio ispisan ne može pružiti. Ponekad je potrebna i toplinska obrada metalnih komada, dodatno umreživanje polimernih materijala te bojanje ako je potrebno da taj dio mora biti drugačije boje od materijala od kojeg je napravljen.

## 2.2 Prednosti aditivne proizvodnje

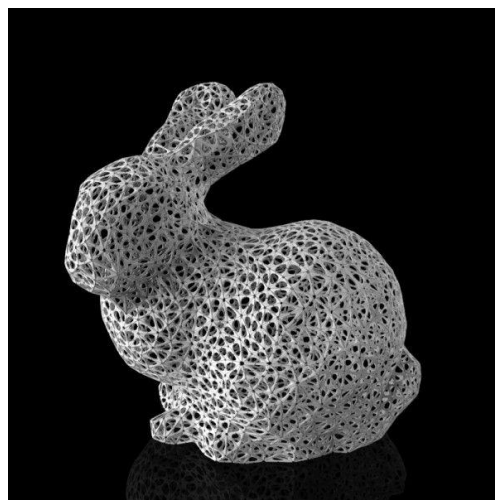
Aditivna proizvodnja može biti skup proces, a kako bi bila isplativa kao proizvodna metoda, mora donijeti dodatnu vrijednost proizvodu npr. kroz smanjenje troškova životnog ciklusa proizvoda.

### 2.2.1. Složenost dijela

Aditivna proizvodnja omogućuje izradu dijelova složenih karakteristika, koje ne bi bilo moguće, ili ne bi bilo jednostavno proizvesti konvencionalnim, tj. subtraktivnim i tradicionalnim metodama. Kod konvencionalne proizvodnje, što je dio geometrijski složeniji, to je skuplji za proizvesti, a u određenom trenutku postane nemoguće.

Što je dio geometrijski složeniji i zahtjevniji, to je prikladniji za aditivnu proizvodnju, jer ne košta gotovo ništa više za proizvesti u odnosu na jednostavan dio, osim u posebnim i iznimnim slučajevima kad je suport, tj. potporni materijal teško odvojiti od dijela. Ukoliko je dio geometrijski vrlo jednostavan, onda AM može postati skuplji način proizvodnje od konvencionalnih načina.

Aditivnom proizvodnjom se mogu kreirati složeniji oblici i vanjske i unutarnje strukture, što rezultira poboljšanim performansama i povećanoj estetskoj privlačnosti proizvoda (slika 4).



Slika 4: proizvod složene geometrije napravljen korištenjem AM [1]

Kod lijevanih dijelova, dijelovi se moraju moći ukloniti iz kalupa u kojem su izrađeni stoga moraju biti dizajnirani na način da je to moguće učiniti. Za jednostavne proizvode to nije nikakav problem, no što su dijelovi složeniji to je broj pomicanja veći što utječe na cijenu alata i proizvodnje, dok u jednom trenutku dio nije moguće proizvesti takvim tradicionalnim postupkom.

Slika 5 pokazuje komoru izgaranja plinske turbine od Siemens. Taj dio je komplicirano strojno obraditi ili lijevati, jer nije moguće obraditi unutarnje površine. Jedino kako se može proizvesti konvencionalnom proizvodnjom je rastaviti dio na nekoliko komada, pa ih zavariti, kao što je prikazano na slici 5.



Slika 5: Siemens komora izgaranja plinske turbine [1]

Komora se sastojala od 13 strojno obrađenih dijelova spojenih s 18 zavora, no upotrebom aditivne proizvodnje, komora je proizvedena iz jednog dijela. Zbog boljeg hlađenja, nije bilo potrebe za toplinski zaštitni sloj (eng., *thermal barrier coating*“), tj. sustavom naprednih materijala (u ovom slučaju materijali koji jako malo provode toplinu, toplinski zamor pri 1150

°C) koji se primjenjuju na metalne površine koje rade pri povišenim temperaturama. TBC je potreban kod konvencionalnih metoda proizvodnje. Također, dovod plina je integriran, čime je uklonjena vanjska cijev za dovod plina. Masa dijela se spustila sa 4,5 kg na 3,5 kg čime se masa smanjila za 29 %.

### ***2.2.2. Sklopovi***

Kao što je ranije spomenuto, aditivnom proizvodnjom moguće je izraditi ono što bi bio sklop od više dijelova konvencionalnom proizvodnjom, kao jedan jednako funkcionalan dio. Pokretni dijelovi tog sklopa su međusobno povezani u homogenu cjelinu i kao takvi su spremni za upotrebu.

Za aditivnu proizvodnju sklopova, potrebno je ostaviti zračnost između pokretnih komponenti. Materijal unutar praznina ne obrađuje stroj za AM, nakon obrade one se mogu pomicati u željenim smjerovima. Veličina zračnosti varira od procesa do procesa, no generalno ne odstupa više od milimetra. Ako su pokretni dijelovi vrlo kruti, malo je vjerojatno da ih je moguće proizvesti kao sklop, već se moraju izraditi kao zasebni dijelovi, te naknadno montirati.

### ***2.2.3. Konsolidacija dijelova***

Konsolidacija dijelova je zamjena više jednostavnih dijelova s jednim kompleksnim dijelom, što je moguće uz pomoć AM, kao što je već ranije spomenuto. Konsolidacija dijelova ima veliki utjecaj na:

- smanjeno vrijeme za izradu crteža za sastavljanje i montažu sklopa
- smanjeno vrijeme planiranja nabave, vrijeme nabave, vrijeme inspekcije nabavljenog materijala
- smanjeno vrijeme skladištenja i komisioniranja dijelova (rezultira i manjim troškovima skladišta, manjim skladištem)
- smanjeno vrijeme montaže i kontrole kvalitete.

#### 2.2.4. Personalizacija proizvoda

Aditivnom proizvodnjom moguće je brže proizvesti pojedinačne proizvode, jer vrijeme za proizvodnju traje neznatno malo u odnosu na konvencionalnu proizvodnju gdje to može potrajati nekoliko tjedana, pa čak i mjeseci. Dok je kod konvencionalne proizvodnje, potrebne dijelove i alate za proces proizvodnje potrebno naručiti i čekati da se narudžba izvrši, s AM je moguće na licu mjesta u bilo kojem trenutku izraditi sve potrebne dijelove i alate. Time se smanjuje vrijeme proizvodnje, smanjuju zalihe rezervnih dijelova i povisuje fleksibilnost procesa, pa je moguće personalizirati proizvod prema zahtjevima kupca.

Iz perspektive konstrukcije proizvoda, to znači da svaka komponenta može biti napravljena drugačije od ostalih u proizvodnom ciklusu bez značajnih dodatnih troškova i produljenja vremena proizvodnje. Svaki proizvod se može prilagoditi kupcu, čak i ako je masovno proizveden. Industrija koja proizvodi implantate, medicinske proteze, slušna pomagala široko primjenjuju navedene prednosti aditivne proizvodnje.

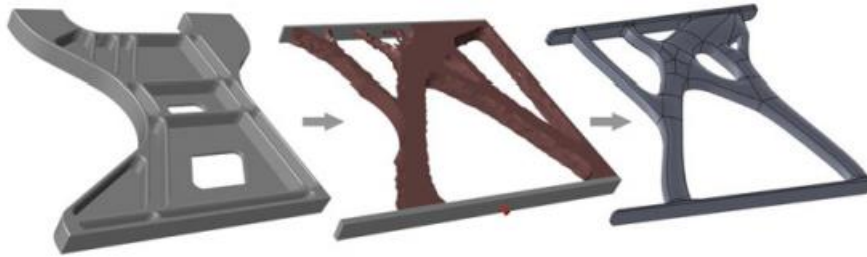


Slika 6: 3D ispisani implantat za ruku [1]

#### 2.2.5. Smanjenje mase

Topološko optimiranje (TO) je metoda uklanjanja što je moguće više materijala s ciljem smanjivanja mase dijela, uz zadržavanje mehaničkih svojstava. Sastoji se od metode konačnih elemenata (FEA- „*finite element analysis*“) te naknadnog iterativnog uklanjanja nepotrebnog materijala.

Ova metoda dostupna je već dugo vremena, no zbog složenosti pojedinih dijelova, nije bila učinkovita kada je bila primijenjena na dio koji se obrađuje konvencionalnom proizvodnjom. No s AM se otvara novo područje razvoja. U zrakoplovstvu, ušteda na masi može rezultirati velikim uštedama goriva. Dobar primjer je okvir sjedala u zrakoplovu, sa slike 7. Konvencionalnom proizvodnjom bi od bloka mase 16,2 kg strojnom obradom trebalo dobiti proizvod od 4,1 kg. Upotrebom AM i TO, okvir bi imao masu 3,1 kg.



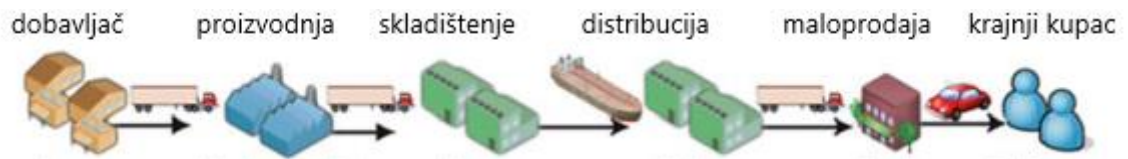
*Slika 7: Okvir sjedala zrakoplova [1]*

Slika 7, s lijeva na desno, prikazuje okvir sjedala zrakoplova obrađen na CNC stroju, grubo optimirana verzija, sve do konačne optimirane verzije. Topološko optimiranje će biti podrobnije obrađeno u nastavku rada.

### 2.2.6. Proizvodnja na zahtjev

Proizvodnja na zahtjev se definira kao proces u kojem se proizvod proizvodi prema potrebi, tj. kad je potrebno i gdje je potrebno. U procesu konvencionalne proizvodnje, montažne linije proizvode velike količine proizvoda, koje se čuvaju u skladištu dok se ne otpreme na namijenjeno mjesto. Proizvodnjom na zahtjev, proizvodi se izrađuju nakon što ih je kupac naručio, te se proizvodi onoliko komada koliko je u tom trenutku potrebno. Sustav aditivne proizvodnje se može nalaziti blizu kupca, proizvodi se mogu izraditi lokalno, bez potrebe da se šalju diljem svijeta. To dovodi do:

- smanjenje troškova nastalih zbog skladištenja zaliha (skladišta puna zaliha i rezervnih dijelova bi se mogla značajno smanjiti, prelazak s fizičkog na digitalni inventar)
- digitalne datoteke pružaju mogućnost brze izrade personaliziranih proizvoda uz male troškove.



Slika 8: Lanac opskrbe danas [1]



Slika 9: Lanac opskrbe budućnosti [1]



### 3. TOPOLOŠKO OPTIMIRANJE

Problemi optimiranja dimenzija, oblika i topologije bave se problemima konstrukcijskog dizajna, tj. strukturalnim optimiranjem (STO). Optimiranje dimenzija definira varijablu koja predstavlja optimalnu distribuciju debljine dijela konstrukcije ili konstrukcijskog elementa, npr. debljinu linearno-elastične ploče ili debljinu štapova rešetkaste konstrukcije. Optimalna distribucija debljine minimira ili maksimira elastičnu deformaciju, vršno naprezanje (najveće naprezanje na kritičnom mjestu), otklon itd., dok ostale varijable i stanja ostaju nepromijenjeni ili unutar dopuštenih granica. Suprotno od navedenog optimiranja, optimiranje oblika ima cilj definirati optimalni oblik konstrukcije. Topološko optimiranje definira značajke kao što su broj, mjesto i oblik prodora na konstrukciji. [2]

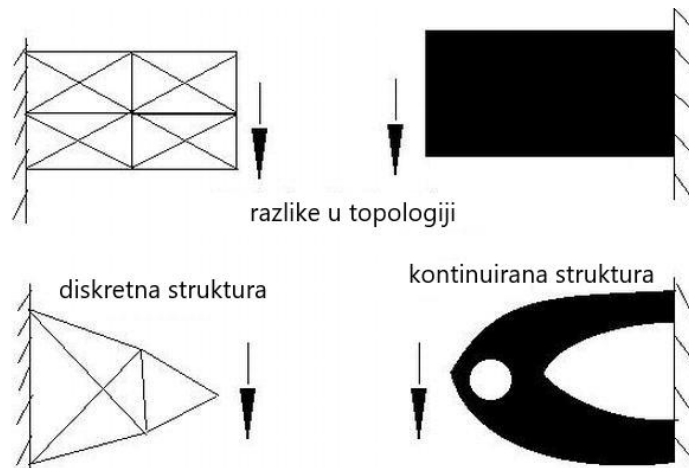
Topološko optimiranje (TO) je oblik strukturalnog optimiranja (u literaturi: „*structural optimisation*“) temeljeno na metodi konačnih elemenata, čiji je cilj odrediti najučinkovitiji način podnošenja određenih opterećenja korištenjem minimalne količine materijala, što uvelike smanjuje troškove proizvodnje.

Metode TO, ne izvode optimiranje uzimajući u obzir tradicionalne kriterije kao što su naprezanje i izvijanje, nego su uvjetovane energetskim kriterijima, koji rezultiraju analitičkim proračunima osjetljivosti konstrukcije. TO za diskretne strukture definira pozicije i veze između elemenata. TO za kontinuirane strukture (*continuum structures*) tj. kontinuirano topološko optimiranje, određuje optimalnu distribuciju materijala, koja definira vanjske granice strukture i broj, položaj, veličinu i oblik unutarnjih šupljina u strukturi. TO kontinuiranih struktura se izvodi na dva različita načina [3]:

- optimiranje raspodjele materijala, mikropristup
- geometrijsko optimiranje, makropristup.

#### 3.1. Vrste topološkog optimiranja

Kao što je navedeno u prethodnom ulomku, TO se prema tipu konstrukcije dijeli na diskretne i kontinuirane strukture. Slika 10 prikazuje razlike u topologiji te dvije strukture.



Slika 10: Tipovi konstrukcije modificirano prema [3]

### 3.1.1. Topološko optimiranje diskretnih struktura

Za diskretne konstrukcije, TO određuje optimalan broj, pozicije i međusobne veze između elemenata strukture, npr. rešetkaste konstrukcije. Početna struktura se sastoji od velikog broja elemenata, npr. štapovi u rešetci. Takva struktura ima veliki stupanj povezanosti čvorova, tj. svaki čvor je povezan sa mnogo drugih čvorova. Struktura se izmjenjuje eliminacijom elemenata koji nisu optimalno iskorišteni. Diskretna metoda uzastopno eliminira štapove ili grede. [3]

Problem diskretne strukture može se riješiti metodom kontinuiranog TO, a njen rezultat se tumači kao diskretna struktura.

U zadnje vrijeme, veliki broj radova temelji se na metodama stohastičkog optimiranja diskretnih struktura. Najčešće korištene metode za diskretne strukture su : [3]

- evolucijske strategije i genetski algoritmi
- metoda simuliranog kaljenja.

