Konstrukcija nosivog tijela bespilotne letjelice

Drašner, Stjepan

Master's thesis / Diplomski rad

2019

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:235:530831

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-10-16**

Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Stjepan Drašner

Zagreb, 2019.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Konstrukcija nosivog tijela bespilotne letjelice

Mentor:

Prof. dr. sc. Nenad Bojčetić, dipl. ing.

Student:

Stjepan Drašner

Zagreb, 2019.

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

Zahvaljujem se svojoj obitelji što su omogućili i podržali moje studiranje, bratu i sestrama, baki, a osobito roditeljima Ivici i Ljubici.

Zahvaljujem se profesoru Nenadu Bojčetiću na mentorstvu, ukazanom povjerenju, strpljenju i svim nesebično upućenim savjetima tijekom studiranja i izrade diplomskog rada.

Zahvaljujem se gospodinu Branku Dautoviću iz EAG Centra na ustupanju softverske podrške i polaznog modela za eksperimentalni dio rada.

Zahvaljujem se i profesoru Nevenu Pavkoviću na suradnji i brojnim pruženim prilikama tijekom studija.

Zahvaljujem se svojoj teti, Emici Brkić, što je vlastitim znanjem, savjetima i utrošenim vremenom utjecala na kvalitetu ovog rada.

Posljednje, no ne i manje važno, zahvaljujem se svim svojim prijateljima, kolegama i obitelji na vremenu. Ivana, Ante, Valentina, Antonija i Martina, Vama osobita hvala!

S poštovanjem, Stjepan Drašner.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE
Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodostrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur. broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Stjepan Drašner** Mat. br.: 0035191897

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Konstrukcija nosivog tijela bespilotne letjelice**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Design of the supporting body of unmanned aerial vehicles**

Opis zadatka:

Konstruirati nosivo tijelo bespilotne letjelice prema zahtjevima smještaja i rasporeda potrebnih komponenti (motori, baterijski paket, oplata, prihvatni elementi). Konstrukciju je potrebno prilagoditi izradi metodom aditivne proizvodnje uporabom saćastih struktura (eng. *lattice structure*) te optimirati po kriterijima minimalne mase i maksimalne krutosti. Pri optimiranju primijeniti metode topološke optimizacije (eng. *topology optimization*) dostupne u CAD aplikaciji. Izraditi kompletne 3D CAD modele te pripadajuću tehničku dokumentaciju.

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

Zadatak zadan: 17. siječnja 2019.

Datum predaje rada: 21. ožujka 2019.

Predviđeni datum obrane: 27., 28. i 29 ožujka 2019.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Nenad Bojčetić

Predsjednica Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

SADRŽAJ

SADRŽAJ I
POPIS SLIKA III
POPIS TABLICA VI
POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE VII
POPIS OZNAKA VIII
SAŽETAK X
SUMMARY XI
1. UVOD 1
1.1. Bespilotne letjelice 1
1.1.1. Definicija 1
1.1.2. Povijesni razvoj 3
1.1.3. Podjela 7
1.1.4. Primjena 9
1.1.5. Tržište 10
1.1.6. Sigurnost i zaštita 10
1.1.6.1. Načini korištenja dronova sa sigurnosnog aspekta 10
1.1.6.2. Događaji uzrokovani nestručnom i nepravilnom uporabom BL 11
1.1.6.3. Događaji uzrokovani svjesnom i namjernom zlouporabom BL 12
1.1.6.4. Protudronska zaštita 14
1.1.7. Hrvatska zakonska regulativa u uporabi sustava bespilotnih zrakoplova 15
1.1.7.1. Opće odredbe i pojmovi 15
1.1.7.2. Stari Pravilnik o sustavima bespilotnih zrakoplova (NN 49/2015 i NN 77/2015) 16
1.1.7.3. Novi Pravilnik o sustavima bespilotnih zrakoplova (NN 104/2018) 17
1.1.7.4. Osvrt na hrvatsku zakonsku regulativu u uporabi sustava bespilotnih zrakoplova 19
1.2. PTC Inc. 20
1.2.1. Povijest 20
1.2.2. Proizvodi 21
1.3. Rešetkaste strukture 23
1.3.1. Motivacija i definicija 23
1.3.2. Ćelija – osnovna građevna jedinica rešetkaste strukture 25
1.3.3. Proizvodnja i podjela 28
1.3.4. Primjena 30
1.4. Optimizacija 32
1.4.1. Svrha optimizacije 32
1.4.2. Strukturalna optimizacija 33
1.4.3. Topološka optimizacija 35
1.4.3.1. Kako djeluje topološka optimizacija? 35
1.4.3.2. Metode topološke optimizacije 37
1.4.3.3. Primjena topološke optimizacije 40
1.5. Aditivna proizvodnja 43

1.5.1. Motivacija i definicija ... 43
1.5.2. Načela aditivne proizvodnje ... 46
1.5.3. Postupci generativne proizvodnje ... 48
1.5.4. Svijetla budućnost aditivne proizvodnje ... 52
2. EKSPERIMENTALNI DIO – KONSTRUKCIJSKA RAZRADA ... 54
2.1. Definiranje eksperimentalnog dijela ... 54
2.1.1. Zadatak ... 54
2.2. Metoda konačnih elementa ... 56
2.2.1. Validacija konačnih elemenata ... 56
2.2.1.1. Analitičko rješenje ... 56
2.2.1.2. Numeričko rješenje ... 58
2.2.2. Analiza polaznog modela ... 64
2.3. Prijedlog konstrukcije temeljen na uporabi rešetkastih konstrukcija ... 67
2.3.1. Verzija 1 ... 67
2.3.2. Verzija 2 ... 69
2.3.3. Verzija 3 ... 71
2.3.4. Verzija 4 ... 73
2.4. Prijedlog konstrukcije temeljen na uporabi topološke optimizacije ... 76
2.4.1. Verzija 5 ... 76
2.4.2. Verzija 6 ... 78
3. ZAKLJUČAK ... 81
3.1. Izbor verzije nosivog tijela bespilotne letjelice ... 81
3.2. Opći osvrt ... 82
LITERATURA ... 83
PRILOZI ... 88

POPIS SLIKA

Slika 1. BL General Atomics MQ – 9 Reaper poznata i pod nazivom Predator B 1
Slika 2. Kontrolni centar bespilotne letjelice MQ – 9 Reaper 2
Slika 3. Oprema besposadnih letjelica 2
Slika 4. Bakrorezi s prikazom bombardiranja Venecije 1849. god. 3
Slika 5. Bespilotne letjelice iz sredine 20. stoljeća 4
Slika 6. Bespilotne letjelice iz 60 – ih i 70 – ih godina 20. stoljeća 5
Slika 7. Hrvatske špijunske BL iz Domovinskog rata 6
Slika 8. Hrvatske moderne bespilotne letjelice 6
Slika 9. Bespilotne letjelice i zabava 7
Slika 10. Podjela letjelica na aerostate i aerodine 8
Slika 11. Različite uporabe iste platforme (DJI Phantom) 8
Slika 12. Profesionalna uporaba BL u službama sigurnosti 9
Slika 13. Civilna profesionalna uporaba besposadnih letjelica 9
Slika 14. Dronovi kao umjetničko sredstvo i objekt propagande 11
Slika 15. Namjerna zlouporaba besposadnih letjelica 13
Slika 16. Obrana od nepoželjnih dronova 14
Slika 17. PTC Inc. – logo i poslovna filozofija 21
Slika 18. PTC Creo sučelje – sklop KTM Duke 990R 22
Slika 19. Rešetkasto strukturirana prirodna tkiva 23
Slika 20. Šupljikavi dizajnirani materijali 24
Slika 21. Rešetkasta struktura 24
Slika 22. Proizvodi načinjeni korištenjem rešetkaste strukture 25
Slika 23. Ćelija kao osnova varijantnosti rešetkastih struktura 26
Slika 24. Osnovni oblik ćelije 26
Slika 25. Rubno područje 26
Slika 26. Relativna gustoća 27
Slika 27. Progresivnost 27
Slika 28. Konformnost 28
Slika 29. Čvor 28
Slika 30. Rešetkasta struktura kao ispuna unutrašnjosti (metal i polimer) 29
Slika 31. Dimenzionalnost rešetkaste strukture (lijevo 2.5D, a desno 3D) 30
Slika 32. Rešetkaste strukture u rekonstrukciji zgloba kuka 31
Slika 33. Rešetkaste strukture u svakodnevnim proizvodima 31
Slika 34. Optimizacija mase okvira automobilskih vrata 32
Slika 35. Optimizacija topologije 33
Slika 36. Optimizacija oblika 34
Slika 37. Optimizacija veličine 35
Slika 38. Mehanizam djelovanja topološke optimizacije 36
Slika 39. Gustoća i njena binarna vrijednost 37
Slika 40. Grafički prikaz jednadžbe (1) 38
Slika 41. Rezultat topološke optimizacije ovisi o načinu opterećivanja 40
Slika 42. Topološka optimizacija nosača 41
Slika 43. Topološka optimizacija nosača u automobilskoj industriji 41
Slika 44. Topološka optimizacija nosača u svemirskoj industriji 42
Slika 45. 3D fizički model i 3D digitalni model 44

Slika 46. Aditivna proizvodnja u izradi kompleksnih kalupa i lakih konstrukcija 44
Slika 47. Metalni izradci nastali aditivnom proizvodnjom 45
Slika 48. Polimerni izradci nastali aditivnom proizvodnjom 46
Slika 49. Kompleksni proizvodi izrađeni aditivnim postupcima 46
Slika 50. Finoća završnog proizvoda ovisi o debljini pojedinog sloja 47
Slika 51. Vizualni prikaz aditivne proizvodnje 48
Slika 52. Postupci aditivne proizvodnje s obzirom na izvorno stanje materijala i fiziku procesa 48
Slika 53. Shematski prikaz stereolitografije popraćen primjerom 49
Slika 54. Shematski prikaz 3D tiskanja popraćen primjerom 50
Slika 55. Shematski prikaz PolyJet postupka popraćen primjerom 50
Slika 56. Shematski prikaz taložnog sraščivanja popraćen primjerom 51
Slika 57. Shematski prikaz laminiranja popraćen primjerom 51
Slika 58. Shematski prikaz selektivnog laserskog sraščivanja popraćen primjerom 52
Slika 59. Uporaba aditivne tehnologije u maksilofacijalnoj kirurgiji i ortopediji 52
Slika 60. Rešetkasto strukturirani i topološki optimirani nosači načinjeni aditivnim tehnikama 53
Slika 61. Polazna geometrija bespilotne letjelice 54
Slika 62. Konzola za usporedbu numeričkih i analitičkih rješenja naprezanja i pomaka 57
Slika 63. Tetraedarski konačni element 58
Slika 64. Model konzole za numeričku analizu 58
Slika 65. Numerička analiza modela konzole s 59 KE 60
Slika 66. Numerička analiza modela konzole s 336 KE 60
Slika 67. Numerička analiza modela konzole sa 635 KE 61
Slika 68. Numerička analiza modela konzole s 18 667 KE 61
Slika 69. Numerička analiza modela konzole s 30 045 KE 62
Slika 70. Numerička analiza modela konzole s 80 447 KE 62
Slika 71. Konvergencija naprezanja uslijed progušćivanja mreže 64
Slika 72. Raspodjela opterećenja i rubni uvjeti na numeričkom modelu 64
Slika 73. Naprezanja i pomaci u polaznom modelu (101 829 konačnih elemenata) 65
Slika 74. Grafički prikaz mase nosive konstrukcije BL (1) 66
Slika 75. *Verzija 1* 67
Slika 76. *Verzija 1* rezultati numeričke analize 68
Slika 77. Grafički prikaz mase nosive konstrukcije BL (2) 68
Slika 78. Naprezanja na dijelu karoserije *Verzije 1* diskretizirane sa 150 935 tetraedarskih KE 69
Slika 79. *Verzija* 2 69
Slika 80. *Verzija 2* rezultati numeričke analize 70
Slika 81. Naprezanja na dijelu karoserije *Verzije 2* diskretizirane sa 140 511 tetraedarskih KE 70
Slika 82. Grafički prikaz mase nosive konstrukcije BL (3) 71
Slika 83. *Verzija 3* 71
Slika 84. *Verzija 3* rezultati numeričke analize 72
Slika 85. Naprezanja na dijelu karoserije *Verzije 3* diskretizirane sa 141 539 tetraedarskih KE 72
Slika 86. Grafički prikaz mase nosive konstrukcije BL (4) 73
Slika 87. *Verzija 4* 73
Slika 88. *Verzija 4* rezultati numeričke analize 74
Slika 89. Naprezanja na dijelu karoserije *Verzije 4* diskretizirane sa 135 842 tetraedarska KE 74

Slika 90. Grafički prikaz mase nosive konstrukcije BL (5) 75
Slika 91. Ulazni podatci za topološku optimizaciju 76
Slika 92. Ovisnost cilja i ograničenja optimizacije topologije o iteraciji (*Verzija 5*)..... 77
Slika 93. *Verzija 5* 77
Slika 94. *Verzija 5* (dodatni pogledi)..... 78
Slika 95. Grafički prikaz mase nosive konstrukcije BL (6) 78
Slika 96. Ovisnost cilja i ograničenja optimizacije topologije o iteraciji (*Verzija 6*)..... 78
Slika 97. *Verzija 6* (prije rekonstrukcije geometrije) 79
Slika 98. *Verzija 6* 79
Slika 99. Grafički prikaz mase nosive konstrukcije BL (7) 80
Slika 100. Predloženo konačno rješenje - *Verzija 3* 81

POPIS TABLICA

Tablica 1. Kategorije letačkih operacija 17
Tablica 2. Kategorizacija i pravo izvođenja letačkih operacija 18
Tablica 3. PTC Creo verzije 22
Tablica 4. Usporedba rezultata numeričkih analiza 63

POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE

BL – 001 – 001 Nosivo tijelo bespilotne letjelice *Verzija 3*

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
b	m	širina poprečnog presjeka
C	m/N	globalna podatljivost konstrukcije
$\delta\sigma$	–	relativna pogreška za naprezanja
δw	–	relativna pogreška za pomake
E	GPa	Youngov modul elastičnosti
E_0	GPa	Youngov modul elastičnosti izotropnog materijala
$E\left(\rho_{(e)}\right)$	GPa	Youngov module elastičnosti elementa e
F	N	vanjske sile na modelu
h	m	visina poprečnog presjeka
I	m^4	moment tromosti presjeka
$K_{(e)}$	N/m	matrica krutosti elementa e
$K_{SIMP(\rho)}$	N/m	globalna krutost konstrukcije
l	m	krak sile
M	Nm	moment
M_{10}	Nm	moment 10 mm od ukliještenog ruba
m_{sum}	kg	ciljana masa konstrukcije u optimizaciji
N	–	ukupan broj konačnih elemenata za opis konstrukcije
υ	–	Poissonov koeficijent
OM	kg	operativna masa letjelice
p	–	korekcijski faktor
R_e	MPa	granica elastičnosti
R_m	MPa	vlačna čvrstoća
ρ	kg/m^3	gustoća

$\rho_{(e)}$	–	varijabla gustoće elementa e
ρ_{min}	–	minimalna vrijednost varijable gustoće
σ_{10}	MPa	naprezanje 10 mm od ukliještenog ruba
σ_{max}	MPa	maksimalno savojno naprezanje
$\sigma_{numerika}$	MPa	naprezanja u numeričkoj metodi
$u_{(e)}$	m	čvorni pomak elementa e
$v_{(e)}$	m^3	volemen elementa e
W	m^3	moment otpora presjeka
w_{max}	m	maksimalni progib
$w_{numerika}$	m	pomak u numeričkoj metodi

SAŽETAK

Tema je ovog rada *Konstrukcija nosivog tijela bespilotne letjelice*. Stoga je u uvodnom dijelu rada prikazano više o bespilotnim letjelicama. Između ostalog moguće je pročitati o definiciji i povijesti bespilotnih letjelica, primjeni i hrvatskoj zakonskoj regulativi u uporabi bespilotnih zrakoplova, ali i brojnim drugim temama vezanim za bespilotne letjelice. Kako je ovaj rad povezan s konstruiranjem i razvojem proizvoda predstavljena je programska podrška korištena za izradu rada. Pri razvoju nosivog tijela bilo je nužno koristiti rešetkaste (saćaste) strukture te koristiti alate za topološku optimizaciju konstrukcije. Zbog toga dan je kratki pregled ovih dviju tema. Kako izrada konstrukcija osmišljenih pomoću rešetkastih struktura i topološke optimizacije nije pogodna za izradu tradicionalnim postupcima proizvodnje predstavljena je i aditivna proizvodnja.

Drugi dio rada obuhvaća eksperimentalni dio koji uključuje konstrukcijsku razradu. Predstavljen je polazni model i cilj konstrukcijskog razvoja. Minimizacija mase uz nametnuta ograničenja glavni je cilj razvoja nosivog tijela bespilotne letjelice. Predložene su četiri verzije temeljene na uporabi rešetkastih konstrukcija. Te verzije kontrolirane su u modulima za metodu konačnih elemenata tako da su naprezanja i pomaci poznati. Naredne dvije verzije rezultat su uporabe optimizacije topologije. Na kraju rada opravdan je izbor predložene izvedbe nosivog tijela bespilotne letjelice i prikazan je autorov osvrt na temu.

Ključne riječi: bespilotne letjelice, nosivo tijelo, konstrukcija, rešetkaste (saćaste) strukture, topološka optimizacija, aditivna proizvodnja, konstruiranje i razvoj proizvoda, dron, minimizacija mase, PTC Creo Parametric

SUMMARY

The subject of this paper is *Design of the supporting body of unmanned aerial vehicles*. Hence, the point in introductory part is on the unmanned aerial vehicles. Among other things it is possible to read about the definition and history of unmanned aerial vehicles. Examples of usage, Croatian unmanned aerial vehicles legislation and more about unmanned aerial vehicles is specified in this part. As this paper is about design and product development then few words are given about software support. During development of supporting body it was necessary to use lattice structure and topology optimization tools. Because of that the short review of these two issues is given. The production of the components with lattice structure or topology optimization incorporated in their volumes is not suitable for a traditional way of production so additive manufacturing is represented.

The second part of the paper deals with experimental work which is all about the design process. The initial model of supporting body is given as well as objective of design development. The minimization of mass with respect to enforced constraints is the main aim of supporting body development. Four versions with lattice structure are proposed. These versions are controlled in module for finite element analysis so that stress and displacement are known. Next two versions are the result of topology optimization. In the end, one version is proposed for production and statements for that choice are provided. Author's review on the topic is the closure of this paper.

Key words: unmanned aerial vehicles, supporting body, design, lattice structure, topology optimization, additive manufacturing, design and product development, drone, mass minimization, PTC Creo Parametric

1. UVOD

1.1. Bespilotne letjelice

U poglavlju „Bespilotne letjelice“ predstavljene su letjelice bez posade kroz nekoliko tema. Govori se o povijesnom razvoju, primjeni, sigurnosnom aspektu uporabe, ali i o hrvatskom pravnom okviru kojim je regulirana uporaba bespilotnih letjelica nad teritorijem Republike Hrvatske.

1.1.1. Definicija

Bespilotne letjelice (engl. *unmanned aerial vehicle* – UAV), često u javnosti poznatije i pod nazivom dronovi, tehnički su sustavi koji izgledom i funkcijom u određenoj mjeri nalikuju klasičnim letjelicama kao što su avioni i helikopteri. Ono što ih međusobno razlikuje pri obavljanju raznih zračnih operacija je prisustvo pilota na i/ili unutar platforme letjelice. Razumljivo je onda da bespilotne letjelice (BL) nemaju posadu pa nije rijetkost da ih pojedinci nazivaju i besposadnim letjelicama. [1] U usporedbi s letjelicama koje ne nose epitet bespilotne, ove potonje se, ako je to moguće, upotrebljavaju u misijama koje su opasne, zamorne ili na neki drugi način štetne za posadu. [2] Jedna takva besposadna letjelica koja se koristi u vojne svrhe pri opasnim borbenim akcijama ili dosadnim izviđačkim misijama dana je slikom 1. gdje se vidi dron tvrtke General Atomics iz SAD – a predstavljen 2001. g. [3]

Slika 1. BL General Atomics MQ – 9 Reaper poznata i pod nazivom Predator B

Širi pojam od bespilotnih letjelica je sustav bespilotnih zrakoplova (engl. *unmanned aircraft system* – UAS) koji unutar sebe obuhvaća nužne elemente za korištenje BL. Sustav bespilotnih zrakoplova stoga uključuje bespilotnu letjelicu, kontrolni centar bespilotne letjelice te sustav za osiguravanje komunikacije između prethodne dvije stavke. Izgled kontrolnog centra BL dan je slikom 2. Iz prethodnih rečenica moguće je zaključiti da je za

obavljanje leta potrebno ipak na neki način upravljati BL. To se čini, primjerice, upravljanjem na daljinu pomoću radiosignala pri čemu pilot s udaljene lokacije izdaje zapovijedi za kretanje letjelice ili se pak u nekom stupnju obavlja samostalno letenje prema unaprijed definiranim rutama leta uz podršku složenih autonomnih dinamičkih sustava. [2]

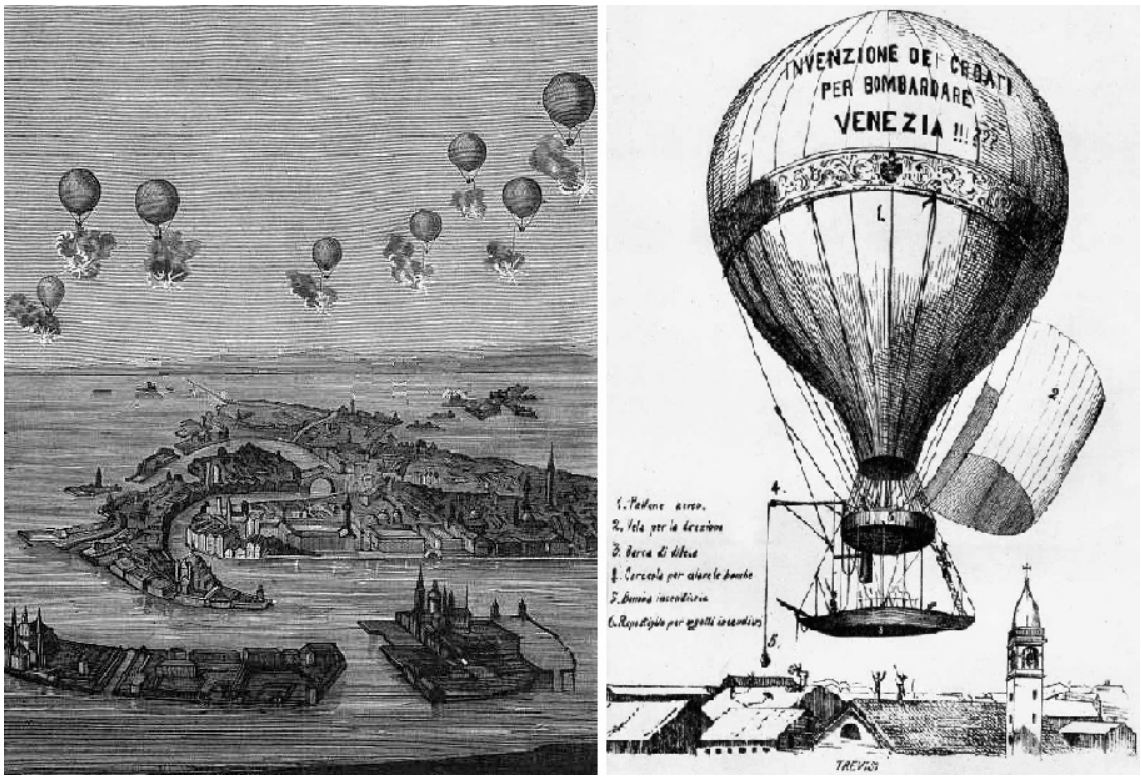
Slika 2. Kontrolni centar bespilotne letjelice MQ – 9 Reaper

Ako se želi uspoređivati bespilotne letjelice s klasičnim letjelicama, naravno, govori se o usporedbi letjelica iste namjene, vrlo se lako mogu definirati komponente letjelice koje su identične ili su neznatno različite. Poneke komponente u BL su u potpunosti izostavljene. U tom slučaju govori se o komponentama koje su usmjerene na posadu, kao što su kokpit i upravljačko sučelje ili primjerice sustavi za održavanje bezopasnih životnih uvjeta – kabina s reguliranim tlakom, temperaturom itd. Dronovi mogu biti često opremljeni dodatnom opremom, što je vidljivo na slici 3. Ona može biti smrtonosna ili bezopasna pa tako npr. nose kamere, mjerne senzore ili neki oblik naoružanja. Nije nikakva rijetkost da su te letjelice lakše od odraslog čovjeka koji bi, primjerice, pilotirao letjelicom iste namjene, ali s ljudskom posadom unutar iste. Iako naoružane vojne BL ponekad nose višetonske terete na kraju u usporedbi s klasičnim letjelicama s posadom iste namjene rezultiraju manjom masom, što je bitno jer smanjenje mase predstavlja osnovu za bolje letne karakteristike kao što je primjerice doseg. [2]

Slika 3. Oprema besposadnih letjelica

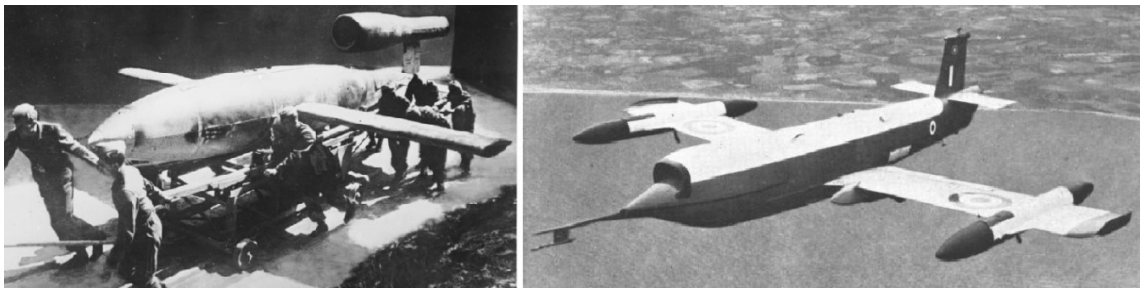
1.1.2. Povijesni razvoj

Ako se govori o povijesnim začetcima BL treba spomenuti jednu od prvih uporaba koja je zabilježena 1849. g. na prostoru Venecije kada su habsburške vlasti u svrhu ugušivanja pobune, nad grad pustile naoružane zračne balone bez posade. Oružje koje su baloni nosili bile su 25 – kilogramske bombe izrađene od lijevanog željeza, unutrašnjosti ispunjene barutom. Papirnati baloni punjeni toplim zrakom promjera oko šest metara ispuštani su na gradske ciljeve s kopna, ali i okolno usidrenih brodova. Bespilotni baloni nošeni vjetrom i opremljeni jednostavnim vremenskim upaljačima ispuštali su barutne bombe na venecijansko tlo. Prema dostupnim informacijama bombardiranje nije bilo pretjerano uspješno, ali zbog svakodnevnih testiranja i očekivanja povoljnog vjetra mjesecima je unosilo neugodnosti u svakodnevicu Mlečana koji su iščekivali neminovno zračno bombardiranje. [4] Iz habsburških je redova poletjelo oko 200 balona, a neki su se zbog promjene u vjetru vratili nazad nad glave habsburških vojnika i to s neiskorištenim opasnim teretom – bombama. [2] Interesantno je spomenuti da se u izvorima spominje kako je među građanima Venecije vladalo mišljenje kako iza ovog izuma stoje Hrvati. To je vidljivo na slici 4. koja prikazuje bombardiranje Venecije iz zraka. Nije sa sigurnošću ustanovljeno zašto je taj izum pripisan baš domaćim ljudima kao što to na bakrorezu stoji – „Invenzione dei Croati per bombardare Venezia“ ili u slobodnom prijevodu s talijanskog – „Izum Hrvata za bombardiranje Venecije“. [4]



Slika 4. Bakrorezi s prikazom bombardiranja Venecije 1849. god.

Značajnijem razvoju bespilotnih letjelica u razdobljima između dvaju svjetskih ratova svakako je pridonio i bežični upravljački mehanizam brodova i vozila kojeg je 1898. g. patentirao Nikola Tesla. Primitivne BL koje su korištene pola stoljeća ranije u zračnom bombardiranju Venecije bežičnim su mehanizmom podignute na novu razinu. Ove se naprednije besposadne letjelice počinju kontrolirati uređajima za upravljanje kao što su žiroskop ili radijska veza za daljinsko navođenje. Bespilotne letjelice toga ranog doba mahom su se koristile kao pokretne mete u zraku pri uvježbavanju pilota za borbene letačke misije ili vojnika koji su sudjelovali u protuzračnoj obrani, ali i kao sredstva destruktivnog djelovanja – zračni torpedo. [1] Sredstva destruktivnog djelovanja u Drugom svjetskom ratu doživjela su snažan razvoj. U to doba predstavljene su prve bespilotne letjelice s krilima opremljene žiroskopskim navođenjem i mlaznim pogonom. Na niže prikazanoj slici 5. mogu se vidjeti te rane mlazne bespilotne letjelice. S lijeve strane je njemačka leteća bomba V – 1 (njem. *Vergeltungswaffen 1*) iz 1944. god. koja, s današnjeg gledišta, predstavlja početke razvoja modernih krstarećih projektila. S desne strane je australska zračna meta GAF Jindivik iz 1952. g. [1] [5] [6]



Slika 5. Bespilotne letjelice iz sredine 20. stoljeća

Napredak tranzistorske tehnike 50 – ih i 60 – ih godina 20. stoljeća omogućio je izradu jačih, pouzdanijih, a u isto vrijeme i manjih upravljačkih uređaja. Zahvaljujući novijim generacijama upravljačkih uređaja i svijesti o potrebi razvoja BL u svrhu očuvanja života pilota u izviđačkim misijama, (nakon obaranja američke špijunske letjelice U2 nad nebom tadašnjeg SSSR – a 1960.), bespilotne su letjelice pronašle plodno tlo za agresivan nastavak razvoja koji je započeo u vremenima Drugog svjetskog rata. [7] U hladnoratovskom razdoblju bespilotne su letjelice stoga prvenstveno razvijane kao instrument špijunaže neprijateljskih teritorija – zračnih luka, industrijskih pogona, državničkih zdanja i sl. Špijunske besposadne letjelice svoj su pravi potencijal pokazale u nadolazećem Vijetnamskom ratu (1955. – 1975. god.) kada su ostvarile preko 3 400 izviđačkih misija za koje se procijenilo da su visokorizične za avione s posadom. Premda je stopa gubitaka BL bila visoka, one su ipak spašavale živote pilota. Naime, poznato je da je u tom ratu ubijeno ili nestalo preko 6 000

pilota. Nakon rata u Vijetnamu i američkih bespilotnih letjelica može se intenzivan razvoj BL pratiti na prostoru Izraela kada su bespilotne letjelice odigrale neizmjerno veliku ulogu u Libanonskom ratu 1982. godine okončavši rat bez ijednog izgubljenog pilota na izraelskoj strani. Ne čudi, stoga, što su i dandanas SAD i Izrael vodeće zemlje u razvoju vojnih bespilotnih letjelica. Zato su slikom 6. dane besposadne letjelice tih dviju država iz vremena nakon Drugog svjetskog rata. Na lijevoj strani prikazan je američki zrakoplov vojne namjene Lockheed M – 21 kako nosi dron Lockheed D – 21 iz 1964. g. dok je na desnoj strani vidljiv izraelski dron manjih dimenzija BL Tadiran Mastiff iz 1973. god. koji se predstavlja kao prvi dron s prijenosom videozapisa visoke kvalitete u realnom vremenu. [1] [8] [9]

Slika 6. Bespilotne letjelice iz 60 – ih i 70 – ih godina 20. stoljeća

Premda bi se razvoj dronova u posljednjih 20 godina drugog tisućljeća mogao pratiti na globalnoj razini kroz napredne vojne dronove, glavni će fokus ovog odjeljka ipak biti stavljen na dronove izrađivane za potrebe Domovinskog rata u Republici Hrvatskoj. BL korištene u ranim godinama Domovinskog rata razvijane su s ciljem špijunaže teritorija pod neprijateljskom upravom – MAH 01 i MAH 02, da bi se na izmaku rata 1995. godine u operaciji Oluja koristila besposadna letjelica imena M – 99 Bojnik. Ovi dronovi vidljivi su na slici 7. S lijeve strane prikazan je MAH 02 s početka Domovinskog rata, a BL koja je važnu ulogu imala u kasnijim godinama rata, M – 99 Bojnik, nalazi se s desne strane. Zbog velikog doprinosa u planiranju i provedbi velike vojno – redarstvene operacije Oluja, M – 99 Bojnik kasnije je prozvan „Oči Oluje“. M – 99 Bojnik daljinski je navođen od strane pilota iz zemaljske postaje koja se nalazi u radijusu od 60 km od interesnog područja nad kojim su se provodila fotografska i video snimanja koja su bila prenosiva u stvarnom vremenu. Ova je letjelica raspona krila 4 m i mase 36 kg mogla u zraku opstajati i do 6 sati s osiguranim visinama leta na 4000 m te tako neprimjetno snimati razmještaj naoružanja pobunjenih Srba. [1] [2] [10]

Slika 7. Hrvatske špijunske BL iz Domovinskog rata

Kad se nastavi promatrati razvoj bespilotnih letjelica na hrvatskom tlu u poslijeratnim godinama onda svakako treba izdvojiti letjelicu Fenix. Razvijena je 2003. godine od strane poduzeća Pastor s namjenom nadzora požarišta, ali i drugim uporabama u poljoprivredi, geodeziji i nadzoru migrantske krize. BL Fenix vidi se na lijevoj strani slike 8. [11] U Hipersferi, zagrebačkoj kompaniji, 2006. g. započet je razvoj stratosferskih bespilotnih zračnih brodova koji služe kao platforma za sustave mobilnih telekomunikacija, daljinskih istraživanja itd. Unazad nekoliko godina, s aspekta razvoja bespilotnih letjelica, zanimljivo je promatrati proizvode tvrtaka Tarsier drones sa sjedištem u Karlovcu i zagrebački Kapetair čija se prototipna letjelica iz 2017. g. Kapetair Prototype – 2 nalazi na desnom dijelu slike 8. U pripremi softvera za besposadne letjelice iskazala se zagrebačka tvrtka IN2. [1] [12]

Slika 8. Hrvatske moderne bespilotne letjelice

Kako tijekom svog cijelog povijesnog razvoja, tako i dandanas bespilotne letjelice svoje vrhunske performanse i mogućnosti duguju uporabi najnovijih sustava i tehnologija. Zbog toga se uz bespilotne letjelice često mogu naći pojmovi kao što su minijaturizacija računalnih resursa, velika autonomija, industrijska tajna, patentno pravo, umjetna inteligencija, vrhunska komunikacijska tehnologija i sl. Naravno, ti pojmovi rezultat su velikih ulaganja u BL, ponajprije od strane vlada država svijeta. Jer, povijest nije samo jednom pokazala da bespilotne letjelice mogu biti više nego važno sredstvo za osiguravanje moći i prevlasti na nekom prostoru. Ako se na trenutak pozornost skrene s vojne uporabe na

onu civilnu, stanje je zahvaljujući globalizaciji, smanjenju cijene računalnih resursa i jednostavnim komandama, slično. Tako danas više nije neobično vidjeti djecu kako u dokolici upravljaju malenim dronovima (slika 9.) kao što su primjerice kvadrotori – dronovi s četiri rotora, često pokretani elektromotorom te opremljeni kamerama ili nekom drugom opremom, po potrebi i mogućnostima. Na slici 9. prikazan je još i jedan dron za utrke čija uporaba može biti čisto rekreativna, ali i profesionalna, jer već postoje organizirana sportska natjecanja pri kojima se kandidati utrkuju dronovima kroz za to posebno pripremljene piste. [1]

Slika 9. Bespilotne letjelice i zabava

1.1.3. Podjela

Postoje brojne podjele dronova na osnovu različitih kriterija kao što su, primjerice, primjena ili veličina koja može varirati od nekoliko kvadratnih centimetara pa sve do preko 40 metara velikog raspona krila. Za početak, moguća je podjela u dvije velike grupe prema načinu na koji osiguravaju uzgonsku silu: [1]

- aerostati – šuplje letjelice lakše od zraka, nalik dirižablima i balonima, koje su punjene plinovima kao što su topli zrak, helij ili vodik;
- aerodini – letjelice teže od zraka koje uzgonsku silu osiguravaju krilima bilo da se radi o nepokretnom krilu (zrakoplovi i zmajevi) ili pokretnom krilu (helikopteri i autožiri).

Ova podjela popraćena je slikom 10. Tu se može vidjeti i velika razlika u dimenzijama bespilotnih letjelica. Lijevo na prikazu nalazi se aerostat TCOM 22M kompanije TCOM iz Sjedinjenih Američkih Država koja od 1971. godine proizvodi tehničke sustave samoodržive u zraku i do mjesec dana. Namjena im je nadzor državnih granica ili se koriste u svrhu komunikacije i organizacije u vojnim misijama. [13] Desni prikaz slike 10. donosi maleni špijunski aerodin norveške proizvodnje, Black Hornet Nano iz 2014. g. [14]

Slika 10. Podjela letjelica na aerostate i aerodine

Nakon osnovne podjele prema načinu osiguravanja uzgonske sile bespilotne se letjelice mogu klasificirati u šest klasa s obzirom na vlastitu namjenu: [2]

- mete i mamci – simuliranje neprijateljskih zrakoplova ili projektila u vojnim treninzima pri provođenju vježbi gađanja i manevriranja;
- izviđanje – špijunaža i nadzor neprijateljskih teritorija;
- borbena uporaba – izvođenje napada na visokorizične ciljeve za letjelice s posadom;
- logistika – isporuka tereta;
- istraživanje i razvoj – podrška razvoju novijih generacija bespilotnih letjelica;
- civilne i komercijalne BL – uporaba za poljoprivredna i geodetska snimanja, fotografiranje nekretnina i događaja, utrke dronovima i sl.

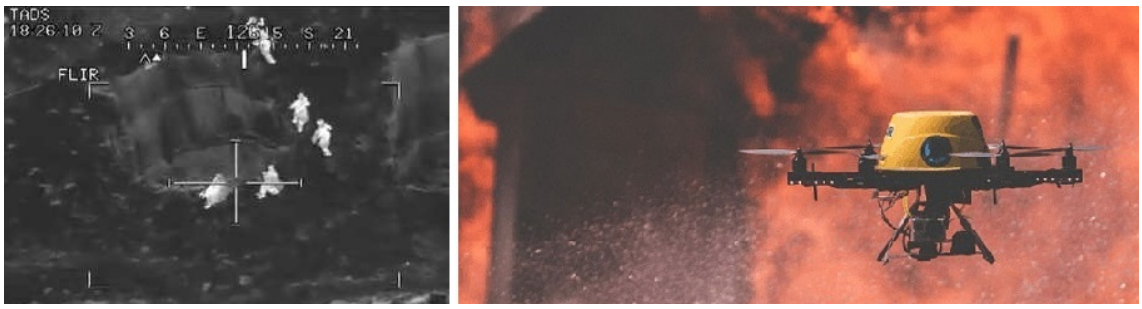
Premda se BL razlikuju po namjeni nije rijetkost da dijele istu platformu. To se vidi na slici 11. gdje je slijeva prikazan kineski dron DJI u civilnoj uporabi kao dron s kamerom, a zdesna je DJI Phantom prenamijenjen za borbenu uporabu kao letjelica s bombama. DJI Phantom dronovi proizvode se od 2013. g. i trenutno na tržištu postoje četiri generacije. [15]

Slika 11. Različite uporabe iste platforme (DJI Phantom)

Kao što je prije spomenuto postoje i drugačije podjele bespilotnih letjelica, npr. na osnovu mase ili prema značajkama leta kao što su najveća visina leta, trajanje leta ili brzina. Te podjele ovdje nisu predstavljane jer se često razlikuju od države do države i njihovih agencija koju su zadužene za nadzor i zakonsku regulativu u području zračnog prometa.

1.1.4. Primjena

Dronovi se još uvijek u najznačajnijoj mjeri primjenjuju u profesionalnim službama zaduženima za sigurnost. Vojne, policijske i tajne službe koriste dronove kao izvidna sredstva za nadzor događaja ili pograničnih područja, kao leteće mete za vježbu ili pak kao alat za provođenje oružanih akcija. Vatrogasci i spasilačke službe, također, kao službe uklanjanja ugroza često rabe bespilotne letjelice za izviđanje i nadzor požarišta iz zraka ili za brzo pretraživanje velikih otvorenih područja u akcijama spašavanja. Slikovni primjeri profesionalne uporabe besposadnih letjelica dani su slikom 12. gdje se može vidjeti uporaba u koordiniranju vojne akcije pomoću termalne kamere ili u vatrogastvu, za izviđanje požarišta, potragu za unesrećenima i organizaciju vatrogasnog osoblja. [1] [2]



Slika 12. Profesionalna uporaba BL u službama sigurnosti

Što se pak tiče civilne profesionalne primjene, ona se ogleda pri geodetskim snimanjima i izmjerama iz zraka, izradi zračnih fotografija pri provedbi arheoloških istraživanja ili dokumentaciji događaja. Prirodni fenomeni kao što su klizišta, životinjske migracije, razvoj bolesti u poljoprivrednim i šumarskim dobrima izvrsno se mogu nadzirati prikladno opremljenim besposadnim letjelicama. Slika 13. primjer je civilne profesionalne uporabe u poljoprivredi za poslove prebrojavanja i nadzora životinja na otvorenim i udaljenim ispašama, a na desnoj se strani daje primjer iz elektroprivrede u kojoj se nadzor komponenata dalekovoda provodi iz zraka pomoću termovizijskih kamera. [1] [2]

Slika 13. Civilna profesionalna uporaba besposadnih letjelica

Amateri, s druge strane, BL koriste kao puko sredstvo za zabavu i realizaciju manjih vlastitih projekata jer u rukama imaju sredstvo, dron, kojim uz malo volje i spretnosti mogu svi upravljati. [1] [2]

1.1.5. Tržište

Tržište bespilotnih letjelica namijenjenih vojnoj uporabi predvođeno je tvrtkama iz SAD – a i Izraela i to s proizvodnog, tj. izvoznog aspekta. S druge strane, najveći uvoz bilježe Velika Britanija i Indija. Dok su američke kompanije (Northrop Grumman, Lockheed Martin, General Atomics i dr.) više bazirane na velike naoružane bespilotne letjelice, izraelske su kompanije (Elbit Systems, BlueBird Aero Systems, IAI itd.) usmjerene na proizvodnju manjih bespilotnih letjelica za nadzor. Drugi značajni proizvođači vojnih dronova su još i švedski Saab, francuski Dassault Aviation i SAGEM, europska korporacija više država EADS (Airbus), indijski DRDO, ruska ZALA, Yakovlev... [2] [7]

Tržište je besposadnih letjelica za civilnu uporabu znatno mlađe od vojnog tržišta dronovima i predvođeno je kineskim kompanijama (DJI, Yuneec, Autel Robotics i drugi). Postoje i kompanije koje su izniknule iz uspješnih startup – a ili su pak nastavak studentskih projekata i istraživanja tijekom izrade završnih i diplomskih zadataka. Zbog svojih nižih cijena (često ispod 1000 USD) i zadovoljavajućih performansi nerijetko se dronovi namijenjeni civilnoj uporabi koriste za vojne i policijske svrhe u zadaćama kao što su, primjerice, lakše akcije nadzora. Na taj su način dobivena povoljnija i jednostavnije upravljiva sredstva za nadzor u usporedbi sa skupim i profesionalnim vojnim dronovima. [2] [7]

1.1.6. Sigurnost i zaštita

1.1.6.1. Načini korištenja dronova sa sigurnosnog aspekta

Kad se BL koriste na nepropisne načine mogu dovesti do određenih štetnih događaja. Stoga se uporaba dronova može okarakterizirati na neki od sljedećih načina: [17]

- stručno i pravilno, tako da njima upravlja educiran i ovlašten pojedinac ili organizacija;
- nestručno i nepravilno, tako da njima upravlja needuciran i neovlašten pojedinac ili organizacija;
- namjerna i svjesna zlouporaba s ciljem nanošenja štete.

Zadnja dva načina korištenja dronova predstavljaju u manjoj ili većoj mjeri nepoželjne uporabe; stoga će se u narednim odlomcima predstaviti realni primjeri potencijalno štetnih događaja bilo da se radi o nehotičnim ugrozama ili zlonamjernoj uporabi. Prije prelaska na nepoželjne načine uporabe dronova, slikom 14. prikazat će se stručna uporaba bespilotnih letjelica. Slijeva je svjetlosni spektakl kao ekološki prihvatljiva zamjena za vatromet, ali i sredstvo demonstracije mogućnosti BL i kompanije Intel koja je događaj i priredila. [16] Zdesna je plakat kojim se poziva građane SAD – a da ne koriste dronove bez dozvola mjerodavnih službi u okolici požarišta jer ometaju leteće vatrogasne snage. [2]

Slika 14. Dronovi kao umjetničko sredstvo i objekt propagande

1.1.6.2. Događaji uzrokovani nestručnom i nepravilnom uporabom BL

U područjima s gustim zračnim prometom bespilotne letjelice mogu ugrožavati sigurnost zbog mogućih sudara s drugim letećim objektima ili pak dodatno opterećuju rad pilota i kontrolora zračne plovidbe u područjima zračnih luka. Zbog navedenog u brojnim su državama upravljanja bespilotnim letjelicama u području zračnih luka podvrgnuta strogim zakonskim zabranama. A ako ipak dođe do takvih štetnih događaja nije rijetkost da se zračne luke zatvaraju do razrješenja nenadanih okolnosti. [2]

Premda je bilo i ranijih incidenata, osobito s vojnim dronovima, a i onih za koje se sumnja da su uključivali dronove, no te sumnje nikada nisu sa sigurnošću potvrđene, moguće je navesti neke od prvih zračnih incidenata pri kojima su bespilotne letjelice ugrozile

sigurnost drugih letjelica s posadom. Sva tri niže obrađena događaja, na sreću, nisu dovela do ljudskih žrtava i značajnijih materijalnih šteta, no svakako su u određenoj mjeri izazvali stresne događaje za ljude koji su u njima sudjelovali. Predstavljeni incidenti lako su mogli prerasti i u nesreće s fatalnijim posljedicama. [18]

Prvi sa sigurnošću potvrđeni sudar bespilotne i klasične letjelice je onaj koji se dogodio 21. rujna 2017. u američkoj saveznoj državi New York kada se dron udaljio preko četiri kilometra od rukovoditelja te izazvao sudar s helikopterom Black Hawk. Ne čudi stoga što državne agencije priječe let amaterskim dronovima izvan radijusa u kojem je moguće ostvariti vizualni kontakt. [18]

12. je listopada 2017. godine na kanadskom nebu iznad grada Quebeca došlo do udara bespilotne letjelice u krilo malog putničkog aviona. Prema dostupnim podatcima o visini na kojoj je došlo do sudara navodi se 450 m iznad tla što predstavlja višestruko prekoračenje dopuštene visine leta za amaterske dronove u Kanadi. [18]

Prvi ikad zabilježen incident u kojem su sudjelovale besposadna letjelica i balon na vrući zrak dogodio se 10. kolovoza 2018. g. u američkoj saveznoj državi Idaho. Iako se incident dogodio u okolici zračne luke, unutar radijusa od 8 kilometara, pilot balona radiovezom je bio u kontaktu sa zračnom kontrolom i ostalim pilotima te nije ometao zračni promet. To se ne može reći za još uvijek neidentificiranog pilota bespilotne letjelice koji je letio u zaštićenom prostoru bez valjanih prijava i dozvola. [18]

Iz ovih primjera, uz pretpostavku da se ne radi o namjernom izazivanju štetnog događaja, može se vidjeti da se nesreće događaju kada se ne poštuje zakonska regulativa za korištenje bespilotnih letjelica od strane (ne)iskusnih amatera i hobista. Primjerice, ne poštuju se propisane visine leta, nedozvoljeno se ometa prostor s intenzivnim zračnim prometom, kao što su zračne luke, ili se BL udaljavaju od upravljačke pozicije u toj mjeri da je narušeno održavanje vizualnog kontakta.

1.1.6.3. Događaji uzrokovani svjesnom i namjernom zlouporabom BL

Besposadne letjelice mogu biti i zlonamjerno rabljene. Zbog sposobnosti da ponesu određenu količinu tereta, dronovi se lako mogu pretvoriti u sredstvo za izazivanje terora ili, primjerice, u izvrstan alat za krijumčarenje. Ponekad ih je teško uočiti zbog tihog leta kojeg omogućuje elektromotorni pogon, a nipošto nije od pomoći ni to što let na nekoliko metara od tla i mogućnosti izrade iz polimernih materijala stvaraju letjelice koje radarske sustave čine

neupotrebljivima. Treba spomenuti i da, primjerice, iako redarstvene snage uspiju zarobiti dron, pronalazak počinitelja često bude bezuspješan pa pilot rijetko kada podliježe bilo kakvim sankcijama. [2]

Možda je jedan od najpoznatijih incidenata na domaćim prostorima onaj koji je uzbunio pripadnike hrvatskih sigurnosnih službi na svečanoj inauguraciji predsjednice, Kolinde Grabar – Kitarović, 15. veljače 2015. g. u Zagrebu. Neidentificirana letjelica snimala je tog dana inauguraciju iz zraka, o čemu adekvatne službe nisu bile obaviještene. S obzirom na to da se radilo o štićenom događaju visokog prioriteta, sama pojava neprijavljene letjelice izazvala je nelagodu u sigurnosnim redovima. [19]

Još jedan incident čiji je akter visokopozicionirana politička osoba je i onaj koji se dogodio u rezidenciji japanskog premijera Shinzo Abea u travnju 2015. godine kada je protunuklearni aktivist dronom dostavio radioaktivni pijesak iz područja oštećene nuklearne elektrane u Fukushimi u zgradu u kojoj boravi premijer. Dron s teretom otkriven je nakon više od 20 dana i to slučajno od strane jednog zaposlenika koji je vodio program upoznavanja novih djelatnika sa zgradom. Prema dostupnim informacijama sadržaj nije predstavljao opasnost za ljude zbog niskih izmjerenih doza radioaktivnosti, a aktivist koji je odgovoran za ovo djelo sam se predao policiji nekoliko dana nakon objave incidenta u javnosti. [20]

Iako, na sreću, ove dvije opisane situacije zlouporabe drona nisu imale značajnije ili gotovo nikakve štetne posljedice po pojedince, bacile su ipak tamnu mrlju na BL. Kako se ističe u oba članka, ovi događaji samo su dodatno potaknuli ili ubrzali izmjene zakonskih pravila vezanih uz korištenje bespilotnih letjelica. Treba navesti da postoje i brojni zabilježeni slučajevi zlouporabe pri transportu narkotika ili neki koji se povezuju čak i s terorističkim grupacijama kada nošeni teret nerijetko biva neko destruktivno sredstvo poput bombe. [21]

Slika 15. prikazuje namjernu zlouporabu besposadnih letjelica. Na lijevom segmentu slike prikazana akcija uklanjanja drona s radioaktivnim materijalom iz prostora rezidencije japanskog premijera, a zdesna se vidi oborena neidentificirana bespilotna letjelica korištena na granici Meksika i Sjedinjenih Američkih Država tijekom krijumčarenja droge.

Slika 15. Namjerna zlouporaba besposadnih letjelica

1.1.6.4. Protudronska zaštita

Kako bi se uklonile potencijalne opasnosti koje se mogu izazvati nestručnom ili zlonamjernom uporabom bespilotnih letjelica, na tržištu su se našla razna rješenja koja najčešće nastoje prizemljiti, tj. oboriti dron u jednom komadu – ovdje se prvenstveno govori o manjim dronovima za amatersku uporabu, a ne o velikim, vojnim, besposadnim letjelicama.

Neka od rješenja su, primjerice, puška koja ispaljuje kapsulu s mrežom i padobranom u koju dron biva uhvaćen te prihvatljivo prizemljen. Jedan je od načina za uklanjanje nepoželjnih dronova i s pomoću drugog drona kojeg kontrolira neka od službi zaduženih za sigurnost. U tom slučaju redarstvena BL izbacuje mrežu pa obara ili odnosi neprijateljski dron zarobljen u mreži u sigurnu zonu što je vidljivo na lijevom dijelu slike 16. Postoje i egzotičnija rješenja kada se ometa veza između neidentificiranog drona i njegovog pilota, pri čemu neidentificirani dron ostaje bez navođenja te se u takvim okolnostima može sam prizemljiti. No nije rijetkost da neka od obrambenih besposadnih letjelica hakira neprijateljski dron i potpuno preuzme kontrolu nad njim. Na kraj nepoželjnim bespilotnim letjelicama, možda na najzanimljiviji, prema nekima pomalo i etički upitan način, stale su francuske i nizozemske policijske snage koje su u sustav protudronske obrane uvele velike ptice poput orlova. Pticu u napadačkoj akciji na dron prikazuje desni dio slike 16.

Vidi se, dakle da se ovisno o području na kojem je potrebno neutralizirati neželjeni dron može birati prikladna zaštita, tako da, primjerice, oborena bespilotna letjelica ne ozlijedi prolaznike u urbanim sredinama ili ne izazove aktivaciju oružja kad je dron korišten u terorističke svrhe. [22]

Slika 16. Obrana od nepoželjnih dronova

1.1.7. Hrvatska zakonska regulativa u uporabi sustava bespilotnih zrakoplova

1.1.7.1. Opće odredbe i pojmovi

Bespilotne su letjelice, kao što je već ranije istaknuto, unazad nekoliko posljednjih godina postale izrazito popularne u raznim uporabama, bilo da se radi o profesionalnoj uporabi ili tek običnom amaterizmu. Zbog načina korištenja koji ponekad u svojoj podlozi ima štetno djelovanje po pojedince i okolinu, nužno je bilo provesti izradu pravnih akata kojima bi se uporaba bespilotnih letjelica dovela u uređeni pravni okvir. Prvi zakoni koji se odnose na sustave bespilotnih zrakoplova u Republici Hrvatskoj priređeni su u prvoj polovini 2015. g., a bili su predstavljeni kroz Pravilnik o sustavima bespilotnih zrakoplova (NN 49/2015) kojeg je izdalo Ministarstvo pomorstva, prometa i infrastrukture, a potom i doradilo kroz Pravilnik o izmjenama i dopunama Pravilnika o sustavima bespilotnih zrakoplova (NN 77/2105). Danas je aktualan Pravilnik o sustavima bespilotnih zrakoplova pod šifrom NN 104/2018. [23]

Na temelju prethodno navedenih Pravilnika dani su opći, tehnički i operativni uvjeti za sigurnu uporabu bespilotnih zrakoplova, sustava bespilotnih zrakoplova i zrakoplovnih modela te uvjeti kojima moraju udovoljiti osobe koje sudjeluju u upravljanju tim zrakoplovima i sustavima. Bitno je spomenuti da se sve odredbe iz oba Pravilnika odnose na bespilotne zrakoplove operativne mase (OM – ukupna masa u trenutku polijetanja) do i uključujući 150 kg, a koji se koriste na prostorima Republike Hrvatske. Postoje i iznimke, odnosno slučajevi na koje se ne primjenjuju odredbe Pravilnika i to u slučaju kada se bespilotni sustavi koriste za državne aktivnosti koje za cilj djelovanja imaju uklanjanja potencijalnih ugroza za građane i okoliš Republike Hrvatske. Takva se djelovanja, primjerice, ogledaju u poslovima potrage i spašavanja, gašenju požara, obalnom i carinskom nadzoru, ali i bilo kojem drugom pothvatu predvođenom od strane vojnih, policijskih, sigurnosno – obavještajnih i sličnih državnih agencija koje za svrhu imaju uspostavu i očuvanje blagostanja u državi. Treba također napomenuti da se prvi Pravilnik, NN 49/2015, ne odnosi na sustave bespilotnih zrakoplova ako se oni koriste u zatvorenom prostoru te ako ne mogu razviti kinetičku energiju iznad 79 J. Ovo zadnje ograničenje novi Pravilnik, NN 104/2018, ne poznaje i stoga se odnosi na sve BL neovisno o maksimalno postizivim kinetičkim energijama. [23] [24]

Terminološki gledano pojmovi kao što su „Agencija“ koristi se za Hrvatsku agenciju za civilno zrakoplovstvo; termin „operator sustava bespilotnog zrakoplova – operator“ podrazumijeva fizičku ili pravnu osobu koja se bavi izvođenjem letačkih operacija sustavom

bespilotnog zrakoplova; dok pak termin „pilot koji upravlja na daljinu – pilot“ predstavlja fizičku osobu odgovornu za sigurno upravljanje letom bespilotnog zrakoplova te njime upravlja ručno ili, ako bespilotni zrakoplov leti na automatiziran način, prati njegov pravac letenja i ima mogućnost intervencije i promjene pravca leta u svakom trenutku. Napokon, hrvatski zakoni bespilotne zrakoplove definiraju kao zrakoplove koji svoje letačke operacije izvode bez pilota u zrakoplovu, a koji mogu biti upravljani daljinskim putem od strane jednog ili više pilota ili pak letjeti tako da su prethodno programirani i autonomni. [23] [24]

U narednim će stranicama biti detaljnije predstavljena klasifikacija letačkih operacija koju donose Pravilnici. Osim toga, Pravilnici upoznaju interesne skupine za sustave bespilotnih zrakoplova s brojnim drugim uputama koje neće biti temeljito obuhvaćene ovim radom jer ga se ne dotiču u dovoljnoj mjeri. Neke od njih su, primjerice, upute koje se odnose na uporabu radiofrekvencijskog spektra, ugovaranje obveznog osiguranja, označavanje bespilotnih letjelica, upute za pravilno izvođenje letačkih operacija, obveze operatora i pilota BL, procjene rizika, ali i brojne druge stavke čijim se poštivanjem potencijalne opasnosti pri letenju bespilotnim zrakoplovima svode na najmanju moguću mjeru. [23] [24]

1.1.7.2. Stari Pravilnik o sustavima bespilotnih zrakoplova (NN 49/2015 i NN 77/2015)

Jedna od klasifikacija bespilotnih zrakoplova u hrvatskom zakonodavstvu dana je tako da se bespilotni zrakoplovi razlikuju prema operativnim masama u tri klase: [24]

- Klasa 5 – do 5 kilograma;
- Klasa 25 – od 5 do 25 kilograma;
- Klasa 150 – od 25 kilograma do i uključujući 150 kilograma.

Kako bi se što bolje definirala prava i obveze koje je nužno poštovati kako bi se ostalo na strani propisa Republike Hrvatske također su klasificirana i područja letenja koja se razlikuju međusobno prema izgrađenosti, naseljenosti i prisutnosti ljudi; područja su letenja stoga svrstana u četiri niže navedene klase: [24]

- Klasa I – područje u kojem nema izdignutih građevina ili objekata i u kojem nema ljudi, osim rukovoditelja i osoblja koje je nužno za letenje;
- Klasa II – područje u kojem postoje pomoćni gospodarski objekti ili građevine koje nisu namijenjene za boravak ljudi i u kojima nema ljudi, osim rukovoditelja i osoblja koje je nužno za letenje, a dozvoljen je samo povremeni prolazak, bez zadržavanja ljudi kroz područje (biciklisti, šetači i sl.);

- Klasa III – područje u kojem postoje građevine ili objekti primarno namijenjeni za stanovanje, poslovanje ili rekreaciju (stambene zgrade, kuće, škole, uredi, sportski tereni, parkovi itd.);
- Klasa IV – područje uskih urbanih zona (središta gradova, naselja i mjesta).

Na osnovu prethodno predstavljenog može se definirati tablica 1. s kategorijama letačkih operacija. Vidi se da su kategorije letačkih operacija svrstane u četiri grupe i to tako da grupa A ima najmanje zahtjeve, a grupa D najoštrija pravila kad su u pitanju određeni prohtjevi koji se očekuju od pilota i operatora bespilotnih zrakoplova, što se ovim radom neće obuhvatiti u značajnijoj mjeri. [25]

Tablica 1. Kategorije letačkih operacija

Klasa sustava bespilotnog zrakoplova	Klasa područja izvođenja leta			
	I Neizgrađeno područje	**II** Izgrađeno nenaseljeno područje	**III** Naseljeno područje	**IV** Gusto naseljeno područje
5 OM < 5 kg	**A**	**A**	**B**	**C**
25 5 kg ≤ OM ≥ 25 kg	**A**	**B**	**C**	**D**
150 25 kg ≤ OM ≤ 150 kg	**B**	**C**	**D**	**D**

1.1.7.3. Novi Pravilnik o sustavima bespilotnih zrakoplova (NN 104/2018)

Prema aktualnom Pravilniku o sustavima bespilotnih zrakoplova, NN 104/2018, koji je na snagu stupio 15. prosinca 2018. prestao je vrijediti raniji Pravilnik o sustavima bespilotnih zrakoplova (NN 49/2015 i NN 77/2015). Novi Pravilnik donosi zakonsku regulativu za sigurno korištenje svih bespilotnih zrakoplova čija je operativna masa manja ili jednaka 150 kilograma uključujući i one koji postižu maksimalnu kinetičku energiju ispod 79 J, a koje raniji Pravilnik nije regulirao. [23]

Novija, trenutno aktualna, kategorizacija i pravo izvođenja letačkih operacija slijedi prema niže navedenoj tablici 2. [23]

Tablica 2. Kategorizacija i pravo izvođenja letačkih operacija

	Kategorija letačkih operacija	**A**	**B1**	**B2**	**C1**	**C2**
BESPILOTNI ZRAKOPLOV (BZ)	Operativna masa BZ	OM < 250 g	250 g ≤ OM ≤ 900 g	OM < 5 kg	5 kg ≤ OM < 25 kg	5 kg ≤ OM ≤ 150 kg
	Najveća brzina BZ prema tehničkim specifikacijama proizvođača	< 19 m/s	< 19 m/s	-	-	-
IZVOĐENJE LETAČKIH OPERACIJA	Dio dana	Dan/noć	Dan	Dan/noć	Dan	Dan/noć
	Područje izvođenja operacija	Naseljeno/ nenaseljeno	Nenaseljeno	Naseljeno/ nenaseljeno	Nenaseljeno	Naseljeno/nenaseljeno
ZAHTJEVI ZA PILOTA NA DALJINU	Minimalna dob	-	14 g. starosti ili manje uz nadzor punoljetne osobe	16 g.	18 g.	18 g.
	Polaganje teorijskog/praktičnog ispita	-	-	-	Položen teorijski ispit iz poznavanja primjenjivih zrakoplovnih propisa koji provodi Agencija	a) Položen teorijski ispit iz poznavanja primjenjivih zrakoplovnih propisa koji provodi Agencija b) Demonstracija pripreme leta i letenja
ZAHTJEVI ZA OPERATORA	Obveza evidentiranja/odobrenja operatora	-	-	Evidencija	Evidencija	Odobrenje
	Dokumentacija operatora	-	-	-	-	a) Operativni priručnik b) Zapisi o letu c) Upravljanje rizicima

1.1.7.4. Osvrt na hrvatsku zakonsku regulativu u uporabi sustava bespilotnih zrakoplova

Na osnovu prethodno predstavljenih hrvatskih Pravilnika kojima je obuhvaćeno korištenje bespilotnih letjelica može se vidjeti da operativna masa bespilotne letjelice ima važnu ulogu u definiranju prava i ograničenja pri izvođenju letačkih operacija. Na operativnu se masu kao ukupnu masu u trenutku uzlijetanja može utjecati smanjenjem mase same bespilotne letjelice ili ograničavanjem mase korisnog tereta.

U pionirskom Pravilniku o sustavima bespilotnih zrakoplova propisano je da se on ne odnosi na bespilotne letjelice koje ne mogu ostvariti kinetičku energiju iznad 79 J. Kako je poznata činjenica da je kinetička energija definirana kroz masu i brzinu koju ta masa postiže, jasno je da bi se smanjenjem operativne mase, odnosno mase same letjelice moglo utjecati na zakonodavne propise čak u toj mjeri da određena bespilotna letjelica ne bude obuhvaćena tim ranim Pravilnikom. To bi bila svakako olakotna okolnost za operatore i pilote takvih letjelica.

Aktualni Pravilnik, s druge pak strane, ne poznaje ograničenja u iznosu kinetičke energije te se tako odnosi na sve bespilotne letjelice izuzev onih koje se koriste u zatvorenim prostorima ili namjenu nalaze u poslovima specijalnih državnih službi zaduženih za osiguranje bezopasnih životnih uvjeta, kao što je već predstavljeno.

Na kraju, gledajući oba Pravilnika, operativna masa bespilotne letjelice koristi se za definiranje klasa letačkih operacija koje propisuju prava i obveze operatora i pilota bespilotnih letjelica. Sa spoznajom da se porastom operativne mase postrožuju prava i obveze operatora i pilota bespilotne letjelice, s proizvodnog se gledišta, odnosno iz pozicije konstruktora, nameće smanjenje mase kao jedan od glavnih ciljeva pri razvoju. Takvim se načinom razvoja koji u osnovi ima redukciju mase, osim utjecaja na zakonodavne propise, može povoljno djelovati i na druge čimbenike poput autonomije leta, mogućeg povećanja mase korisnog tereta i sl.

1.2. PTC Inc.

Eksperimentalni dio diplomskog rada izrađen je u programu Creo Parametric 5.0.4.0 zbog čega će u kratkim crtama biti predstavljena povijest i poslovanje tvrtke PTC Inc.

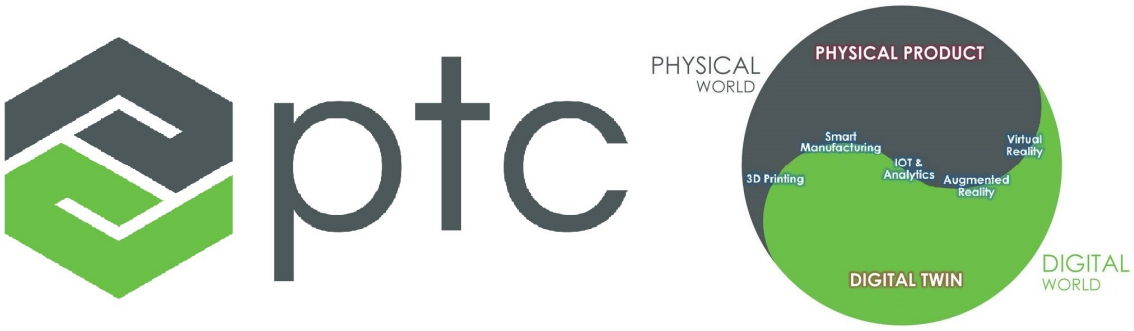
1.2.1. Povijest

U Needhamu, predgrađu Bostona, ne tako davne 1985. god. ruski je imigrant i matematičar dr. Samuel Geisberg osnovao računalnu tvrtku za razvoj softvera i pružanje usluga u oblasti računalnih znanosti. Tri godine kasnije, 1988. g., ista ta tvrtka, Parametric Technology Corporation, izbacuje na tržište svoj prvi komercijalni alat za oblikovanje pomoću računala (engl. *computer aided design* – CAD) naziva Pro/ENGINEER - jedan od pionirskih softvera za parametarsko modeliranje na tržištu. Prvi kupci ovog softvera došli su iz poznate tvrtke za proizvodnju poljoprivredne mehanizacije John Deere. U narednim je godinama uslijedio strelovit rast ponajviše zahvaljujući ugovaranju poslovanja sa svojim najvećim klijentom, američkim Caterpillarom. Na samom kraju milenija, 1998. g., potaknuti razvojem infrastrukture za uporabu globalne mreže na tržište izbacuju sustav za upravljanje životnim ciklusom proizvoda Windchill (engl. *product lifecycle management* – PLM). Kasnije se na postojeći sustav nadograđuju, među ostalima, i moduli za proširenu stvarnost (engl. *augmented reality*), međusobno povezivanje uređaja (engl. *Internet of Things* – IoT) i sl. [26] [27]

Zahvaljujući pružanju softverske podrške i povezanih usluga Parametric Technology Corporation u svojim poslovnim izvješćima 1999. godine iznosi podatak kako su dosegnuli brojku od 25 000 kupaca. Danas, prema profilu kompanije na Linkedin platformi, spominje se više od 26 000 kompanija koje su na neki način u svoje poslovanje ugradile proizvode tvrtke PTC Inc. Iz PTC Inc. Kao najzastupljenije oblasti u kojima osiguravaju programsku podršku navode tvrtke iz zračne i svemirske industrije, automobilske i visokotehnološke industrije te industrije potrošačke robe i industrijske opreme. Tvrtka posluje pod logom prikazanim na lijevom dijelu slike 17. [26] [27] [28]

Neke od inženjerima zanimljivijih promjena zbile su se unazad desetak godina. Kompanija PTC Inc. kakvu danas poznajemo dobila je svoje ime 2013. godine napustivši staro ime Parametric Technology Corporation. Nešto prije toga, 2010. god. došlo je do promjene imena njihova CAD proizvoda PRO/ENGINEER u PTC Creo. Ostale su promjene možda zanimljivije ekonomskim stručnjacima jer uključuju promjene u burzovnom poslovanju, širenje kroz kupovinu nemalog broja tvrtki (30+) koje se bave virtualnom i

proširenom stvarnošću, IoT tehnologijama i sličnim vidovima računalnih znanosti. Smjer poslovanja možda se najbolje vidi na desnoj polovici slike 17. Kroz ilustraciju je prikazano nastojanje tvrtke da osigura alat koji omogućuje izradu digitalnog blizanca (engl. *digital twin*) u zbilji izrađenog fizičkog proizvoda (engl. *physical product*). Kako bi se stvorila što jača spona između fizičkog i digitalnog svijeta ponuđeni su alati za pripremu aditivne proizvodnje (engl. *3D printing*), planiranje i provođenje optimizirane proizvodnje (engl. *smart manufacturing*), IoT i analitiku (engl. *IOT & Analytics*) te proširenu i virtualnu stvarnost (engl. *augmented and virtual reality*). [26]



Slika 17. PTC Inc. – logo i poslovna filozofija

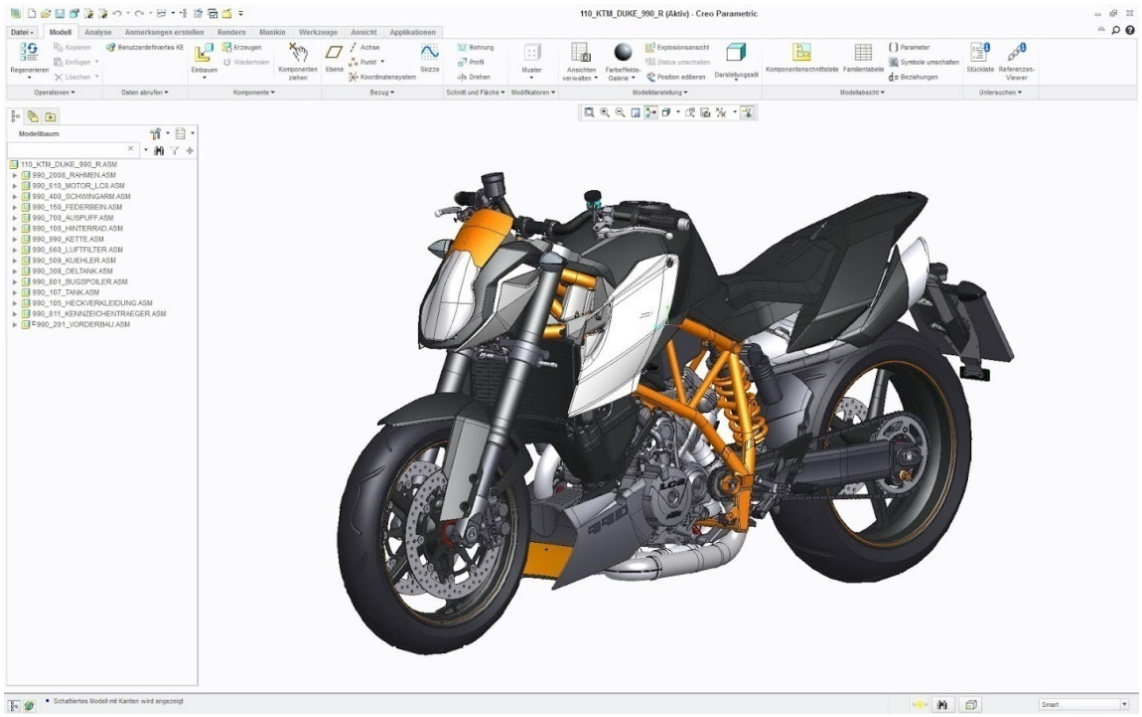
Do danas je PTC Inc. izrasla u globalnu tehnološku tvrtku čiji se rast i razvoj temelje na više od 6 000 zaposlenih u 30 zemalja. Važna su karika u tom lancu i njihovi tehnološki partneri, distributeri i drugi suradnici. Najbolji se dojam može steći uvidom u listu kompanija koje svoje poslovanje temelje na PTC Inc. proizvodima korištenjem PLM rješenja i CAD/CAM/CAE alata, (engl. *computer aided manufacturing* – CAM i engl. *computer aided engineering* – CAE). Neke od najpoznatijih kompanija su: MAN, SKF, Lenovo, iRobot, KTM, Piaggio, Volvo, Whirlpool, Embraer, Lockheed Martin, Fujitsu, Adidas Group, Airbus, AMD, Continental, GM, Lexmark, Lotto, Panasonic, Philips, Qantas, ZF,... [29] [30]

1.2.2. Proizvodi

PTC Inc. svoje proizvode dijeli u dvije velike grupe – „IoT grupa“ (engl. *IoT Group – Internet of Things and Augmented Reality business units*) i grupa „Rješenja“ (engl. *Solutions Group* – CAD, PLM, SLM). [26]

Kako je za potrebe ovog rada bilo nužno koristiti CAD alat potrebno je ukratko predstaviti i PTC Creo softver. PTC Creo paket alata predstavlja programsku osnovu za brojne primjene u modernom strojarstvu (CAD/CAE/CAM) pa tako softver u sebi uključuje proizvode koji omogućuju konstrukcijski razvoj proizvoda i određena rješenja za vršenje analiza i planiranje proizvodnje. PTC Creo se pokreće na Windows operativnim sustavima te

pruža moćan alat za 3D parametarsko modeliranje, 3D izravno modeliranje, izradu 2D tehničke dokumentacije, module za metodu konačnih elemenata, izradu tehničkih ilustracija i shema te razne mogućnosti za vizualizaciju i pregledavanje, a integracije kao što su Windchill, Mathcad i Arbortext sastavni su dijelovi PTC Creo softvera čije je sučelje prikazano na slici 18. Zbog svoje globalne tržišne orijentiranosti PTC Inc. je osim engleske verzije ponudio još i cjelovite (korisničko sučelje i podrška) ili djelomične jezične verzije (samo korisničko sučelje) i u njemačkoj, ruskoj, francuskoj, talijanskoj, španjolskoj, japanskoj, korejskoj i kineskoj inačici. [31] [32]



Slika 18. PTC Creo sučelje – sklop KTM Duke 990R

Za potrebe izrade eksperimentalnog dijela ovog diplomskog rada korišten je PTC Creo Parametric 5.0.4.0 programski paket čiju je uporabu omogućila tvrtka EAG Centar. Ova, ali i druge dostupne i fukncionalne verzije prikazane su niže navedenom tablicom 3. [31]

Tablica 3. PTC Creo verzije

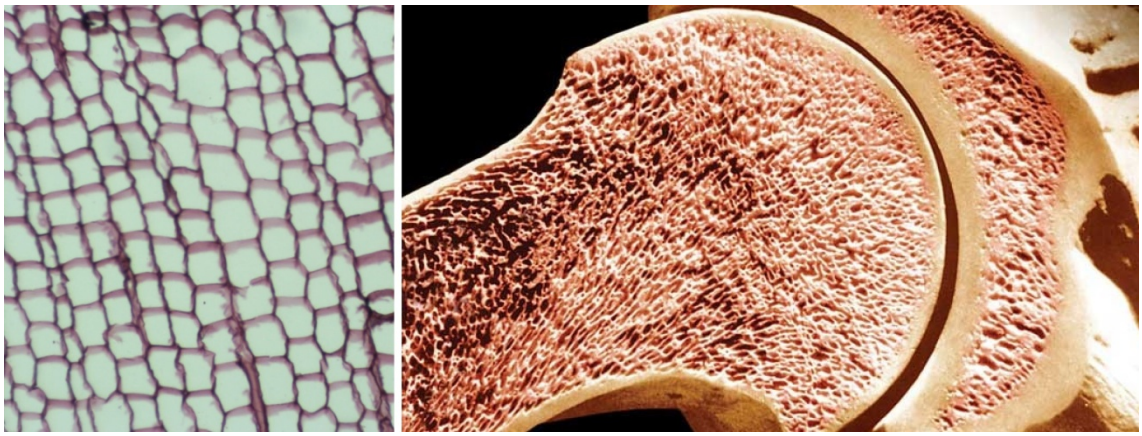
Verzija	Dostupno od
Creo 1.0	06. siječnja 2011.
Creo 2.0	27. ožujka 2012.
Creo 3.0	17. lipnja 2014.
Creo 4.0	15. prosinca 2016.
Creo 5.0	19. ožujka 2018.