Evolucijske strategije i genetski algoritmi su metode „usmjerenog slučajnog pretraživanja prostora“ u potrazi za globalnim optimumom. To su algoritmi potaknuti prirodnim procesom prirodne selekcije. Ovakvi algoritmi zadržavaju samo jedno rješenje, a svakom iteracijom rješenje se mijenja dodavanjem određenih podataka. [3]

Metoda simuliranog kaljenja inspiraciju uzima iz termodinamičkog kretanja materije prema stanju minimalne energije u stupnjevanom snižavanju temperature. Metoda sadrži jedno

rješenje i u svakoj iteraciji traži susjedno rješenje, kako bi se što više „približilo“ zadovoljavanju kriterija. [3]

### **3.1.2. Kontinuirano topološko optimiranje**

Kao što je već rečeno, kontinuirano topološko optimiranje zahtjeva optimalnu distribuciju materijala, te sadrži sva tri oblika optimiranja konstrukcija. To su:

- optimiranje dimenzija
- optimiranje oblika
- topološko optimiranje.

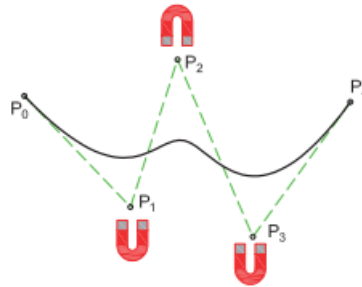
#### 3.1.2.1. Geometrijski ili makropristup

Topološko optimiranje kontinuiranih struktura geometrijskim pristupom svodi se na ubacivanje otvora u konstrukciju, čime se izmjenjuje topologija konstrukcije. Nakon toga, optimiranjem oblika se traži optimalan oblik ubačenih otvora. Problem kod ovog postupka je koliko otvora je potrebno ubaciti, te na koja mjesta ih ubaciti kako bi se dobio optimalni rezultat, tj. topologija s obzirom na tražene kriterije. Jednostavnije metode rješavaju problem ubacivanjem jednog ili više otvora u područja gdje su niska naprezanja u konstrukciji. [3]

„Bubble method“, najzastupljenija metoda geometrijskog pristupa, je relativno složena metoda. Mjesto na kojemu će biti ubačen novi otvor definira se rješavanjem novog problema optimiranja. Iteracija «Bubble-Metode» sastoji se od tri koraka. [3]

U prvom koraku se primjenjuje postupak optimiranja oblika s obzirom na zadani cilj i zadane kriterije. Tada su vanjski i unutarnji rubovi često definirani NURBS funkcijama. Površinu je moguće definirati prostorno određenom krivuljom, koja mijenja oblik kroz prostor. NURBS („non uniform racional b-spline“), tj. neuniformna racionalna b-spline krivulja se najčešće javlja kao kvadratna ili kubna, parametrima određena krivulja. Definirana je kontrolnim točkama, tj. njihovim koordinatama i „težinama“. Ponašanje krivulje se može usporediti s elastičnom niti, a

kontrolne točke s magnetima čiji intenzitet je proporcionalan s „težinom“ kontrolne točke, kao na slici 11. [4]



Slika 11: NURBS krivulja [3]

Parametri krivulje jesu projektne varijable, metodom konačnih elemenata se izvrši analiza naprezanja i deformacija. Završetkom postupka optimiranja oblika, daljnje optimiranje konstrukcije nije moguće bez primjene topologije.

U drugom koraku se ubacuje otvor u konstrukciju, čime se mijenja topologija konstrukcije. Za dobivanje optimalne pozicije za ubačeni otvor, koordinate se određuju minimiranjem karakteristične funkcije  $\varphi$ . Karakteristična funkcija  $\varphi$  za problem ubacivanja otvora sfernog oblika u 3D konstrukciju s proizvoljnim opterećenjem [3]:

$$\varphi(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) = \frac{1}{2E(14 - 10\nu)} [C_a(\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2) + C_b(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_1\sigma_3 + \sigma_2\sigma_3)] \quad (1)$$

gdje su:

$$C_a = 1920\pi(1 - \nu^2) - 160\pi c(1 - \nu^2) + 8\pi c^2(1 - \nu) \quad (2)$$

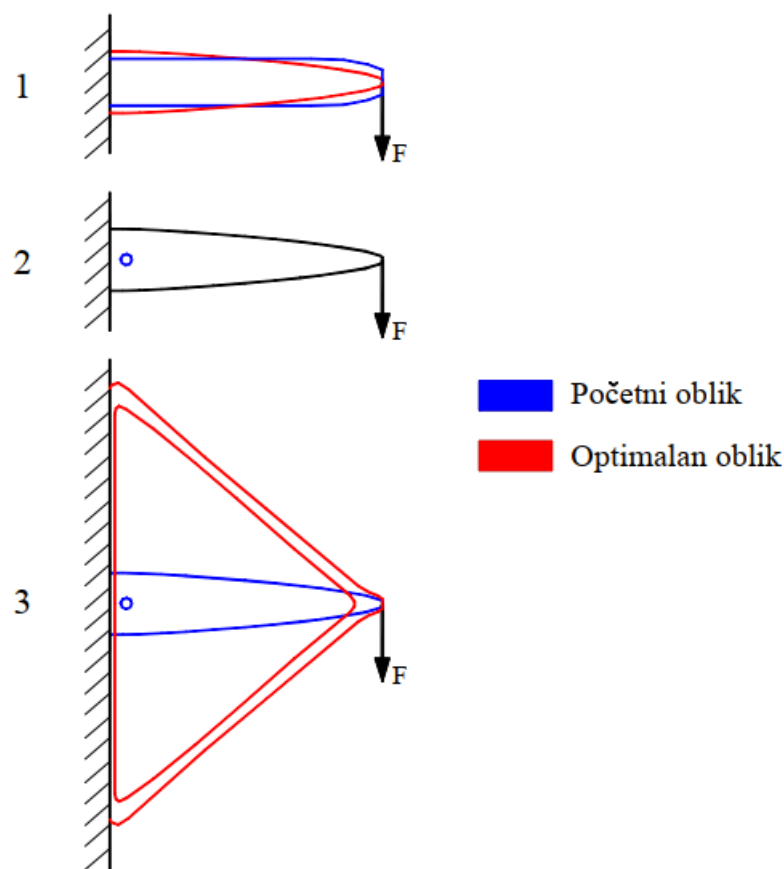
$$C_b = 1440\pi(1 - 3\nu^2) + 160\pi c(2\nu^2 + \nu - 1) + 8\pi c^2(1 - 2\nu) \quad (3)$$

$$c = 3 + 15\nu \quad (4)$$

$\nu$  Poissonov omjer ili koeficijent  
 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  glavna naprezanja.

U trećem koraku ponovo se izvodi postupak optimiranja oblika, na jednak način kao u prvom koraku, čime se dobiva optimalan oblik novoubačenog otvora, postojećih otvora i vanjskog oblika konstrukcije.

Slika 12 prikazuje sve korake „Bubble method“ metode.



Slika 12: "Bubble method" metoda [3]

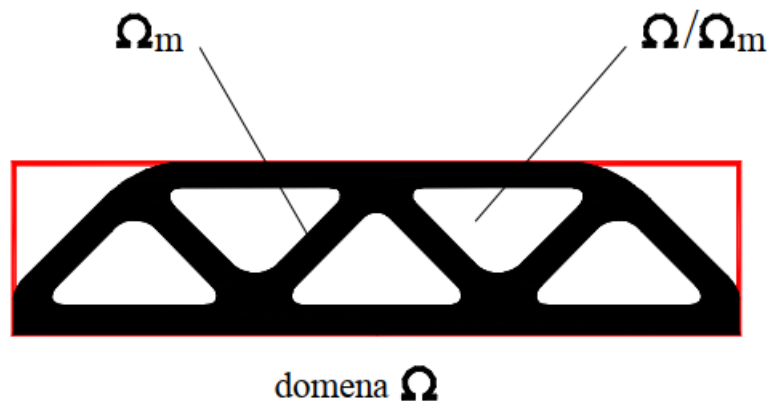
### 3.1.2.2. Optimiranje na temelju raspodjele materijala ili mikropristup

Mikropristup topološkom optimiranju je postupak raspodjele materijala u prostoru domene  $\Omega$ . [3]

Problem optimiranja definiraju:

- domena  $\Omega$
- opterećenja unutar domene  $\Omega$
- rubni uvjeti
- kriterij optimiranja
- ograničenja.

Domena  $\Omega$  je podskup dimenzionalnog ili trodimenzionalnog prostora unutar kojeg se nalazi konstrukcija definirana skupom  $\Omega_m$ , što je vidljivo na slici 13. [3]

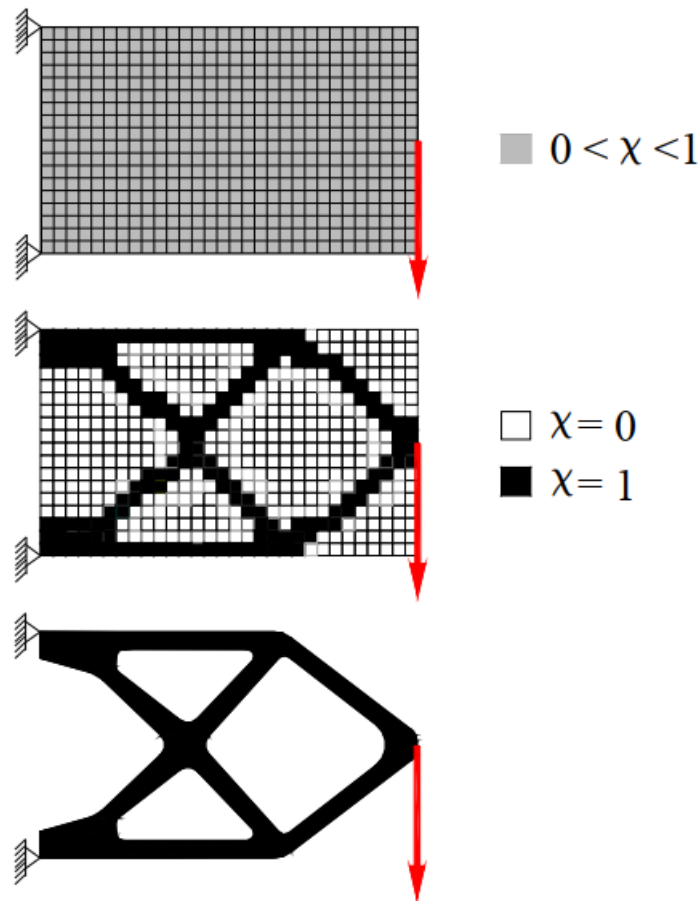


Slika 13: Domena [3]

0-1 raspodjela materijala je postupak pri kojemu se u svakoj točki domene pridružuje vrijednost 0 ako u toj točki nema materijala, te vrijednost 1 za točke u kojima se nalazi materijal. Iz toga proizlazi funkcija raspodjele materijala  $\chi$ , iz koje proizlazi da je konstrukcija skup svih točaka  $x$  za koje vrijedi  $\chi(x) = 1$ . [3]

$$\chi(x) = \begin{cases} 1, & \forall x \in \Omega_m \\ 0, & \forall x \in \Omega/\Omega_m \end{cases} \quad (5)$$

Problem TO je odrediti funkciju raspodjele materijala  $\chi(x)$  koja optimalno izvršava zadani kriterij unutar zadanih ograničenja. Kod makropristupa, problem TO ekvivalentan je problemu optimalne raspodjele materijala. Makropristup sadrži topološko optimiranje i optimiranje oblika. [3]



Slika 14: 0-1 raspodjela materijala [3]

U većini postupaka, kada se rješava problem raspodjele materijala, definira se količina materijala koju sadrži željena optimalna konstrukcija. Količina koja se definira je manja od količine koja je potrebna kako bi se „pokrila“ kompletna domena  $\Omega$ . Pri oblikovanju inicijalne strukture da se materijal raspoređi po cijeloj domeni  $\Omega$ . Takva raspodjela vidljiva je na slici 14, označena sivom bojom u početnoj fazi oblikovanja konstrukcije. [3]

Osim rijetkih, izoliranih slučajeva, u praksi se najčešće koristi istu mrežu konačnih elemenata za aproksimiranje geometrije konstrukcije, te za numeričku analizu odziva konstrukcije (određivanje deformacija, naprezanja, pomaka i dr.). Najčešće se koristi mreža sastavljena od jednakih pravokutnika, a varijable su konstantne unutar svakog elementa. Prilikom optimiranja, gustoća materijala (varijabla), unutar svakog konačnog elementa, dobiti će neku vrijednost između 0 (slab materijal ili šupljina) ili 1 (čvrsti materijal). Na slici 14, na drugoj etapi oblikovanja konstrukcije, slab materijal je označen bijelom, a čvrst materijal crnom bojom. Optimiranjem svaki konačni element poprima krajnju vrijednost ovisno o gustoći koju konačni element sadrži, tj. je li

konačni element slab ili čvrst materijal. Rezultat optimiranja predstavlja gruba slika unutrašnjih i vanjskih rubova strukture. Takva struktura sadrži optimalnu topologiju konstrukcije s obzirom na traženi kriterij i ograničenja. Broj konačnih elemenata korištenih pri diskretizaciji domene  $\Omega$  definira koliko će slika biti „gruba“. S obzirom na zadanu količinu materijala, topologija koja se dobije ovim postupkom, će odrediti oblik kontinuirane konstrukcije s određenim brojem otvora (takve oblike nije moguće dobiti metodama optimiranja oblika), ili rešetkastu konstrukciju sačinjenu od elemenata poput štapova ili grede. [3]

Takva topologija koristi se za određivanje početne konstrukcije u procesu optimiranja oblika, što znači na temelju rezultata topološkog optimiranja definira se rešetkastu konstrukciju optimalne topologije, a s pomoću neke od metoda, se odrede optimalne vrijednosti kao npr. koordinate čvorova u rešetkastoj konstrukciji ili kao npr. poprečnih presjeka štapova.

### 3.2. SIMP model

Problem optimiranja se najčešće definira kao problem minimiranja, kao npr. na str. 9, smanjenje mase zrakoplova, i smanjenje troškova materijala.