1.3. Rešetkaste strukture

Potrebno je na početku ovog poglavlja istaknuti da se pojam rešetkaste strukture u daljnjim stranicama rada ne odnosi, primjerice, na sustave kao što su dalekovodi i mostovi koji su nastali ukrštanjem štapnih elemenata i njihovim međusobnim povezivanjem u čvorovima već je riječ o posebno strukturiranim materijalima čiji je volumen ispunjen istovremeno i materijom i šupljinom između dijelova materije.

1.3.1. Motivacija i definicija

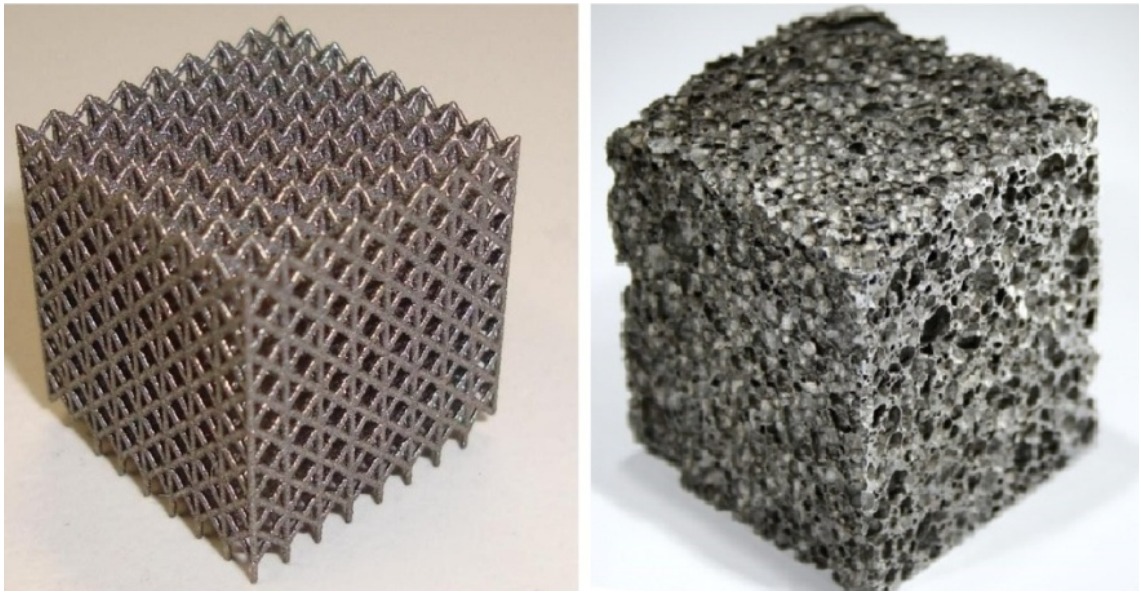
Rešetkastim je strukturama (engl. *lattice structure*) u posljednje vrijeme pridana velika pažnje od strane inženjerske struke, kako zbog njihovih povoljnih mehaničkih i estetskih svojstava, tako i zbog razvoja novih, ponajviše aditivnih tehnologija koje omogućuju proizvodnju takvih šupljikavih struktura. Inspiracija za stvaranje i razvoj rešetkastih struktura dolazi iz prirode. Na sličan su način građena drvna vlakna, pčelinje saće, kosti i zubi dajući tako zoran primjer rešetkasto strukturiranih prirodnih tvorbi. Potvrda prethodne misli može se pronaći na slici 19. gdje je slijeva dan mikroskopski prikaz drvnog tkiva hrasta plutnjaka – pluto, a nadesno se vidi presjek rešetkaste strukture u životinjskom tkivu tj. kosti. [33]



Slika 19. Rešetkasto strukturirana prirodna tkiva

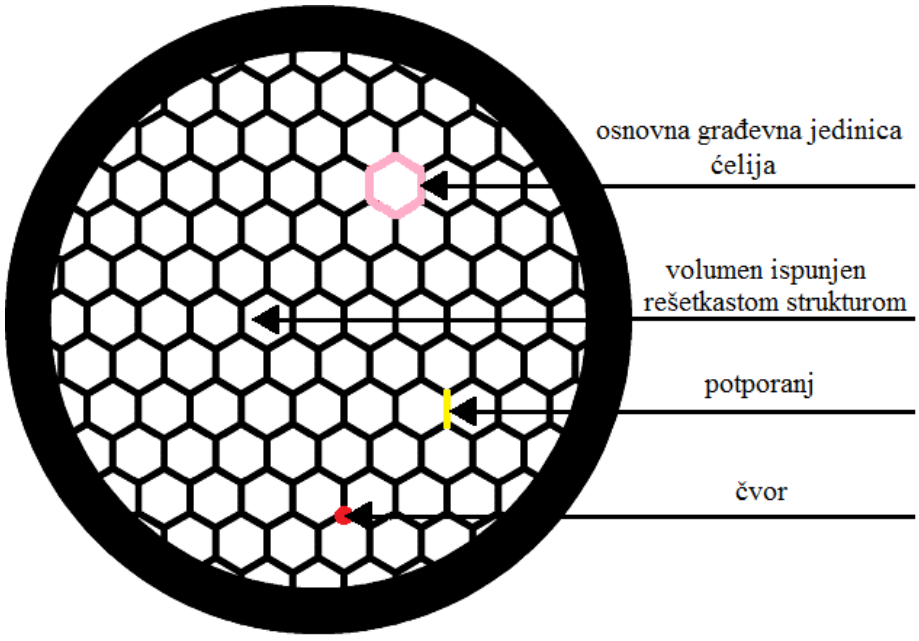
Za proizvode ispunjene rešetkastom strukturom može se reći da su načinjeni od dizajniranih materijala (engl. *architectured material*), odnosno, specijalne vrste materijala koja je nastala kombiniranjem dva različita materijala ili jednog materijala i šupljina unutar istog. U grupu dizajniranih materijala, osim rešetkastih struktura, mogu se ubrojiti, primjerice, i pjenasti materijali, sendvič konstrukcije, itd. Pjene ili ćelijaste strukture (stohastički šupljikavi materijali) i rešetkaste strukture (periodični šupljikavi materijali) poprilično su slične građe što se može vidjeti na slici 20. Na lijevom prikazu dan je uvid u volumen ispunjen rešetkastom strukturom, dok na suprotnoj strani stoji prikaz jednog volumena

izgrađenog pomoću pjenaste strukture. Premda su obje grupe dizajniranih materijala građene od šupljina i osnovnog materijala, planski građena rešetkasta struktura ima povoljnija mehanička svojstva od neplanski izgrađene ćelijaste strukture – pjene. [33]



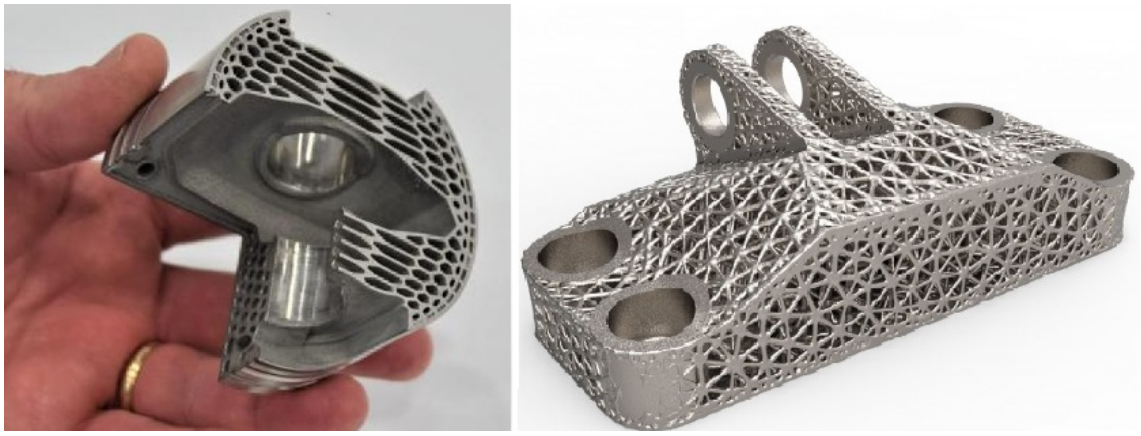
Slika 20. Šupljikavi dizajnirani materijali

Ukratko, rešetkasta je struktura, planski građena struktura nastala međusobnim povezivanjem osnovnih građevnih jedinica koje se, kao i kod pjenastih materijala, može nazivati ćelijama. Kako u ovom slučaju ćelije nisu stohastičke, može se govoriti i o pravilno definiranim potpornjima koji se međusobno sastaju u spojnim točkama, čvorovima i tako čine ćeliju. Slikom 21. dan je shematski prikaz jedne rešetkaste strukture s nazivima specifičnih građevnih elemenata. [33]



Slika 21. Rešetkasta struktura

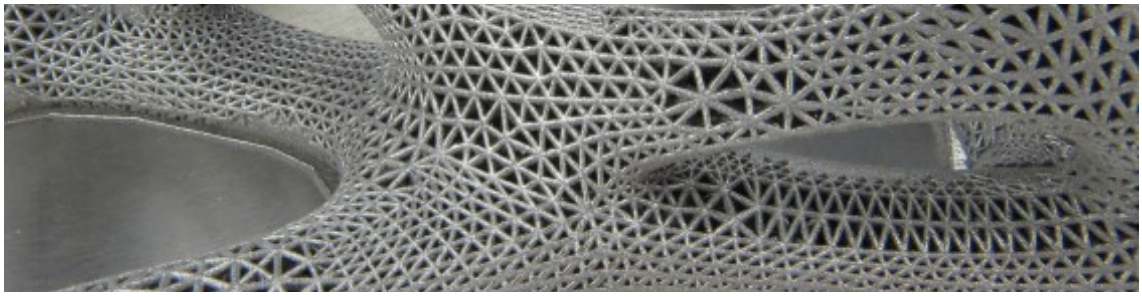
Korištenjem konstrukcija koje su bar u nekom svom dijelu izgrađene pomoću rešetkastih struktura štedi se na materijalu, što u današnje vrijeme može predstavljati dobar temelj za smanjenje troškova finalnog proizvoda. S manje materijala, odnosno lakšom konstrukcijom, prirodno se nameće i smanjenje troškova energenata, bilo tijekom proizvodnog postupka, transporta ili tijekom uporabe konstrukcija izrađenih iz rešetkastih struktura. Primjeri rešetkasto strukturiranih konstrukcija prikazani su slikom 22. Slijeva je klip motora s unutarnjim izgaranjem, a zdesna nosač iz lakih rešetkastih struktura. Redukcije mase mogu biti značajne čak u tolikoj mjeri da se dobivaju funkcionalni dijelovi s masama u iznosu od petine mase koju ima komponenta iste namjene izrađena nekim od konvencionalnih postupaka proizvodnje pri čemu je proizvod ispunjen materijalom u svojoj cjelokupnosti. Konvencionalni postupci poput obrade odvajanjem čestica ili kovanja nisu prikladni niti s ekonomskog niti s proizvodnog aspekta za izradu lakih rešetkasto strukturiranih konstrukcija svakodnevne uporabe. No, iskorištavanjem postupaka aditivne proizvodnje njihova izrada ipak postaje moguća i opravdana. [34] [35]



Slika 22. Proizvodi načinjeni korištenjem rešetkaste strukture

1.3.2. Ćelija – osnovna građevna jedinica rešetkaste strukture

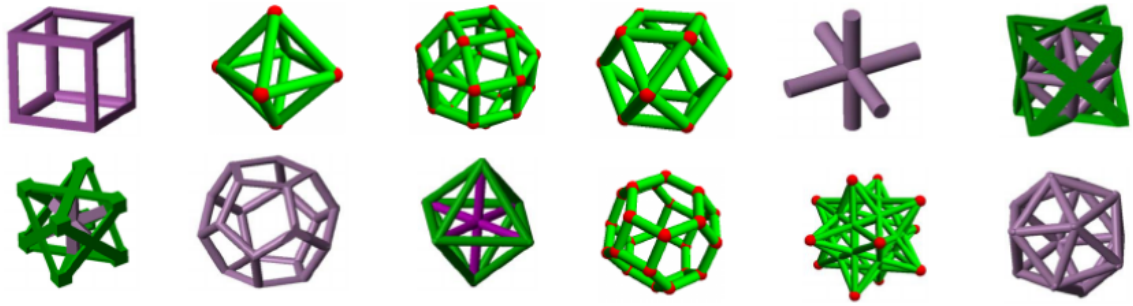
Ćelijom se, kao osnovnom građevnom jedinicom u rešetkastim strukturama, može manipulirati na razne načine, slika 23. Cilj je manipulacije dobiti optimalnu raspodjelu materijala koja sa sobom posljedično donosi i različita mehanička svojstva pojedinog segmenta konstrukcije, npr. dobivaju se krući ili podatniji dijelovi konstrukcije. Može se isto tako utjecati i na raspored mase zbog čega gustoća ne mora biti jednolika unutar nekog volumena. Sama ta nejednolikost u gustoći za sobom povlači i razlike u mehaničkim svojstvima određenog dijela konstrukcije. [35]



Slika 23. Ćelija kao osnova varijantnosti rešetkastih struktura

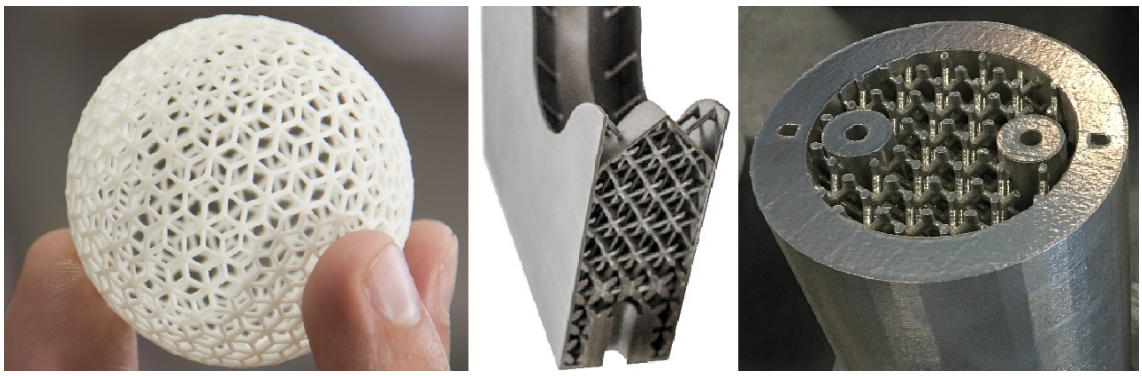
Prirodna tkiva prikazana u prethodnom poglavlju u različitim smjerovima bolje ili lošije podnose opterećenja, tj. pokazuju anizotropna svojstva. Slična stvar se može dobiti i kod rešetkasto strukturiranih materijala tako da se izmjenom nekog od ulaznih parametara pri definiranju svojstava ćelije i cjelokupne rešetke utječe na nosivost konstrukcije pri određenom modu opterećivanja. Parametri za variranje niže su pobrojani i ukratko predstavljeni. [33] [36]

- Osnovni oblik ćelije – definira položaj i usmjerenost potpornja, a samim tim i smještaj čvorova u kojima se ti potpornji sastaju. Vidljivo je na slici 24. da su neki od oblika ćelije kubični, oktogonalni, heksagonalni itd.



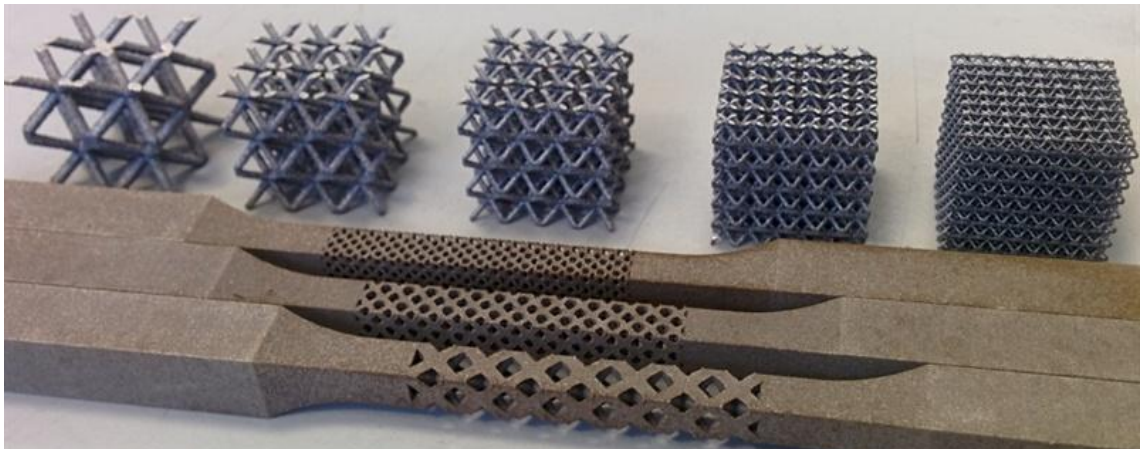
Slika 24. Osnovni oblik ćelije

- Rubno područje – definira volumen unutar kojeg su rešetkaste strukture smještene. Na slici 25. vide se razni tipovi rubnog područja; nalijevo struktura rešetke nije ograničavana punom plohom, dok su srednji i desni prikaz primjer kad je rešetkasta struktura definirana površinom i to za slučaj ravne, odnosno zakrivljene površine.



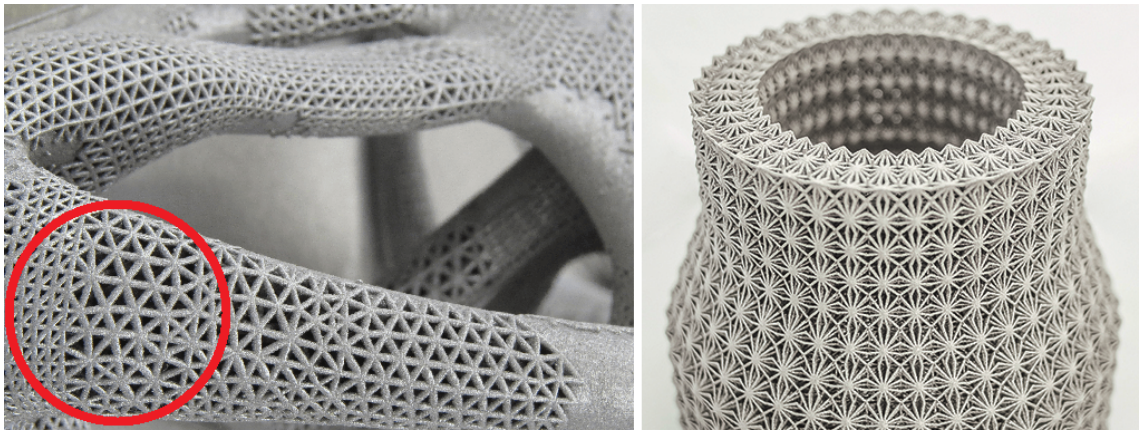
Slika 25. Rubno područje

- Relativna gustoća – definirana je omjerom volumena materijala koji izgrađuje ćeliju i sveobuhvatnog volumena u kojem se ta ćelija nalazi. Relativna gustoća ovisi, primjerice, od veličine i oblika poprečnog presjeka potpornja (okrugli, pravokutni, trokutasti ili neki poligonalni oblik) i čvorova od kojih je ćelija građena. Na slici 26. prikazana je promjena u relativnoj gustoći pa se vidi da s porastom veličine ćelije ukupan broj ćelija u volumenu koji je prožet rešetkastom strukturom opada.



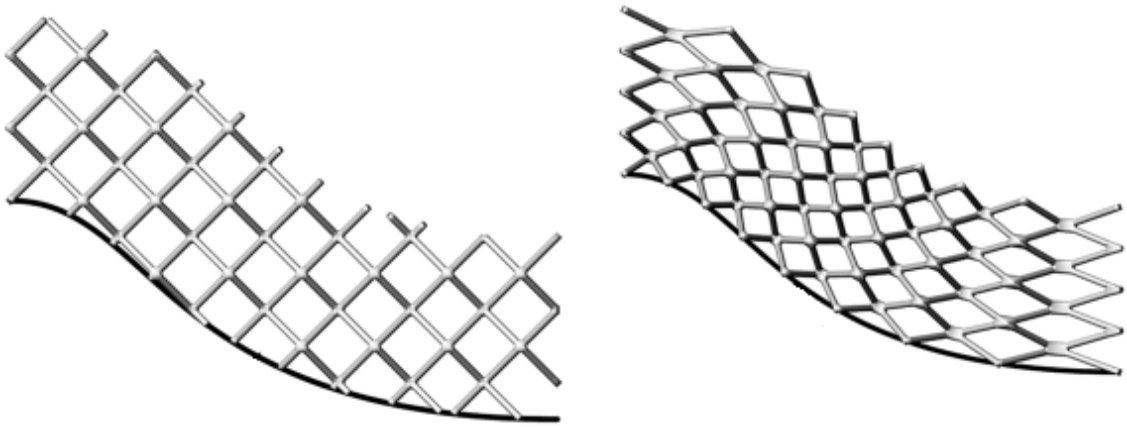
Slika 26. Relativna gustoća

- Progresivnost – rešetkasta struktura unutar nekog volumena može biti jednolika ili takva da joj primjerice dimenzije i oblik variraju, zbog čega se mogu dobiti dijelovi u kojima je rešetka gušća. To dovodi do stvaranja lokalnog područja u kojem su mehanička svojstva, kao što su čvrstoća (nosivost) i krutost, poboljšani. Takav se tip varijabilne rešetkaste strukture može vidjeti na lijevoj polovici slike 27. dok je na desnoj polovici lako vidjeti da je proizvod izrađen korištenjem jednolike ćelije. Osim varijacija u ovim geometrijskim svojstvima ćelije, može se utjecati i na orijentaciju potpornja kako bi se oni što adekvatnije usmjerili u odnosu na opterećenje koje djeluje na konstrukciju.



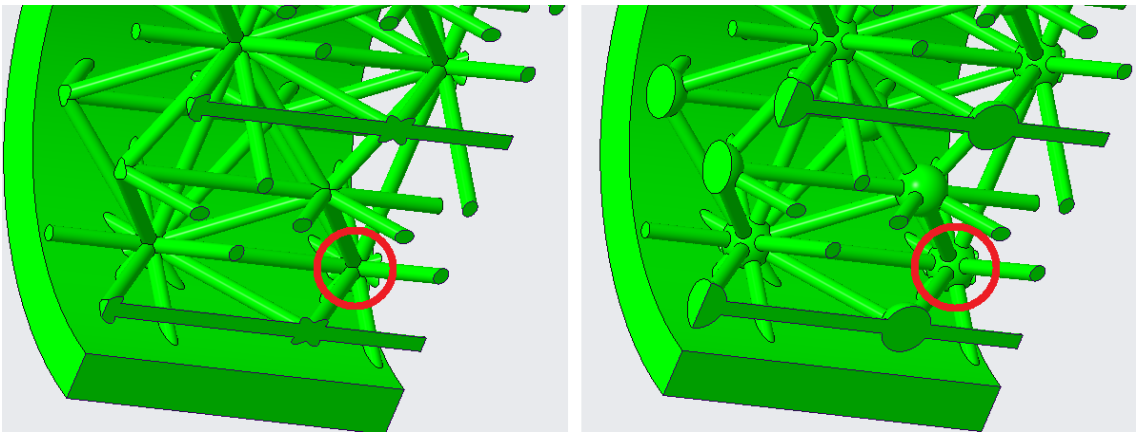
Slika 27. Progresivnost

- Konformnost – nametanjem uvjeta konformnosti rešetkasta struktura postaje prilagodljivija rubnim područjima pa je spoj između dva geometrijska diskontinuiteta blag. Kod nekonformne (uniformne) rešetkaste strukture to svojstvo se gubi te je rešetka usmjerena, primjerice, u smjeru koordinatnih osi i takvu usmjerenost zadržava unutar cijelog volumena, što proširivanjem do rubnog područja obično rezultira grubim i izravnim spojem. Slikom 28. gledajući slijeva nadesno prikazana je nekonformna rešetka pa zatim ona koja posjeduje svojstvo konformnosti.



Slika 28. Konformnost

- Čvor – mjesto gdje se sastaju potpornji, može se definirati tako da nalikuje kugli ili kocki ili čvora nekog specijalnog izgleda uopće ne mora biti. Upravo takav slučaj je dan slikom 29., a na desnoj polovici isti je izveden u kuglastom obliku.



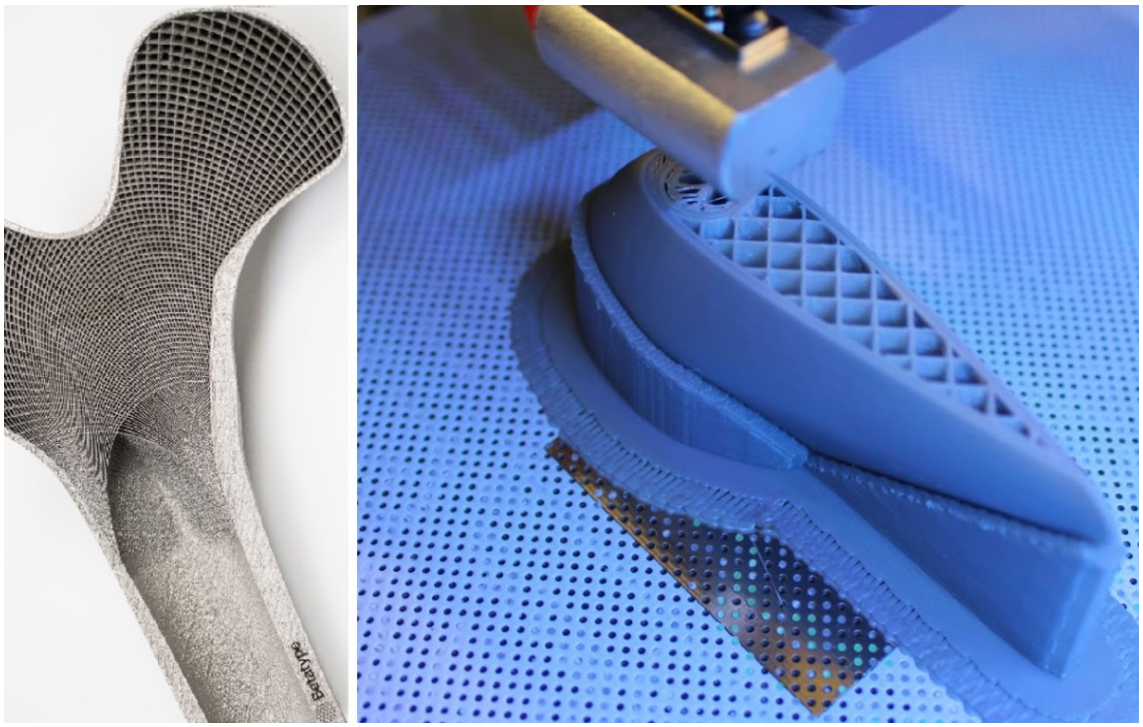
Slika 29. Čvor

1.3.3. Proizvodnja i podjela

Rešetkaste se strukture danas mogu učinkovito proizvoditi aditivnim tehnologijama. Jedan od problema s kojima se inženjeri moraju nositi je razvoj i uporaba modula za

generiranje rešetkaste strukture u digitalnim modelima koji će kasnije poslužiti kao podloga za izradu fizičkog modela načelima aditivne proizvodnje. Digitalni model proizvoda korištenjem rešetkastih struktura postaje računalno zahtjevan zbog velike količine podataka koji opisuju geometriju unutar volumena. Zbog toga rad s ovom značajkom vrlo brzo može postati spor i gotovo nemoguć s običnom, amaterskom, opremom, a za očekivati je da u jednom trenutku i profesionalni uređaji imaju pred sobom značajnu problematiku. Broj kombinacija rješenja koje je moguće generirati uporabom modula za rešetkaste strukture gotovo da je neograničen jer postoje mnogi parametri ćelije koje je moguće varirati što je ranije i prikazano. S druge strane, sve je to pridonijelo tomu da rešetkasto strukturirani proizvodi nisu samo prototipne verzije već mogu biti konkurentni proizvodima dobivenim postupcima konvencionalne proizvodnje. Kako bi se omogućila još intenzivnija uporaba ovih struktura u konstrukcijama nužno je omogućiti valjanu numeričku analizu čvrstoće komponenata izrađenih po načelima aditivne proizvodnje i rešetkaste strukture. [36]

Aditivnim postupcima, nekom od laserskih metoda, moguće je izrađivati rešetkaste strukture zadovoljavajućih svojstava. Kao polazni materijali najčešće se koriste razni metalni prahovi poput titanovih i kobaltnih legura, ali i tradicionalniji metali poput čelika i aluminija – lijevo na slici 30. Nije neobično vidjeti (zdesna na slici 30.) i rešetkaste strukture iz polimernih materijala kao što su poliamid (PA), poli(vinil – klorid) (PVC), polikarbonat (PC) i sl. [35] [39]



Slika 30. Rešetkasta struktura kao ispuna unutrašnjosti (metal i polimer)

Rešetkaste bi se strukture mogle podijeliti na mnogo načina, a kao potkrjepa ovom razmišljanju može se navesti široka mogućnost variranja parametara ćelije. A s druge, proizvodne, strane mogle bi se dijeliti ovisno o proizvodnoj tehnologiji i materijalu od kojeg su načinjene. Mogućnosti su brojne, no može se predložiti polazna podjela prema dimenzionalnosti koja je popraćena slikom 31.: [37]

- prizmatične rešetkaste 2.5D strukture – dimenzije ćelije se definiraju u dva smjera te se potom dobiveni presjek produžuje kroz volumen tvoreći strukture nalik pčelinjem saću;
- potpune rešetkaste 3D strukture – dimenzije ćelije se definiraju u sve tri koordinatne osi te se zatim ćelija umnožava do popunjavanja zadanog volumena čime se dobiva potpuna rešetkasta struktura.

Slika 31. Dimenzionalnost rešetkaste strukture (lijevo 2.5D, a desno 3D)

1.3.4. Primjena

Zbog mogućnosti izrade rešetkasto strukturiranih komponenata iz biokompatibilnih materijala nije neobično da se ovakve tvorbe koriste za izradu medicinskih konstrukcija. U tom slučaju mogu, zahvaljujući šupljikavosti, ponuditi dijelove pogodne za osteointegraciju. To je veoma bitno u zahvatima ugradnje umjetnog zgloba kuka, kada s vremenom živo tkivo prodire u šupljine implantata i dodatno fiksira usadak. Slikom 32. dan je prikaz trupa proteze koji se fiksira u bedrenu kost (crno) i umetak čašice (srebrno) koji se ugrađuje u zdjelicu na položaj prethodne oštećene zglobne čašice. Dodatno se na priloženoj slici 32. vidi rendgenski snimak s položajem usadaka nakon operativnog zahvata koji se naziva artroplastika i izvodi se u svrhu ponovnog postizanja gibljivosti zgloba. [38] [40]

Slika 32. Rešetkaste strukture u rekonstrukciji zgloba kuka

Zadržavanje povoljnih svojstava kao što su visoka čvrstoća unatoč redukciji mase, velike mogućnosti apsorpcije deformacijske energije te disipacija energije samo su pridonijeli uporabi rešetkastih struktura u vojnoj, zrakoplovnoj, automobilskoj i drugim industrijama. Primjeri sa slike 33. predstavljaju proizvode iz rešetkastih struktura i to slijeva element zrakoplovnog sjedala te primjer iz obućarstva pri izradi đona sportskih tenisica. [34] [41]

Slika 33. Rešetkaste strukture u svakodnevnim proizvodima

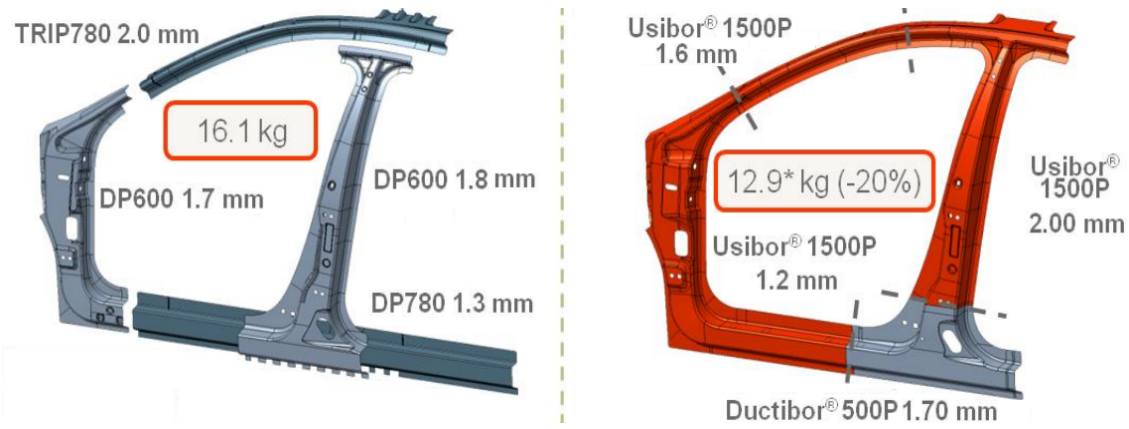
1.4. Optimizacija

U ovom je poglavlju predstavljena optimizacija (engl. *optimization*) – matematički alat u službi inženjera pri razvoju optimiziranih konstrukcija u građevini, strojarstvu ili bilo kom proizvodnom segmentu industrije. Optimizirana je konstrukcija ona konstrukcija koja je izvedena tako da predstavlja najbolje postignuće među konstrukcijama iste namjene. [42]

1.4.1. Svrha optimizacije

Posljednjih je godina zbog globalne dostupnosti informacija, kako potrošačima tako i proizvođačima, za kompanije koje teže postizanju vrhunskih poslovnih rezultata i više no bitno agilno odgovarati na kretanja i potrebe tržišta, a sve kako bi se osigurao proizvod poželjniji od konkurentskog. Poželjniji proizvod može se osigurati na brojne načine – povjerenjem u brend zbog prijašnje kvalitete, ranim izlaskom na tržište i inovativnim funkcijama, pristupačnošću cijenom ili specifikacijama boljima od konkurentskog proizvoda. Ovo posljednje, bolje specifikacije, može se razmotriti u temama poput snage, izdržljivosti, mase i dimenzija. Pri izradi vrhunskih proizvoda specifikacije se povlače na margine tehničkih mogućnosti što će se u nastavku izlaganja vidjeti na primjeru mase konstrukcije.