SIMP je skraćenica za „solid isotropic material with penalisation“. Čvrsti izotropni materijali imaju identična svojstva materijala u svim smjerovima u svakoj točki. To znači da, kada se na bilo koju točku na osi  $x$ ,  $y$  ili  $z$  primjenjuje opterećenje, izotropni materijali će pokazati istu čvrstoću, naprezanje, deformaciju, Youngov modul i tvrdoću. [5]

SIMP model prebacuje cjelobrojne varijable (0-1 raspodjela,  $\chi=0$  ili  $\chi=1$ ) u kontinuirane varijable, bez uvođenja prijelaznih varijabli gustoće, tj. bez funkcije raspodjele materijala. [3]

Na primjer, ukoliko se promatra izotropni materijal gustoće  $\rho_0$ , SIMP model omogućuje da točke domene imaju svojstvo gustoće čija je vrijednost manja od vrijednosti promatranog materijala (vrijednost nije jednaka 0), a da nije potrebno znati kolike gustoće je promatrani materijal. Iz perspektive funkcije razdiobe  $\chi$ , nije potrebno znati je li u nekoj točki domene postoji scenarij koji se određuje kao prijelazno stanje između „u točki je sadržan materijal“ i „u točki nije sadržan materijal“. Time je otklonjen problem složenog cjelobrojnog optimiranja, tj. moguća je upotreba „metoda optimiranja za kontinuirano promjenjive projektne varijable“. Kod SIMP



modela, materijal je u 100% slučaja izotropan bez obzira radi li se o prijelaznim ili graničnim vrijednostima gustoće. [3]

Kako bi SIMP model bio učinkovit potrebno je da rješenje problema optimiranja na domeni  $\Omega$  dobiva skup točaka bez materijala ( $\chi = 0$ ) i skup točaka „pune“ materijalom ( $\chi = 1$ ), no da ne dobiva skup točaka sa prijelaznih vrijednosti relativne gustoće. Potrebno je uvesti sustav koji će sprječavati pojavu prijelaznih vrijednosti. [3]

Također, potrebno je riješiti problem određivanja važnih fizikalnih svojstva materijala (npr. elastičnost) u skupu točaka prijelazne relativne gustoće. To je moguće riješiti dodavanjem interpolacijskih funkcija kao poveznicu važnih fizikalnih svojstava s gustoćom materijala, ali moraju sadržati svojstvo koje sprječava („kažnjava“) pojavu prijelaznih vrijednosti gustoće. S obzirom da je potrebno znati Youngov modul elastičnosti materijala  $E$ , kako bi se riješio problem minimiranja elastičnosti za analizu odziva konstrukcije, kod SIMP modela Youngov modul se računa prema: [3]

$$E(\chi) = \chi^p E_0 \quad (6)$$

gdje je:

$p$  faktor kazne

$E_0$  Youngov modul elastičnosti osnovnog materijala

$\chi$  Poissonov koeficijent (konstantan za sve vrijednosti relativne gustoće).

$$E = \frac{E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} = \begin{pmatrix} 1 - \nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1 - \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1 - \nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.5(1 - 2\nu) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5(1 - 2\nu) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5(1 - 2\nu) \end{pmatrix} \quad (7)$$

gdje je:

$E$  Youngov modul elastičnosti materijala

Iz (6) i (7) vrijedi: [3]

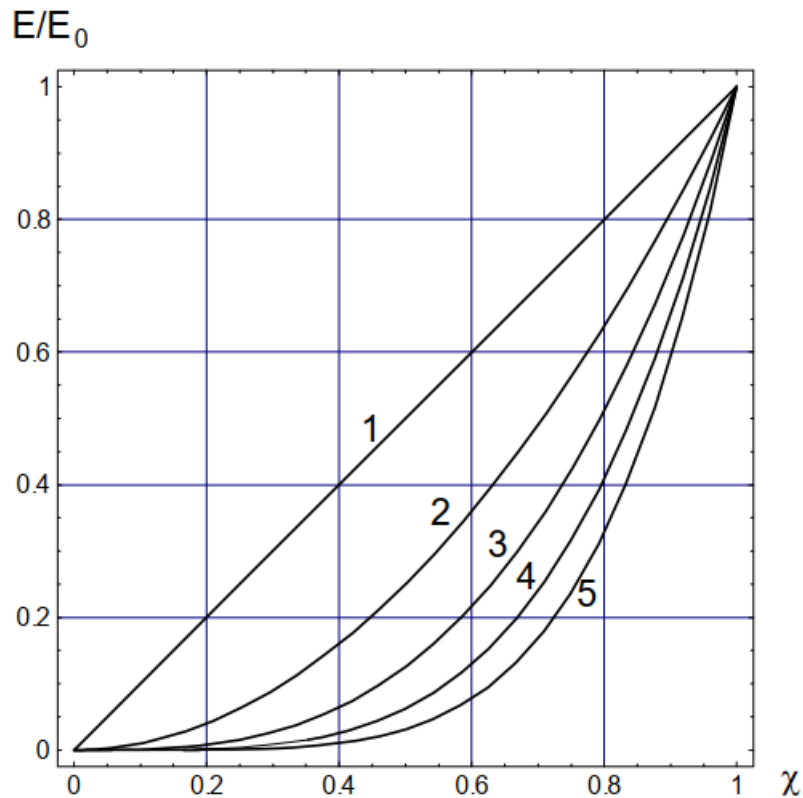
$$\mathbf{E}(\chi) = \chi^p \mathbf{E}_0 \quad (8)$$

Interpolacija iz (8) ispunjava uvjete:

$$\mathbf{E}(0) = 0 \quad \mathbf{E}(1) = \mathbf{E}_0 \quad (9)$$

Konačno rješenje u svakoj točki domene  $\Omega$  sadrži vrijednosti relativne gustoće 0 ili 1, a za takvo rješenje SIMP model je ekvivalentan izotropnom materijalu. Skup točaka prijelaznih vrijednosti (8) nije u korelaciji sa ponašanjem nijednog realnog materijala. Iz tog razloga SIMP model se u nekoj literaturi naziva „fiktivan materijal“. Interpolacijske funkcije (7), odnosno (8), s dovoljno velikim faktorom kazne  $p$ , kao posljedicu imaju optimalnu konstrukciju s 0-1 raspodjelom materijala na domeni  $\Omega$ . Iskustveno je dobiveno da je optimalna vrijednost faktora kazne  $\geq 3p$ , a tipično se uzima  $p=3$ . [3]

Interpoliranje Youngovog modula elastičnosti za prijelazne vrijednosti gustoća prema izrazu (6), razvijen je postupak svojstva „kažnjavanja“ prijelaznih vrijednosti gustoća za SIMP model. Masa beskonačnog malog volumena u nekoj točki domene  $\Omega$  proporcionalna je s relativnom gustoćom materijala  $\chi$  u toj točki, a krutost konstrukcije putem modula elastičnosti konstrukcije (8) proporcionalna je sa  $\chi^p$  ako je  $\chi \ll 10$ . Masa na domeni koja se ostvaruje s prijelaznim relativnim gustoćama nije optimalno iskorištena, zbog toga što krutost je „manje“ proporcionalna s relativnom gustoćom  $\chi$ , nego što je masa u nekoj točki proporcionalna relativnoj gustoći u toj točki. Time je 0-1 raspodjelom mase, iskoristivost mase je optimalna. Sustav kažnjavanja prijelaznih vrijednosti gustoća za različite vrijednosti faktora kazne  $p$  prikazan je na slici 15. [3]



Slika 15: SIMP model [3]

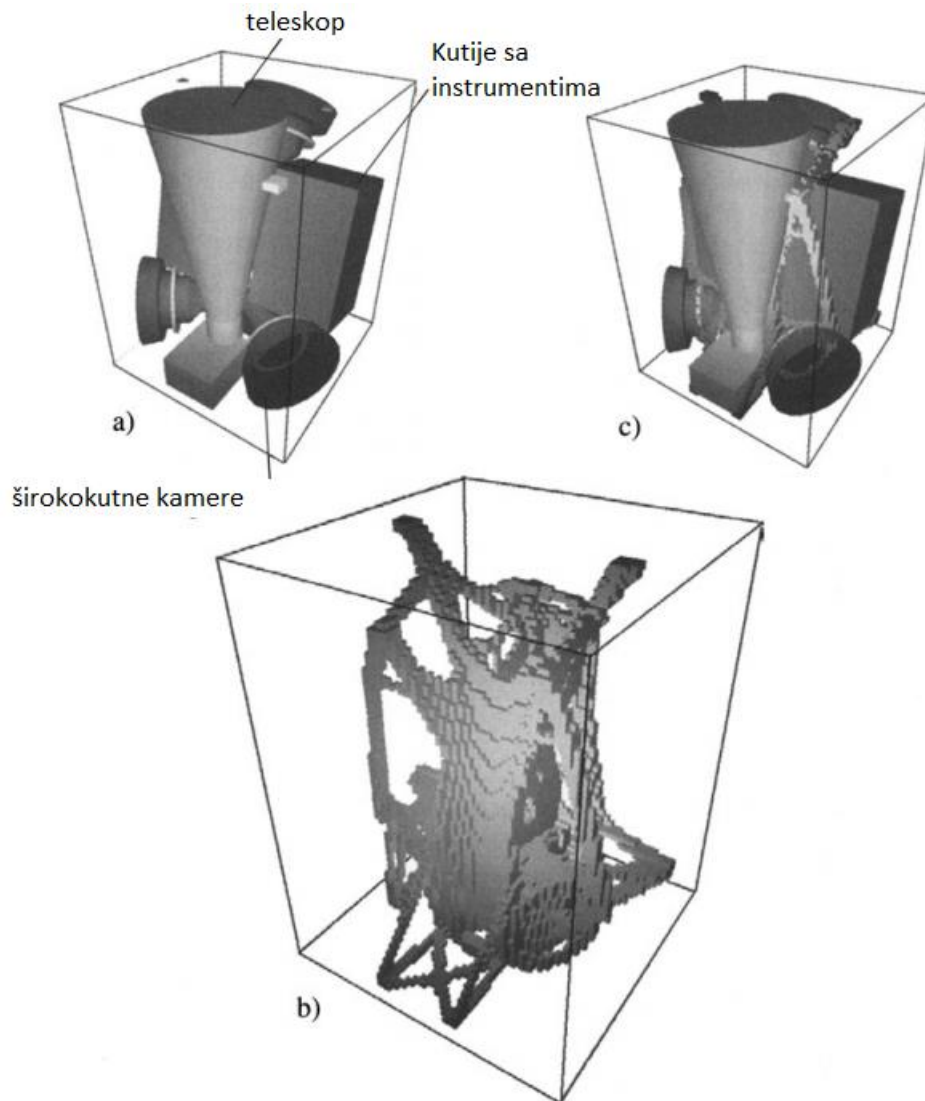
### 3.3. Topološko optimiranje kao alat za konstruiranje

TO se pokazalo se kao fleksibilan i pouzdan alat za konstruiranje. Metoda je tijekom posljednjeg desetljeća postala prilično raširen alat u industrijskim primjenama, posebno među nekim velikim proizvođačima automobila (Ford motor company) i u medicini. Pojava komercijalnih softvera utjecala je na korištenje metoda konstruiranja topologije u praksi.

Rezultat topološkog optimiranja koristi se za identifikaciju potencijalno dobrih oblika modela. Jedan od učinaka metode topološkog optimiranja je učinkovito ispitivanje prikladnosti modela za opterećenja. Budući da je topologija vrlo osjetljiva na pravilno modeliranje s obzirom na opterećenja, mogu se odmah otkriti nedosljednosti ili netočnosti u pogrešnom modeliranju.

Za učinkovito korištenje konstrukcije topologije, problem bi trebao biti formuliran na što jednostavnijoj strukturi (domeni). Domena bi trebala omogućiti definiranje opterećenja i ograničenja. Komplikirane domene potrebne su za slučajeve gdje zahtjevi podrazumijevaju isključivanje određenih dijelova prostora kao dijelova strukture. Ako su precizni oblici unutarnjih

otvora u složenoj referentnoj domeni nevažni, preporučljivo je pobrinuti se za takve praznine fiksiranjem gustoće materijala na nuli za elemente koji definiraju otvor (ili njezine dijelove). Ova razmatranja dovela su do toga da se većina primjera tretira u pravokutnim referentnim domenama, ali uporaba metode nije ograničena na takve domene.



Slika 16: Topološko optimiranje okvira satelita [6]

Na slici 16 prikazan je 3D model tijekom procesa topološkog optimiranja okvira satelita, napravljen od 288 tisuća kubnih (kockastih) konačnih elemenata. Kvadar unutar kojeg se nalazi model, predstavlja domenu u trodimenzionalnom prostoru. Na a) primjeru na slici vidi se definiranje domene. Na b) primjeru vidi se rezultat topološkog optimiranja, okvira satelita, a pod c) nalazi se topološki optimirani okvir satelita zajedno sa potrebnim instrumentima. [6]

Na razvoj i širenje primjene topološkog optimiranja, uvelike je utjecao razvoj računalnih programa (softvera) za topološko optimiranje. Primjenom računalnih programa za topološko optimiranje, moguće je samostalno, i u kratkom roku koristiti složene matematičke operacije za konstruiranje proizvoda. Privlačnost topološkog optimiranja je u tome što je taj pristup kao rezultat pruža najučinkovitiji oblik konstrukcije. Uz to, računalni programi za topološko optimiranje pružaju veliki broj podataka koji uključuju čvrstoću i krutost konstrukcije, naprezanja i momente savijanja te mnoge druge. Time korisniku omogućuju jasan uvid u konstrukciju s kojom mora baratati.

Osim toga, omogućuju naknadno dodavanje materijala, kako bi se zadovoljila funkcija estetike. Računalni programi za topološko optimiranje namijenjeni su pružanju rezultata složene geometrije, posebno u granama industrije, gdje je smanjenje mase vrlo bitan faktor. Brzi razvoj ovakvog pristupa doveo je do široke ponude kvalitetnih računalnih programa. Najrašireniju primjenu u industriji imaju sljedeći računalni programi:

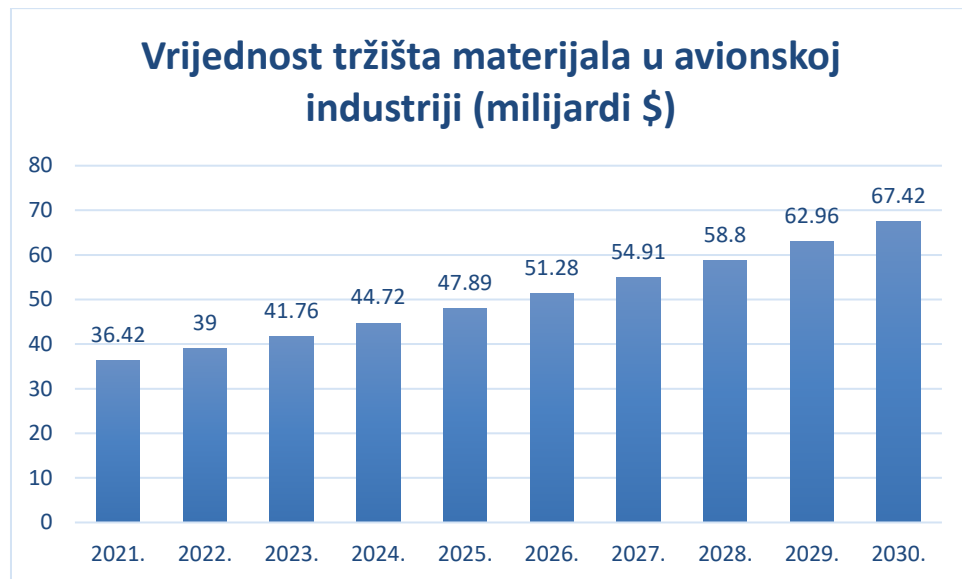
- nTopology (pruža kompatibilnost s raznim CAD softverima, namijenjen za velike procese)
- 3DXpert („all-in-one“ program za cijeli proces, vrlo visoka cijena za softversku licencu)
- Creo (mala cijena, ograničenost značajki)
- Tosca (vremenski vrlo učinkovit, ograničenost značajki)
- Altair Inspire (jednostavan za korištenje, ograničenost značajki).