Redukcijom mase konstrukcije mogu se ostvariti značajni rezultati. Ukoliko se masa smanji utoliko se može govoriti o uštedama na troškovima materijala, obrade i transporta, a ne treba ni isticati kolike uštede se postižu korištenjem olakšanih konstrukcija. Mogu se dati brojni primjeri redukcije mase iz avio i auto industrije. Jedan je primjer dan pomoću slike 34. gdje se vidi smanjenje mase okvira vrata automobila na osnovu umanjenja brojnosti dijelova i promjene u debljini limova od kojih je okvir sastavljen. Može se bez zadrške reći da uistinu masa predstavlja dobru osnovu za smanjenje proizvodnih, manipulativnih i uporabnih troškova pa masu treba optimizirati tako da se s manje mase postigne isti ili čak veći cilj. [43]



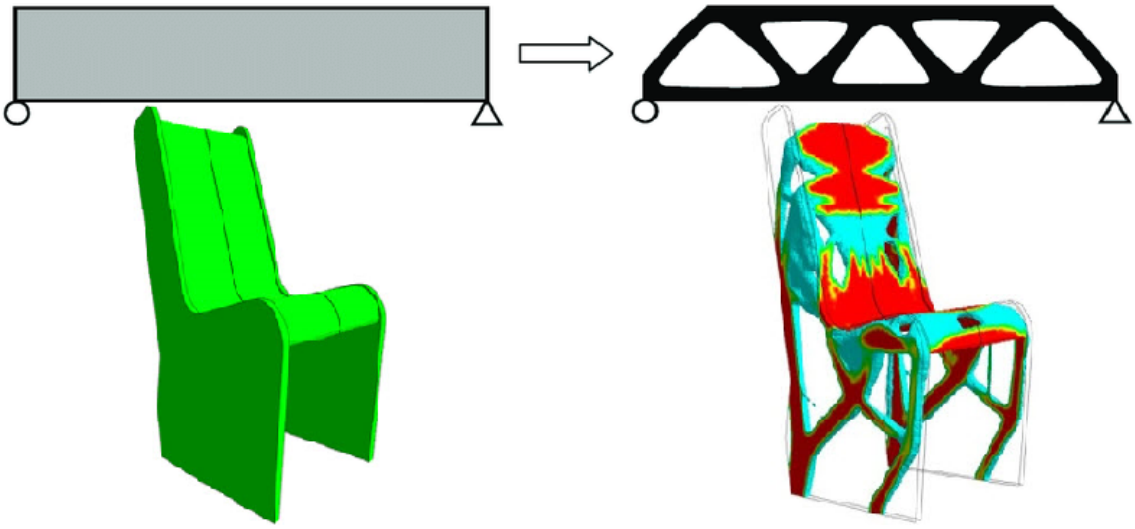
Slika 34. Optimizacija mase okvira automobilskih vrata

Zaključno, optimizacija predstavlja traženje ekstremnih vrijednosti, minimalnih ili maksimalnih, koje bi na prihvatljiv način zadovoljile željenu funkciju te pritom donijele što je više moguće dobra u finalni proizvod. [43]

1.4.2. Strukturalna optimizacija

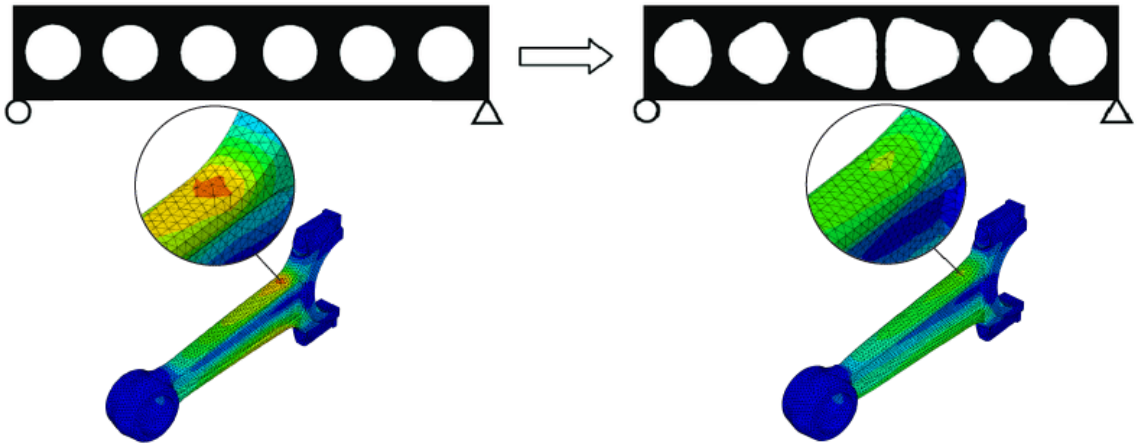
Optimizacija strojarskih, građevinskih i sličnih konstrukcija pod zajedničkim imenom naziva se strukturalna optimizacija. Kroz iterativni pristup problemu strukturalna optimizacija nastoji ponuditi naprednije izvedbe proizvoda sa stajališta mase, krutosti, nosivosti i vlastitih frekvencija konstrukcije. Tri su osnovna tipa strukturalne optimizacije: [44]

- Optimizacija topologije (engl. *topology optimization*) – pronalazak idejnih rješenja za set definiranih ulaznih ograničenja kao što su opterećenja, rubni uvjeti, maksimalne dimenzije i sl. Cilj je topološke optimizacije (TO) ponuditi povoljniju raspodjelu materijala unutar definiranog volumena kako bi se dobilo rješenja smanjene mase i zadovoljavajuće funkcionalnosti. Od ostalih, niže predstavljenih, tipova optimizacije razlikuje se po tome što rješenje neke iteracije može biti bilo kakva izgleda sve dok se poštuju ulazna ograničenja zbog čega se TO može koristiti kao alat za generiranje koncepata pri razvoju proizvoda. Trud i vrijeme koje je potrebno uložiti u definiranje problema TO u softveru relativno su maleni u usporedbi s vremenom i zahtijevanom računalnom snagom za izvršavanje optimizacije topologije. Brojnost varijabli u proračunu topološke optimizacije glavni je razlog potrebe za velikim računalnim resursima. Slikom 35. slijeva su prikazane konstrukcije prije TO, a zdesna se vide predložena optimalnija rješenja problema nakon optimizacije topologija. [45] [46]



Slika 35. Optimizacija topologije

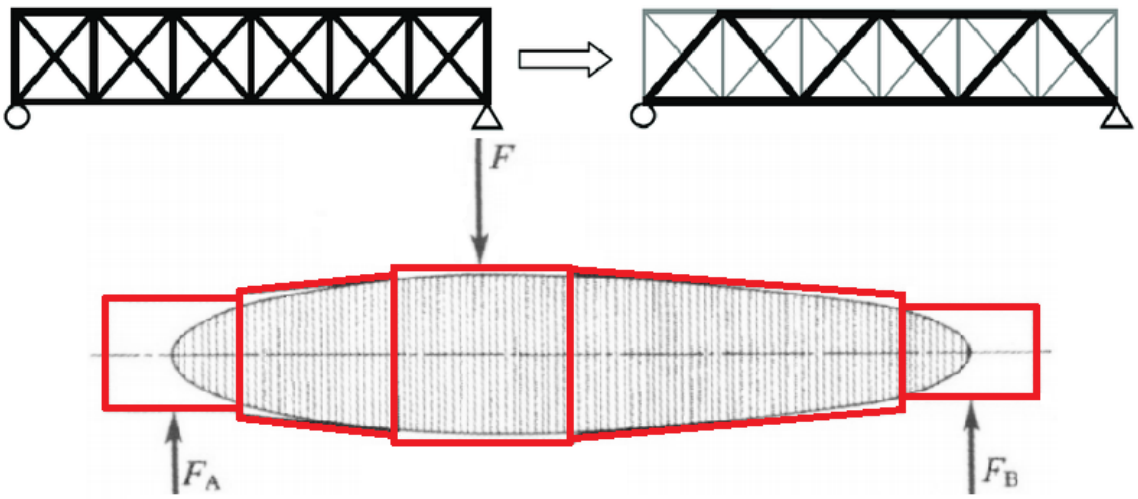
- Optimizacija oblika (engl. *shape optimization*) – pronalazak povoljnijeg oblika vanjske površine kako bi se smanjile nepovoljne vrijednosti nekog parametra na osnovu promjena u tom graničnom, površinskom sloju. Ovakvim tipom optimizacije mogu se ispitivati problemi kao što su određivanje minimalne vanjske površine koja definira neki volumen ili pak problematika lokalne koncentracije naprezanja u konstrukcijama. Promjena u radijusima zaobljenja klasična je akcija koja se poduzima u slučajevima s prekomjernim naprezanjima. Nakon što topološka optimizacija ponudi ideju rasporeda šupljina u nekoj konstrukciji, optimizacija oblika doradit će tu ideju tako da će izvesti konstrukciju čija su vršna naprezanja na površini umanjena. Dakle, optimizacija oblika koristi se za analizu i usavršavanje postojećih koncepata koji mogu biti generirani primjerice optimizacijom topologije. Iz perspektive uporabe računalnih resursa optimizacija je oblika manje zahtjevna od topološke optimizacije. Na slici 36. na lijevoj strani se vidi greda s otvorima i model ojnice s prikazom koncentracije naprezanja pomoću konačnih elemenata, a zatim je nakon provedene optimizacije oblika na desnoj strani dana greda s oblikom otvora koji pridonose manjim lokalnim naprezanjima. U prikazu optimirane ojnice može se vidjeti da je povećanjem radijusa zaobljenja gotovo u potpunosti uklonjeno kritično područje s visokim lokalnim naprezanjima. [47] [48]



Slika 36. Optimizacija oblika

- Optimizacija veličine (engl. *sizing optimization*) – pronalazak povoljnih dimenzija ovisno o opterećenjima koja djeluju na pojedinom segmentu konstrukcije. Polazni oblik konstrukcije nije podložan promjeni već se varira dimenzija poprečnih presjeka profila kako bi se finalno dobila konstrukcija smanjene mase sa zadovoljavajućom čvrstoćom, podatljivošću, ali i frekvencijskim odzivom. Od sve tri predstavljene optimizacije, optimizacija veličine je računalno najmanje

zahtjevna. Tomu je tako jer se jednostavnim postupkom mijenja jedna dimenzija konačnih elemenata čime se oponaša promjena u debljini stijenke profila. Treba istaknuti da se niti optimizacija veličine niti optimizacija oblika ne koristi za pronalazak idejnih rješenja, već je smisao njene uporabe postojeće rješenje optimizirati – optimizacija veličine djeluje u smjeru promjena u dimenzijama poprečnih presjeka profila kako bi se smanjila masa ili izbjegnulo nepovoljno područje vlastitih frekvencija. Slika 37. s lijeve strane prikazuje rešetkastu gredu prije optimizacije veličine, a zdesna se vide dva rješenja nakon provedene optimizacije veličine, pri čemu jedno rješenje ima manji broj štapova većeg poprečnog presjeka, dok drugo rješenje ima veći broj štapova manjeg poprečnog presjeka. Na slici 37. dodatno je dan i prikaz osovine (crveno) i u podlozi idealna osovina (crno) gdje se sama ta idealna osovina može gledati kao primjer optimizacije veličine. [46] [49]



Slika 37. Optimizacija veličine

1.4.3. Topološka optimizacija

1.4.3.1. Kako djeluje topološka optimizacija?

Kako se ovaj rad bavi topološkom optimizacijom ista će biti detaljnije opisana i to tako da je uz jednostavan opis optimizacije topologije dan prateći dvodimenzionalni primjer prema slici 38.

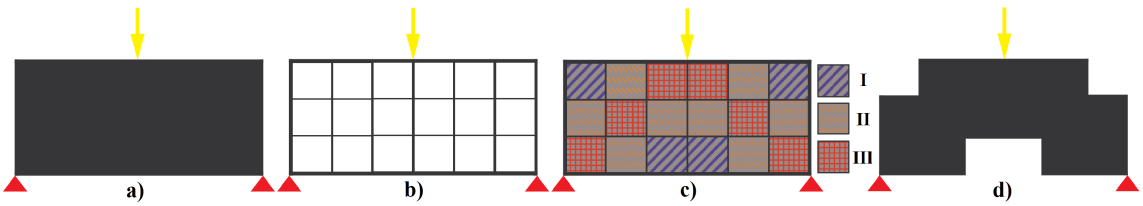
Ranije je pokazano da se topološka optimizacija koristi za definiranje raspodjele materije unutar nekog dozvoljenog volumena s ciljem zadovoljavanja nametnutih opterećenja i s njima povezanih rubnih uvjeta. Na početku provođenja optimizacije topologije može se kao definicija dozvoljenog konstrukcijskog prostora koristiti postojeće rješenje ili se može

krenuti i s puno prostijom ulaznom geometrijom kao što je, primjerice, kvadar koji definira dozvoljeni volumen u koji se mora moći smjestiti finalni proizvod. Slika 38. prikaz a) donosi uvid u primjer geometrije, opterećenja i rubnih uvjeta potrebnih za definiranje problema koji će se rješavati TO.

Neovisno o polaznoj definiciji volumena isti se mora diskretizirati pomoću konačnih elemenata kako bi se omogućilo određivanje bitnosti svakog pojedinog elementa za integritet konstrukcije. Prikaz b) na slici 38. predstavlja diskretiziranu geometriju testnog modela pomoću mreže konačnih elemenata.

Presudnost elementa u konstrukciji pri topološkoj optimizaciji određuje se preko energetskog stanja pojedinog konačnog elementa tako da se ustanovi energija deformiranja te potom, ovisno o iznosu iste, može se definirati bitnost pojedinog elementa za cjelovitost konstrukcije. Na slici 38. u prikazu c) vidi se mreža s tri klase konačnih elemenata čija je podjela izvedena na temelju iznosa energije deformiranja i to tako da su elementi I. klase oni s najmanjom energijom deformiranja, elementi II. klase imaju srednje velike iznose energije deformiranja, dok elementi III. klase posjeduju najveće energije deformiranja. Što je energija deformiranja nekog elementa veća, to je on važniji za postojanost konstrukcije i kao takav ne smije biti uklonjen pri optimizaciji.

U posljednjem prikazu slike 38., prikazu d), vidi se nova geometrija konstrukcije. Ta nova geometrija može predstavljati finalnu konstrukciju ili može poslužiti kao polazna vrijednost u novom krugu iteracije ukoliko neki od uvjeta nije zadovoljen kao što je to primjerice iznos maksimalne mase konstrukcije. Optimizacija topologije stoga predstavlja spregnuto iteracijsko djelovanje metode konačnih elemenata (engl. *finite element method*) kojom se određuju energetsko stanje i optimizacijskih algoritama (engl. *optimization algorithm*) čija je zadaća na osnovu energetskog stanja definirati bitnost pojedinog elementa za integritet konstrukcije. [50]



Slika 38. Mehanizam djelovanja topološke optimizacije

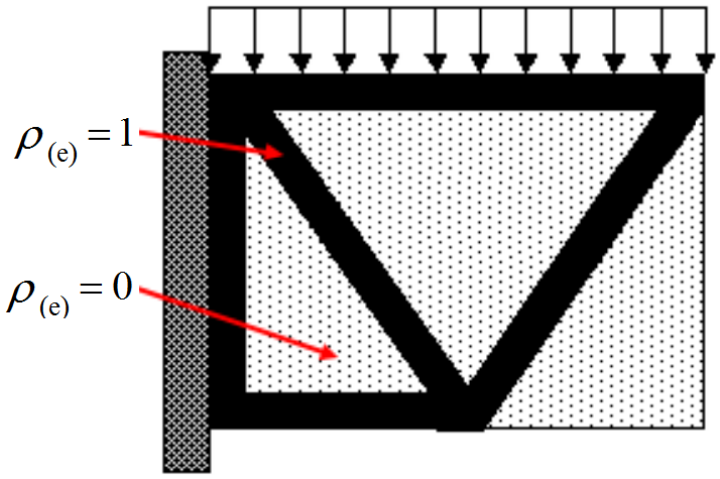
1.4.3.2. Metode topološke optimizacije

Četiri su osnovne metode za provođenje optimizacije topologije čiji su nazivi dani na engleskom jeziku: [51]

- *Bubble method*;
- *Evolutionary structural optimization*;
- *Solid isotropic material with penalization* (SIMP);
- *Level set method*.

Jedna od najčešće korištenih metoda za optimizaciju topologije je SIMP metoda zbog čega će ista biti i opširnije predstavljena. [45]

Mreža konačnih elemenata koja se koristi u diskretizaciji polaznog prostora u SIMP je metodi razmatrana kao fina mikrostruktura materijala s izotropnim svojstvima. U toj mikrostrukturi svaki konačni element opisuje dio volumena konstrukcije. Ovisno o važnosti konačnog elementa za cjelovitost konstrukcije može mu se pripisati određena vrijednost koja zahtjeva postojanje materijala na mjestu tog konačnog elementa ili u suprotnom konačni element nije od presudne važnosti za integritet konstrukcije te na njegovom mjestu materijal biva uklonjen. Samo uklanjanje konačnog elementa dovodi u zbilji do uklanjanja elementa volumena i posljedično do redukcije mase. Raspodjela bitnih konačnih elemenata, tj. raspodjela materijala unutar volumena može se opisati varijablom gustoće ρ. Slikom 39. dan je prikaz binarne vrijednosti varijable gustoće – $\rho_{(e)}$ koja je za svaki element volumena jedinstvena i može opisati postojanost ili odsutnost materijala u prostoru kojeg zauzima element. [52]



Slika 39. Gustoća i njena binarna vrijednost

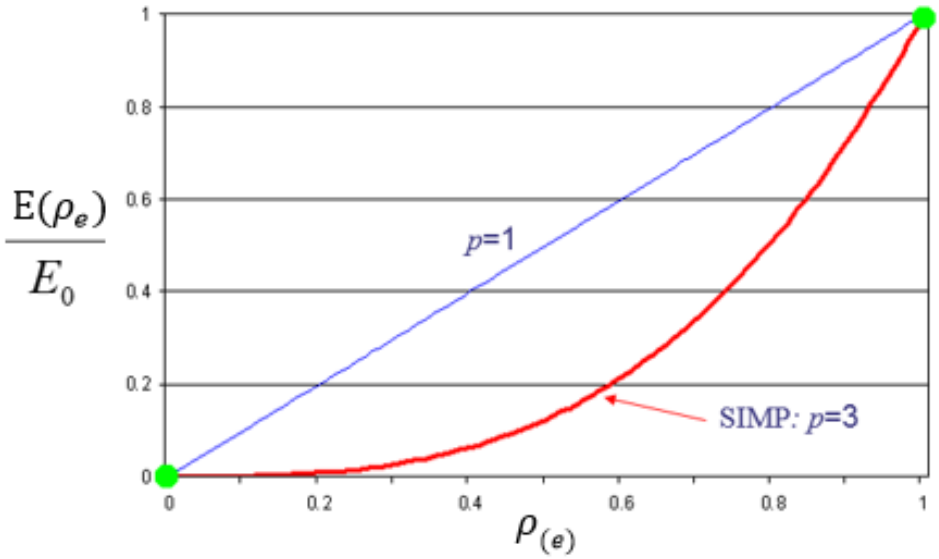
Kako bi se izbjegla stroga dvojnost rješenja odnosno vrijednost gustoće jednaka 1 ili 0 uvedena je kontinuirana funkcija relativne raspodjele gustoće. Od sada se svakom elementu

može pripisati vrijednost relativne gustoće u iznosu od neke minimalne vrijednosti $\rho_{\min}$ do 1. Elementi koji imaju vrijednost relativne gustoće jednaku minimalnoj vrijednosti relativne gustoće, $\rho_{(e)} = \rho_{\min}$, ustvari su prazni elementi bez materijala. Ta je vrijednost $\rho_{\min}$ koja je veća od 0 uvedena kako bi se osigurala numerička stabilnost pri analizi metodom konačnih elemenata. Relativna gustoća sa svojim kontinuiranim vrijednostima sada može opisati i neke srednje vrijednosti gustoće za pojedini element što može upućivati na poroznu mikrostrukturu koja bi u idućem krugu iteracije mogla biti uklonjena. [52]

U SIMP metodi kontinuirana funkcija relativne gustoće u uskoj je svezi s Youngovim modulom elastičnosti elementa $E\left(\rho_{(e)}\right)$ što se vidi prema jednadžbi (1). Ta jednadžba za svaki element (e) daje poveznicu između faktora relativne gustoće $\rho_{(e)}$ i Youngova modula elastičnosti izotropnog materijala E_0. Zbog kontinuiranosti relativne gustoće Youngov modul elastičnosti pojedinog elementa također poprima svojstvo kontinuiranosti. [52]

$$E(\rho_{(e)}) = \rho_{(e)}^{p} E_0 . \qquad \textbf{(1)}$$

Korekcijski faktor p umanjuje doprinos elemenata sa srednjim gustoćama ukupnoj krutosti. To se čini na način da se proces optimizacije usmjerava na elemente koji su s vrijednostima relativne gustoće bliži jedinici pa se ti elementi zadržavaju. Kada su vrijednosti relativne gustoće elementa bliske minimalnoj vrijednosti relativne gustoće $\rho_{(e)} \approx \rho_{\min}$ element će biti uklonjen. Eksperimentalno je dokazano da je vrijednost korekcijskog faktora $p = 3$ prikladna za uporabu premda najčešće može biti variran u rasponu od 1 do 3 što se vidi i na slici 40. [45] [52]



Slika 40. Grafički prikaz jednadžbe (1)

Smanjenje modula elastičnosti nekog elementa pridonosi smanjenju krutosti toga elementa što utječe na globalnu krutost koja se u SIMP metodi određuje prema jednadžbi (2). Član $\left[K_{(e)}\right]$ predstavlja matrica krutosti elementa, a N je broj konačnih elemenata kojima je opisana konstrukcija. [52]

$$K_{\mathrm{SIMP}(\rho)} = \sum_{e=1}^{N}\left[\rho_{\min} + (1-\rho_{\min})\rho_{(e)}^{p}\right]\left[K_{(e)}\right]. \qquad \textbf{(2)}$$

Topološkom se optimizacijom nastoji dobiti konstrukcija visoke sveukupne krutosti uz poštivanje ograničenja o ciljanoj masi. Kako je podatljivost recipročna vrijednost krutosti u slučaju da je krutost konstrukcije velika razumno je očekivati da će podatljivost iste biti malena pa se može reći da konstrukcija gubi na fleksibilnosti. Sveukupna podatljivost jednaka je sumi energija deformiranja u pojedinim elementima. Razumljivo je onda da optimizacijski algoritmi kroz iterativne procese pokušavaju pronaći takvu gustoću elemenata koja dovodi do minimiziranja vrijednosti globalne podatljivosti strukture što je prikazano u jednadžbi (3). Kako je ranije naglašeno da je podatljivost recipročna krutosti jedino ispravno za zaključiti je da minimiziranjem globalne podatljivosti dolazi do maksimizacije globalne krutosti. Cilj je optimizacije topologije dobiti male pomake, odnosno velike vrijednosti krutosti. $\left[u_{(e)}\right]$ u izrazu predstavlja vektor čvornih pomaka elementa (e), a vektor $\{\rho\}$ sadrži relativne gustoće svih elemenata $\rho_{(e)}$. [52]

$$\min C(\{\rho\}) = \sum_{e=1}^{N}(\rho_{(e)})^{p}\left[u_{(e)}\right]^{T}\left[K_{(e)}\right]\left[u_{(e)}\right]. \qquad \textbf{(3)}$$

Tijekom svake iteracije potrebno je poštivati nametnuta ograničenja kao što su, primjerice, vršna masa ili naprezanja u elementima. U slučaju ciljane mase prethodna misao može se zapisati pomoću jednadžbe (4) gdje je $v_{(e)}$ volumen elementa, a m_{sum} ciljana masa optimizacije. [52]

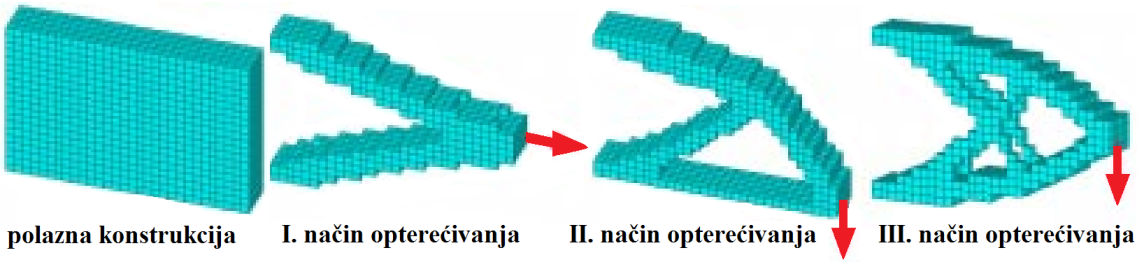
$$\sum_{e=1}^{N}\left\{v_{(e)}\right\}^{T}\rho_{(e)} \le m_{\mathrm{sum}}. \qquad \textbf{(4)}$$

Ako se definiraju dopuštena naprezanja ili s njima povezane vanjske sile može se dati jednadžba (5) u kojoj je $\left[K\{\rho\}\right]$ globalna matrica krutosti koja je promjenjiva na osnovu vektora relativnih gustoća, $\{u\}$ je vektor pomaka, a $\{F\}$ je vektor pripadajućih vanjskih sila na modelu. [52]

$$\left[K\{\rho\}\right]\{u\} = \{F\}. \qquad \textbf{(5)}$$

1.4.3.3. Primjena topološke optimizacije

Topološka se optimizacija danas sve više koristi. Svoju atraktivnost uporabe može zahvaliti pristupačnosti zadovoljavajućih računalnih resursa za obavljanje jednostavnijih analiza koje mogu poslužiti kao osnova razvoju proizvoda, odnosno, mogu se dobiti brojne ideje za konceptualnu fazu razvoja proizvoda. Nešto su ozbiljniji računalni resursi ipak potrebni ukoliko se provodi detaljnija optimizacija topologije s gušćim mrežama i većim polaznim volumenima. Tada u provođenju iterativnih postupaka vrlo brzo dolazi do popunjavanja radne memorije računala što usporava dolazak do rezultata. Finalno, bilo da se radi tek o procesu generiranja ideje za daljnji razvoj ili cjelokupnom konstrukcijskom razvoju proizvoda, topološka optimizacija ne gubi na atraktivnosti. Inovativna rješenja vidljiva na slici 41. možda su baš razlog te atraktivnosti.

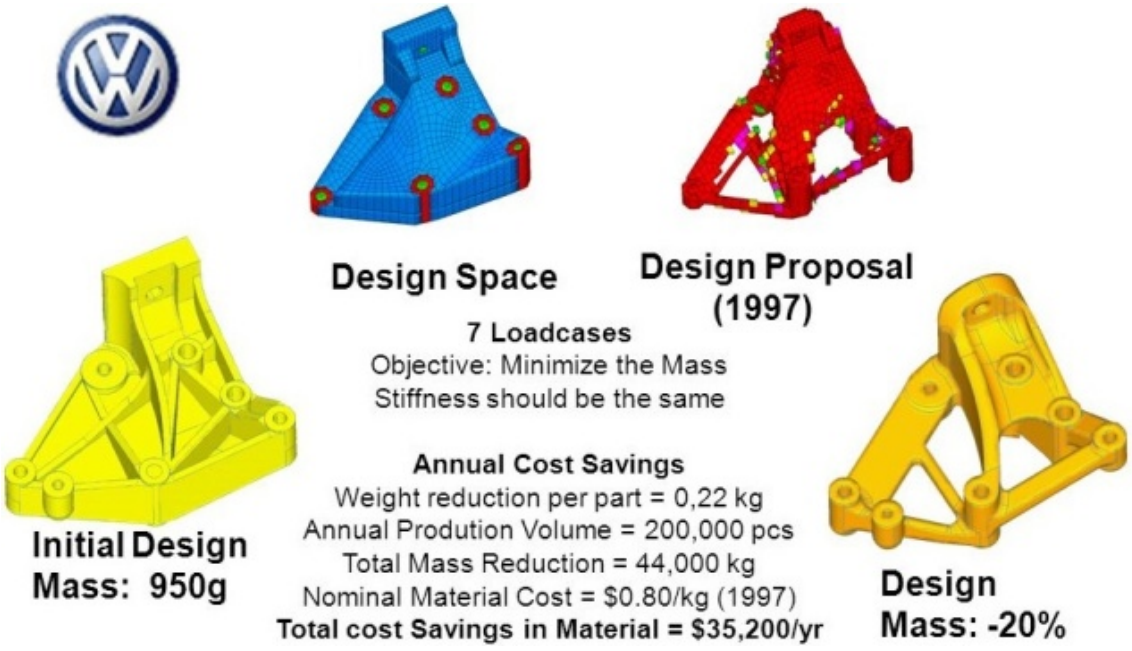


Slika 41. Rezultat topološke optimizacije ovisi o načinu opterećivanja

Slikom 42. dan je primjer uporabe topološke optimizacije pri izradi nosača koji je u točki A opterećen vertikalnom i horizontalnom silom, dok su u točkama B i C definirani oslonci. U sredini slike 42. smješten je rezultat TO gdje se može vidjeti nosač geometrije koja nije povoljna za izradu klasičnim proizvodnim postupcima. Takva topologija mogla bi se jednostavno izraditi nekim od postupaka aditivne proizvodnje. Zbog tvrdnje u prethodnoj rečenici prikazan je dodatno na desnoj strani slike model nosača pripremljen za proizvodnju tradicionalnim postupcima proizvodnje, a njegov je izgled nadahnut rezultatom topološke optimizacije. U ovom je slučaju optimizacija topologije poslužila kao konceptualna osnova za daljnji razvoj nosača. Ne treba mnogo isticati da se na ovaj način mogu dobiti olakšani nosači za uporabe u avionskoj i automobilskoj, ali i brojnim drugim industrijama gdje je smanjenje mase jedan od imperativa konstrukcijskog razvoja proizvoda. [53]

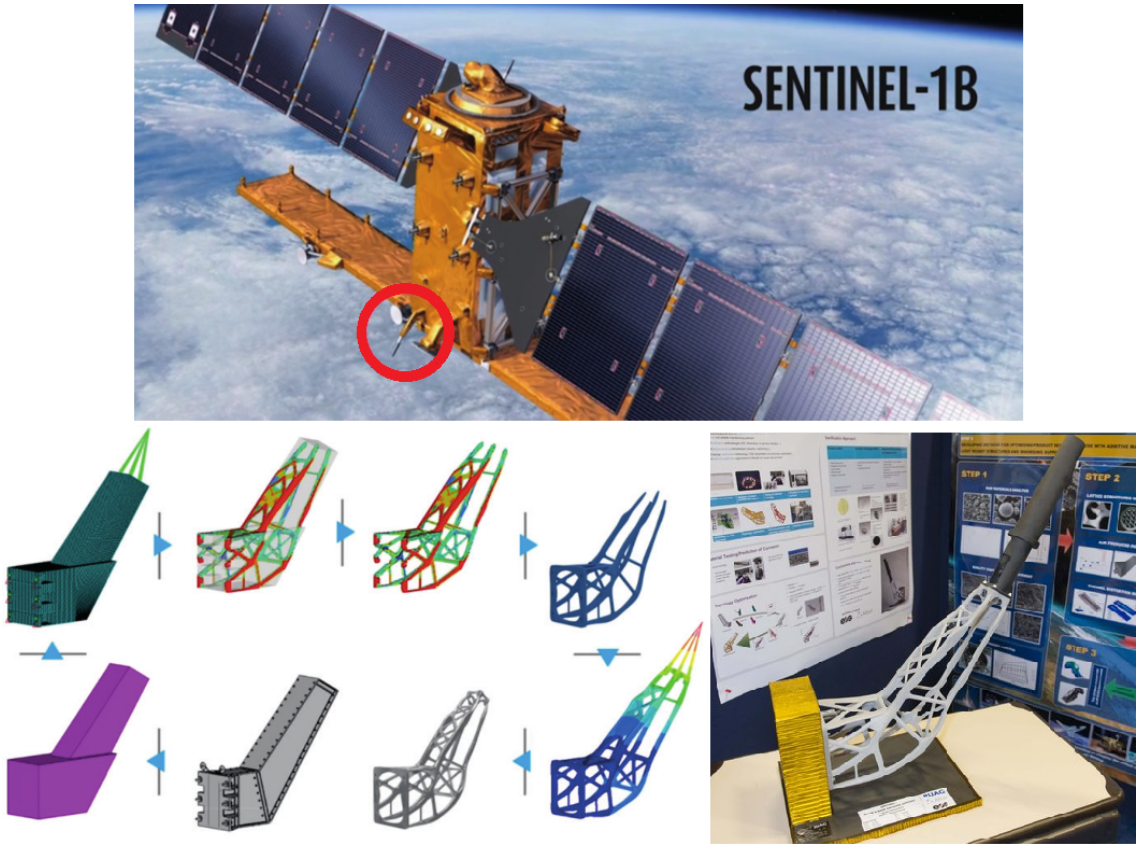
Slika 42. Topološka optimizacija nosača

Primjena softvera za TO na slučaju nosača motora u koncernu Volkswagen prikazana je slikom 43. gdje je lijevo, žutom bojom, prikazana postojeća izvedba nosača motora iz 1997. god. Nakon definiranja opterećenja na nosaču i raspoloživog volumena za raspodjelu materijala provedena je optimizacija topologije tako da za cilj ima reducirati masu uz uvjet zadržavanja postojeće krutosti (plava boja). Rezultat topološke optimizacije prikazan je crvenom bojom te je potom na osnovu tog modela razvijen novi nosač pogodan za izradu ljevaoničkim postupcima što je naznačeno narančastom bojom. Kao što je vidljivo iz ove studije slučaja, ako se uzme u obzir cijena materijala i veličina serije, dolazi se do godišnje uštede na materijalu od 35 200 USD, a sve na osnovu smanjenja mase od 20 %. Treba imati na umu da su uštede potencijalno još i veće jer se govori o smanjenim potrebama za energentima u transportu materijala i u procesu pripreme taljevine. [54]



Slika 43. Topološka optimizacija nosača u automobilskoj industriji

Na slici 44. prikazan je slučaj redizajna postojećeg nosača antene na satelitu Sentinel – 1B u vlasništvu Europske svemirske agencije. Novi, redizajnirani nosač bit će postavljen na iduća dva satelita serije Sentinel, Sentinel – 1C i Sentinel – 1D, a u trenutcima kad je proizveden ovaj 40 – ak centimetara velik nosač bio je najveći aditivnim tehnikama proizveden proizvod namijenjen uporabi u svemiru. Na prikazu dolje lijevo vidi se ciklus razvoja proizvoda, preko postojećeg modela nosača antene do topološki optimiranog nosača. Prikaz nakon proizvodnje aditivnom tehnologijom iz aluminijske legure dan je desnim donjim prikazom. Finalna konstrukcija rezultirala je smanjenjem mase od 40 % u odnosu na polaznu verziju (1.6 kg) te trenutno iznosi 940 grama. Osim ove redukcije u masi te postizanja jednolike raspodjele opterećenja dodatno je povećana krutost za više od 30 %. Uz poznatu okvirnu cijenu od 20 000 € po kilogramu u svemir transportiranog tereta ovakva mala smanjenja mase sumarno mogu značajno utjecati na cijenu lansiranja. Topološka se optimizacija uz podršku aditivne proizvodnje nameće kao logičan smjer u pripremi i izradi lakih konstrukcija. [55] [56] [57] [58] [59]



Slika 44. Topološka optimizacija nosača u svemirskoj industriji

1.5. Aditivna proizvodnja

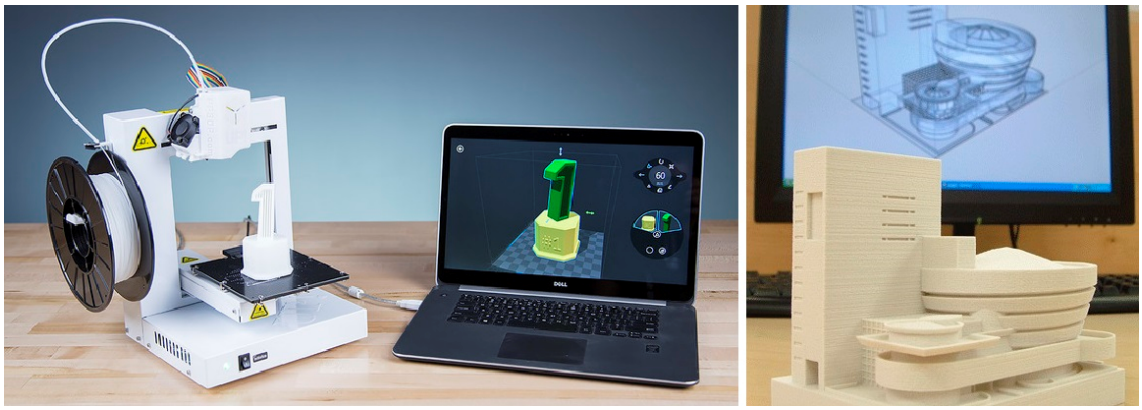
Proizvodnja proizvoda iz prethodna dva poglavlja bez aditivne proizvodnje ne bi bila isplativa ili uopće moguća te su zbog toga kroz ovo poglavlje dane osnove aditivne proizvodnje. Bit će moguće vidjeti da su aditivni postupci prikladni za izradu rešetkastih struktura, ali i onih nastalih procesima optimizacije.