„Altair Inspire“ je odabrani računalni program za analizu i optimiranje nosača sjedala vlaka, zbog svoje jednostavnosti, te dostupnosti studentske licence. Osim analize strukture i topološkog optimiranja, ovaj računalni program korisniku nudi izradu geometrije, generiranje kinematike modela, pripremu za aditivnu proizvodnju i konfiguraciju sklopa.

### **3.4. Topološko optimiranje u transportnoj industriji**

Topološko optimiranje je sve češće zastupljeno u industrijskoj upotrebi, te se sve brže razvija. U transportnoj industriji je vrlo poželjno zbog velike uštede materijala, iz više razloga.

Trošak materijala u transportnoj industriji sve je veći. Prema „Precedence Research-u“, jednoj od većih svjetskih kompanija za strategijski razvoj tržišta, tržište materijala u avionskoj industriji će se povećati za gotovo 100 % do 2030. godine. [7]

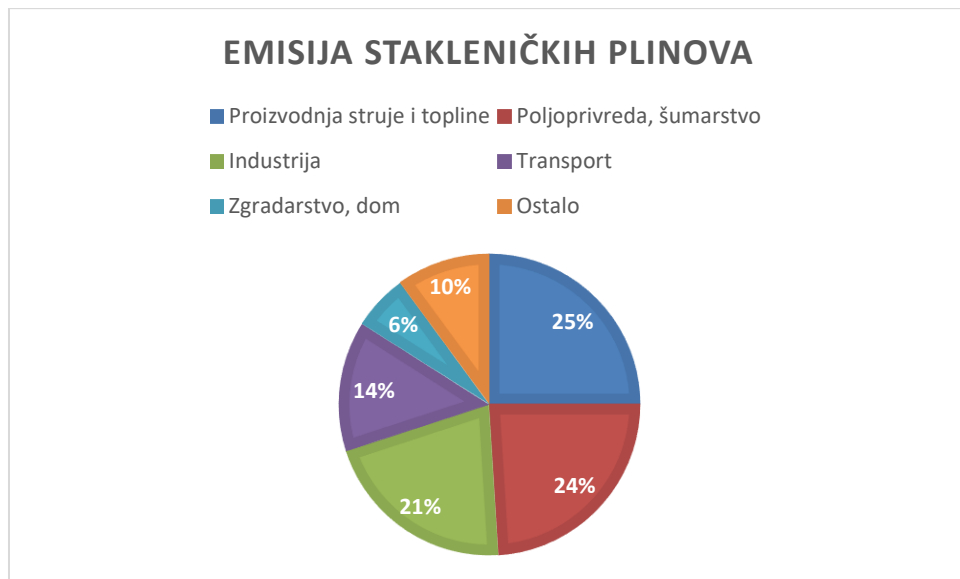


*Slika 17: Procijenjena vrijednost tržišta materijala u avionskoj industriji*

U automobilskoj industriji je slična situacija. Prema Toyotinom financijskom izvještaju iz 2022. godine, najveći proizvođač automobila na svijetu predviđa da će se profit kompanije za 2023. godinu smanjiti za 20 milijuna dolara zbog povećanja troškova materijala. [8][9]

Troškovi materijala predstavljaju dominantan faktor ukupnih troškova proizvodnje u transportnoj industriji. Upravo zbog toga, transportnoj industriji je cilj potrošiti što manje materijala je moguće.

Jedan od razloga je i energetska učinkovitost. Razvojem svijesti o utjecaju iskorištavanja energije na klimatske promjene i definiranjem zahtjeva održivog razvoja, transportna sredstva, koja su odgovorna za 14 % ukupne emisije stakleničkih plinova (prema izvještaju EPA-e, „Agenciji za očuvanje okoliša“), moraju biti energetske učinkovitija. [10]



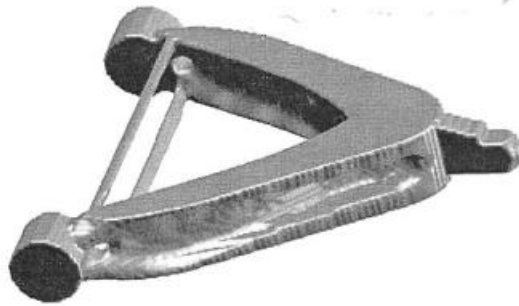
*Slika 18: Udjeli emisija stakleničkih plinova s obzirom na područje upotrebe*

Sukladno tome, struktura karoserije npr. automobila, mora biti lakša, a pritom mora pružati bolje performanse i sigurnost uz minimalno povećanje troškova. Topološko optimiranje je izrazito povoljna metoda za ostvarenje tog cilja. Također, zbog smanjenja mase, raste potreba za kvalitetnijim, čvršćim materijalima, najčešće kompozitima.

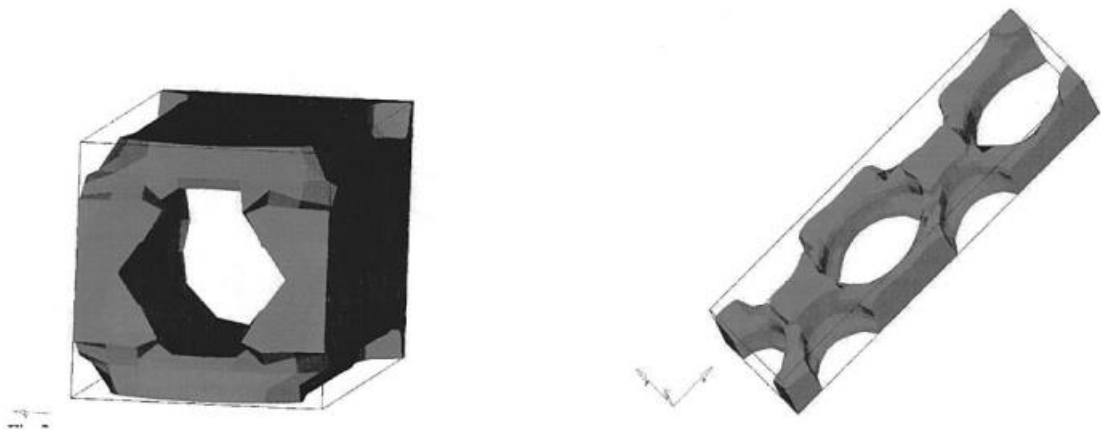
U „Ford Motor Company“ su objavili mnogo znanstvenih radova na temu TO. Na njihovom primjeru vidljiva je široka primjena TO u transportnoj industriji:[11][12]

- TO dijelova: TO velikih struktura još nije razvijeno i dostupno zbog enormnog utroška vremena koje bi bilo potrebno za kalkulaciju i zbog problema koji bi softver imao s dobivanjem rezultata. Unatoč tome, veliki broj dijelova automobila je moguće optimirati. Npr. Ford je još na početku 21. stoljeća s pomoću softvera „Altair“ napravio optimiranje vilice ovjesa (Slika 18.) (eng. „vehicle control arm“). Analiza se sastojala od 260 tisuća konačnih elemenata, te je za rad koristila 15 procesorskih jezgri, što je smanjilo vrijeme optimiranja na samo 15 sati. Obično se ova vrsta strukture proizvodi postupkom lijevanja, ali vrlo često rezultat TO ispadne neizvediv za ovu vrstu proizvodnog procesa. Također, često je teško transformirati rezultat optimiranja u proizvodljivi oblik. Kako bi se riješio ovaj problem, moguće je „particionirati“ model, tj. primijeniti razna geometrijska ograničenja tijekom optimiranja, kako bi se ostvario model kompatibilan za postupak lijevanja. Npr., slika 18. prikazuje TO grede pod torzijskim

opterećenjem. Objekt na lijevoj strani slike je greda optimirana bez ikakvih ograničenja, a na desnoj slici je ta ista greda optimirana s određenim ograničenjima. Moguće je zaključiti kako je model s desne strane prikladniji za konvencionalnu proizvodnju, zahvaljujući postavljenim ograničenjima, koja su rezultirala „pravilnijom“ izvedbom bridova, plohi itd. Kod aditivne proizvodnje, nema problema pri izvođenju bilo kakve topologije.



Slika 19: Topološki optimirana vilica ovjesa automobila [12]

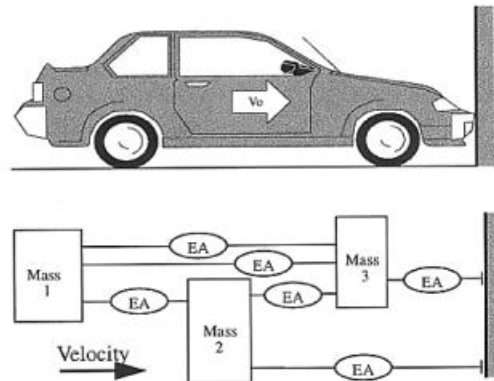


Slika 20: Topološko optimiranje grede pod torzijskim opterećenjem [12]

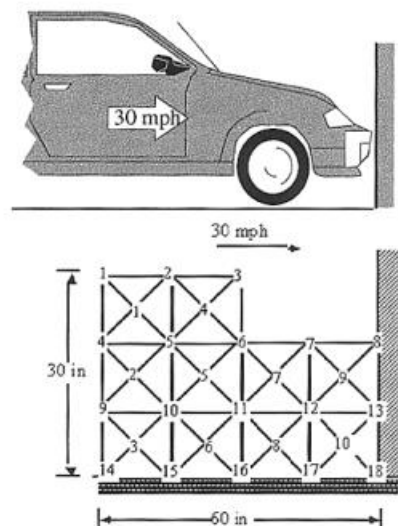
- Otpornost na udarce: Ovo je područje od iznimne važnosti. Zbog modela velikog obujma i složene topologije, kada bi se koristio cijeli model vozila, u slučaju da proračuni traju predugo, koriste se razne metode za pojednostavljivanje modela. Ford-ovi istraživači predstavljaju dvije različite vrste modela. Jednodimenzionalnu aproksimaciju modela, na slici 19, a drugi kao dvodimenzionalni model koji se sastoji od rešetkastih elemenata, na slici 20. Potrebno je pravilno odabrati numeričke geometrijske varijable koje se mogu mijenjati optimiranjem, što ne predstavlja problem u prostoru (3D modeli), no postaje složeno kada je riječ o 1D



i 2D modelima. Jednodimenzionalni model je baziran na odnosu kapaciteta apsorbirane energije (EA) i mase (slika 19). Kod dvodimenzionalnog modela, svaka šipka u ćeliji može prenijeti opterećenje samo duž svoje središnje osi. Geometrijska varijabla je parametar čvrstoće svake ćelije.



Slika 21: Apsorbirana energija-masa model [12]



Slika 22: Rešetkasti model [12]

- MDO: Multidisciplinarno optimiranje cjelovitih modela vozila je sve traženije i dostupnije, zbog razvoja računala i njegovih komponenti. Međutim, zbog složenosti modela, izračuni su iznimno dugotrajni iako se snaga računala jako povećala u moderno doba. Potrebno je pojednostaviti modele i metode kako bi se optimiranje moglo aplicirati na velikim i složenim strukturama. U Ford-u su zaključili kako bi pojednostavljivanje modela u CAD (eng. „Computer aided Design“) softveru bio previše složen zadatak za većinu inženjera. Kako bi uspješno pojednostavili model, razvili su novi koncept FOA (eng. „First Order Analysis“)

temeljen na diskretnim i funkcionalno orijentiranim elementima kao što su grede i ploče. FOA koncept koristi Microsoft Excel za grafičko sučelje dizajna.

Na primjeru „Ford-a“, može se jasno zaključiti koliko veliku ulogu ima optimizacija za razvoj lakše konstrukcije, povećanja sigurnosti konstrukcije i očuvanja okoliša. Kako bi proizvođači ostali konkurentni na tržištu, moraju koristiti metodu TO.

## 4. TOPOLOŠKO OPTIMIRANJE I ADITIVNA PROIZVODNJA

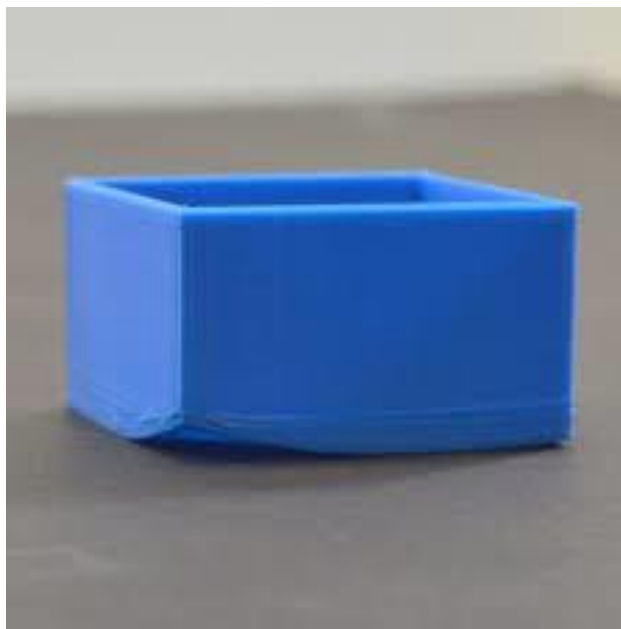
TO je korisna metoda za optimiranje složenih objekata koji se izrađuju aditivnom proizvodnjom. Tijek topološkog optimiranja nekog objekta je sljedeći: [13]

1. Pojednostavniti model tj. ukloniti sve značajke konstrukcije koje su rezultat tradicionalne proizvodnje. Traži se relativno veliki „blok“ materijala s kojim softver može raditi optimiranje. Što više prostora se dopusti softveru (što je manje definiran dizajn geometrijskim ograničenjima) to je optimiranje bolje. Ako je softveru dana minimalna količina materijala, nema dovoljno slobode za optimiranje dijela.
2. Primijeniti odgovarajući materijal na model, tj. odabrati materijal od kojeg će objekt biti napravljen. Treba napomenuti da se korištenjem TO znatno smanjila količina materijala pa je moguće da će biti potrebno koristiti kvalitetniji, tj. skuplji materijal od prvotno izabranog.
3. Podijeliti model na područja između onih na koje softver neće utjecati, i ona koja će modificirati. Kao što je navedeno u prvom koraku, cilj je imati što veći prostor koji softver može optimirati.
4. Postaviti različite scenarije s obzirom na sile koje mogu djelovati na objekt koji se optimira. Najčešće se postavlja jedna sila po scenariju. Za svaki scenarij postoji najgori mogući scenarij koji se koristi za optimiranje. Svi scenariji se kombiniraju kako bi se stvorio novi scenarij koji pokriva sve prethodne scenarije. Taj scenarij se koristi za novi oblik objekta. Ukoliko je moguće razumjeti učinak svih sila koje djeluju na objekt, moguće je postaviti scenarij s više sila u isto vrijeme.
5. Provesti topološko optimiranje. Provesti oblikovanje kroz softver. Vrlo je bitno razumjeti sile koje djeluju na objekt i pravilno izvesti prethodni korak, u suprotnom neće se dobiti valjan i željen rezultat.
6. Pretvoriti grube rezultate TO u glatki model koji je spreman za AM