1.5.1. Motivacija i definicija

Nekada, a danas još i u značajnijoj mjeri, u procesu razvoja proizvoda nastoji se razviti proizvod uz kojeg će se povezivati pojmovi poput visoke kvalitete, kratkog vremena razvoja i niskih troškova. U vrijeme globalizacije i Interneta, tj. vrijeme sve većeg pritiska nametnutog od strane konkurencije i potrošača nužno je pojmove navedene u prethodnoj rečenici dovesti do krajnjih mogućnosti. U razvoju proizvoda samom konstruiranju posvećuje se sve veća pažnja, sve je više zahtjeva koje finalni proizvod mora ispuniti kako bi tvrtka zadržala konkurentnost. Često određeni zahtjevi znaju biti u sukobu pa se u cilju ispunjavanja ekoloških i estetskih zahtjeva, međunarodnih i nacionalnih normnih pravila, tržišnih i ostalih ciljeva, zahtijevani proizvodi mogu geometrijski izrazito zakomplicirati ili pak postati kompleksni u pogledu funkcija. Treba napomenuti da se ispunjavanje prethodno nabrojanih ciljeva traži u minimalnom mogućem vremenu kako bi se dolaskom na tržište prije konkurencije dosegao puni potencijal proizvoda jer se često definira vrijeme potrebno za dolazak na tržište kao jedan od glavnih mjeritelja uspješnosti proizvoda. Kako bi se osigurala izdašna dobit od proizvoda treba povesti računa o pravovremenom izlasku na tržište. Potrebno je smanjiti vrijeme razvoja proizvoda, a ne tražiti osnovu za veći profit u smanjenju troškova razvoja. Svi neophodni resursi za proces konstruiranja, tj. razvoj ne bi smjeli biti bezrazložno ograničavani ako će oni ustvari dovesti do visokokvalitetnog proizvoda razvijenog u vremenu kraćem od konkurencije.

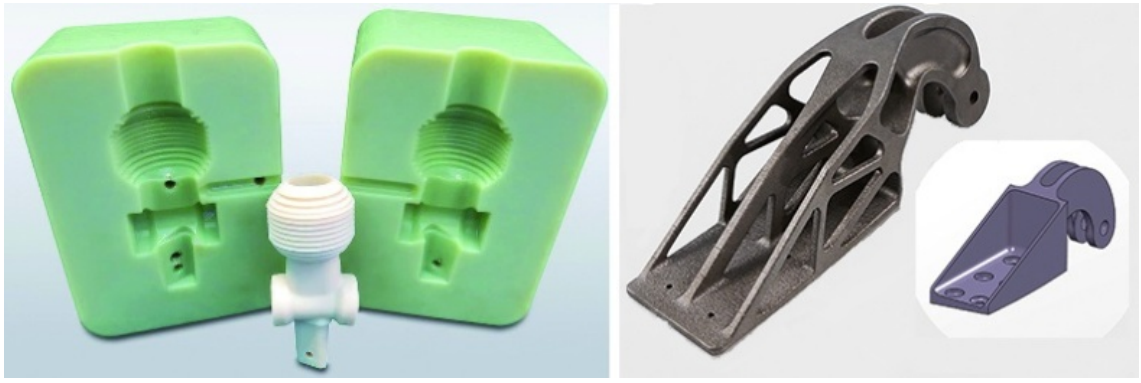
Filozofija brzog razvoja proizvoda (engl. *rapid product development*) može dati odgovor na visoko postavljene zahtjeve u prethodnom odlomku. Ona se ponajprije ogleda u uporabi računala za procese konstruiranja i planiranja proizvodnje, istodobnom inženjerstvu (engl. *collaborative engineering*) te primjeni postupaka aditivne proizvodnje i reverzibilnog inženjerstva (engl. *reverse engineering*). Kako je predmet ovog rada aditivna proizvodnja (engl. *additive manufacturing*) dobro je znati da se ona ponekad naziva još i generativnom ili slojevitom proizvodnjom. [60]

Aditivna je proizvodnja tip proizvodnje čiji proces rezultira 3D fizičkim objektima nastalima na temelju trodimenzionalnog digitalnog modela što je prikazano na slici 45. 3D fizički objekt nastaje postupkom dodavanja, odnosno građenja slojeva jedan na drugi. Ova aditivna proizvodnja svoje začetke nalazi u drugoj polovici 80 – ih godina prošlog stoljeća u SAD – u. [60]



Slika 45. 3D fizički model i 3D digitalni model

Prednost je aditivne proizvodnje nad konvencionalnim proizvodnim postupcima kao što su kovanje, lijevanje ili obrada odvajanjem čestica, mogućnost proizvodnje izrazito kompliciranih geometrija bez potrebe za planiranjem kompleksnih alata i kalupa što povoljno utječe na vrijeme razvoja i troškove. S druge strane, aditivne tehnologije zbog nekih svojih trenutnih nedostataka možda neće istisnuti klasičnu proizvodnju, no svakako će pronaći svoje mjesto pri izradi raznih fizičkih modela, kalupa, alata i dr. kao što se vidi na lijevom prikazu slike 46. U nekim slučajevima generativna proizvodnja može rezultirati objektima koji su u potpunosti funkcionalni i to s masom manjom i do 70 % u odnosu na svoje dvojnike izrađene nekim od konvencionalnih postupaka što je vidljivo na desnom prikazu slike 46. Ne čudi onda što su visokospecijalizirane industrije poput zrakoplovne i medicinske vodeće industrije u uporabi ovih tehnologija no često se korištenje može pratiti i u obrazovnim područjima te amaterskim uporabama. [55] [60]

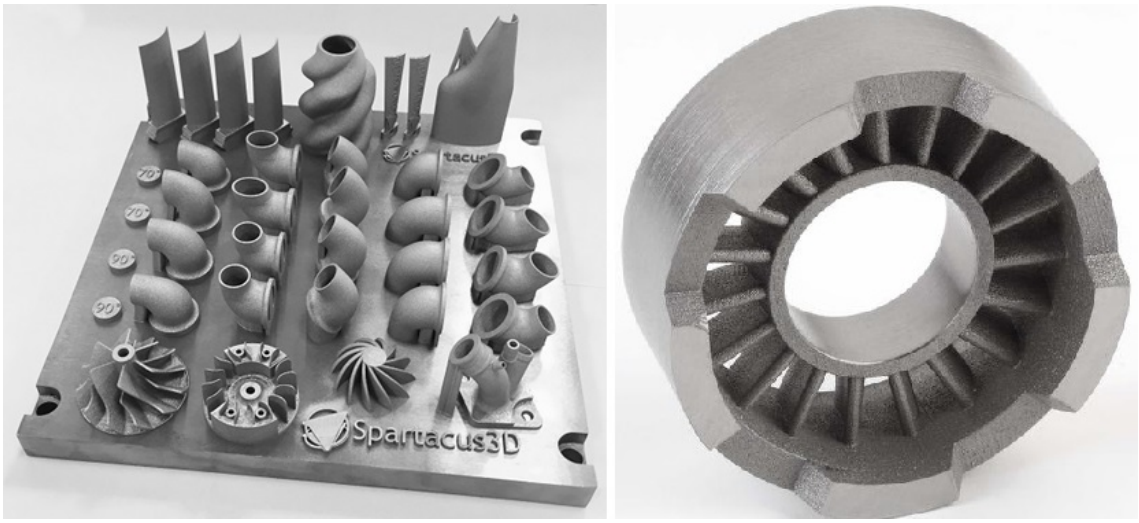


Slika 46. Aditivna proizvodnja u izradi kompleksnih kalupa i lakih konstrukcija

Aditivna proizvodnja ostvariva je na tri načina: [60]

- postupcima brze izrade prototipova (engl. *rapid prototyping*) – proizvodnja modela i prototipova koji mogu oponašati geometriju, materijale i funkcije proizvoda u razvoju;
- postupcima brze izrade alata i kalupa (engl. *rapid tooling*) – proizvodnja alata i kalupa u cijelosti ili tek nekih njihovih kompleksnijih dijelova kako bi se omogućila brza testna izrada prototipa proizvoda;
- postupcima brze (izravne) proizvodnje (engl. *rapid manufacturing*) – proizvodnja rezultira proizvodom koji može zamijeniti proizvod dobiven serijskom proizvodnjom.

Sva tri prethodno nabrojana postupka mogu dati finalne proizvode kompliciranih geometrija i to izravno iz računalnih modela nastalih u procesu razvoja proizvoda, tj. pri konstruiranju. Treba napomenuti da su aditivni postupci ograničeni u pogledu uporabe materijala, no taj je problem sve manje značajan jer se razvijaju novi materijali zadovoljavajućih svojstava. U tom se slučaju većinom radi o metalnim prahovima i polimernim polaznim materijalima. Na slici 47. vidljivi su dijelovi cijevne i pumpne tehnike izrađeni iz metalnog polaznog materijala. Kada se govori o postupcima aditivne proizvodnje treba još jednom istaknuti da se zapravo radi o slojevitoj gradnji proizvoda. Sama ta slojevitost može definirati značenje riječi *brzo* u ova tri prethodna tipa postupaka. Ovisno o kompleksnosti proizvoda, debljini slojeva, a zapravo i veličini finalnog proizvoda *brzo* se može protezati od nekoliko minuta pa sve do nekoliko dana. [60]



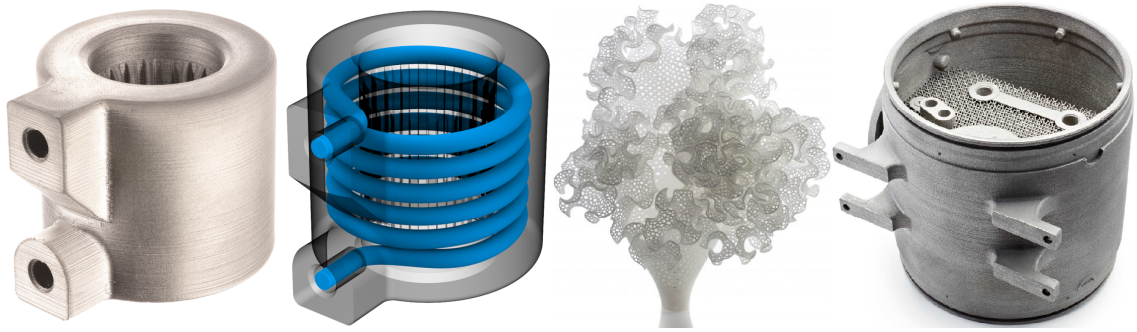
Slika 47. Metalni izradci nastali aditivnom proizvodnjom

Postupci aditivne proizvodnje ne traže, primjerice, izradu alata i kalupa za dobivanje realnog modela, a s druge strane izvrstan su alat za izvedbu kompleksnih proizvoda pa se uz

dozu opreza može istaknuti da su konstruktorima i dizajnerima odriješene ruke pri radu. Sa slike 48. može se vidjeti da je aditivna proizvodnja možda izvrstan odgovor na potrebe tržišta kada se govori o pojedinačnoj i maloserijskoj proizvodnji te o personalizaciji proizvoda budući da na tržište postavlja povoljne proizvode čija cijena nije opterećena visokim troškovima razvoja kalupa ili alata. [60]

Slika 48. Polimerni izradci nastali aditivnom proizvodnjom

Glavne vodilje pri razvoju aditivnih tehnologija za budućnost svakako su onda razvoj novih materijala i uređaja za aditivnu proizvodnju, kontrola i ponovljivost kvalitete, te jednaka (ili bolja) svojstva proizvoda kao i u onih dobivenih konvencionalnom proizvodnjom. Na taj bi se način postigla potpuna opravdanost primjene postupaka aditivne proizvodnje, osobito ako se ona koristi za izradu kompleksnih proizvoda kao što su proizvodi sa slike 49. [60]



Slika 49. Kompleksni proizvodi izrađeni aditivnim postupcima

1.5.2. Načela aditivne proizvodnje

Proces izrade proizvoda, kalupa ili alata aditivnom proizvodnjom u suprotnosti je s nekim drugim klasičnim postupcima proizvodnje kao što su, primjerice, postupci obrade odvajanjem čestica jer nema uklanjanja slojeva materijala. Upravo suprotno, vrši se građenje proizvoda iz slojeva. Pomoću slojevite gradnje proizvoda mogu se dobiti vrlo kompliciranе geometrije 3D proizvoda koje su rezultat slaganja 2D slojeva (2.5D slojevi) jednog na drugi te posljedično tome dobivanja treće dimenzije proizvoda. Da se naslutiti da se točnost, odnosno

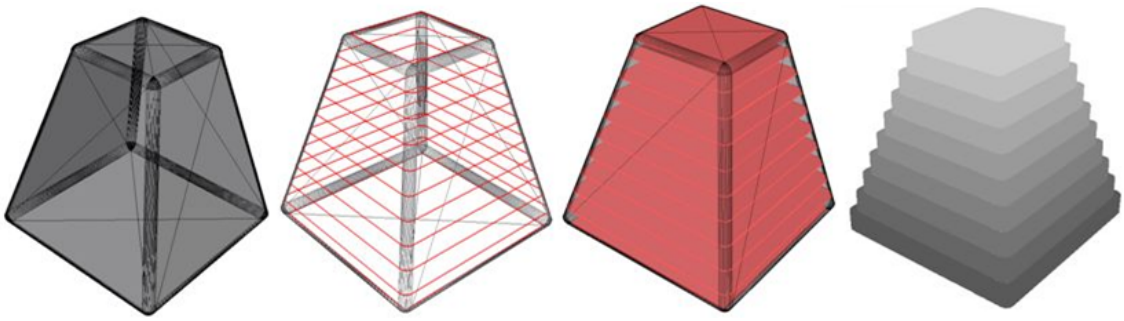
finoća geometrije proizvoda povećava ako je isti građen od tanjih 2D slojeva materijala što je prikladno prikazano na slici 50. [60]

Slika 50. Finoća završnog proizvoda ovisi o debljini pojedinog sloja

Fizički model kao rezultat aditivne proizvodnje smatra se vjernom replikom 3D postojećeg CAD modela bez obzira na koji način je taj digitalni 3D model nastao. Bilo da se radi o klasičnom postupku modeliranja ili pak reverzibilnom inženjerstvu bitno je da je volumen proizvoda potpuno opisan. Potpuno opisani volumeni dijele se u slojeve što se još naziva i rezanjem. Informacije o geometrijama narezanih slojeva tvore ulazne podatke za uređaje kojima se vrši aditivna proizvodnja. Na taj način moguće je oblikovati fizički proizvod. Dakle, za uspješnu aditivnu proizvodnju nužno je raspolagati zapisom koji je vjerna kopija volumena proizvoda. To treba istaknuti jer se 3D model može, primjerice, dobiti skeniranjima, a u tom je slučaju najčešće poznat površinski oblik modela. No što se događa iza površine, dublje u volumenu, može ostati nepoznato pa treba poduzeti određene radnje kako bi se volumen u potpunosti definirao. [60]

Sam proces generiranja zapisa geometrije slojeva digitalnog modela sastoji se od dva koraka pri čemu se prvotno stvaraju presjeci, tj. slojevi (u ravnina XY) te se potom povezuju s prethodno načinjenim slojem (u smjeru osi Z). Međusobna povezanost slojeva bitna je ne samo za uspješnu orijentaciju već i za određivanje potrebne količine energije odnosno veziva potrebnog za povezivanje dvaju slojeva. Da bi se ostvarila dobra veza među slojevima nužno je, osim utjecaja na trenutni sloj koji se proizvodi, djelomično utjecati i na prethodno izrađen sloj. Slojevi iz ravnine XY pri izradi fizičkog modela slažu se u smjeru osi Z, a uobičajena debljina im je 0.1 mm premda postoje uređaji koji rade s debljinama slojeva ispod 0.02 mm, ali i oni s debljinama iznad 1.5 mm što stvara prepoznatljiv stepeničast uzorak na proizvodima nastalima aditivnom proizvodnjom. Slikom 51. grafički je popraćen ovaj odlomak pa se s lijeva na desno može vidjeti 3D digitalni model, proces rezanja 3D digitalnog modela, zapisivanje geometrije svakog sloja uz međusobno povezivanje slojeva te 3D fizički

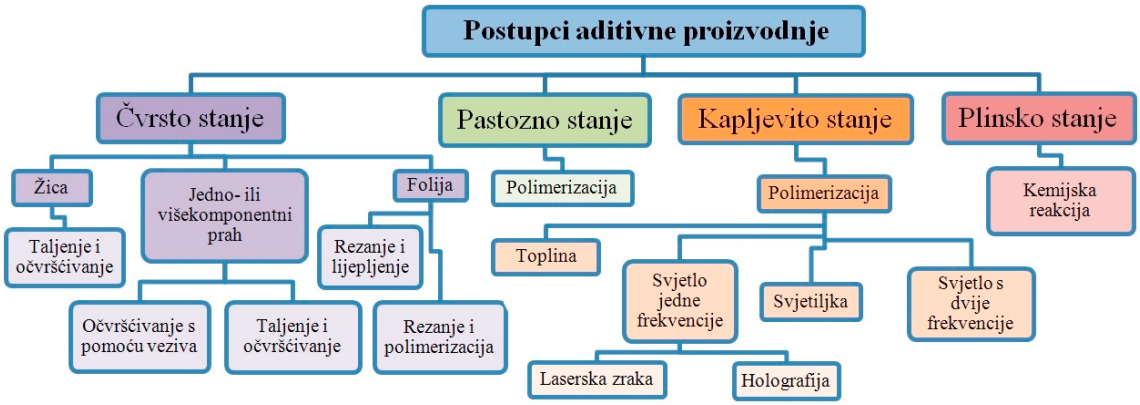
model. Kada se govori o zapisivanju, pohrani i izvozu geometrije 3D digitalnog proizvoda treba spomenuti STL (engl. *stereolithography*) i 3MF (engl. *3D manufacturing format*) vrste datoteka koje su u uporabi za prethodno nabrojane zadaće. [60] [61]



Slika 51. Vizualni prikaz aditivne proizvodnje

1.5.3. Postupci generativne proizvodnje

Sistematizacija postupaka aditivne proizvodnje može biti vršena, primjerice, na temelju fizike procesa, izvora korištene energije, vrste polaznog materijala, veličine načinjenog proizvoda, načina pravljenja pojedinog sloja. Unatoč brojnim podjelama najprihvaćenija je ona na temelju smjernica njemačkih normi DIN 8580 i DIN 8581. Prema njima aditivna se proizvodnja razvrstava u grupe s obzirom na oblik izvornog materijala i način njegova preoblikovanja – fiziku procesa što je i prikazano prema slici 52. [60]



Slika 52. Postupci aditivne proizvodnje s obzirom na izvorno stanje materijala i fiziku procesa

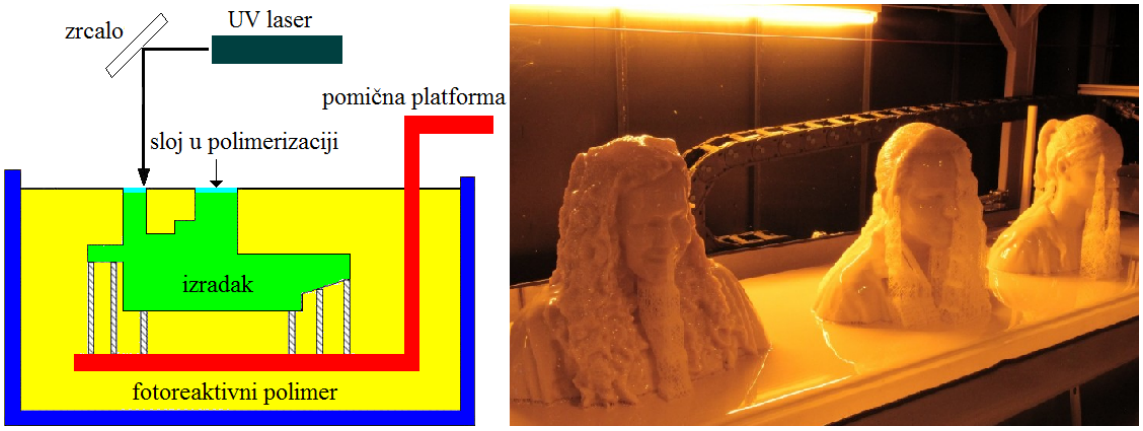
Iako je moguće uočiti brojnost različitih postupaka aditivne proizvodnje, ipak se najviše primjenjuju postupci proizvodnje iz kapljevitog i čvrstog stanja. Važno je valjano odabrati postupak ovisno o potrebama koje se nameću na realni model. Premda čimbenika za odabir optimalnog postupka proizvodnje ima više mogu se razvrstati u četiri kategorije: [60]

- fizikalni i mehanički čimbenici – odabir postupka koji zadovoljavaju postavljene zahtjeve u pogledu fizikalnih (točnost i preciznost izmjera i oblika proizvoda,...) i mehaničkih (poroznost, tvrdoća,...) svojstva finalnog proizvoda;

- parametri procesa proizvodnje – najvažniji je čimbenik ove skupine veličina proizvoda koji se može izraditi na određenoj opremi, premda postoji mogućnost izrade modela u segmentima koji se naknadno spajaju u cjelokupni model; važan čimbenik ove skupine je i brzina postupka gdje je često nužno postići kompromis između vremena potrebnog za izradu i kvalitete samog fizičkog modela; u ovu grupu spadaju još i utrošak energije, minimalna i maksimalna debljina sloja, debljina stijenke modela, izmjere radnog prostora, potreba za potpornjima itd.;
- mogućnost uporabe načinjenih proizvoda - uglavnom ju definira vrsta materijala koji je moguće preraditi nekim postupkom, a u tom slučaju materijal za izradu prototipa treba biti isti kao materijal stvarnog proizvoda ili što je moguće sličniji;
- gospodarski kriteriji – uz tehničke karakteristike samog postupka u razmatranje treba uzeti i ekonomsku stavku postupka pa je stoga potrebno obratiti pozornost primjerice na mogućnost automatizacije postupka, potrebu za stručnim nadzorom, nužnost naknadne obrade proizvoda, vrijeme potrebno za osposobljavanje operatera, trošak opreme i potrošnih dijelova te čitav niz drugih stavki.

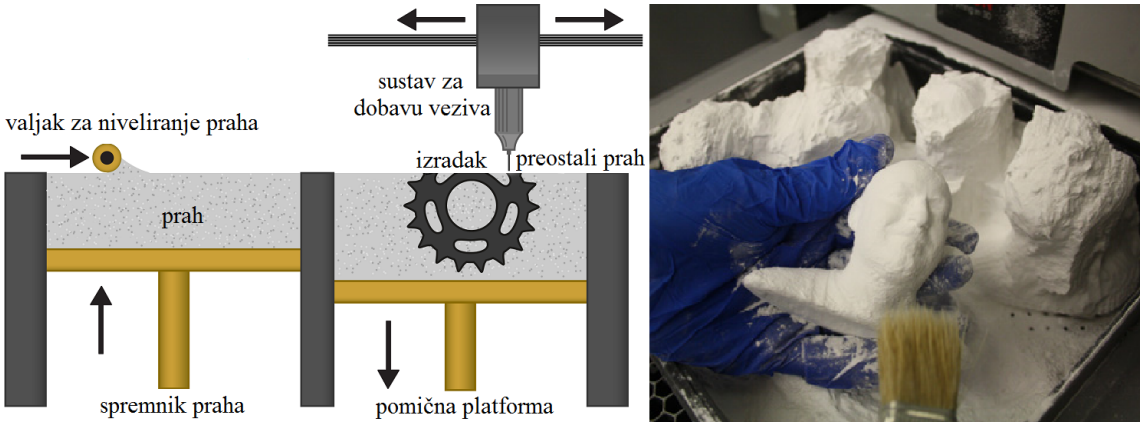
U kratkim crtama predstavljeno je nekoliko postupaka aditivne proizvodnje, a ovo su neke od najčešće rabljenih metoda slojevite proizvodnje: [60] [62] [63]

- Stereolitografija – temelji se na fotopolimerizaciji gdje laser emitira ultraljubičastu svjetlost i osvjetljava sloj tekućeg polimera koji se potom skrućuje. Radna ploha po završetku prethodnog sloja spušta se za debljinu sloja i proces kreće ispočetka, odnosno vrši se izrada novog sloja koji se povezuje s prethodno izrađenim. Fizički model na završetku se vadi iz tekućeg polimera, a višak nepolimeriziranog polimera ispire se u otapalu. Slika 53. prikazuje shematski prikaz stereolitografije i daje primjer proizvoda načinjenih stereolitografijom.



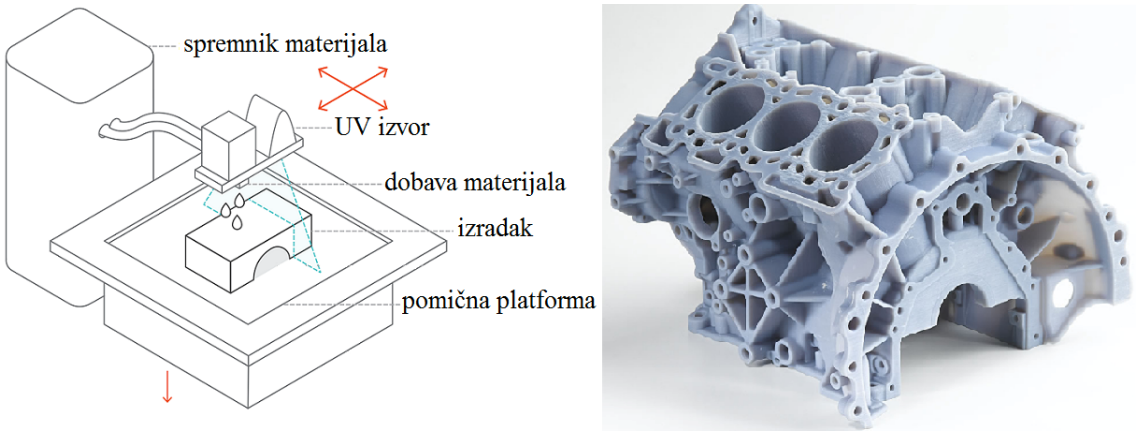
Slika 53. Shematski prikaz stereolitografije popraćen primjerom

- 3D tiskanje – princip rada je sličan kao i kod tintnih pisača no umjesto tinte mlaznica izbacuje vezivo ili ljepilo po sloju pripremljenog praha te se stvara sloj modela koji je definiran mjestom na koje je izbačeno vezivo. Slično kao i kod stereolitografije radna ploha se pomiče za iznos debljine sloja kako bi se nanio idući sloj praha te omogućio ponovni prolazak glave pisača. Po završetku i vezivanju slojeva moguće je fizički model izvaditi iz komore i praha. Slika 54. prikazuje shematski prikaz 3D tiskanja i daje primjer proizvoda načinjenog tim postupkom.



Slika 54. Shematski prikaz 3D tiskanja popraćen primjerom

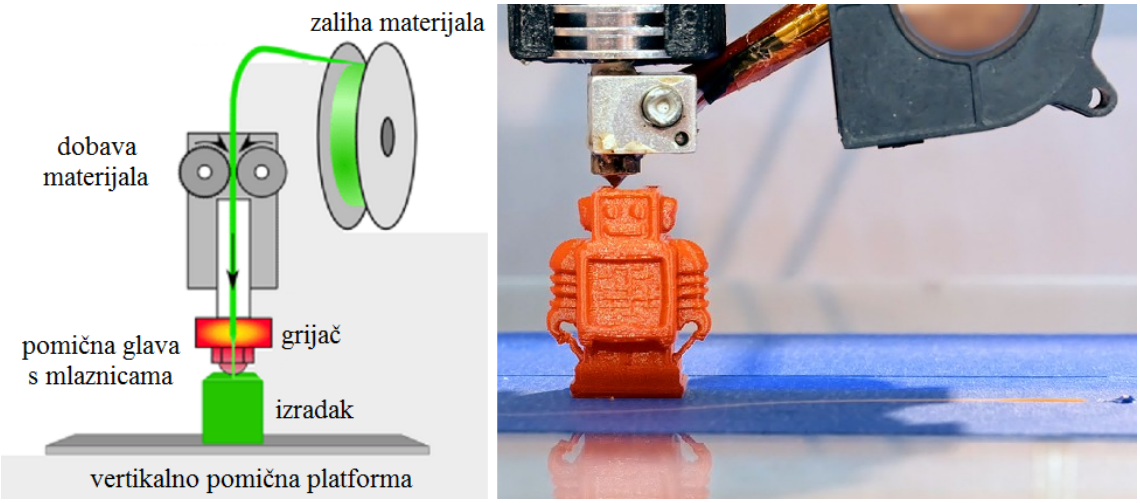
- PolyJet postupak – hibridni postupak stereolitografije i 3D tiskanja gdje sapnica raspršuje sloj polimera koji se potom skrućuje pod utjecajem ultraljubičaste svjetlosti te veže na prethodni sloj. Slika 55. prikazuje shematski prikaz PolyJet postupka i daje primjer proizvoda načinjenog PolyJet postupkom.



Slika 55. Shematski prikaz PolyJet postupka popraćen primjerom

- Taložno srašćivanje – omekšani polimerni materijal dobavlja se u obliku niti kroz sapnicu na glavi uređaja. Prolaskom glave tvori se sloj koji se hladi i skrućuje pri sobnim temperaturama, naravno, uz vezanje na prethodni sloj. Ovakvi uređaji najčešće se koriste u kućnoj i manje zahtjevnoj profesionalnoj primjeni. Slika 56.

prikazuje shematski prikaz taložnog srašćivanja i daje primjer proizvoda načinjenog tim postupkom.



Slika 56. Shematski prikaz taložnog srašćivanja popraćen primjerom

- Proizvodnja laminiranih objekata – pomoću lasera izrezuje se kontura objekta iz posebne folije koja se potom polaže na prethodni sloj da bi preko nje prešao zagrijani valjak koji pokreće vezivno sredstvo unutar folije te omogućava vezivanje s prethodnim slojem. Ova metoda je jedna od najbržih i najpristupačnijih metoda aditivne proizvodnje. Slika 57. prikazuje shematski prikaz laminiranja i daje primjer proizvoda načinjenog laminiranjem.

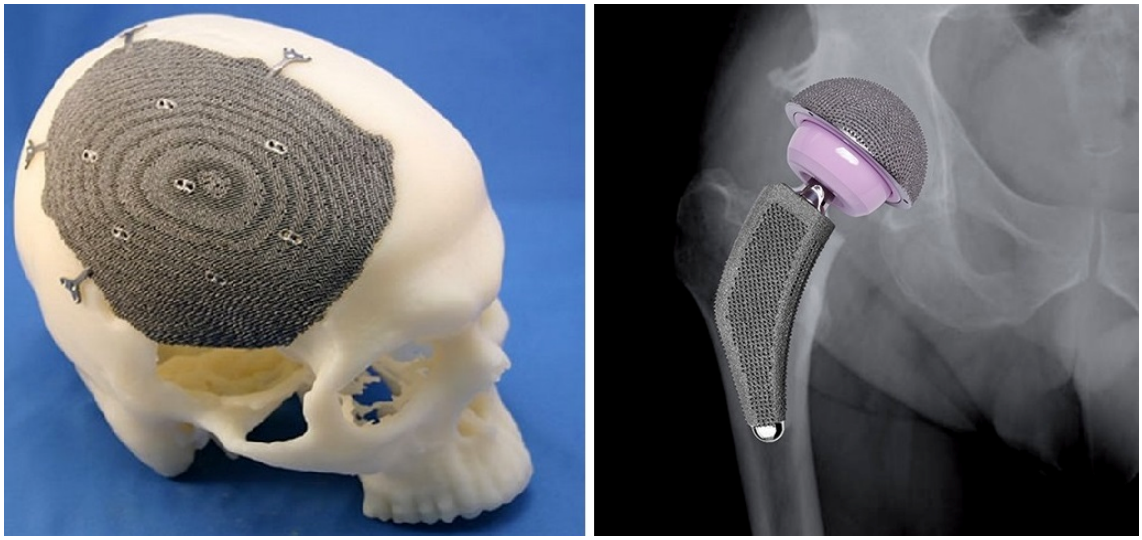
Slika 57. Shematski prikaz laminiranja popraćen primjerom

- Selektivno lasersko srašćivanje – pomicanjem radne podloge definira se debljina sloja praškastog materijala koji prelazi u kruto stanje uslijed visoke temperature laserskog snopa pa dolazi do srašćivanja zagrijanih čestica materijala. Sve do zadnjeg ispisanog sloja vrši se pomicanje radne plohe i nanošenje novih slojeva praškastog materijala. Slika 58. prikazuje shematski prikaz selektivnog laserskog srašćivanja i daje primjer proizvoda načinjenog istim postupkom.

Slika 58. Shematski prikaz selektivnog laserskog sraščivanja popraćen primjerom

1.5.4. Svijetla budućnost aditivne proizvodnje

Brzi razvoj i popularizacija unazad nekoliko godina osigurali su aditivnoj proizvodnji zagarantiran daljnji razvoj i porast interesa u brojnim sferama znanosti bilo da se radi o avionskoj i vojnoj industriji, arhitekturi i automobilizmu, medicini i stomatologiji kao što to prikazuje slika 59. ili pak pukom amaterizmu i hobiju. [63]



Slika 59. Uporaba aditivne tehnologije u maksilofacijalnoj kirurgiji i ortopediji

Uz dozu opreza može se reći da bi aditivna proizvodnja jednog dana mogla postati glavni proizvodni postupak u modernom društvu. Podloga za ovakav zaključak leži u tome što je moguće odbaciti uvriježene smjernice za konstruiranje koje je podređeno proizvodnom postupku jer su aditivne tehnologije lišene nedostataka koji bi primjerice doveli do nemogućnosti izrade kompleksnih detalja, različitih debljina stijenki, necilindričnosti i sl. Zbog svega navedenog aditivni postupci proizvodnje predstavljaju izvrsnu osnovu za proizvodnju proizvoda koji su topološko optimirani ili im je struktura izrađena od rešetkastih

struktura. Ovo razmišljanje je popraćeno slikom 60. Premda još uvijek postoje određeni problemi kod nekih postupaka, poput generiranja otrovnih para, generalno se postupci aditivne proizvodnje smatraju ekološki prijateljski nastrojenima ponajprije jer se koristi manja količina materijala i stvara se manje otpada u usporedbi s, primjerice, klasičnim obradama odvajanjem čestica. Također ekološka prihvatljivost takvih proizvoda ogleda se kako u smanjenim troškovima fosilnih goriva koja se koriste za transport gotovih modela tako i u troškovima upotrebe, jer najčešće proizvodi dobiveni aditivnom proizvodnjom zbog svojih poroznosti daju finalno lakše konstrukcije. Naravno, uz očuvanu punu funkcionalnost, a to je izrazito bitno, primjerice, u zrakoplovnoj i svemirskoj industriji. [60]

Slika 60. Rešetkasto strukturirani i topološki optimirani nosači načinjeni aditivnim tehnikama

Povoljan aspekt za uporabu aditivnih tehnologija je i to što za dobivanje fizičkog modela nije potrebno koristiti kalupe ili razvijati alate što može predstavljati značajnu uštedu, osobito ako se radi o unikatnoj ili maloserijskoj proizvodnji. Mogućnost uporabe materijala za aditivnu proizvodnju raste. Premda su se prvotno najviše koristili polimerni materijali (ABS, PA, PC, PMMA, PVC, PUR, epoksidne smole) zbog svojih pogodnih svojstava sve češće se koriste razni metalni prahovi pa je sve uobičajenije viđati proizvode nastale aditivnom proizvodnjom, a da su načinjeni od nehrđajućih čelika, titanovih legura, zlata i lakih legura kao između ostalog i od keramike. [62]

Kako se ne bi stvorio dojam da je aditivna proizvodnja lišena nedostataka treba navesti da je njena vremenska komponenta ponekad upitna. Kada je produkt rada, primjerice, volumenski velik proizvod jednostavne geometrije tada nema pretjeranog smisla koristiti aditivnu proizvodnju. Točnost izmjera, kvaliteta površine, raspoloživi materijali i ponovljivost često su daleko od onih koje se postižu klasičnim metodama obrade. Shodno tome pažnja istraživača i razvojnih centara upravo je usmjerena na rješavanje ove problematike prije no razvoj novih postupaka i uređaja. Očito je glavni cilj na poboljšanju izvedbe. [60]

2. EKSPERIMENTALNI DIO – KONSTRUKCIJSKA RAZRADA

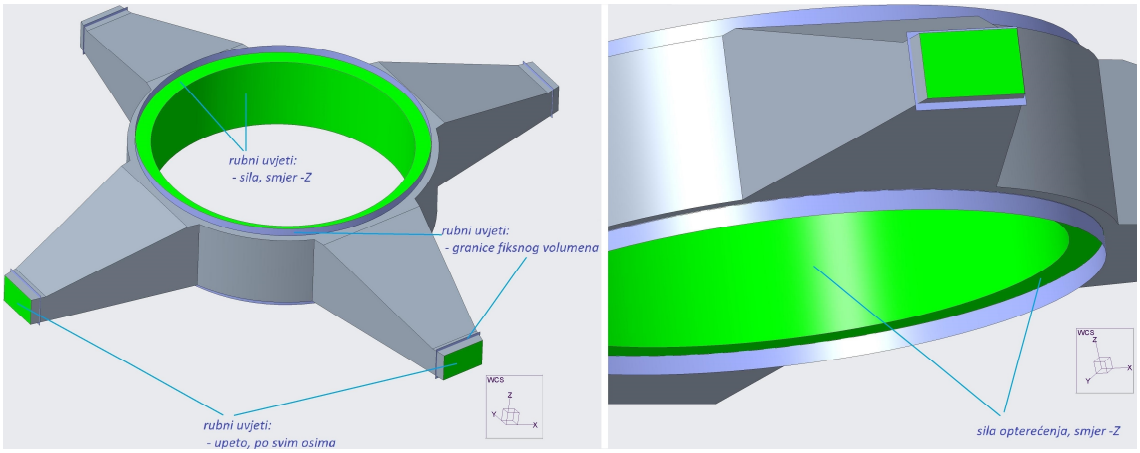
2.1. Definiranje eksperimentalnog dijela

Tekstom diplomskog zadatka zadana je razrada nosive konstrukcije bespilotne letjelice. Konstrukciju je potrebno izvesti uporabom rešetkastih struktura i topološke optimizacije na način da se smanji ukupna masa drona uz kontrolu čvrstoće i krutosti. Cjelokupan razvoj potrebno je provesti unutar dostupne aplikacije – Creo Parametric 5.0.4.0.

2.1.1. Zadatak

U suradnji s gosp. Brankom Dautovićem ispred tvrtke EAG Centar osmišljen je zadatak za eksperimentalni dio diplomskog rada, a osim zadavanja zadatka putem njega osigurana je i programska podrška za eksperimentalni dio rada. Zadatkom su definirana opterećenja i rubni uvjeti modela, materijal, kriteriji čvrstoće i krutosti te polazna geometrija.

Polazna geometrija vidljiva je na slici 61.; ona donosi geometrijske odnose i definira maksimalan volumen u koji konstrukcija mora moći biti upisana. Nosivo tijelo drona sastoji se od centralno smještenog cilindra i četiri kraka što je poprilično uobičajena izvedba karoserije jednog kvadrotora. Kroz polaznu geometriju dodatno su definirani i volumeni koji nisu dostupni za variranje u konstrukcijskoj razradi jer oni predstavljaju prihvatna mjesta za motore ili sklop baterije, upravljačke i komunikacijske uređaje, senzoriku itd. Ti, fiksni, volumeni prikazani su zelenom bojom pa se može vidjeti da je jedan definiran u središnjem cilindru, a ostala četiri fiksna volumena smještena su na krajevima krakova.



Slika 61. Polazna geometrija bespilotne letjelice

Predloženi materijal za izradu drona je PA 30GF – poliamid s 30 % staklenih vlakana. S aspekta krutosti potrebno je materijal iskoristiti tako da je maksimalni pomak ograničen na 1 milimetar. Raspoloživa čvrstoća materijala određena je kao 80 % raspoložive vlačne čvrstoće. Ove kriterije treba ispuniti pod djelovanjem opterećenja koje je ekvivalentno masi od 20 kilograma, a jednoliko je distribuirano po trima površinama centralnog cilindra. Rubni uvjeti kojima se sprječavaju pomaci krutog tijela pri analizi određeni su kao uklještenja smještena na krajevima krakova.

2.2. Metoda konačnih elementa

Rješenja razrade dobivena uporabom modula za rešetkaste strukture bit će podvrgnuta analizi pomoću metode konačnih elemenata. Cilj je analize odrediti iznose naprezanja i pomaka u pojedinoj verziji konstrukcije kako bi se moglo odlučiti o daljnjem smjeru razrade. Kako analiza konstrukcija metodom konačnih elemenata nije glavna domena ovog rada ta opširna metodologija neće biti detaljnije razmatrana na ovim stranicama.

2.2.1. Validacija konačnih elemenata

Prije uporabe modula za numeričku analizu konstrukcije, na karoseriji drona, potrebno je provjeriti konvergenciju rješenja koja se dobivaju pomoću konačnih elemenata. Osim konvergencije, za potpuniju validaciju metode konačnih elemenata treba dobivena rješenja usporediti i s poznatim slučajevima opterećivanja i geometrije, a za koje se mogu odrediti točna rješenja analitičkim putem.

2.2.1.1. Analitičko rješenje

Na temelju prethodnog odlomka u kojem je opisan sam zadatak može se naslutiti da je karoserija drona dominantno savojno opterećena. Zbog takvog moda opterećivanja može se validacija konačnih elemenata izvesti na primjeru jednostrano ukliještene grede koja je opterećena silom na svom drugom kraju. Za takvu konstrukciju poznata su analitička rješenja za raspodjelu naprezanja i pomake.

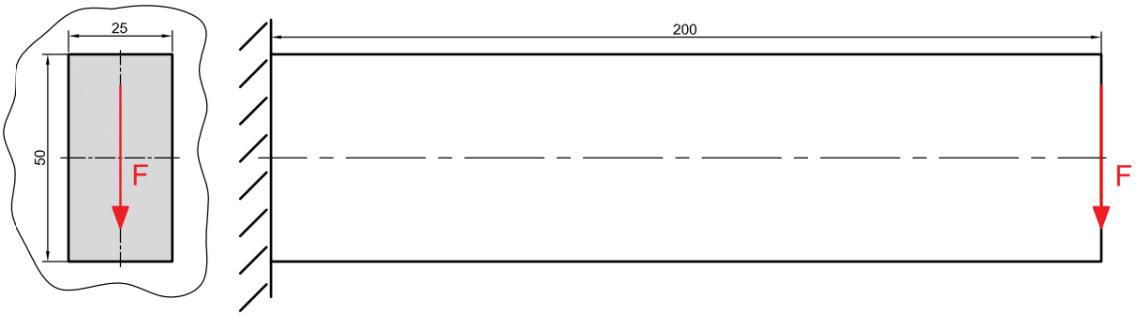
Na slici 62. prikazana je greda korištena za usporedbu analitičkih i numeričkih rješenja problema. Greda dimenzija 25x50x200 na lijevom je kraju ukliještena, dok je na desnom kraju slobodna i opterećena vertikalnom silom u iznosu od 5 kN. Materijal je grede neka proizvoljno odabrana magnezijeva legura s niže prikazanim svojstvima – gustoća ρ u izrazu (6), modul elastičnosti E u izrazu (7), Poissonov koeficijent υ u izrazu (8) i granica elastičnosti R_e u izrazu (9). [64]

$$\rho = 1.8 \text{ g/cm}^3, \tag{6}$$

$$E = 45 \text{ GPa}, \tag{7}$$

$$\upsilon = 0.35, \tag{8}$$

$$R_e = 130 \text{ MPa}. \tag{9}$$



Slika 62. Konzola za usporedbu numeričkih i analitičkih rješenja naprezanja i pomaka

Maksimalno naprezanje javlja se u lijevom, uklještenom, rubu i može se odrediti iz jednadžbe (10) u kojoj σ_{max} predstavlja maksimalno naprezanje na savijanje koje se pojavljuje na površini grede. Moment koji djeluje u gredi označen je s M, a s W moment otpora presjeka. Koncentrirana sila obilježena je s F dok je krak na kojem ta sila djeluje zapisan pod oznakom l. Vrijednosti b i h predstavljaju dimenzije poprečnog presjeka grede i to redom širinu i visinu. [65]

$$\sigma_{max} = \frac{M}{W} = \frac{6F \cdot l}{b \cdot h^2} = \frac{6 \cdot 5\,000 \cdot 200}{25 \cdot 50^2} = 96 \text{ MPa}. \quad \textbf{(10)}$$

Maksimalni progib, tj. pomaci određuju se kroz izraz (11) u kom su navedeni pod oznakom w_{max}, a pojavljuju se na desnom, slobodnom, kraju konzole na mjestu djelovanja sile. Moment tromosti presjeka u izrazu označen je pomoću I. [65]

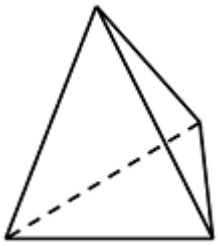
$$w_{max} = \frac{F \cdot l^3}{3E \cdot I} = \frac{12F \cdot l^3}{3E \cdot b \cdot h^3} = \frac{12 \cdot 5\,000 \cdot 200^3}{3 \cdot 45 \cdot 10^3 \cdot 25 \cdot 50^3} = 1.138 \text{ mm}. \quad \textbf{(11)}$$

Tijekom numeričke analize konstrukcija pomoću konačnih elemenata često može doći do pojave područja u kojima se javlja singularnost. Singularnost sa sobom donosi nagli skok naprezanja u područjima u kojima se pojavljuje. Lokalna visoka naprezanja u numeričkim modelima nisu vjerna replika stvarnih naprezanja u realnim konstrukcijama. Singularnost se javlja na mjestima rubnih uvjeta, primjerice, u uklještenjima ili na mjestima gdje djeluju koncentrirane sile. Bilo bi besmisleno uspoređivati numeričke i analitičke rezultate u mjestu uklještenja jer bi se vrijednosti isuviše razlikovale. Zbog toga je u jednadžbi (12) dana vrijednost naprezanja 10 milimetara od uklještenog ruba gdje se u numeričkom modelu ne pojavljuje singularnost. Ta vrijednost naprezanja, σ_{10}, bit će uspoređivana s vrijednostima naprezanja na istom mjestu pri analizi provedenoj pomoću konačnih elemenata. M_{10} iznos je momenta koji djeluje u presjeku 10 mm odmaknutom od uklještenja. [66]

$$\sigma_{10} = \frac{M_{10}}{W} = \frac{6F \cdot (l-10)}{b \cdot h^2} = \frac{6 \cdot 5\,000 \cdot (200-10)}{25 \cdot 50^2} = 91.2 \text{ MPa}. \quad \textbf{(12)}$$

2.2.1.2. Numeričko rješenje

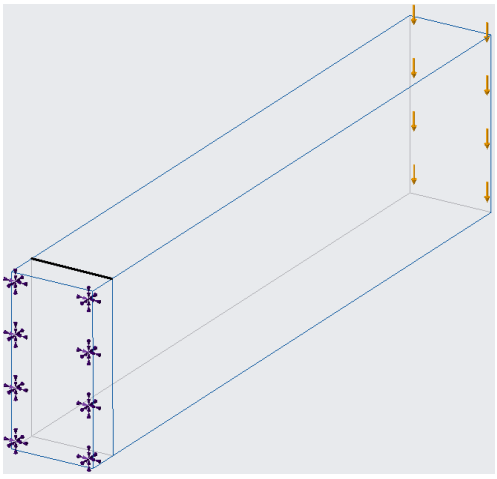
Sve su numeričke analize u ovom radu vršene pomoću 3D konačnih elemenata (KE), točnije, tetraedarskih konačnih elemenata. Ovi elementi često se koriste zbog svoje univerzalnosti u pogledu opisa geometrije jer daju zadovoljavajuće rezultate za numeričke analize bilo da se radi o pravilnim ili nepravilnim geometrijama. Tetraedarski konačni element prikazan je na slici 63. gdje se vidi da je isti opločen s četiri trokutaste stranice te da isto tako posjeduje četiri vrha. [67] [68] [69]



Slika 63. Tetraedarski konačni element

Slikom 64. prikazan je model konzole za validaciju tetraedarskih elemenata u softveru Creo Parametric 5.0.4.0. Validacija elemenata je dvostruka; odnosno uspoređuju se numeričke i analitičke vrijednosti naprezanja i pomaka te se vrši kontrola konvergencije rješenja pri progušćivanju mreže. Sa slike 64. na lijevoj površini grede vidi se definirano uklještenje, dok je na desnom boku postavljena sila koja je raspodijeljena po površini boka. Sila je kontinuirano distribuirana kako bi se izbjegla singularnost koja se javlja pri korištenju koncentriranog opterećenja. Singularnost u uklještenju nije moguće izbjeći te je zbog toga kao što je i ranije spomenuto korištena usporedba naprezanja na 10 mm od uklještenja. Na istoj se slici vidi definirana linija koja omogućuje jednoliko uzorkovanje pri svakom krugu analize.

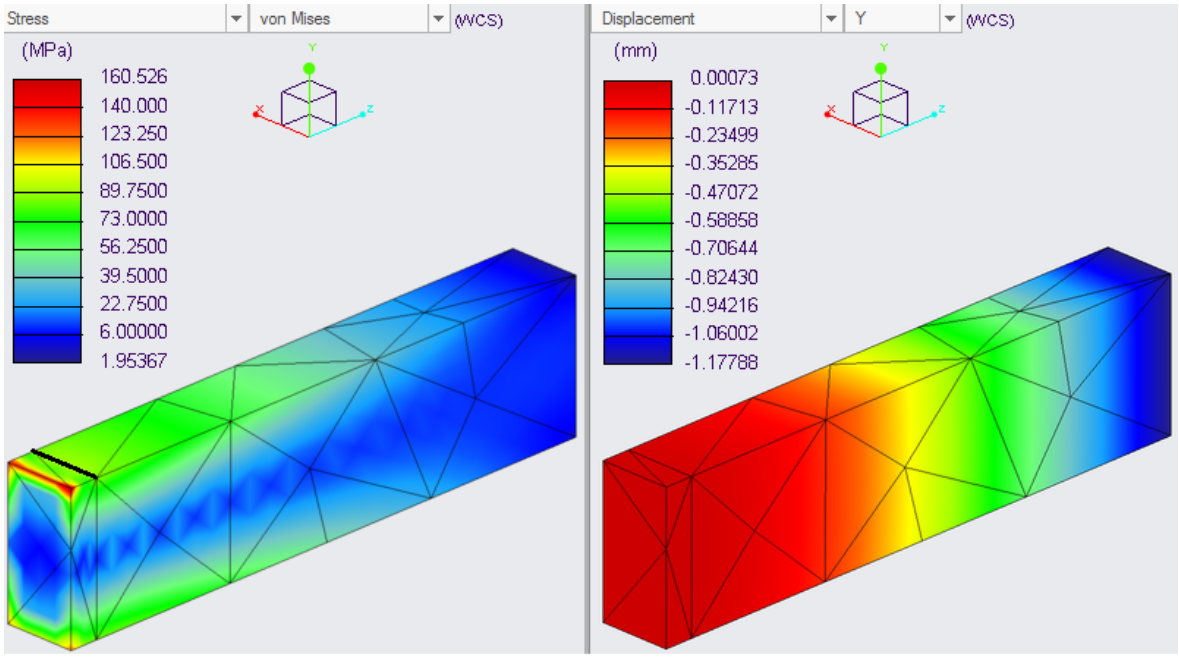
Sve geometrijske i materijalne karakteristike kao i sile i rubni uvjeti jednaki su onima ranije definiranima u analitičkoj kontroli interesnih veličina – naprezanja i pomaka.



Slika 64. Model konzole za numeričku analizu

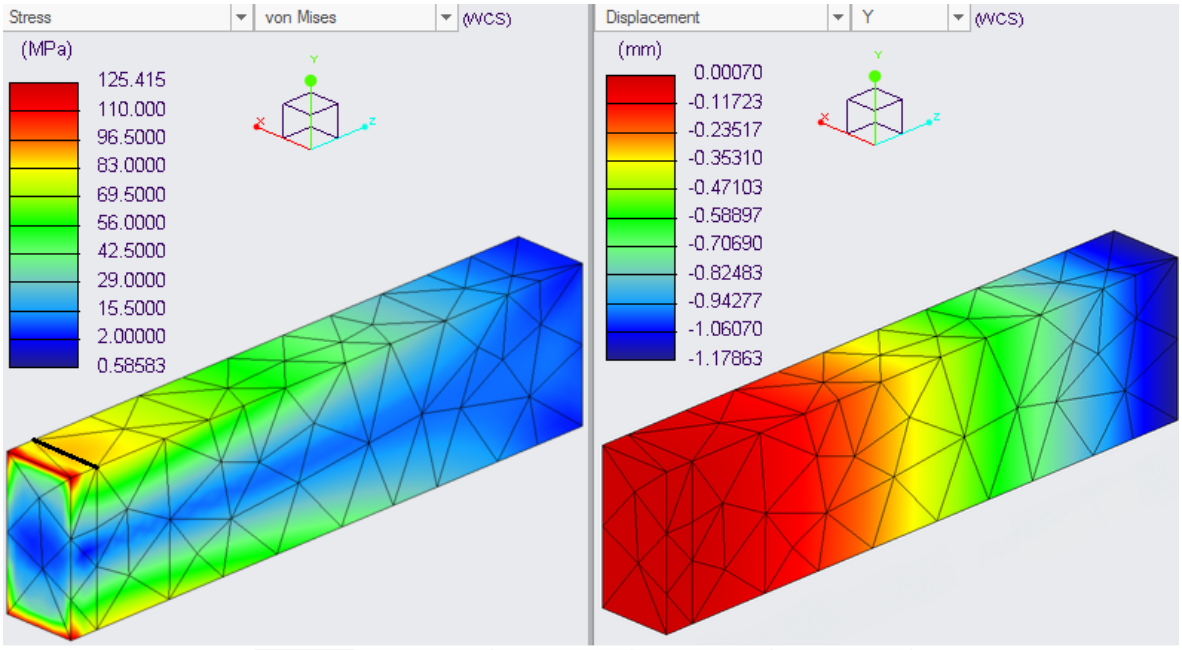
Razlike u analitičkom i numeričkom proračunu jednostavno se uspoređuju, no za potvrdu konvergencije nekog tipa konačnih elemenata potrebno je provesti više numeričkih analiza s različitim veličinama konačnih elemenata u mreži. Bit će dakle kroz narednih nekoliko slika prikazane mreže s manjim brojem konačnih elemenata – grube mreže. Postupnim će se povećanjem broja konačnih elemenata i finoća mreže poboljšavati. Za potvrdu konvergencije izrađeno je šest analiza koje su prikazane sljedećim slikama – slika 65., slika 66., slika 67., slika 68., slika 69., slika 70.

Kako je prikaz rezultata načelno isti za svih šest analiza neće se posebno davati širok opis svake već će se podrobnije opisati samo rezultat prve, najgrublje mreže vidljive na slici 65. Lijevo je u grafičkim prikazima rezultata dana raspodjela naprezanja u testnom modelu. Iz legende s bojama može se osim o raspodjeli naprezanja u gredi saznati više i o graničnim iznosima naprezanja – najveći i najmanji iznos naprezanja u modelu prikazani su kao rubne vrijednosti u legendi. Također je na lijevom prikazu vidljiva i linija koja je korištena za određivanje srednjih vrijednosti naprezanja na 10 milimetara od uklještenja. Vrijednost tih naprezanja korištena je za usporedbu s analitičkim rješenjem i provjeru konvergencije. Na desnom segmentu slike prikazani su pomaci u smjeru Y osi, identično kao i kod naprezanja i ovdje se iz legende s bojama može saznati više o rubnim vrijednostima pomaka u smjeru osi Y. Finalno, na dnu slike nalazi se tablica s vrijednostima naprezanja na liniji za uzorkovanje.



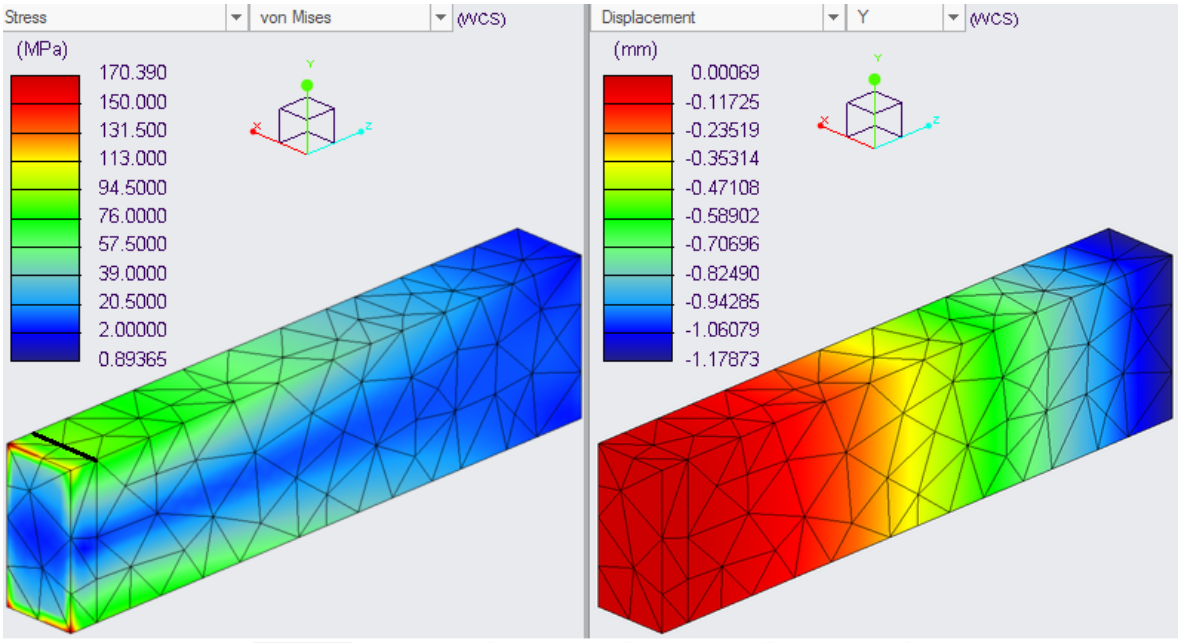
	Point1	Midpoint	Point2	Maximum
Membrane	89.0898	89.0898	89.0898	89.0898
Bending	2.97129	0	2.97129	2.97129
Mem+Bend	88.4471	89.0898	89.8264	89.8264
Peak	2.30542	1.20521	3.4496	3.4496
Total	86.2455	90.1265	86.9621	90.4747

Slika 65. Numerička analiza modela konzole s 59 KE



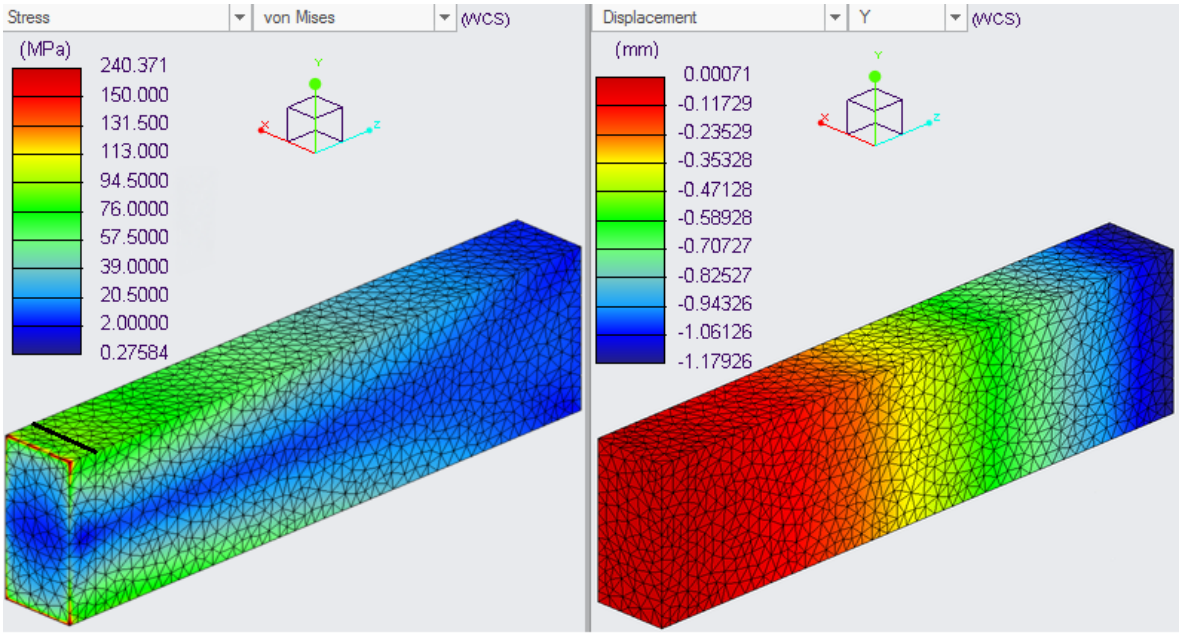
	Point1	Midpoint	Point2	Maximum
Membrane	87.5224	87.5224	87.5224	87.5224
Bending	1.90283	0	1.90283	1.90283
Mem+Bend	87.913	87.5224	87.1717	87.913
Peak	3.40116	2.07078	3.68327	3.68327
Total	84.7255	89.5502	83.5866	89.5502

Slika 66. Numerička analiza modela konzole s 336 KE



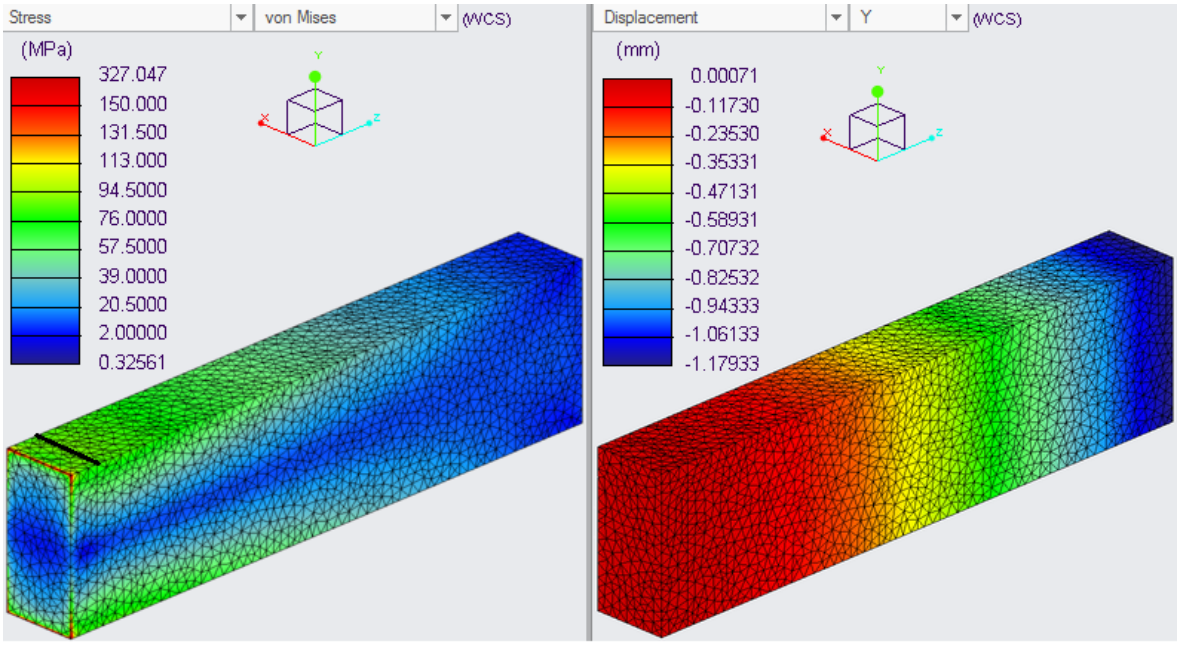
	Point1	Midpoint	Point2	Maximum
Membrane	87.4394	87.4394	87.4394	87.4394
Bending	0.529117	0	0.529117	0.529117
Mem+Bend	87.215	87.4394	87.6663	87.6663
Peak	4.53905	1.69302	3.81095	4.53905
Total	82.8932	88.9451	83.9248	89.0849

Slika 67. Numerička analiza modela konzole sa 635 KE



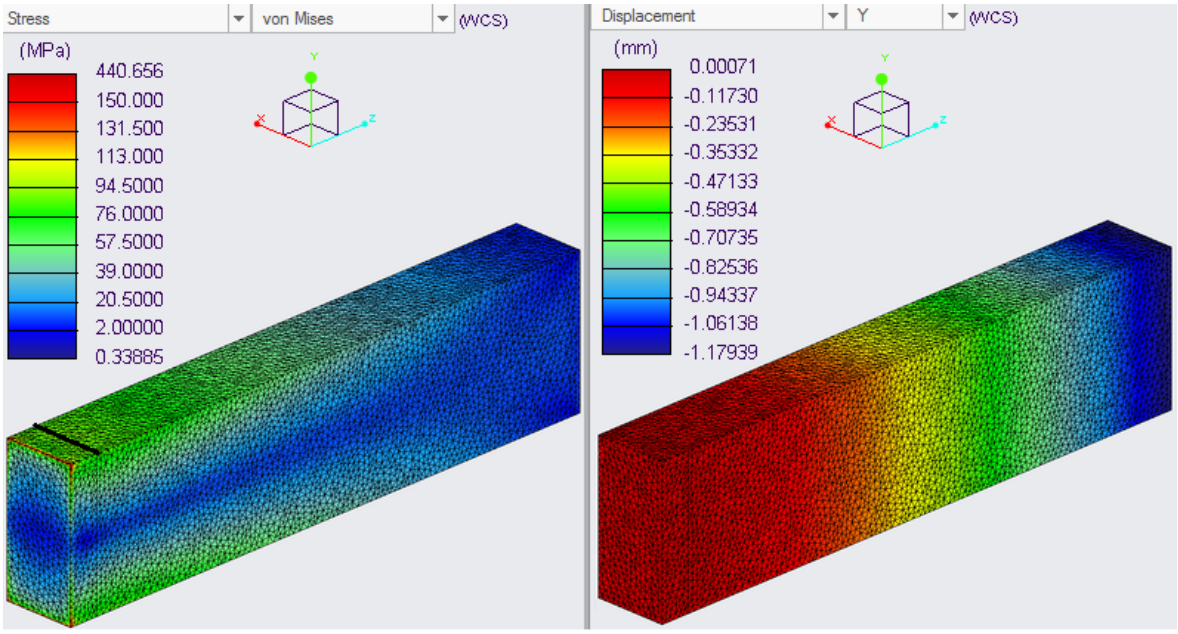
	Point1	Midpoint	Point2	Maximum
Membrane	87.1974	87.1974	87.1974	87.1974
Bending	0.0363505	0	0.0363505	0.0363505
Mem+Bend	87.1737	87.1974	87.221	87.221
Peak	5.42377	1.46557	5.21527	5.42377
Total	81.8041	88.1838	82.0573	88.4796

Slika 68. Numerička analiza modela konzole s 18 667 KE



	Point1	Midpoint	Point2	Maximum
Membrane	87.1727	87.1727	87.1727	87.1727
Bending	0.0277545	0	0.0277545	0.0277545
Mem+Bend	87.1716	87.1727	87.1737	87.1737
Peak	5.28035	1.42886	5.25919	5.28035
Total	81.9358	88.1095	81.9597	88.4257

Slika 69. Numerička analiza modela konzole s 30 045 KE



	Point1	Midpoint	Point2	Maximum
Membrane	87.1736	87.1736	87.1736	87.1736
Bending	0.0172607	0	0.0172607	0.0172607
Mem+Bend	87.1709	87.1736	87.1762	87.1762
Peak	5.24715	1.42262	5.25394	5.25394
Total	81.9681	88.0999	81.9664	88.3933

Slika 70. Numerička analiza modela konzole s 80 447 KE

U tablici 4. objedinjeni su podatci prikupljeni u svih šest analiza. Za početak može se usporediti rješenja naprezanja i progiba dobivenih numeričkim i analitičkim postupkom. Pomoću jednadžbi (11) i (12) određeni su analitičkim postupkom pomaci u iznosu od 1.138 mm te naprezanja iznosa 91.2 MPa. Negativan predznak pomaka u numeričkoj analizi upućuje na smjer pomaka u odnosu na pozitivan smjer osi Y. Prema podatcima može se vidjeti da su analitička i numerička rješenja bliska po iznosu no za bolju ocjenu procijenit će ih se preko postotka u kojem se oni razlikuju što je dano jednadžbama (13) i (14). U te dvije jednadžbe vrijednosti σ_{numerika} i w_{numerika} predstavljaju iznos naprezanja i pomaka dobivenih numeričkim metodama i to tako da su to vrijednosti koje će dati najveću relativnu pogrešku, $\delta\sigma$ za naprezanja, odnosno pomake δw. [72]

$$\delta\sigma = \left|1 - \frac{\sigma_{\text{numerika}}}{\sigma_{10}}\right| \cdot 100 = \left|1 - \frac{88.1}{91.2}\right| \cdot 100 = 3.4\ \%, \qquad \textbf{(13)}$$

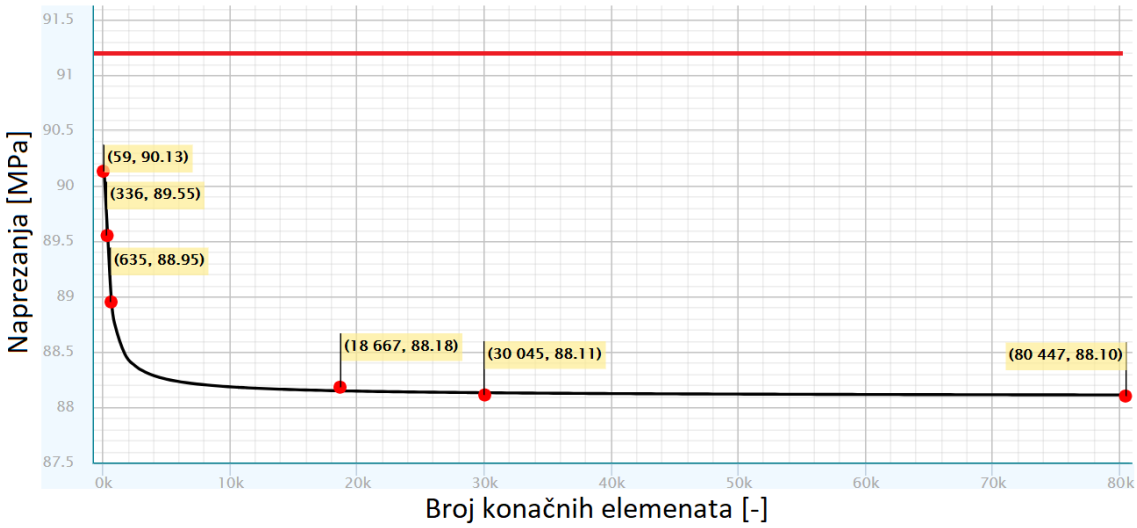
$$\delta w = \left|1 - \frac{w_{\text{numerika}}}{w_{\max}}\right| \cdot 100 = \left|1 - \frac{1.179}{1.138}\right| \cdot 100 = 3.6\ \%. \qquad \textbf{(14)}$$

Iz neposredno određenih relativnih pogrešaka može se vidjeti da se numeričke vrijednosti naprezanja i pomaka razlikuju od analitičkih vrijednosti za manje od 5 % što se smatra prihvatljivom inženjerskom pogreškom. Na temelju prethodne rečenice izvodi se zaključak da su odstupanja analitičkih i numeričkih rješenja prihvatljiva.

Tablica 4. Usporedba rezultata numeričkih analiza

Maksimalna veličina konačnog elementa [mm]	Broj konačnih elemenata [-]	Naprezanje na sredini linije uzorkovanja [MPa]	Pomaci u smjeru osi Y [mm]
50	59	90.13	-1.178
25	336	89.55	-1.179
20	635	88.95	-1.179
5	18 667	88.18	-1.179
4	30 045	88.11	-1.179
2.5	80 447	88.10	-1.179

Drugi dio validacije numeričkih rješenja proveden je kroz kontrolu konvergencije rješenja. Iako je i u tablici 4. moguće vidjeti da je konvergencija ostvarena dodatno je ista prikazana i grafički na slici 71. U grafu konvergencije naprezanja, crvenom linijom naznačeno je analitičko rješenje naprezanja, a crnom su krivuljom aproksimirana numerička rješenja naprezanja koja ovise o broju konačnih elemenata u analizi.



Slika 71. Konvergencija naprezanja uslijed progušćivanja mreže

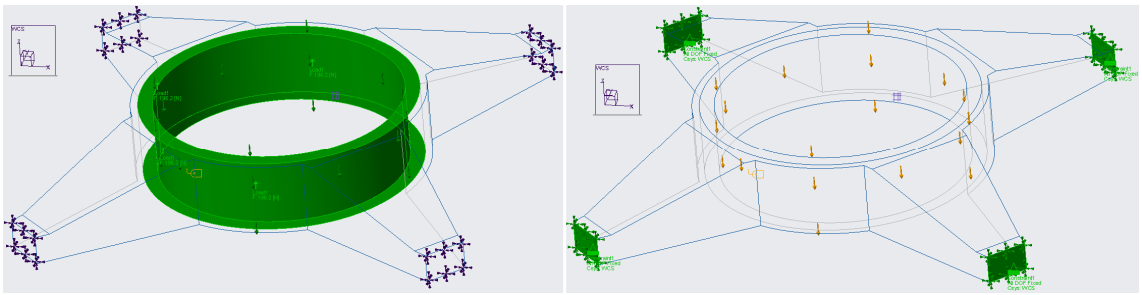
Oba predložena uvjeta validacije konačnih elemenata su zadovoljena. Može se sada zaključiti da su tetraedarski elementi prikladni za daljnju numeričku analizu u kontroli maksimalnih naprezanja i pomaka pri konstrukcijskoj razradi.