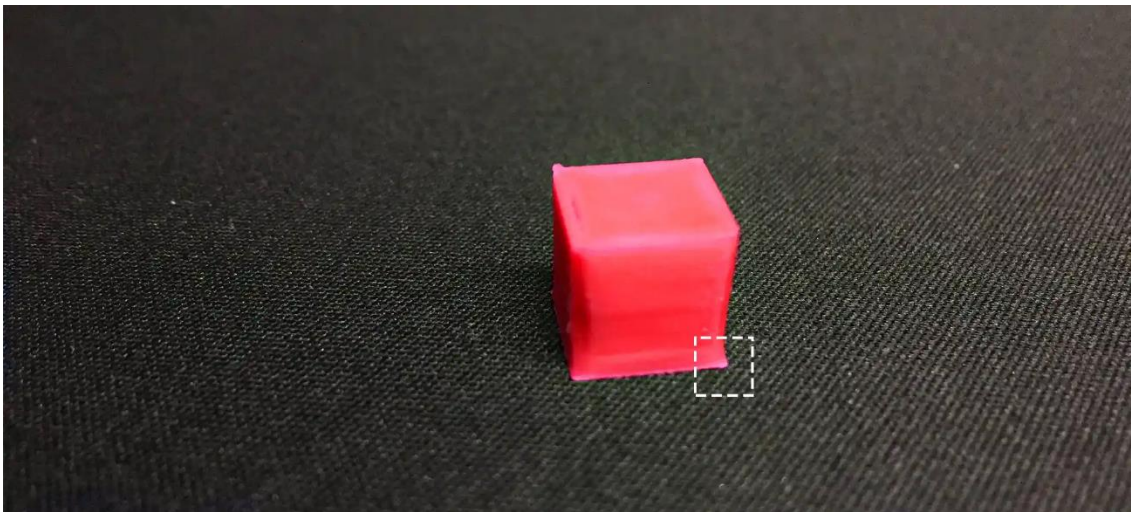
*Slika 23: Količina suporta prije i nakon i TO [13]*

Na slici 23 vidljiva je konstrukcija napravljena aditivnom proizvodnjom. Lijeva konstrukcija napravljena je bez topološkog optimiranja, a desna s TO. Kada se dvije konstrukcije usporede, vidljive su velike razlike. Lijeva konstrukcija ima „raft“, tj. bazu. Tijekom obrade dolazi do zagrijavanja, materijali se šire, pa se ponovno skupljaju kada se hlade. Ove oscilacije stvaraju promjene u ispisanom materijalu, te dolazi savijanja 3D ispisa: hladniji slojevi povlače toplije slojeve dok se skupljaju. A ako se to dogodi kada su topliji slojevi ispod hladnijih, 3D ispisan objekat biti će prisiljen otpustiti svoj pritisak na radnu površinu i savijati se prema gore, što je vidljivo na slici 24, u donjem lijevom kutu konstrukcije.



*Slika 24: Savijanje slojeva [14]*

Također ponekad, kada se radi 3D ispis bez „rafta“, može se dogoditi da je prvi sloj malo veći od ostalih. Takva pojava, u literaturi, je poznata kao slonova noga. Iako je većinu vremena neprimjetna i neznatna, slonova noga može predstavljati veliki problem pri ispisu predmeta za praktičnu primjenu. Drastično smanjuje tolerancije, što otežava spajanje dijelova. Ovaj se nedostatak često pojavljuje kod većih ispisa jer je uzrokovan težinom predmeta koji gura prema dolje prvi sloj. Ako još nije potpuno ohlađen, ova težina rezultira ispupčenjem prvog sloja, što je vidljivo na slici 22. [14]



Slika 25: „Slonova noga“ [14]

Lijeva konstrukcija sa slike 21, također, za razliku od desne konstrukcije, sadrži pozamašnu količinu suporta. S obzirom da model ne može stajati u zraku, za strukture koje imaju kut manji od  $45^\circ$  u odnosu na radnu podlogu, potrebna je suportna struktura. Vidljiva je i drastična promjena u obliku između dvije konstrukcije. [15]

Desna konstrukcija je 3D ispisani objekt nakon topološkog optimiranja. Objekt je napravljen bez baze, bez suporta i s izmijenjenom topologijom, dodana su tri otvora. Tako je topološkim optimiranjem objekt zadržao svoja mehanička svojstva, a utrošeno je znatno manje materijala, znatno je skraćeno vrijeme naknadne obrade uklanjanja suporta, čime su dodatno smanjeni troškovi obrade.

S obzirom na prednosti aditivne proizvodnje, navedene u poglavlju 2 i velike uštede na materijalu, vidljivo je koliko se topološkim optimiranjem može povećati korištenje aditivne

proizvodnje, te kako je praktično obraditi topološki optimirani objekt s aditivnom proizvodnjom u usporedbi s konvencionalnom proizvodnjom.

## 5. TOPOLOŠKO OPTIMIRANJE NOSAČA SJEDALA VLAKA

### 5.1. Izbor materijala

Cilj ovog zadatka je dobiti konstrukciju sjedala vlaka što manje mase, čime je izbor materijala vrlo bitan faktor za uspješno rješavanje problema. Izabrani materijal je aluminijska legura 6061-T6 [16]. Aluminij kao legura je vrlo elastičan materijal, a struktura je slična čeličnoj strukturi. Unatoč tome, ima lošija mehanička svojstva, ali je manje gustoće (i manje mase) od čelika. Također, aluminij je otporan na hrđu, i žilaviji je, čime je bolji pri niskim temperaturama u odnosu na čelik. Snižanjem temperature, pospješuju se mehanička svojstva aluminija, a s povišenjem temperature, svojstva se pogoršavaju [16] (u usporedbi sa čelikom, ima dvostruko veću toplinsku rastezljivost). Tablica 1 se odnosi na izabranu leguru.

Tablica 1: Mehanička svojstva aluminija

Temperatura [ °C]	Granica tečenja [MPa]	Rastezna čvrstoća [MPa]	Istezanje pri lomu [%]
24	276	310	17
371	12	24	95
316	19	32	85
260	34	51	60
204	103	131	28
149	214	234	20
100	262	290	18
-28	283	324	17
-80	290	338	18
-196	324	414	22

Youngov modul elastičnosti:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{F/A_0}{\Delta L/L_0} = \frac{FL_0}{A_0\Delta L} = 68.9 \text{ GPa} \quad (10)$$

gdje su:

$E$  Youngov modul elastičnosti materijala

$F$  Sila koja djeluje na konstrukciju

$A_0$  početni poprečni presjek konstrukcije

$\Delta L$  produljenje konstrukcije

$L_0$  početna duljina konstrukcije

$\sigma$       naprezanje  
 $\varepsilon$       omjer produljenja konstrukcije i njene duljine.

Prvi broj u imenu legure (6) označuje da ova legura pripada grupi aluminijskih legura koja koristi magnezij i silicij kao legirajuće elemente. Drugi broj u imenu legure (0) označuje stupanj kontrole nečistoća osnovnog aluminijskog, u ovom slučaju označuje da je legura pretežito od komercijalnog aluminijskog, i nije mu potrebno povećanje razine kontrole. Treći i četvrti broj označuju leguru. [17]

Aluminijska legura 6061 je najčešće korištena legura od aluminijskog. Ima široku industrijsku primjenu pa tako i u transportnoj industriji (konstrukcije aviona, automobila, vlakova) zbog visoke čvrstoće i visoke otpornosti na koroziju. Također, često se koristi u termotehnici (hladnjaci i izmjenjivači topline), u elektronici i za zavarene konstrukcije.



Slika 26: Konstrukcija vlaka od aluminijskog [18]

## 5.2. Analiza modela sjedala

CAD model se otvara u računalnom programu „Altair Inspire“. Model dva sjedala s nosačem sjedala je sljedećih dimenzija:

$$(x, y, z) = (514,73, 899,6, 1020) \text{ mm}$$

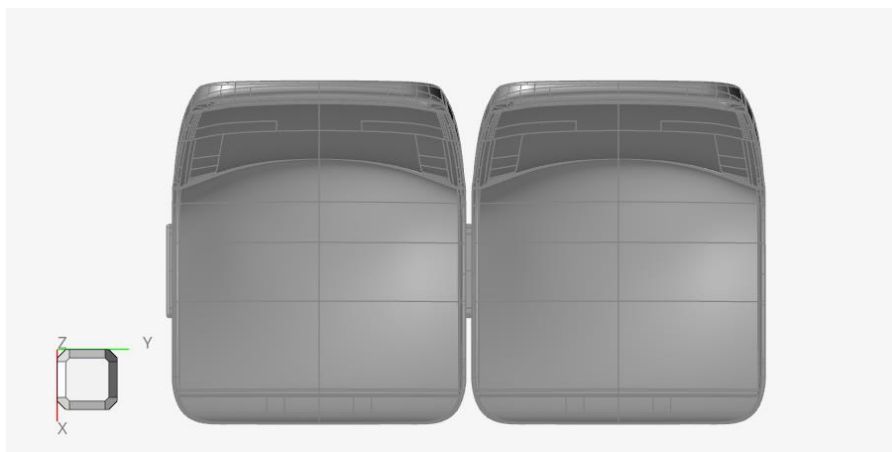
Slika 25 prikazuje model sjedala u ravnini nacрта:





*Slika 27: Model sjedala u ravnini nacрта*

Slika 26 prikazuje model sjedala u ravnini tlocrta:



*Slika 28: Model sjedala u ravnini tlocrta*

Slika 27 prikazuju model sjedala u ravnini bokocrta.



Slika 29: Model sjedala u ravnini bokocrta

Sljedeća tablica prikazuje podjelu mase prema dijelovima:

Tablica 2: Model sjedala, masa

Ime dijela	Broj dijelova	Materijal	Ukupna masa prije optimiranja [kg]
Sjedalo	2	Plastika ABS	3,06440
Vijci, matice, podloške	1	Čelik AISI 304	0,28182
Nogice	2	Aluminij 6061-T6	1,88646
Klupa	1	Aluminij 6061-T6	2,07120
Ukupna masa modela prije optimiranja			7,30388
Ukupna masa nosača prije optimiranja			3,95766

Tehnički zahtjevi:

- Vertikalno opterećenje se procjenjuje tako da se u točki težišta osobe koja sjedi (procijenjeno na 90 kg) postavi vertikalna sila  $F_{v1} = F_{v2} = 900 \text{ N}$
- Horizontalno opterećenje se procjenjuje tako da se u točki težišta osobe koja sjedi (procijenjeno na 90 kg) postavi horizontalna sila  $F_{hx1} = F_{hx2} = F_{hy1} = F_{hy2} = 4500 \text{ N}$
- Dimenzije „klupe“ su (145 x 875 x 25) mm

- Dimenzije nogica su (195 x 40 x 375) mm. Nogice se sastoje od dva L-profila. Sa jednim se povezuju nogice sa podom, a sa drugim se nogice povezuju sa klupom.
- Odabrani materijal za nosače je aluminij 6061-T6 koji je dostupan u praškastom obliku za aditivnu proizvodnju.

Horizontalni nosač („Klupa“) i dva vertikalna nosača („Nogice“) čine 54,19 % ukupne mase cijelog sklopa. Norma zahtijeva da je sva oprema u vlaku projektirana na način da prilikom potencijalnog sudara s preprekom, nosači opreme moraju ostati u elastičnom području. Nosači sjedala su pravokutne cijevi. Ideja je dobiti konstrukciju minimalne mase, a da ima zadovoljavajuću nosivost u svim uvjetima ugradnje.

### 5.3. Tijek rada

#### 5.3.1. Početna analiza

Najprije je potrebno „očistiti“ CAD model, za analizu i optimiranje nisu potrebni svi dijelovi sklopa. Dijelovi sjedala, vijaka, matica i podloška su u koliziji s klupom i nogicama, stoga računalni program ne može odraditi analizu i optimiranje. Ti dijelovi se uklanjaju iz sklopa prije početne analize. Početna analiza je potrebna kako bi se vidjela svojstva konstrukcije prije optimiranja. Kako bi se analiza izvršila, potrebno je definirati opterećenja. S obzirom da je konstrukcija uklještena o pod, postavljaju se dva „suporta“ unutar rupa na L-profilu (slika 30). Na slici 31 je ikona naredbe u programu AltairInspire.



Slika 30: Postavljanje suport-a



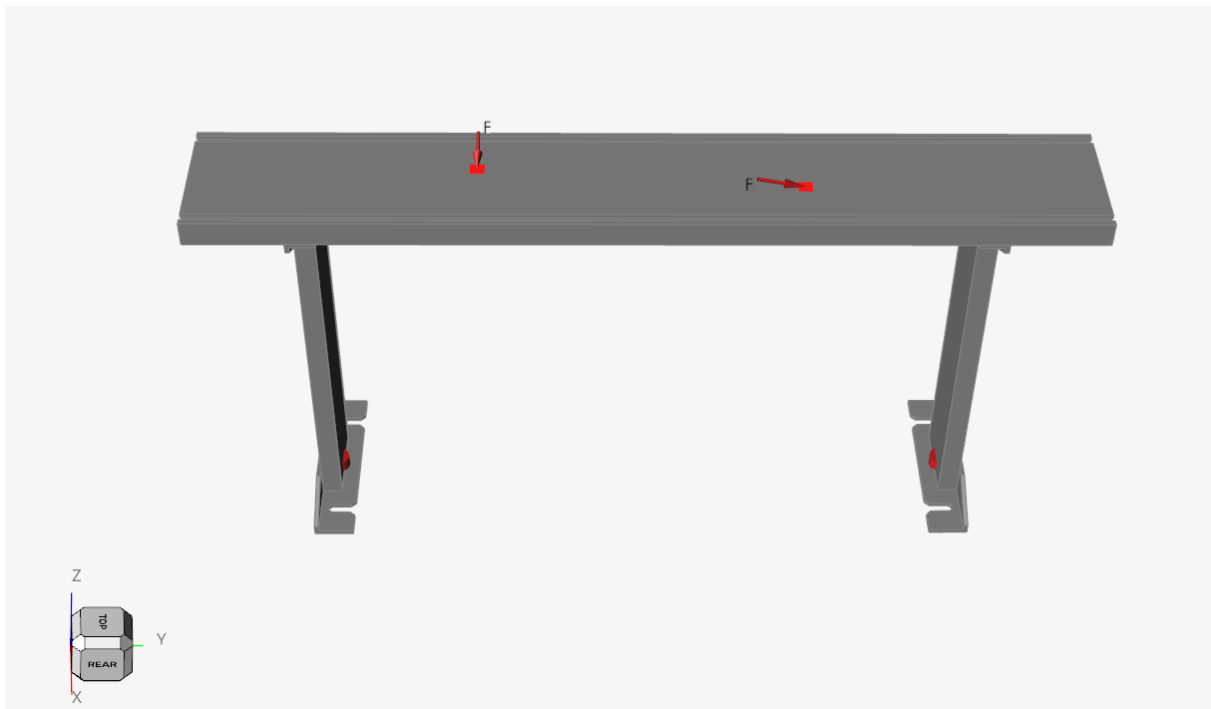
Slika 31: Ikona "Apply Force/Pressure/Torque/Support"

S pomoću ikone sa slike 31 se postavljaju i sile, tj. vertikalno i horizontalno opterećenje definirano u prethodnom ulomku. U ovom računalnom programu nije moguće postaviti silu u točku a da program tu silu primjeni na cijeli model. Iz tog razloga, sila se procjenjuje kao kontinuirano opterećenje na cijeloj gornjoj plohi klupe, kao najbliža aproksimacija stvarnom slučaju. Definirane su dvije sile (tablica 3):

Tablica 3: Definirane sile

Sila	$F_x$ [N]	$F_y$ [N]	$F_z$ [N]
Sila 1 (eng. "Force 1")	9000	0	-1800
Sila 2 (eng. "Force 2")	0	9000	-1800

Aproksimacija je napravljena tako da su dvije sile, (jedna iz svakog sjedala), svaka od 4500 N u smjeru osi x, te 900 N u negativnom smjeru osi z, definirane kao kontinuirano opterećenje od 9000 N u smjeru osi x, odnosno 1800 N u negativnom smjeru osi z, u slučaju orijentacije u smjeru vožnje vlaka. Isto je učinjeno i za drugi slučaj, u slučaju bočne orijentacije sjedala u odnosu na smjer kretanja vlaka, tj. definirana je sila od 9000 N u smjeru osi y, odnosno 1800 N u negativnom smjeru osi z. Slika 32 prikazuje sile na programu, položaj sila nije bitan, jer je opterećenje raspoređeno po cijeloj plohi.



Slika 32: Sile koje djeluju na klupu

Kada su postavljeni suporti i sile, moguće je pokrenuti prvu analizu. Prosječna veličina konačnog elementa je 5 mm. Prva analiza za oba slučaja orijentacije je prikazana na slikama 33 i 34.



Slika 33: von Mises- početna analiza- smjer kretanja vlaka

Sukladno očekivanjima, najveće opterećenje se javlja u nogicama. Maksimalno dopušteno naprezanje materijala prema perogram Altair Inspire je 241 MPa, a može se vidjeti da je

maksimalno naprežanje na analizi konstrukcije jednako 343 MPa, iz čega se može zaključiti da ovaj nosač ne može izdržati zadana naprežanja.



Slika 34: von Mises- orijentacija okomita na smjer kretanja vlaka

Kod nosača orijentiranog pod pravim kutom u odnosu na smjer kretanja vlaka, vidljivo je da su naprežanja još veća. Maksimalno naprežanje nosača je 396 MPa, što je znatno više od dopuštene granice od 241 MPa, što znači da ovaj nosač ne može izdržati zadana naprežanja.

Zadani materijal ne može izdržati zadana opterećenja. Moguće je uzeti čvršći materijal, a moguće je optimirati postojeću konstrukciju bez promjene materijala.

### 5.3.2. Topološko optimiranje nosača

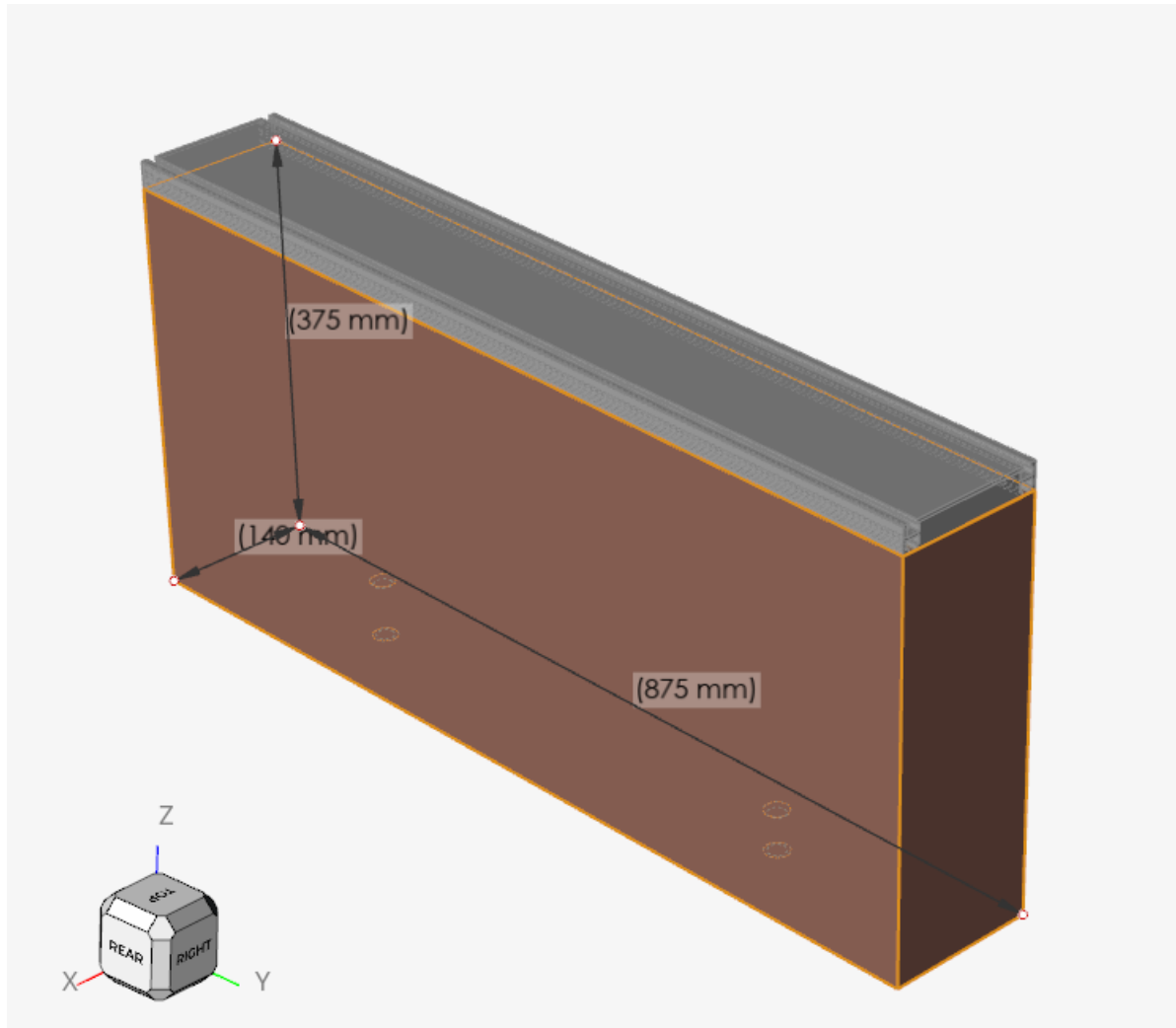
#### 5.3.2.1. Definiranje domene

Prvi korak metode topološkog optimiranja podrazumijeva definiranje domene. Zadaje se što je moguće veći prostor, kako bi optimiranje bilo što učinkovitije. Domena (slika 35) se definira kao kvadar dimenzija:

$$(x, y, z) = (140, 875, 375) \text{ mm}$$

Dimenzije po uzdužnoj i poprečnoj osi domene su jednake dimenzijama uzdužne i poprečne osi klupe, a dimenzije vertikalne osi su jednake visini od poda do donje ravnine klupe. Razlog što klupa nije optimirana je taj, što je klupa vrlo male mase i što su naprežanja materijala klupe unutar

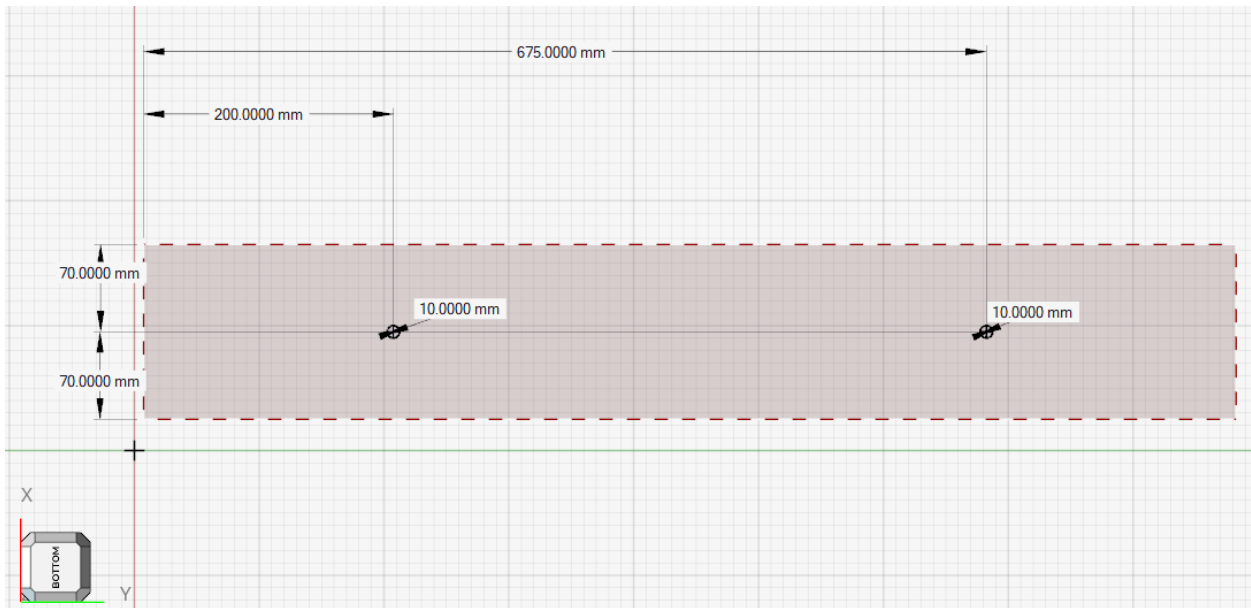
dopuštenih granica. Stoga nije vrijedno optimirati dio koji nije skup, koji je dovoljno čvrst za svoju namjenu i koji je prije optimiranja vrlo male mase. Područje domene se u Inspire-u zove „Design Space“, a označeni „Design Space“ pri odabiru poprimi nijansu smeđe boje (slika 35).



Slika 35: Domena

### 5.3.2.2. Partitioniranje geometrije

Kako bi se definirala mjesta na domeni gdje će se optimirani nosač uklještit s podlogom, potrebno je particionirati „design space“. Na taj način će se na prostoru koji je dio domene napraviti zaseban „dio“ prostora koji neće biti dio domene. Potrebno je napraviti skicu (eng. „sketch“) u ravnini donje plohe domene  $(x,y,0)$ . Skicom se geometrijski definiraju provrti. S obzirom da originalna konstrukcija nosača sadrži provrt promjera od 10 mm, također je i za optimirani nosač pretpostavljen jednaki provrt. Koordinate središta provrta prikazane su na slici 36.



*Slika 36: Koordinate provrta*

Naredbom „Pull“ (slika 37), oblikuju se cilindrični provrti unutar domene. Svaki cilindar je promjera provrta, a visina mu je 35 mm. Cilindri predstavljaju prostor koji je oduzet od domene.



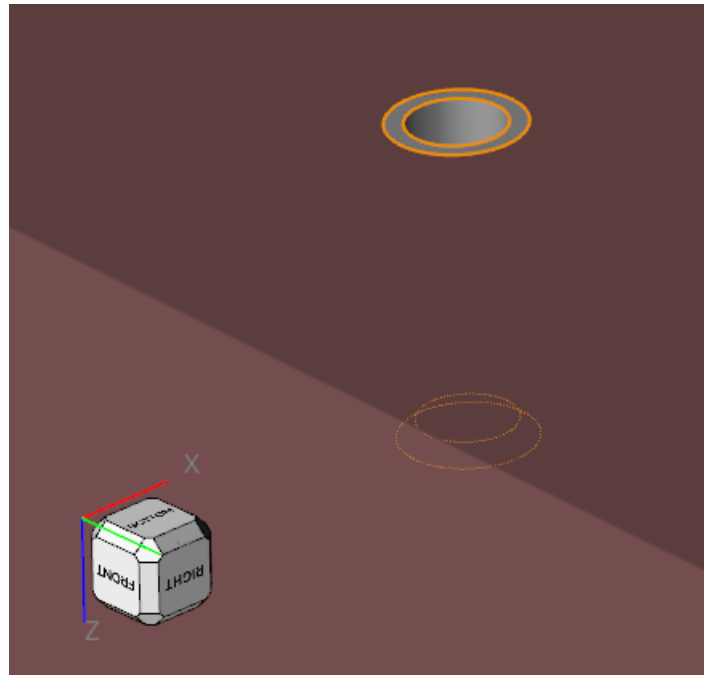
*Slika 37: Ikona za dodavanje/oduzimanje materijala*



*Slika 38: Ikona za particioniranje*

Pritiskom na ikonu sa slike 38, otvara se izbornik unutar kojeg se odabiru spomenuti cilindri. Inspire zahtijeva pomak (eng. „offset“), tj. vanjski promjer cilindra koji će generirati unutar domene. Vanjski promjer je jednak 20 mm (slika 39).

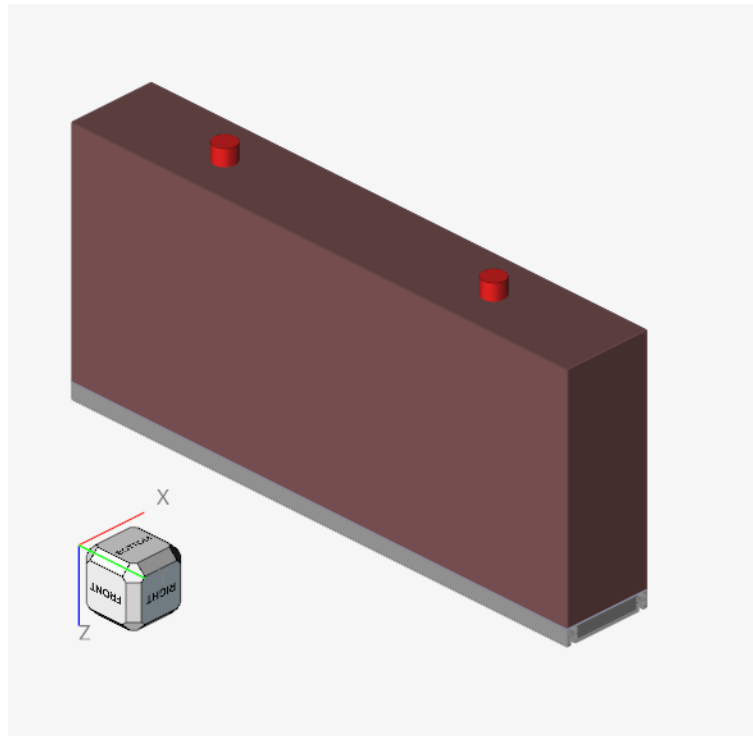




Slika 39: Partitionirani dio nosača

### 5.3.3. Definiranje rubnih uvjeta

Rubni uvjeti se definiraju s pomoću modula „Structure“. Pomoću „supporta“, domena se na partitioniranim dijelovima spaja s podlogom krutom vijčanom vezom. Time su definirani uvjeti uležištenja konstrukcije (slika 40).