2.2.2. Analiza polaznog modela

Prije konstrukcijske razrade uporabom rešetkastih struktura provesti će se numerička analiza naprezanja i pomaka u polaznom modelu. Opterećenje, rubni uvjeti i materijal ne mijenjaju se u narednim analizama pa će isti biti ovdje predstavljeni.

Na slici 72. slijeva je prikazan centralni cilindar čija geometrija mora biti očuvana jer predstavlja prihvatna mjesta za ostale komponente drona koje predstavljaju opterećenje karoserije. Opterećenje je na centralnom cilindru jednoliko raspodijeljeno na tri prihvatne površine (unutarnji plašt i dva čeona kružna vijenca) i to tako da je ekvivalentno sili koju stvara masa od 20 kilograma. Opterećenje je usmjerno u negativnom smjeru Z osi.

Zdesna na slici 72. prikazana je definicija rubnih uvjeta u modelu. Krajnje plohe na krakovima su ukliještene, tj. onemogućeno je svih šest stupnjeva slobode.



Slika 72. Raspodjela opterećenja i rubni uvjeti na numeričkom modelu

Za provedbu analize nužno je konstrukciji pripisati materijal, a u ovom slučaju to je PA 30GF sa sljedećim fizikalnim i mehaničkim svojstvima - gustoća ρ u izrazu (15), modul elastičnosti E u izrazu (16), Poissonov koeficijent υ u izrazu (17) i vlačna čvrstoća R_m u izrazu (18). [70] [71]

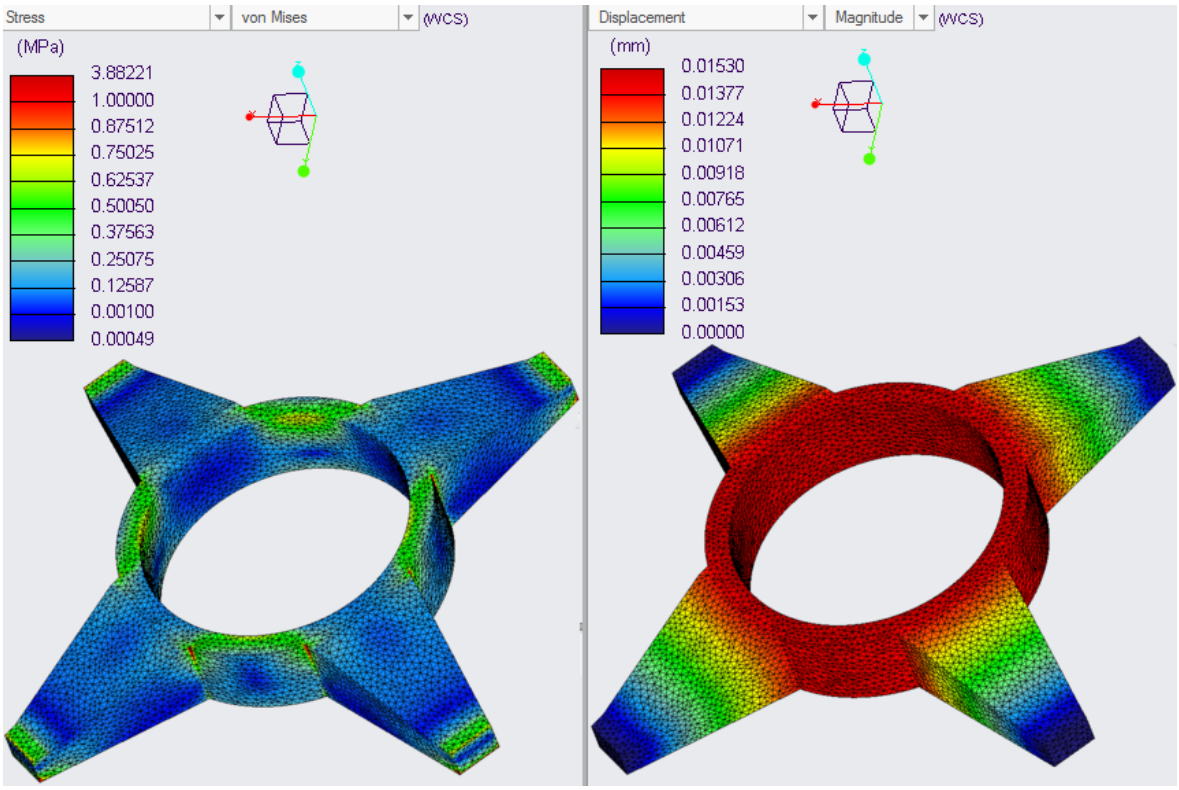
$$\rho = 1.36 \text{ g/cm}^3, \tag{15}$$

$$E = 9.5 \text{ GPa}, \tag{16}$$

$$\upsilon = 0.34, \tag{17}$$

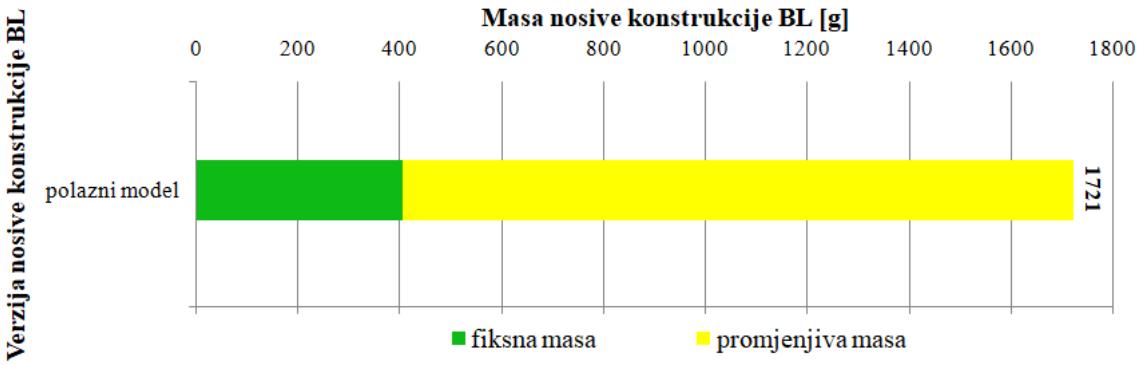
$$R_m = 190 \text{ MPa}. \tag{18}$$

Numeričkom analizom određena su naprezanja i pomaci u polaznoj konstrukciji što je dano slikom 73. Ovakva izvedba nosive konstrukcije predstavlja značajno predimenzioniranu karoseriju. S ciljem smanjenja mase i povećanja iskorištenja materijala mogu se predložiti optimalnije izvedbe karoserije. Te izvedbe bit će predložene na osnovu uporabe modula za izradu rešetkastih struktura i onog za optimizaciju topologije. Potrebno je povesti računa o definiranim ograničenjima u odlomku „Zadatak“ – maksimalni pomak od jednog milimetra i s aspekta čvrstoće maksimalno naprezanje ograničeno je na 80 % vrijednosti vlačne čvrstoće što iznosi 152 MPa.



Slika 73. Naprezanja i pomaci u polaznom modelu (101 829 konačnih elemenata)

Niže je na slici 74. grafom dan prikaz mase nosive konstrukcije bespilotne letjelice za predloženu polaznu verziju karoserije. Kao što se može vidjeti, zelenom je bojom u grafu naznačena fiksna masa koju čini masa dijelova koji ostaju nepromijenjeni (centralni cilindar i prihvatne ploče za motore). Žutom je bojom dana vrijednost preostalog dijela polazne konstrukcije; taj dio predstavlja masu, odnosno volumen, na koji se smije utjecati. Cilj je dakle, smanjiti veličinu varijabilne mase kako bi se povoljno utjecalo na sveukupnu masu.



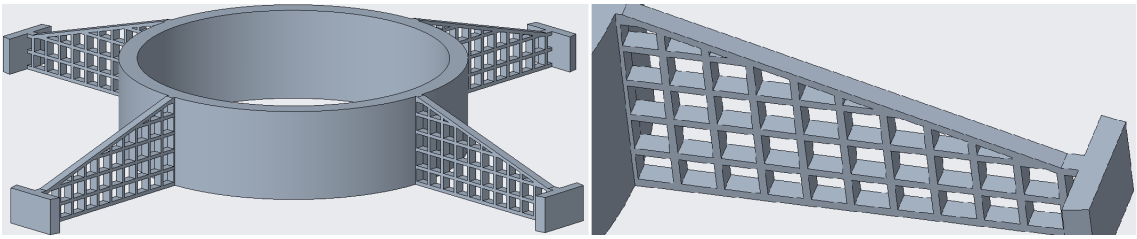
Slika 74. Grafički prikaz mase nosive konstrukcije BL (1)

2.3. Prijedlog konstrukcije temeljen na uporabi rešetkastih konstrukcija

U ovom poglavlju dane su četiri verzije nosive konstrukcije bespilotne letjelice. Te verzije izrađene su uporabom rešetkastih struktura i provjerene numeričkim metodama. Pri izradi mreže koju čine tetraedarski konačni elementi u svim je verzijama nametnuto ograničenje veličine elementa od 3 milimetra. Naprezanja i pomaci pri punom opterećenju uspoređeni su s dopuštenim vrijednostima koje su već definirane. Treba spomenuti da je u sve četiri naredne verzije uklonjen dio centralnog tijela koje je u obliku cilindra kako bi se maksimalno smanjila finalna masa karoserije. Zadržan je samo onaj dio cilindra koji nije dozvoljeno mijenjati. Taj postupak izveden je jer se na slici 73. može vidjeti da su naprezanja u tom dijelu karoserije apsolutno zanemariva. Ukoliko se u narednim numeričkim analizama s uklonjenim dijelom cilindra pojave visoka naprezanja u preostalom cilindru, utoliko će povratak uklonjenog vanjskog cilindra biti detaljnije razmotren.

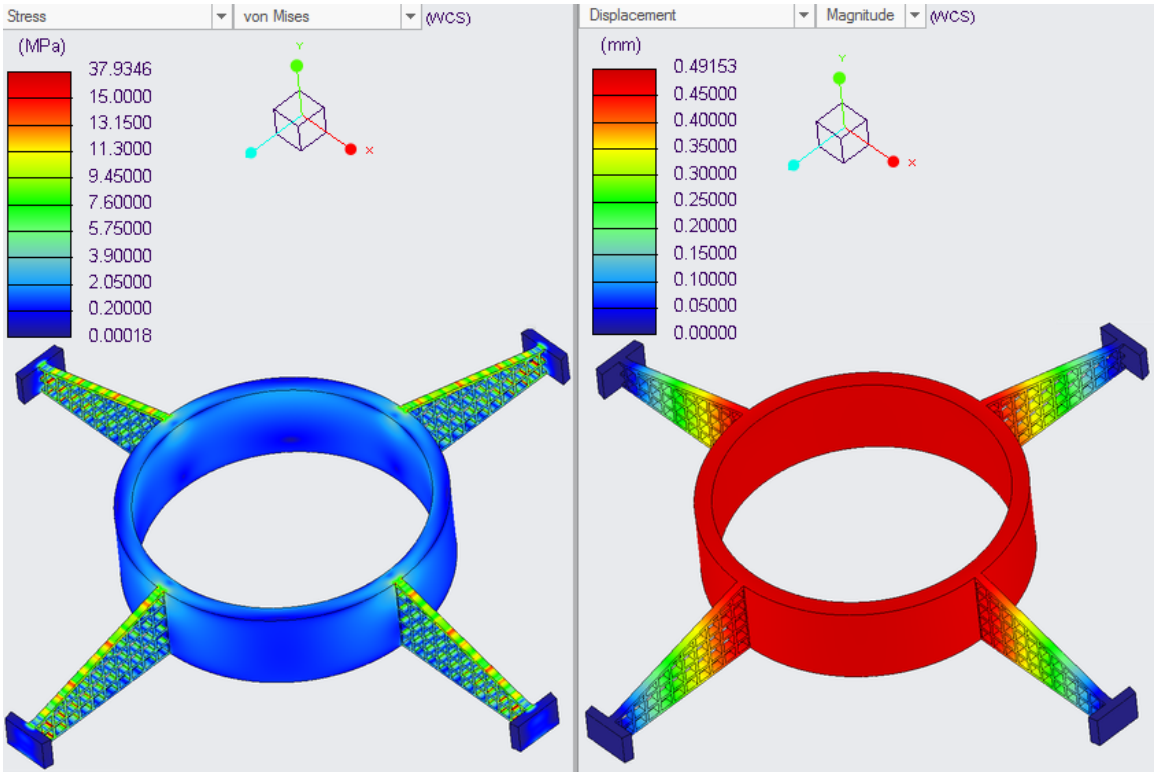
2.3.1. Verzija 1

Verzija 1, prikazana slikom 75., izvedena je uporabom rešetkaste strukture s četverokutnom osnovnom građevnom jedinicom. Dimenzije rabljene kvadratne ćelije su 10x10x1.8; takva ćelija ispunjava unutarnji volumen nosača. Visina nosača je promjenjiva jer prati geometriju polaznog modela. S druge strane, širina nosača ne prati polaznu geometriju jer bi bila značajno predimenzionirana, a uštede na masi ne bi ostvarile puni potencijal. Dakle, širina nosača cijelom je dužinom konstantna i za ovu verziju iznosi 5 milimetara.



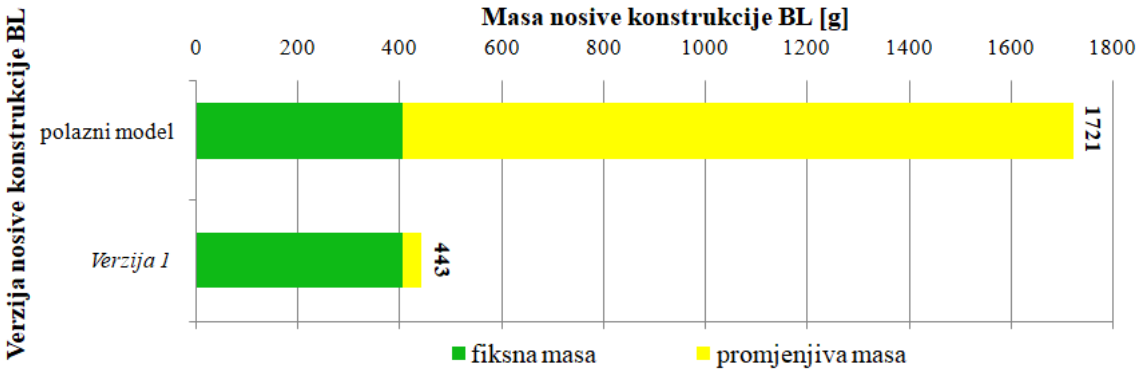
Slika 75. ***Verzija 1***

Nakon modeliranja provedena je numerička analiza *Verzije 1*. Vrijednosti naprezanja i pomaka određene su na temelju diskretiziranog modela sa 150 935 konačnih elemenata. Prema slici 76. vidi se da su oba kriterija zadovoljena, tj. naprezanja i pomaci ispod su dopuštenih vrijednosti. Također je vidljivo da je uklanjanje vanjskog dijela centralnog cilindra bilo u potpunosti opravdano jer su naprezanja još uvijek u zadovoljavajućim granicama, a pozitivno se djelovalo na ukupnu masu karoserije.



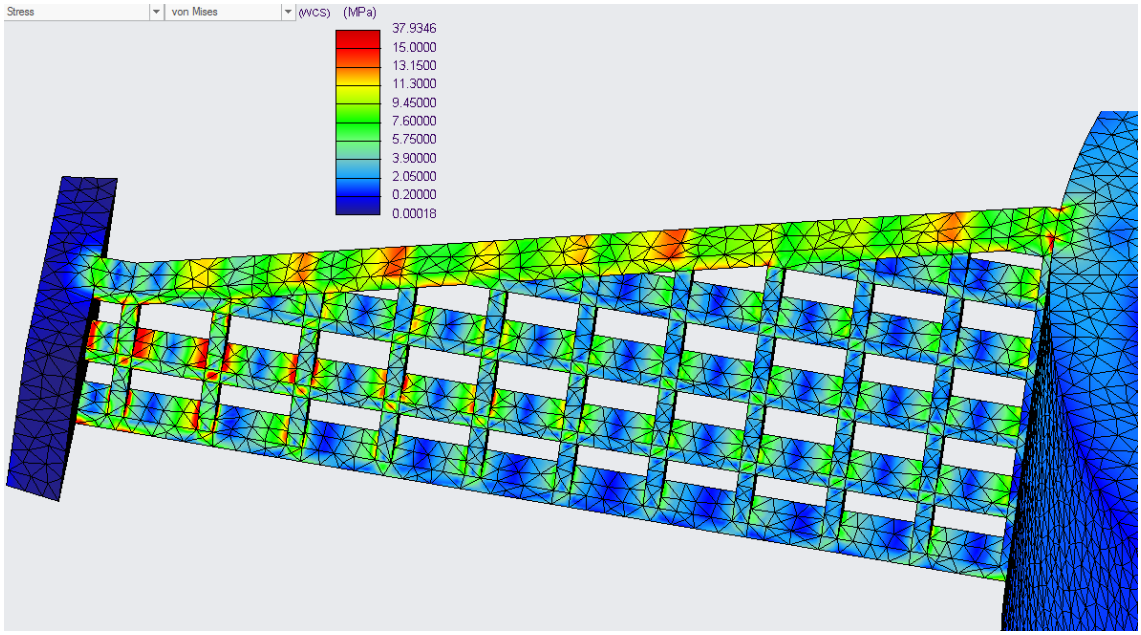
Slika 76. *Verzija 1* rezultati numeričke analize

Grafički prikaz usporedbe masa polazne verzije i nove verzije, *Verzije 1*, dan je kroz sliku 77. Novija karoserija dana u ovoj verziji ima 433 grama što ugrubo predstavlja tek četvrtinu mase predloženog polaznog modela.



Slika 77. Grafički prikaz mase nosive konstrukcije BL (2)

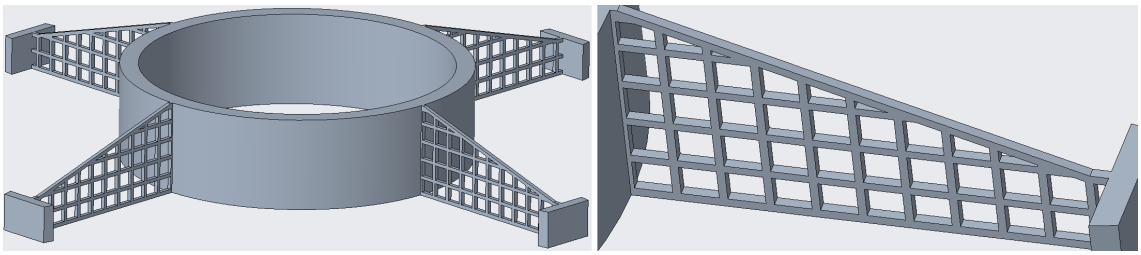
Uštede mogu biti i veće jer progib i vršno naprezanje u konstrukciji nisu dosegnuli kritične vrijednosti što je prikazano u slici 76., a detaljnije o naprezanjima na segmentu karoserije može se vidjeti i sa slike 78.



Slika 78. Naprezanja na dijelu karoserije *Verzije 1* diskretizirane sa 150 935 tetraedarskih KE

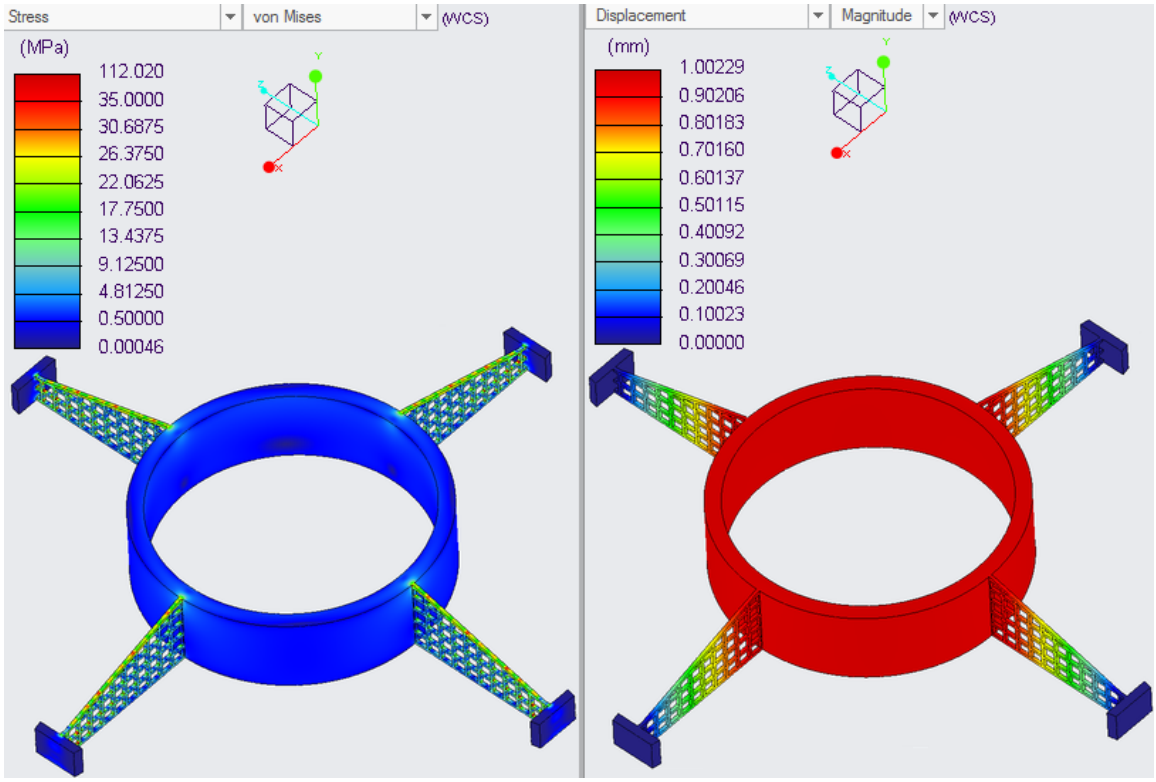
2.3.2. Verzija 2

Verzija 2 gotovo da je identična *Verziji 1*, a ono što ih razlikuje jedino je širina. Širina je i u ovom slučaju konstantna, ali iznosi 2.2 milimetra. Ovako malena širina rezultat je optimizacije veličine koja za cilj ima smanjiti masu uz zadovoljenje nametnutih kriterija. *Verzija 2*, slika 79. ju prikazuje, izvedena je tako da je predložena minimalna širina nosača kako bi se zadovoljio nametnuti pomak od 1 mm.



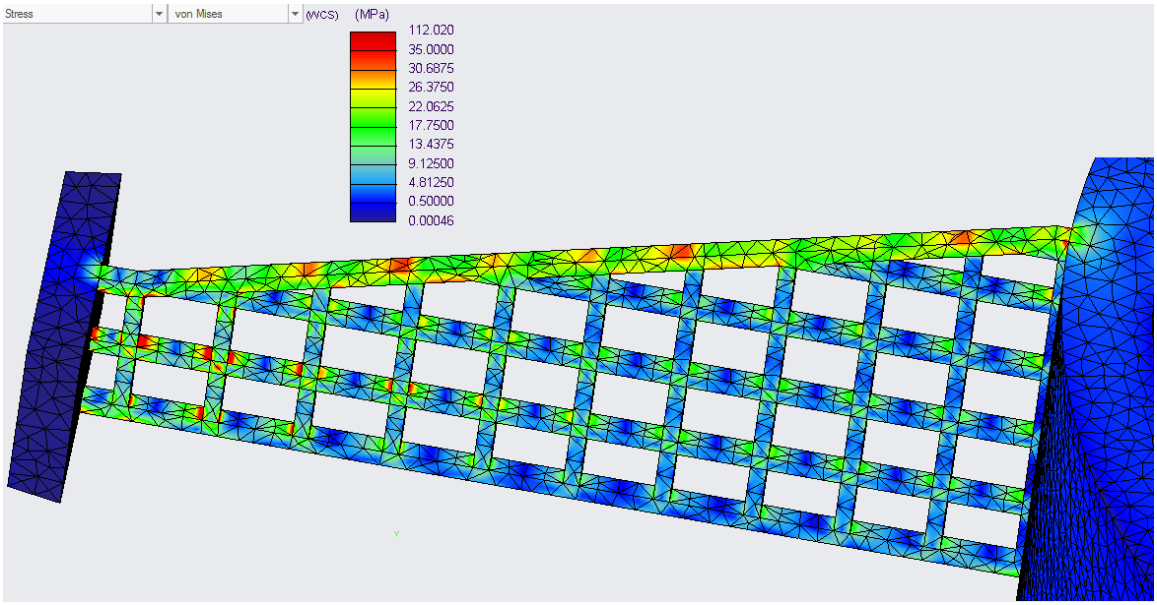
Slika 79. *Verzija* 2

Nakon diskretizacije sa 140 511 tetraedarskih konačnih elemenata i numeričke analize dobivena su naprezanja koja su očekivano povećana na prethodnu verziju no i dalje ispod kritičnih vrijednosti. Pomaci su, kako je već i spomenuto, dosegnuli iznos granične vrijednosti od 1 mm. Može se onda zaključiti da je za ovakav oblik nosača i ćelije minimalna vrijednost širine istog 2.2 milimetra, a ostale, manje vrijednosti ne bi zadovoljile nametnuta ograničenja.



Slika 80. ***Verzija 2*** **rezultati numeričke analize**

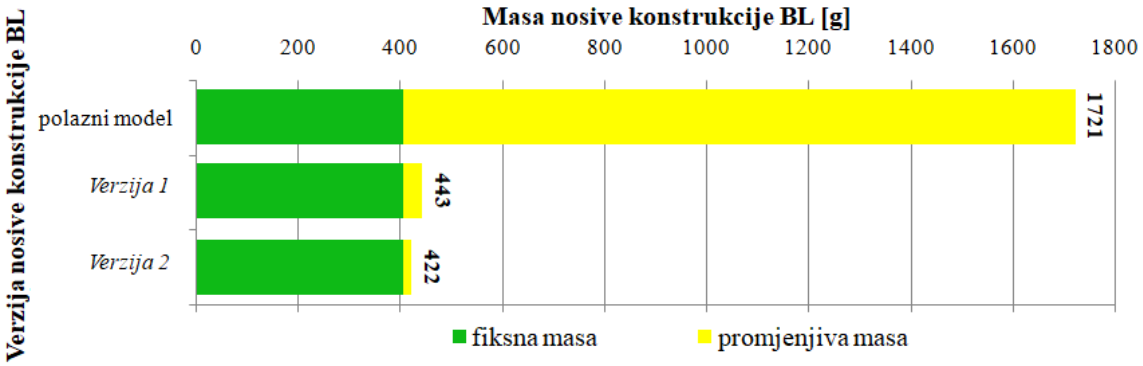
Osim što se sa slike 81. može dobiti uvid u mrežu na dijelu karoserije mogu se detaljnije proučiti i vrijednosti naprezanja. S aspekta čvrstoće mogao bi se predložiti i nosač manje širine no u tom slučaju uvjet krutosti ne bi bio zadovoljen.



Slika 81. Naprezanja na dijelu karoserije ***Verzije 2*** **diskretizirane sa 140 511 tetraedarskih KE**

Masa nosivog tijela iznosi 422 grama, ako se izradi po mjerama koje su identične *Verziji 2*. Razlika u masi između dviju verzija nije značajno velika no ukoliko se traži

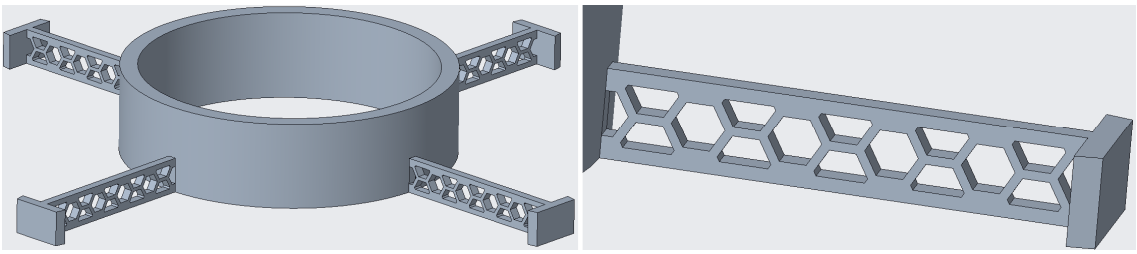
maksimalno smanjenje mase, *Verzija 2* čini se kao bolje rješenje u usporedbi s *Verzijom 1*; može se to vidjeti na slici 82.



Slika 82. Grafički prikaz mase nosive konstrukcije BL (3)

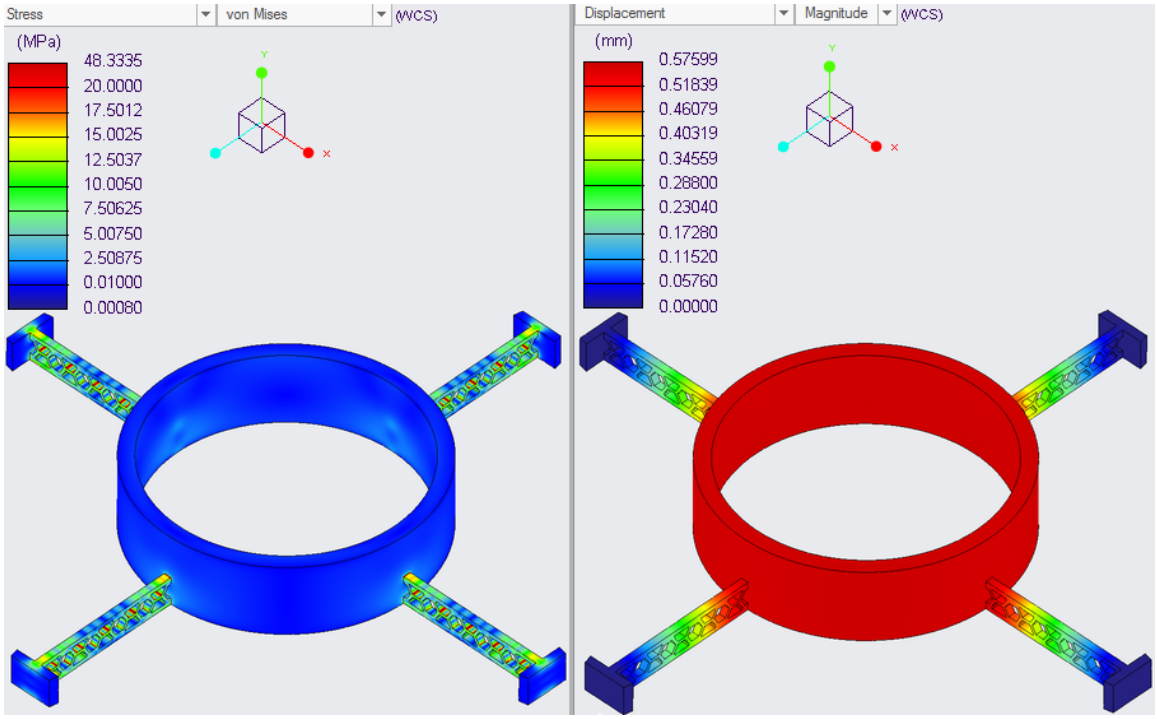
2.3.3. Verzija 3

Verzija 3 razlikuje se od prethodne dvije verzije karoserije BL, a njen izgled vidljiv je na slici 83. U ovoj verziji četverokutni oblik ćelije zamijenjen je šesterokutnom ćelijom koja nalikuje pčelinjem saću. Ćelija ima dimenzije, tj. može se upisati u kvadrat stranica, 14x14, a debljina potpornja ćelije iznosi 2 mm; dakle dimenzije ćelije su 14x14x2. U ovoj verziji i *Verziji 4* napuštena je geometrija s promjenjivom visinom. Zapravo, visina i širina kraka jednake su cijelom dužinom. U *Verziji 3* predložena je širina kraka u iznosu 5 milimetara.



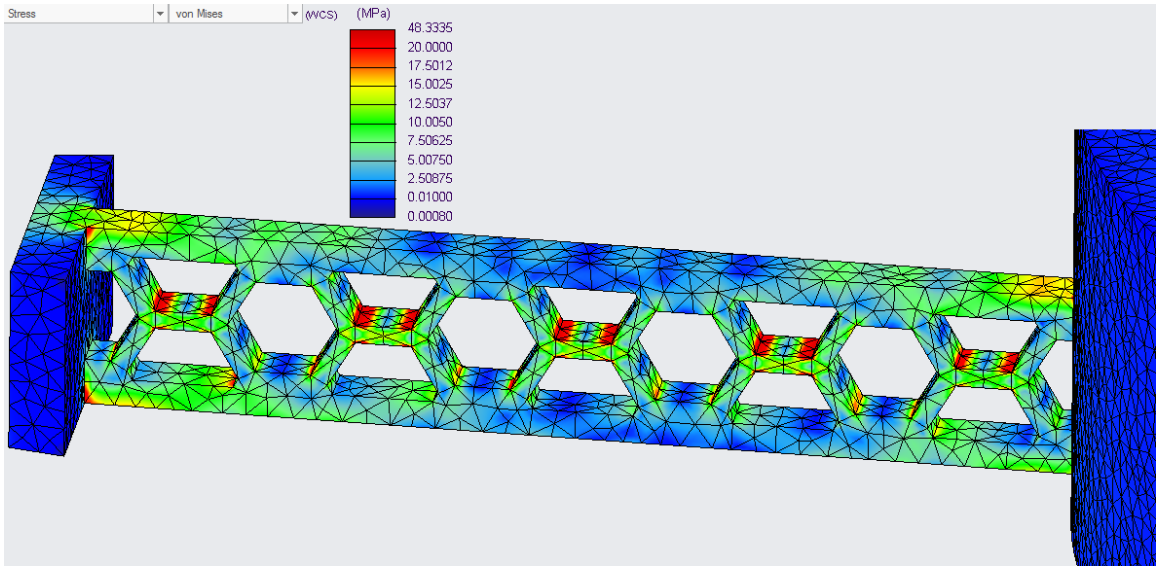
Slika 83. *Verzija 3*

141 539 tetraedarskih konačnih elemenata korišteno je za izradu mreže kojom je diskretiziran volumen *Verzije 3*. Numeričkom analizom prikazanom na slici 84. utvrđeni su iznosi naprezanja i pomaka u karoseriji pri punom opterećenju. Iz tih prikaza može se vidjeti da su uvjeti čvrstoće i krutosti zadovoljeni pa se može razmisliti o daljnjim smanjenjima dimenzija.



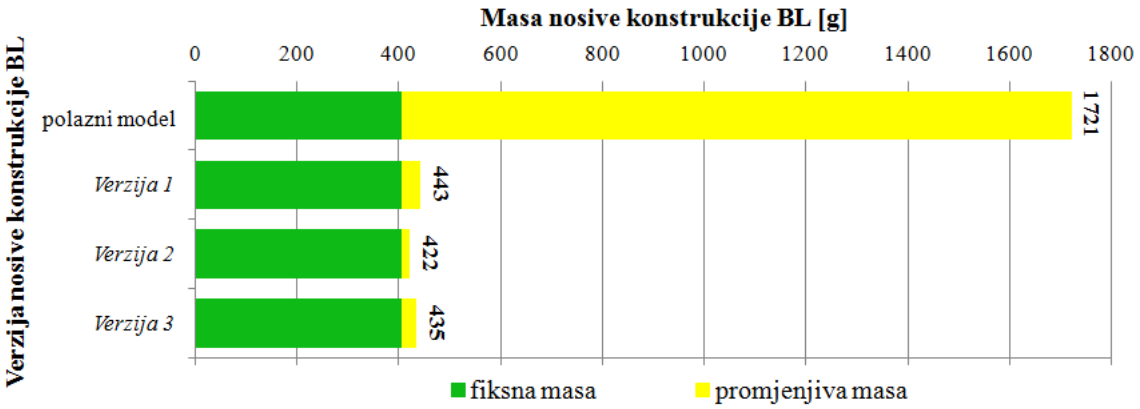
Slika 84. ***Verzija 3*** **rezultati numeričke analize**

Zorniji prikaz kraka s mrežom KE osiguran je slikom 85. Na istoj se slici vidi iznos i položaj vršnih naprezanja koja su značajno ispod zadatkom predložene kritične vrijednosti.