Slika 40: Rubni uvjeti uležištenja konstrukcije

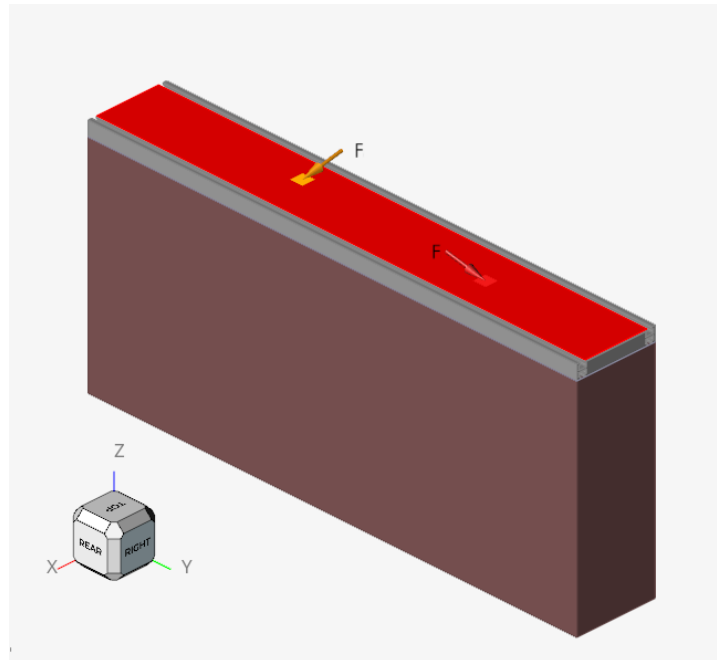
Uz navedeno, potrebno je definirati opterećenja. Ona se definiraju kao u poglavlju 5.3.1. Početna analizana stranici 40. Sile su kontinuirano raspoređene na gornjoj plohi klupe. S obzirom da svaka sila se pojavljuje kod jednog od načina montaže sjedala.

Tablica 4: Postavljanje rubnih uvjeta opterećenja

Sila	F <sub>x</sub> [N]	F <sub>y</sub> [N]	F <sub>z</sub> [N]	Smjer
Sila 1 (eng. "Force 1")	9000	0	-1800	Smjer kretanja vlaka
Sila 2 (eng. "Force 2")	0	9000	-1800	Smjer okomit na smjer kretanja vlaka

Dva su slučaja rubnih uvjeta opterećenja (slika 41):

1. **Nosač je montiran u smjeru kretanja vlaka.** Putnik koji sjedi na sjedalu okrenut je licem prema smjeru kretanja vlaka. („Load Case 1“)
2. **Nosač je montiran u smjeru okomitom na smjer kretanja vlaka.** Putnik koji sjedi na sjedalu okrenut je licem za 90 ° od smjera kretanja vlaka („Load Case 2“)



Slika 41: Rubni uvjeti opterećenja

Zadnji uvjet koji treba definirati su osi simetrije koje je potrebno zadovoljiti optimiranjem. Pritiskom na ikonu „Shape controls“ (slika 42) definiraju se ravnine simetrije na domeni. Kako bi se olakšala montaža nosača, definiran je slučaj sa svim osima simetrije domene, te slučaj kada je simetrija s osima domene x i y.



Slika 42: Ikona "Shape controls"

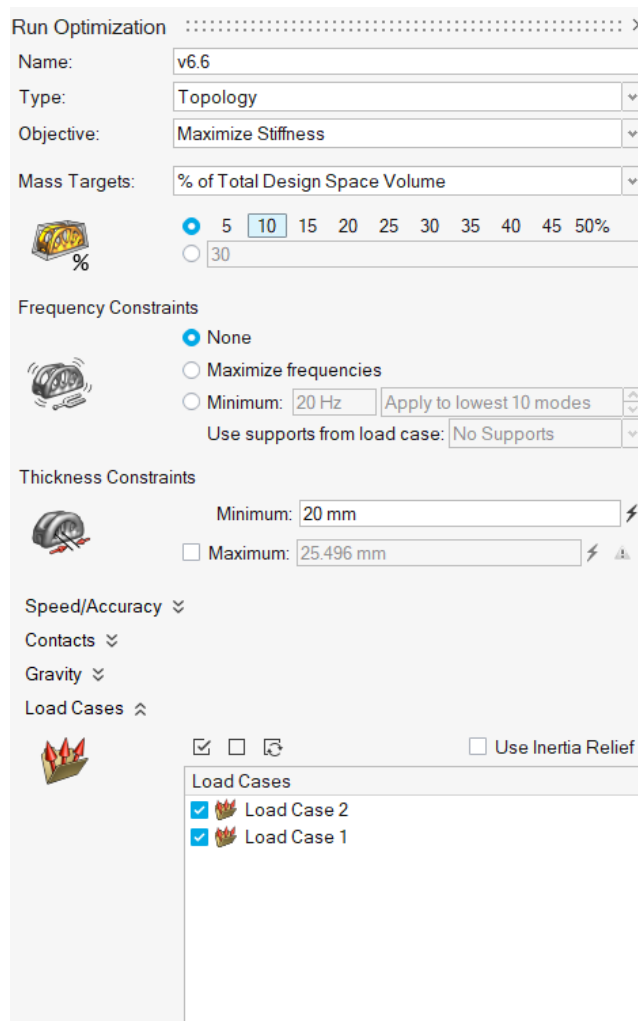
#### 5.3.4. Topološko optimiranje u „Altair Inspire“

Dostupna su 3 različita kriterija topološkog optimiranja u računalnom programu „Altair Inspire“:

- Maksimiranje krutosti
- Minimiranje mase
- Maksimiranje frekvencije.

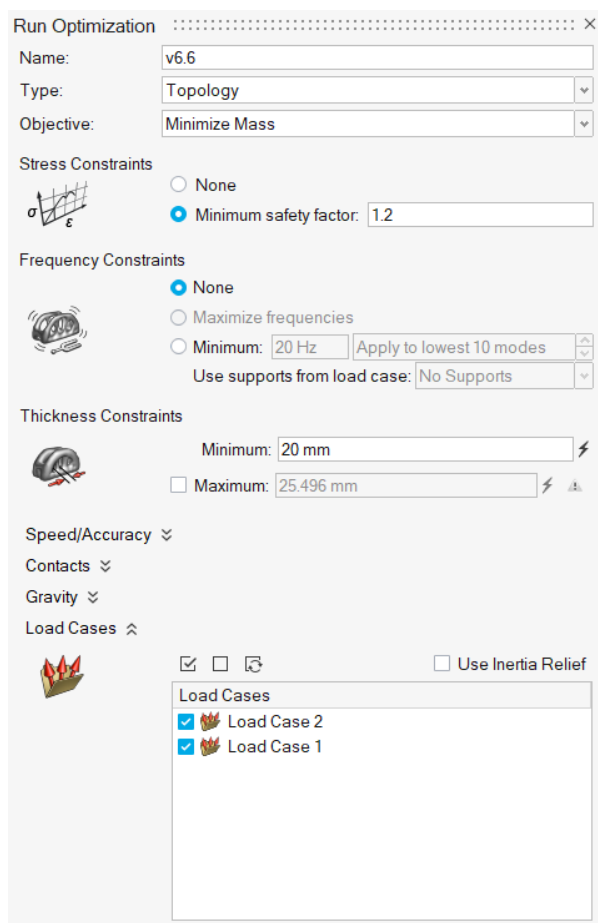
U svrhu ovog rada korišteni su kriteriji maksimiranja krutosti te minimiranja mase.

TO koje se temelji na kriteriju maksimiranja krutosti rezultira konstrukcijom s najmanjim mogućim pomacima. Potrebno je definirati od kolikog udjela mase domene će TO generirati novu konstrukciju (slika 43). Moguće je definirati minimalnu i maksimalnu debljinu stijenke konstrukcije. Što je veći udio mase domene i veća debljina stijenke, to je lakše obradivo optimiranje za procesorsku jedinicu računala, drugim riječima, vrijeme trajanja optimiranja će biti kraće. Smanjenjem udjela mase domene i debljine stijenke, konstrukcija će biti lakša.



Slika 43: Maksimiranje krutosti

TO koje se temelji na kriteriju minimiranja mase rezultira konstrukcijom s najmanjom mogućom masom s obzirom na definirani faktor sigurnosti (slika 44). Kao i kod maksimiranja krutosti, odabir debljine stijenke će utjecati na rezultat konstrukcije.



Slika 44: Minimiranje mase

Kada je odabran način TO, računalo će pokrenuti proces optimiranja. Veličina konačnog elementa je 5 mm.

## 6. REZULTATI

### 6.1. Usporedba rezultata

Provedena su tri različita optimiranja (tablica 5)

Tablica 5: Optimiranje nosača

	Način optimiranja	Debljina stijenke [mm]	Masa domene [kg]	Masa nakon optimiranja [kg]	Vrijeme (procesno) trajanja optimiranja [h]
1.	Maksimiranje krutosti (5%)	40	131,05	4,2221	01:31:50
2.	Minimiranje mase ( $F=3$ )	30	131,05	3,9964	01:15:47
3.	Minimiranje mase ( $F=4$ )	30	131,05	2,9593	01:25:47

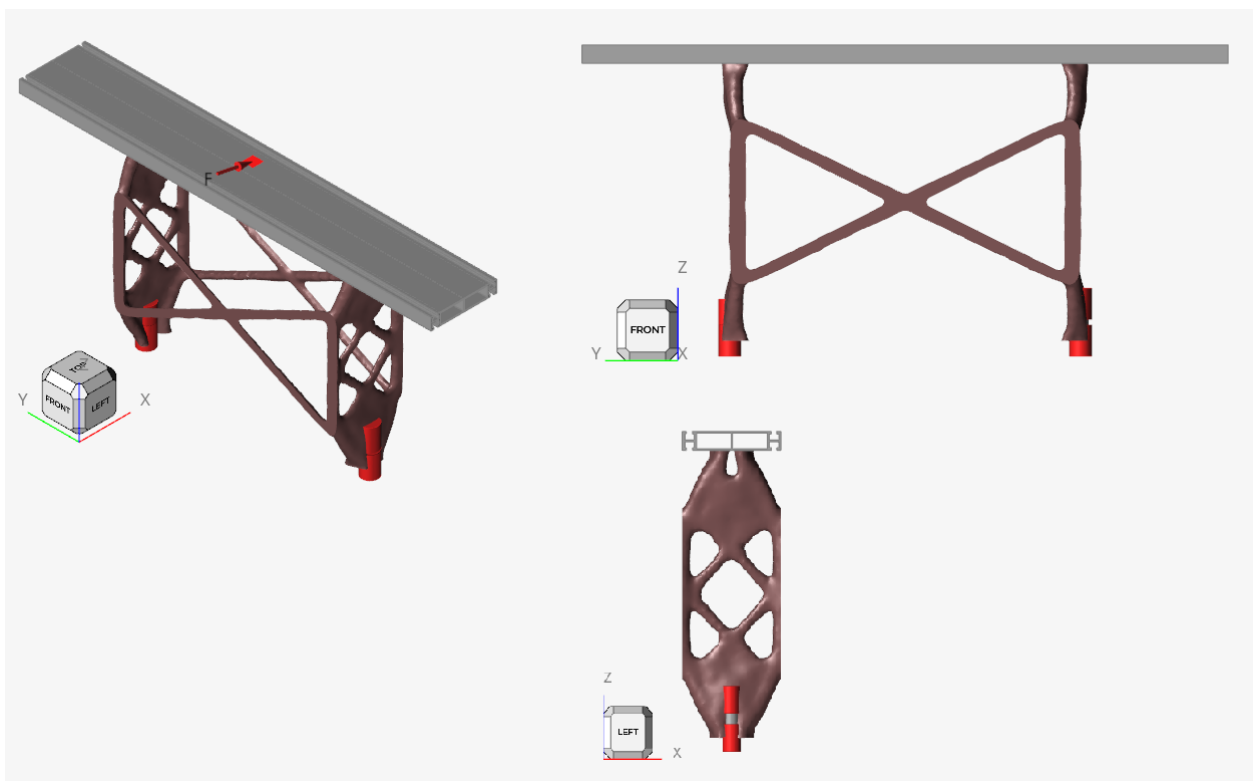
Kako bi se što više smanjila masa, a vrijeme optimiranja i memorija koju zauzima datoteka bili prihvatljivi, odabrana je debljina stijenke 30 i 40 mm. Kako bi se što više smanjila masa, odabran je najmanji udio preostalog materijala (5%). Kod optimiranja minimiranjem mase, odabrani su faktori sigurnosti  $F_1=3$ ,  $F_2=4$ . Rezultati navedenih optimizacija prikazane su na slikama 45-48.



Slika 45: Maksimiranje krutosti (5%)



Slika 46: Minimiranje mase ( $F=3$ )



Slika 47: Minimiranje mase ( $F=4$ )

Nakon optimiranja potrebno je izvršiti analizu optimirane konstrukcije. Sve analize su prikazane u tablici 6:

Tablica 6: Analize optimiranja nosača

Broj analize/Ime analize	Masa nosača [kg]	Maksimalna napreznja- smjer kretanja vlaka [MPa]	Maksimalna napreznja- bočno od smjera kretanja vlaka [MPa]	Dopušteno napreznje materijala* [MPa]
1/Početna analiza	3.95766	343	396	241
2/Maksimiranje krutosti (5%)	4.2221	161	49.85	241
3/Minimiranje mase ( $F=3$ )	3.9964	175	136.9	241
4/Minimiranje mase ( $F=4$ )	2.9593	135	143.1	241

Pregled analiza topološkog optimiranja na slikama 48-53:



Slika 48: von Mises- Maksimiranje krutosti (5%)- smjer kretanja vlaka





Slika 49: von Mises- Maksimiranje krutosti (5%)- smjer okomit na smjer kretanja vlaka



Slika 50: von Mises- Minimiranje mase (F=3)- smjer kretanja vlaka



Slika 51: :von Mises- Minimiranje mase ( $F=3$ )- smjer okomit na smjer kretanja vlaka



Slika 52: von Mises- Minimiranje mase ( $F=4$ )- smjer kretanja vlaka



Slika 53: von Mises- Minimiranje mase ( $F=4$ )- smjer okomit na smjer kretanja vlaka

Zaključak je da je moguće smanjiti masu konstrukcije i povećati krutost konstrukcije topološkim optimiranjem. Optimiranje maksimiranjem krutosti (5%) se pokazalo kao najbolji način za optimiranje konstrukcije ako se nosač montira u smjeru okomitom na smjer kretanja vlaka. Analizom inicijalne konstrukcije utvrđeno je da, ako je nosač montiran u smjeru okomitom na smjer kretanja vlaka u vertikalnim nosačima sjedala, pojavljuje se opterećenje od 396 MPa, što je znatno više od dopuštene granice od 241 MPa<sup>1</sup>. Kod ove rezultata TO, maksimalno naprezanje u tom slučaju je oko 50 MPa, što je veliko poboljšanje u odnosu na inicijalnu konstrukciju. No ipak, konstrukcija nosača dobivena ovim načinom topološkog optimiranja, veće je mase od inicijalne konstrukcije nosača. Dobivenu konstrukciju je potrebno zagladiti NURBS krivuljama prije proizvodnje.

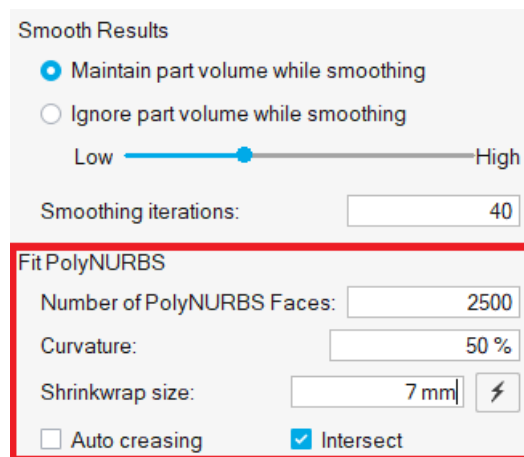
Optimiranje minimiranjem mase s faktorom sigurnosti  $F=3$  se pokazalo kao najlošija varijanta. Konstrukcija je gotovo jednake mase kao i inicijalna konstrukcija (konstrukcija je za 0,038 kg veće mase od inicijalne konstrukcije), no analiza naprezanja pokazuje kako su sva naprezanja unutar područja elastične deformacije. Unatoč tome, ova konstrukcija zbog kvalitete površine dobivene topološkim optimiranjem nije prihvatljiva. Kao što je vidljivo na slikama 46,50 i 51, dijelove ove konstrukcije bi trebalo odbaciti (dijelovi koji „strše“), a ostale dijelove urediti, tj. „zagladiti“ prije proizvodnje.

<sup>1</sup> Prema Altair Inspire-u granica tečenja za materijal Aluminij 6061-T6

Optimiranje minimiranjem mase s faktorom sigurnosti  $F=4$  se pokazalo kao najučinkovitija varijanta u slučaju optimiranja nosača sjedala. Ovo je jedini rezultat koji ima manju masu od inicijalne konstrukcije (nosač ima za 0,998 kg manju masu), a pritom su mu najveća naprezanja bez obzira na smjer montaže sjedala unutar područja elastične deformacije. Rezultat daje konstrukciju simetričnu po svim osima simetrije. U slučaju proizvodnje, ovaj rezultat bi bio optimalan. Konstrukciju je potrebno zagladiti prije proizvodnje.

## 6.2. Izrada CAD modela

Rezultat dobiven minimiranjem mase sa faktorom sigurnosti  $F=4$  je najkvalitetniji, pa ga je potrebno pripremiti za proizvodnju. Na slici 54 su definirani parametri kreiranja konstrukcije s NURBS krivuljama. Altair Inspire će generirati CAD model s pomoću NURBS krivulja na temelju rezultata (slika 55). Sada je model spreman za „CAM“ (proizvodnja s pomoću računala). Altair Inspire ima integrirane module za aditivnu i subtraktivnu proizvodnju.



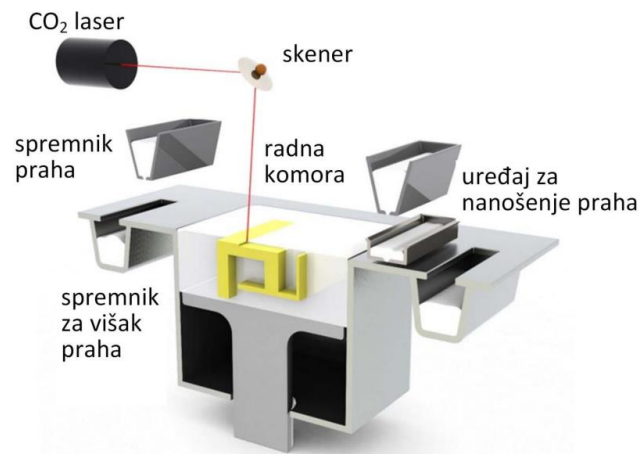
Slika 54: Fit NURBS



Slika 55: CAD model

## 7. PRIPREMA ZA ADITIVNU PROIZVODNJU

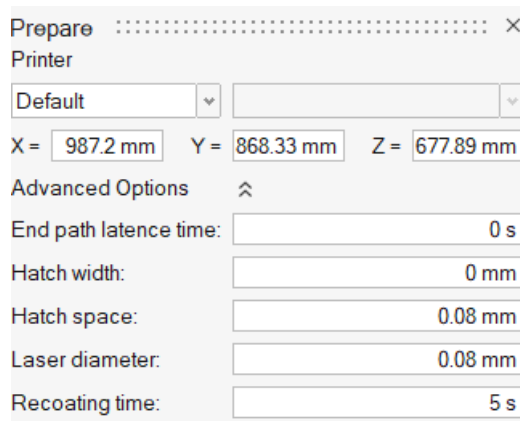
Odabrana tehnologija za aditivnu proizvodnju aluminijskog nosača je taljenje materijala s laserom (SLM- eng. „Selective laser melting“). SLM tehnologija radi na način (slika 56) da laser zagrijava sloj metalnog praha koji se nalazi u radnom prostoru. Zbog visoke temperature, čestice praha okrupnjuju. Platforma unutar koje se nalazi prah se spušta postepeno, čime omogućuje okrupnjivanje praha, sloj po sloj. Kada je proces gotov, višak praha se filtrira, pa miješa s novim prahom za buduće uporabe. Time je znatno smanjena količina otpada, oko 95 % praha se može ponovno iskoristiti [15].



Slika 56: SLS proces [15]

Takav proizvod ima visoku čvrstoću, stoga ova tehnologija je primjerena za konstrukcije kod kojih je vrlo važan kriterij toplinskog istezanja, zamora metala itd.

Topološko optimirani nosač je prevelikih dimenzija da bi se proizvodio aditivnom proizvodnjom u jednom komadu. Montaža nije obrađena u ovom radu. Slika 58 grafički prikazuje parametre odabrane orijentacije. S obzirom da SLM tehnologija ne zahtijeva suport, konstrukcija se orijentira tako da se minimira vrijeme proizvodnje.



Slika 57: Parametri 3D pisača

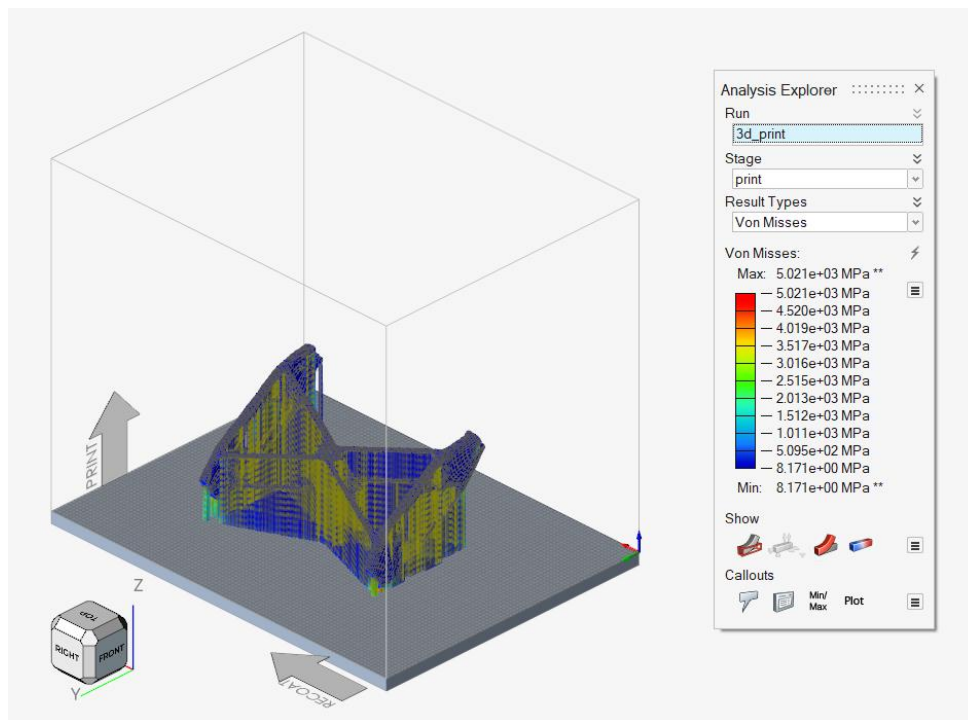
Zadana konfiguracija će orijentirati model tako da se minimira vrijeme proizvodnje, i deformacije koje mogu nastati tijekom proizvodnje.



Slika 58: Grafički parametri orijentacije modela

Analizom simulacije procesa aditivne proizvodnje može se zaključiti da postoje naprezanja koja su iznad granice tečenja materijala. Razlozi tome su opisani u 4. poglavlju rada. Izmjenom parametara 3D ispisa moguće je smanjiti pomake i deformacije.





Slika 59: Simulacija 3D ispisanog dijela



## 8. ZAKLJUČAK

Cilj diplomskog rada je bio prikazati proces topološkog optimiranja na primjeru nosača sjedala. S pomoću topološkog optimiranja na temelju minimiranja mase, s faktorom sigurnosti  $F=4$ , dobivena je konstrukcija manje mase i veće otpornosti na naprezanja. Analizom konstrukcije je dokazano da dvije osobe od 90 kg mogu sjediti na sjedalima neovisno o orijentaciji montaže, čime je postojeći proizvod značajno unaprijeđen. Konstrukcija, ako je izvedena iz jednog komada, je vrlo jednostavna za montažu, jer je simetrična po poprečnoj i uzdužnoj osi simetrije. Prilikom montaže, to bi značilo da nije bitno na koju se stranu okrene konstrukcija, takva orijentacija će biti zadovoljavajuća.

Kako bi se došlo do optimalnog rješenja, potrebno je napraviti niz iteracija koje zahtijevaju mnogo inženjerskog vremena, te vrlo dobro poznavanje teorije topološkog optimiranja i računalnog programa. Potrebno je imati kvalitetno računalo. Spomenuti kriteriji ne predstavljaju problem u transportnoj industriji, gdje se topološko optimiranje primjenjuje za razvoj novih proizvoda. To je od ključne važnosti za pozicioniranje proizvođača na tržištu, koje iz ekoloških i ekonomskih razloga sve više traži smanjenje mase materijala. Zamor metala je također važan kriterij zbog kojeg industrija sve više priklonjena topološkom optimiranju.

Iako vrlo privlačno iz perspektive razvoja proizvoda, topološko optimiranje je donedavno stvaralo problem iz perspektive proizvodnje. S obzirom na kompleksnost topološki optimirane strukture, bez razvoja aditivne proizvodnje, rezultati topološkog optimiranja su vrlo ograničeni jer konvencionalni strojevi ne mogu oblikovati takvu geometriju, pa se rezultat TO mora pojednostaviti, čime gubi svoj smisao. Razvojem tehnologija aditivne proizvodnje započinje šira primjena topološkog optimiranja, jer je moguće realizirati bilo kakvu geometriju koja je rezultat topološkog optimiranja.

Na daljnji razvoj topološkog optimiranja će utjecati aditivna proizvodnja, a s druge strane, zbog potencijala koji topološko optimiranje pruža, razvijati će se aditivna proizvodnja, kao jedini učinkoviti način realizacije rezultata topološkog optimiranja. Razvojem procesorskih jedinica računala, biti će moguće napraviti strukture s manjim debljinama stijenke, čime će se dodatno moći smanjiti masa konstrukcije.

## LITERATURA

- [1] Olaf Diegel, Axel Nordin, Damien Motte: A Practical Guide to Design for Additive Manufacturing, Singapore, 2020.
- [2] L. Krog, A. Tucker: Topology Optimization of Aircraft Wing Box Ribs, Albany, 2004.
- [3] D.Šćap, A.Jokić : Optimiranje mehaničkih konstrukcija, Zagreb, 2014.
- [4] Z. Gjuranić: Konike i grafovi nekih polinoma pomoću NURBS krivulja
- [5] S.A. Nelson, "Properties of Light and Examination of Istropic Substances", 2014.
- [6] M.P. Bendsoe, O. Sigmund: Topology Optimization: Theory, Methods, and Applications, 2004.
- [7] <https://www.precedenceresearch.com/aerospace-materials-market> , na internetu (posjećeno 31.10.2022.)
- [8] <https://global.toyota/en/ir/financial-results/> , na internetu (posjećeno 20. rujna 2022.)
- [9] <https://www.toyota-industries.com/investors/library/reports/> , na internetu (posjećeno 20. rujna 2022.)
- [10] <https://www.epa.gov/ghgemissions/global-greenhouse-gas-emissions-data> , na internetu (posjećeno 20. rujna 2022.)
- [11] R.J. Yang, Ching-Hung Chuang, Xiangdong Che, Ciro Soto: New applications of topology optimisation in automotive industry, Ford Motor company, Michigan, 2000.
- [12] Harold Frederickson: Structural topology optimisation applications review, Volvo Car Corporation, Goteborg, 2005.
- [13] G. Chiandussi, I. Gaviglio, A. Ibba: Topology optimisation of an automotive component without final volume constraint specification, Torino, 2003.
- [14] <https://all3dp.com/> , na internetu (posjećeno 18. ožujka 2022.)
- [15] Mladen Šercer, Damir Godec, Ana Pilipović, Miodrag Katalenić: Aditivna proizvodnja s polimerima, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu
- [16] <https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=b8d536e0b9b54bd7b69e4124d8f1d20a&ckck=1> , na internetu (posjećeno 18. ožujka 2022.)
- [17] <https://www.aviationaluminum.com/hr/news/what-is-6061-aluminum-alloy/> , na internetu (posjećeno 2. rujna 2022.)
- [18] Xiaoguang Sun, Xiaohui Han, Chaofang Dong, Xiaogang li: Applications of Aluminum Alloys in Rail Transportation