Slika 85. Naprezanja na dijelu karoserije ***Verzije 3*** **diskretizirane sa 141 539 tetraedarskih KE**

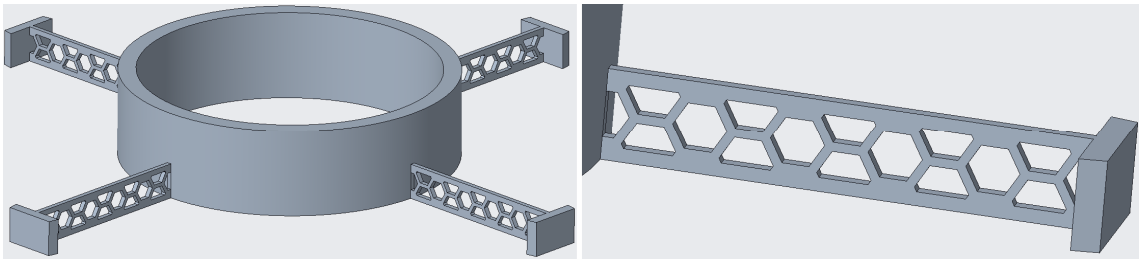
Karoserija naziva *Verzija 3* ima masu od 435 grama čime se može upisati između vrijednosti masa prethodne dvije verzije. Kako i ovaj oblik karoserije može ponuditi bolje rješenje po pitanju uštede mase predložena je *Verzija 4*.



Slika 86. Grafički prikaz mase nosive konstrukcije BL (4)

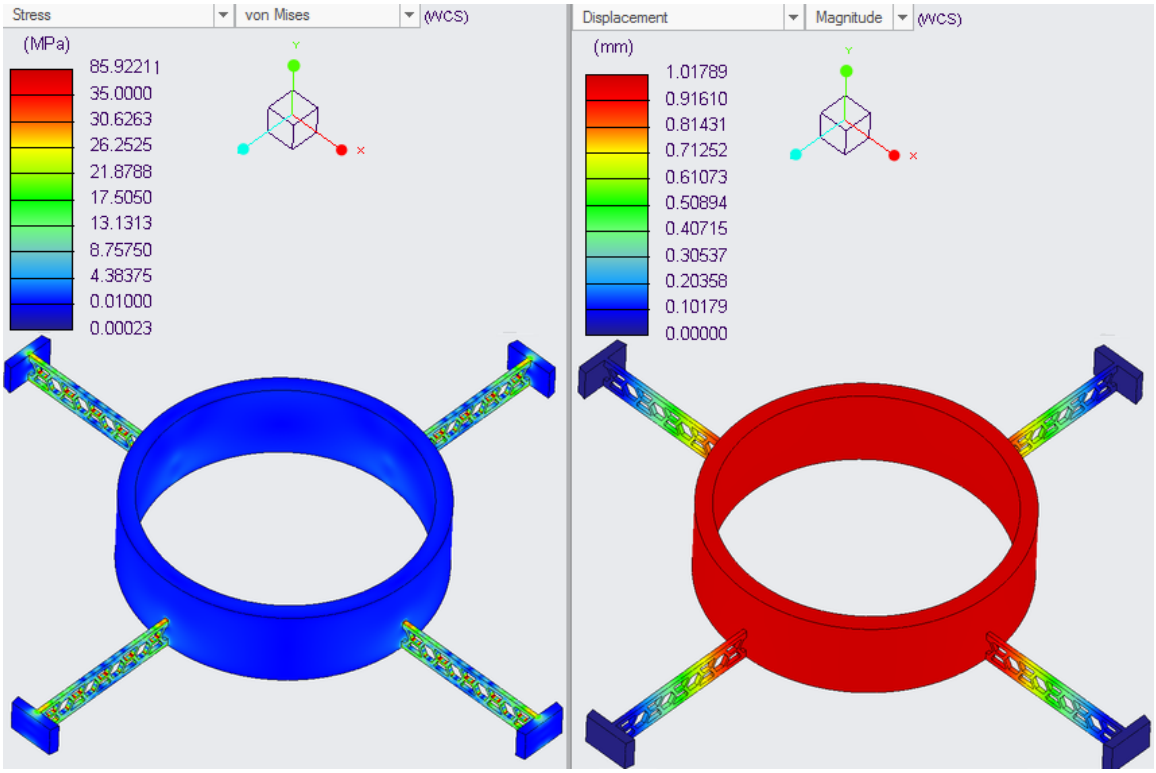
2.3.4. Verzija 4

Kao što je spomenutu u prethodnom retku da u *Verziji 3* za danu geometriju iskorištenje materijala s obzirom na nametnuta ograničenja nije potpuno, predložena je naredna verzija, *Verzija 4*. *Verzija 4* prikazana slikom 87. od prethodne se verzije razlikuje u širini kraka dok su ostale geometrijske karakteristike iste. Konstantna širina kraka aktualne verzije iznosi 2.7 milimetara čime su pomaci u modelu pri opterećenju ekvivalentnom 20 kilograma jednaki onima definiranima u zadatku, tj. 1 mm što će se i moći vidjeti u prikazu rezultata numeričke analize.



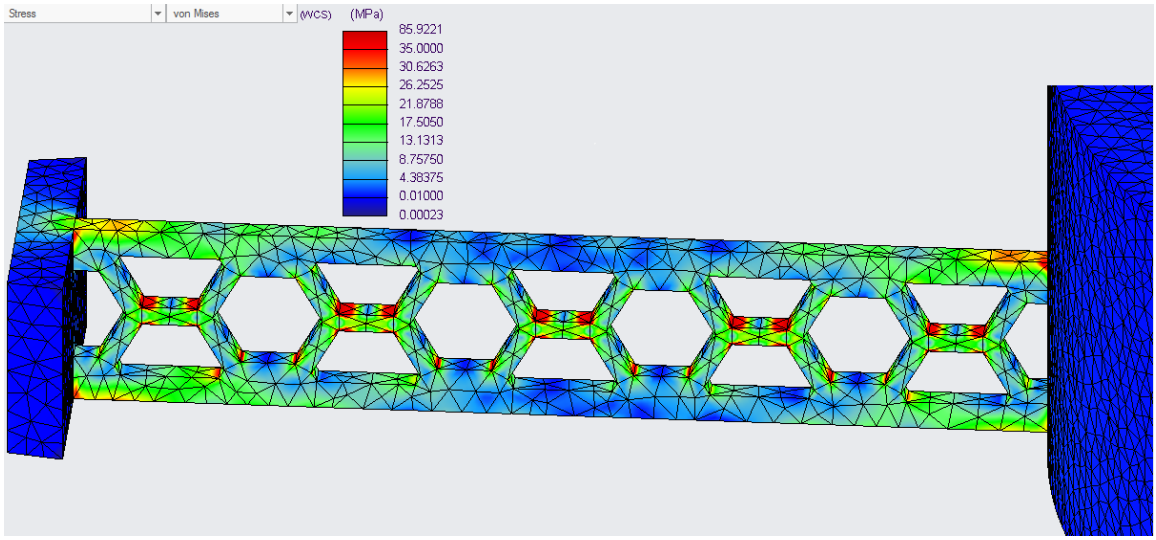
Slika 87. *Verzija 4*

Vidljivo je sa slike 88. da su najveći iznosi naprezanja zadovoljavajućih vrijednosti; slično je i s pomacima u karoseriji. Pomaci iznose približno 1.02 mm što predstavlja prebačaj od zadanih vrijednosti za 2 % pa je moguće pozvati se na prihvatljivost inženjerskih rješenja ukoliko ona variraju do nekih 5 %. Stoga, zaključiti se može da za ovakvu geometriju kraka širina od 2.7 mm predstavlja približno graničnu vrijednost s kojom su zadovoljeni uvjeti određeni u zadatku.



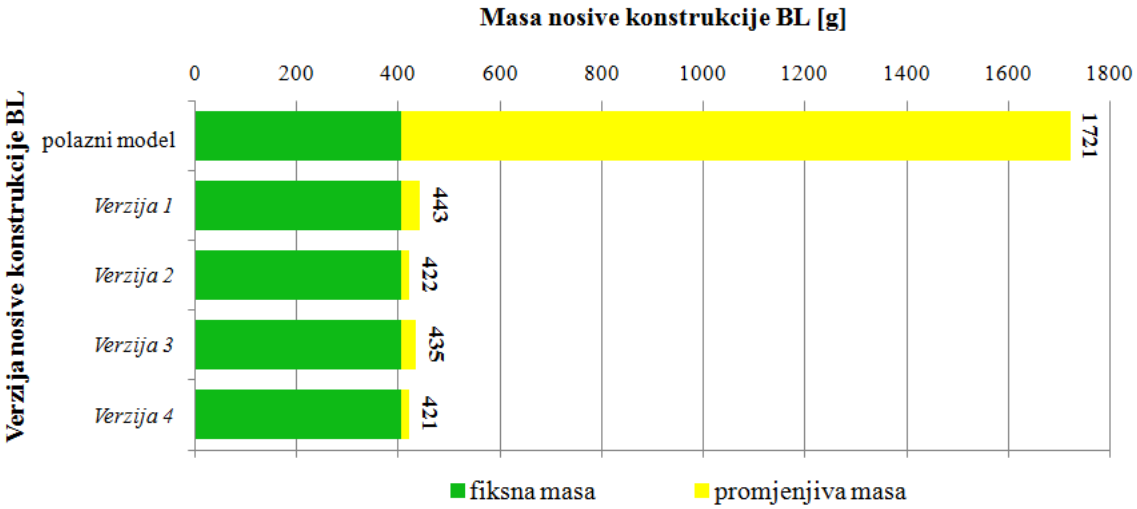
Slika 88. ***Verzija 4*** **rezultati numeričke analize**

Bolji pogled na raspodjelu naprezanja u kraku *Verzije 4* može se dobiti razmatranjem slike 89. Mjesta s naglim promjenama geometrije označena su crvenom bojom. To upućuje na povišena naprezanja u tim područjima no ona su ipak značajno manja od vlačne čvrstoće materijala ili ulaznim podatcima propisane vrijednosti naprezanja.



Slika 89. Naprezanja na dijelu karoserije ***Verzije 4*** **diskretizirane sa 135 842 tetraedarska KE**

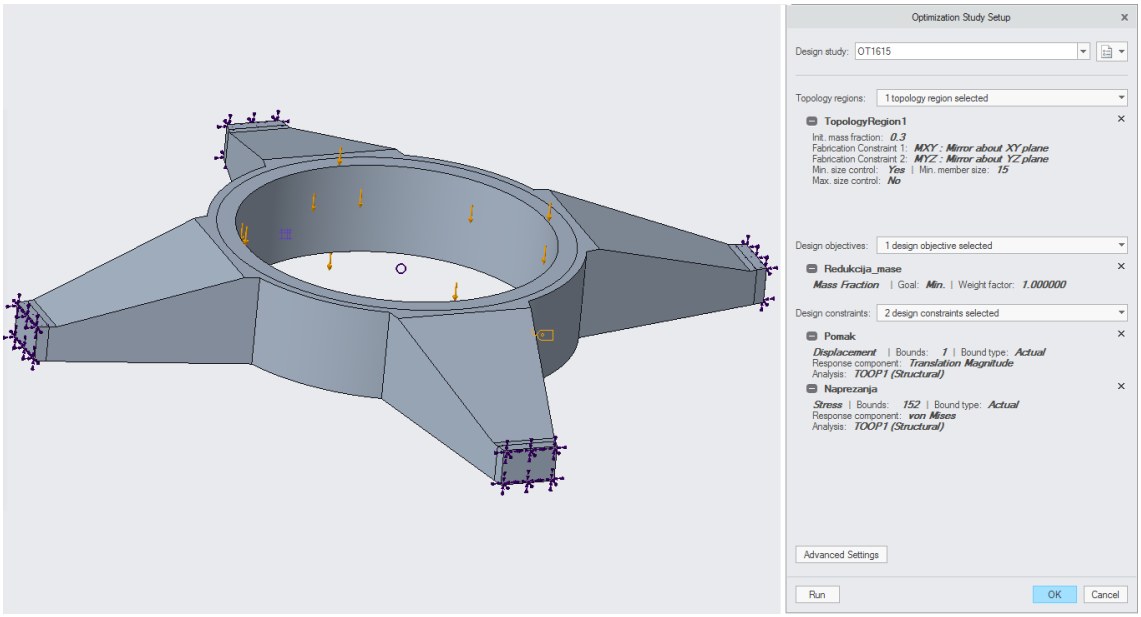
U grafičkom prikazu, slika 90., dana je vrijednost mase *Verzije 4.* Vidi se da je od svih predloženih rješenja ovo baš najmanje mase iznosa 421 gram. Premda je razlika u usporedbi s *Verzijom 2* minimalna, 1 gram.



Slika 90. Grafički prikaz mase nosive konstrukcije BL (5)

2.4. Prijedlog konstrukcije temeljen na uporabi topološke optimizacije

U ovom poglavlju dane su dvije verzije nosive konstrukcije bespilotne letjelice. Te verzije izrađene su uporabom modula za optimizaciju topologije. Polazna geometrija s rubnim uvjetima i opterećenjem poznata je iz prethodne konstrukcijske razrade no kao mali podsjetnik može se razmotriti lijevi prikaz slike 91. Ti ulazni podatci iznova su jednaki za obje predstavljene verzije. Zdesna, na slici 91., osiguran je prikaz prozora s postavkama za optimizacijsku studiju. Iz nje se može vidjeti da je kao cilj razvoja potrebno minimizirati masu uz poštivanje ograničenja – dozvoljeni pomak i maksimalno naprezanje. Cilj i ograničenja postavljeni prije pokretanja procesa optimizacije topologije također su jednaki za obje verzije. Dodatno se u tom prozoru mogu nametnuti ograničenja optimizacije s proizvodnog stajališta kako bi se dobili oblici pogodni za ekstrudiranje ili, primjerice, simetrične strukture. Za ovaj razvojni proces korišteni su samo uvjeti simetrije. Sve predstavljeno u ovom odjeljku jednako je za obje verzije; no po čemu se onda razlikuju? Broj iteracija u procesu optimizacije i minimalna veličina članova ulazni su podatci koji rezultiraju raznolikošću *Verzije 5* i *Verzije 6.*

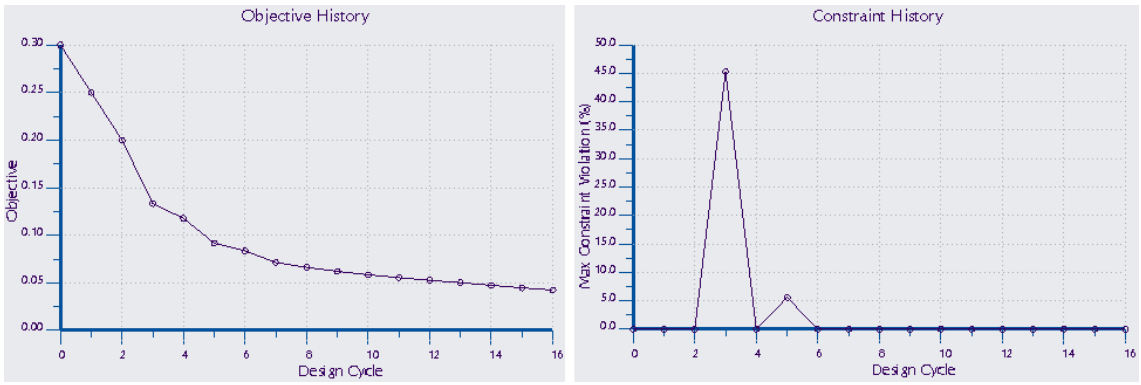


Slika 91. Ulazni podatci za topološku optimizaciju

2.4.1. Verzija 5

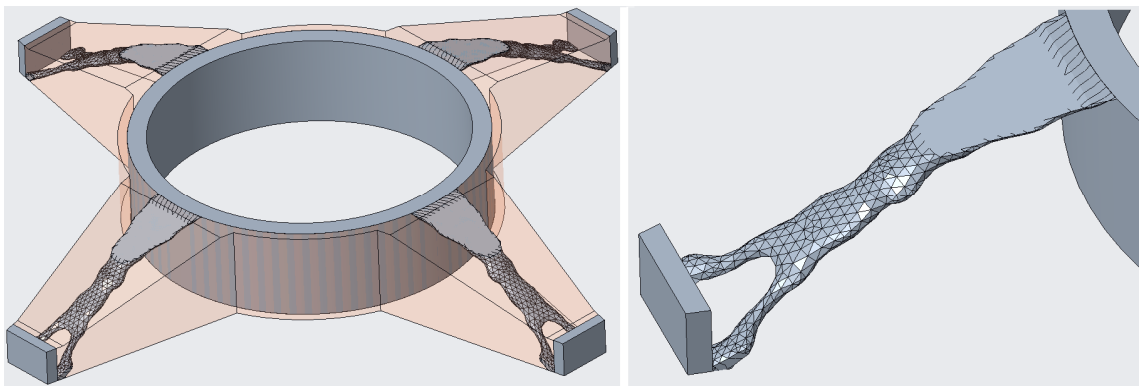
Ova verzija rezultat je minimalne veličine člana u iznosu 15 milimetara uz nametnuto zaustavljanje procesa nakon 16. iteracije. Dva su grafa prikazana slikom 92. Lijevi graf prikazuje cilj topološke optimizacije kako ovisi o krugu iteracije. U ovom je slučaju cilj topološke optimizacije masa. Iz lijevog je grafa onda moguće analizirati krivulju promjene

mase ovisno o krugu iteracije. Kad se već govori o iteraciji treba spomenuti da se optimizacija topologije može zaustaviti na dva načina. Prvo, moguće je definirati broj iteracija prije pokretanja samog procesa pri čemu sustav zaustavlja proces kada dosegne maksimalni broj dopuštenih iteracija. Drugi način zaustavljanja optimizacije topologije je da sustav sam analizira napredak trenutne iteracije u odnosnu na prethodnu. Jednostavnije bi bilo reći, za ovaj drugi slučaj, ako krivulja u lijevom grafu konvergira i nije ostvaren značajan napredak, sustav se samostalno zaustavlja. Ovaj zaštitni mehanizam može se smatrati korisnim jer optimizacija topologije s aspekta računalnih resursa i potrebnog vremena za analizu nije jednostavan proces. Desni grafikon, slika 92., donosi prikaz odstupanja ograničenja dobivenih u pojedinom krugu iteracije i onih nametnutih. Krivulje u oba grafa ovise dakle o koraku iteracije.



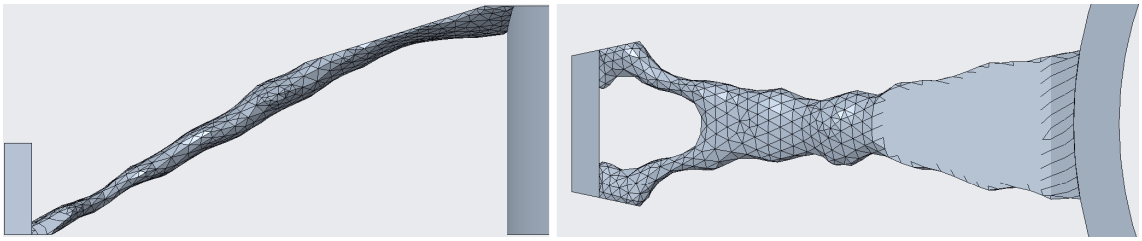
Slika 92. Ovisnost cilja i ograničenja optimizacije topologije o iteraciji (*Verzija 5*)

Na niže prikazanoj slici 93. napokon je moguće vidjeti *Verziju 5*. Kako bi se dobio što bolji dojam rezultata topološke optimizacije osiguran je prikaz u odnosu na volumen polaznog modela. Dodatno je, zdesna, pobliže prikazan jedan krak nosivog tijela. *Verzija 5* nije geometrijski dodatno uređivana pa joj je površina pomalo gruba, izlomljena. Takav trokutima opločen volumen može ukazati na mrežu konačnih elemenata koji se koriste pri optimizaciji topologije o čemu se detaljnije može čitati u poglavlju *Optimizacija.*



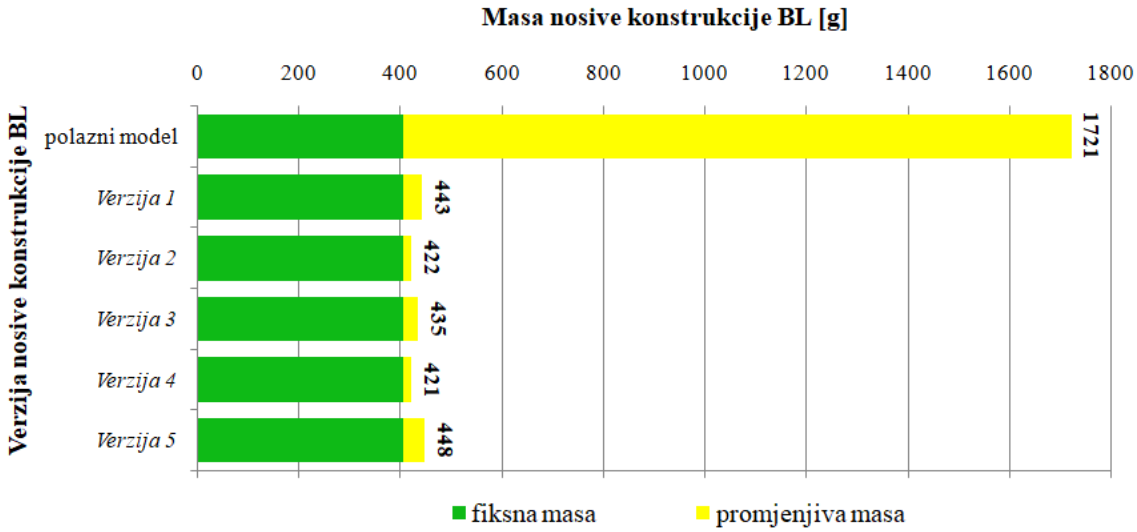
Slika 93. *Verzija 5*

Zbog nepravilne građe dodatni pogledi na geometriju kraka prikazani su na slici 94.



Slika 94. *Verzija 5* (dodatni pogledi)

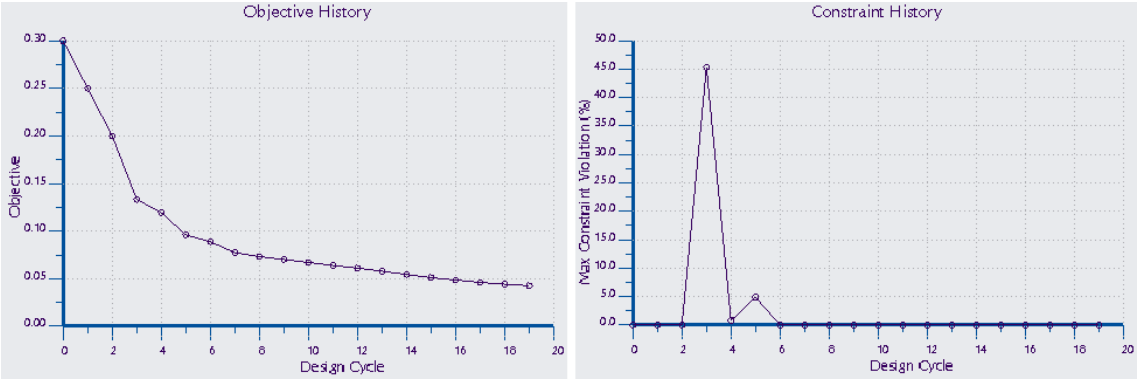
Ponuđena *Verzija 5* nešto je veće mase od prethodnih verzija što se može vidjeti prema dijagramu na slici 95.



Slika 95. Grafički prikaz mase nosive konstrukcije BL (6)

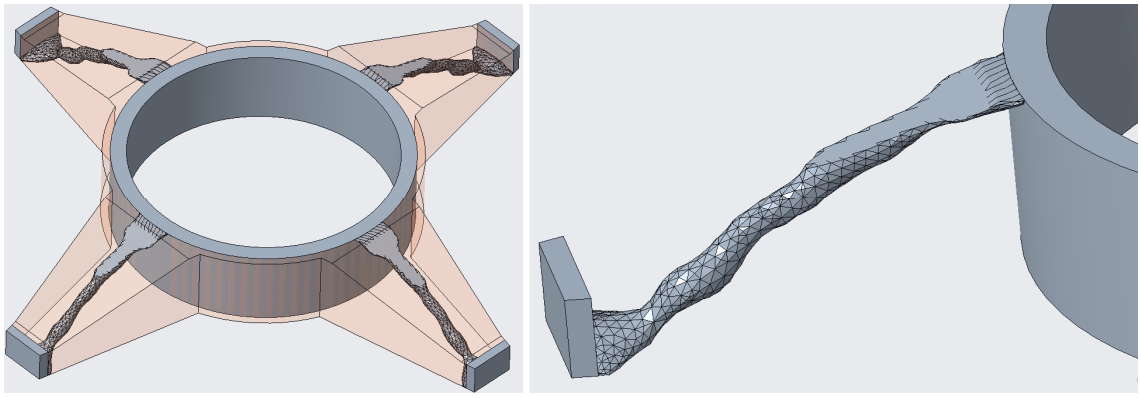
2.4.2. Verzija 6

Verzija 6 razlikuje se od *Verzije 5* po definiciji minimalne veličine člana koja u ovom slučaju iznosi 25 mm, dakako vidljivo je i sa slike 96. da se radi o 19 iteracija optimizacije topologije. Način tumačenja dvaju dijagrama detaljno je opisano u odlomku *Verzije 5*.



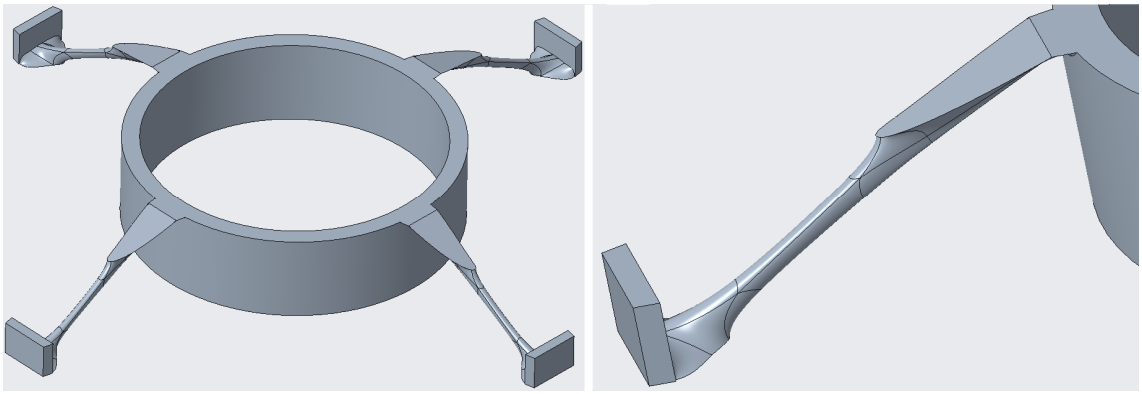
Slika 96. Ovisnost cilja i ograničenja optimizacije topologije o iteraciji (*Verzija 6*)

Na slici 97. moguće je razmotriti rezultat topološke optimizacije koji je, usporedbe radi, smješten unutar polaznog volumena, a dodatno je zornije prikazan i jedan krak. Nosivo tijelo u ovoj izlomljenoj izvedbi neće biti zadržano.



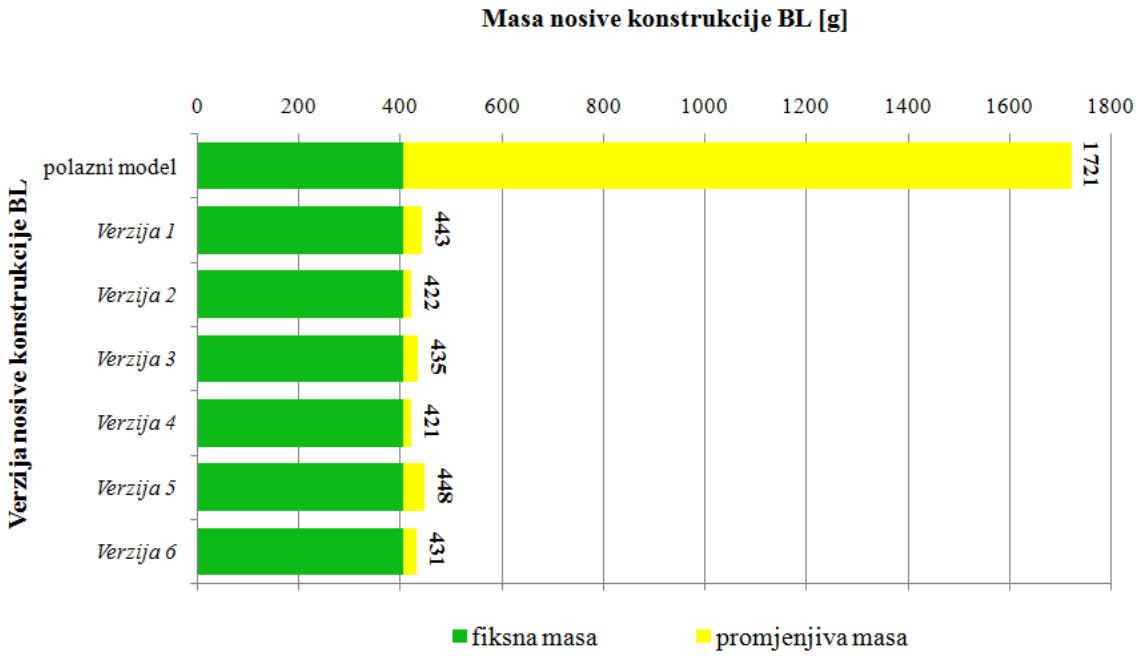
Slika 97. ***Verzija 6*** **(prije rekonstrukcije geometrije)**

Moguće je unutar programskog paketa nakon provedene topološke optimizacije rekonstruirati geometriju kako bi se dobile površine manje hrapavosti. U usporedbi s prikazom na prethodnoj slici, na slici 98. dana je *Verzija 6* nastala rekonstrukcijom geometrije po završetku optimizacije topologije. Ovim je postupkom dobiven krak *pravilnije* geometrije.



Slika 98. ***Verzija 6***

Nadograđeni grafikon s masama polaznog modela i svih verzija predstavljen je kroz sliku 99. Na njemu se, između ostalog, može vidjeti da se posljednja, šesta, verzija masom od 431 gram smjestila u približno središte raspona masa svih verzija.

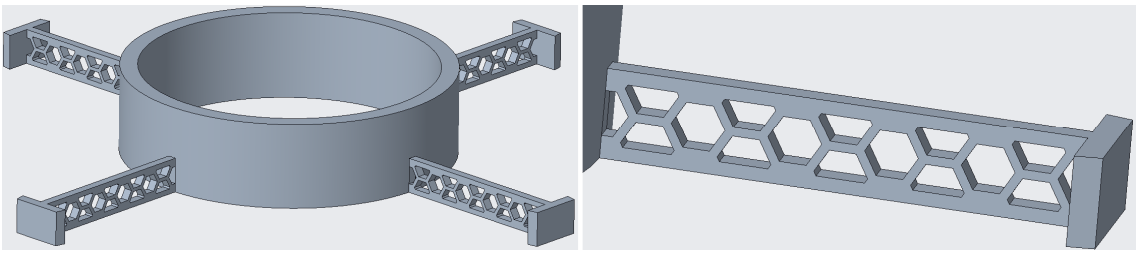


Slika 99. Grafički prikaz mase nosive konstrukcije BL (7)

3. ZAKLJUČAK

3.1. Izbor verzije nosivog tijela bespilotne letjelice

Kao što se može vidjeti na niže prikazanoj slici 100., odabrano rješenje za izvedbu nosivog tijela bespilotne letjelice ono je pod imenom *Verzija 3*.



Slika 100. Predloženo konačno rješenje - *Verzija 3*

Iako su ponuđene verzije s manjom masom, evo nekoliko razloga zašto je *Verzija 3* bolji izbor od ostalih ponuđenih.

Visina kraka *Verzije 3* iznosi 40 % visine centralnog cilindra što ostavlja prostor za smanjenje visine samog cilindra, naravno, ukoliko razmještaj ostalih komponenata dozvoljava takav pothvat. Masa sva četiri kraka sumarno predstavlja tek 6.9 % ukupne mase nosivog tijela pa je dodatne uštede na masi potrebno potražiti u preoblikovanju centralnog tijela prije no u rekonstrukciji krakova, čime bi se osigurale minimalne redukcije mase. Ukoliko smanjenje visine centralnog cilindra nije opcija, utoliko treba razmisliti o rešetkastoj ispuni samog cilindra kako bi se dobio šupljikav, tj. olakšan centralni dio. Više je puta kroz rad prikazana rešetkasta ispuna kao izvrstan način smanjenja mase uz minimalne promjene u integritetu konstrukcije.

Nadalje, pri izvođenju numeričkih analiza u obzir nije uzet reakcijski moment koji na sebe preuzimaju krakovi. Reakcijski moment rezultat je vrtnje i naglih ubrzanja propelera zbog mogućih žustrih promjena smjera gibanja kakve su karakteristične za dronove. Razumljivo je onda da takvi dodatni momenti nisu rijetka pojava. *Verzija 3* zbog svojih nešto većih dimenzija (debljina kraka) posjeduje zalihu materijala za preuzimanje dodatnih momenata. Dodatno treba istaknuti da je pravilna geometrija izrazito prikladna za izradu mreže konačnih elemenata, a samim tim i numeričku analizu.

Napokon, s estetskog aspekta izvedba ovakva kraka odaje dojam pouzdane i stabilne konstrukcije. Već viđene slične izvedbe rešetkastih konstrukcija svakako doprinose povjerenju pri uporabi ovakvih krakova.

3.2. Opći osvrt

U vremenu brze smjene trendova i mahnitog zastarijevanja izvedbi proizvoda, aditivne tehnologije sve intenzivnije bivaju korištene od strane profesionalnih korisnika. Naravno, nikako se ne smije zanemariti ni amaterska uporaba. Aditivne tehnologije pružaju mogućnost izrade geometrija koje su lišene brojnih ograničenja prisutnih kod konvencionalnih postupaka proizvodnje. Stoga je nužno ponuditi konstrukcijske alate u prvom redu namijenjene za aditivnu proizvodnju. Neki su od prikladnih alata predstavljeni kroz ovaj rad; a to su moduli za optimizaciju i izradu rešetkastih (saćastih) konstrukcija. Uporabom ovih dvaju modula, vidjelo se to i u ovom radu, kroz konstrukcijski proces na primjeru nosivog tijela bespilotne letjelice, moguće je konstruirati proizvode koji svojim fizikalnim svojstvima kao što su masa ili, primjerice, površina mogu biti izrazito prikladni za vlastitu namjenu. Utjecaj na fizikalna svojstva u tim slučajevima ne mora nužno voditi do pogoršanja mehaničkih svojstava, dapače moguće je čak i povoljno djelovati na ista. Zbog toga je logično za očekivati da će se u nadolazećem vremenu uporaba modula za optimizaciju i rešetkaste strukture kao polaznih osnova za razvoj proizvoda namijenjenih aditivnoj proizvodnji samo dodatno utvrditi.

LITERATURA

[1] http://tehnika.lzmk.hr/bespilotna-letjelica/
Članak: Bespilotna letjelica; objavljeno: 22. ožujka 2018.

[2] https://en.wikipedia.org/wiki/Unmanned_aerial_vehicle
Članak: Unmanned aerial vehicle; objavljeno: 23. veljače 2019.

[3] https://en.wikipedia.org/wiki/General_Atomics_MQ-9_Reaper
Članak: General Atomics MQ – 9 Reaper; objavljeno: 23. veljače 2019.

[4] https://vojnapovijest.vecernji.hr/vojna-povijest/prvo-bombardiranje-iz-zraka-u-povijesti-978547
Članak: Prvo bombardiranje iz zraka u povijesti; objavljeno: 10. prosinca 2014.

[5] https://en.wikipedia.org/wiki/V-1_flying_bomb
Članak: V – 1 flying bomb; objavljeno: 18. veljače 2019.

[6] https://en.wikipedia.org/wiki/GAF_Jindivik
Članak: GAF Jindivik; objavljeno: 21. siječnja 2019.

[7] https://bs.wikipedia.org/wiki/Bespilotna_letjelica
Članak: Bespilotna letjelica; objavljeno: 25. svibnja 2018.

[8] https://en.wikipedia.org/wiki/Lockheed_D-21
Članak: Lockheed D – 21; objavljeno: 29. siječanja 2019.

[9] https://en.wikipedia.org/wiki/Tadiran_Mastiff
Članak: Tadiran Mastiff; objavljeno: 11. lipnja 2018.

[10] https://hr.wikipedia.org/wiki/BL_M-99_Bojnik
Članak: M – 99 Bojnik; objavljeno: 10. veljače 2014.

[11] https://www.tportal.hr/tehno/clanak/domaci-dron-fenix-djelo-je-bivseg-slavonskog-ratnika-20160408
Članak: Domaći dron Fenix djelo je bivšeg slavonskog ratnika; objavljeno: 11. travnja 2016.

[12] http://kapetair.com/

[13] http://www.tcomlp.com/

[14] https://en.wikipedia.org/wiki/Black_Hornet_Nano
Članak: Black Hornet Nano; objavljeno: 19. veljače 2019.

[15] https://en.wikipedia.org/wiki/Phantom_(UAV)
Članak: Phantom (UAV); objavljeno: 30. siječnja 2019.

[16] https://newatlas.com/intel-anniversary-guinness-world-record/55541/
Članak: 2,018 drones take to the air as Intel sets yet another world record; objavljeno: 20. srpnja 2018.

[17] Sovilj, D., Poje Sovilj, M.: Terorizam dronovima – novi način ratovanja?, Policija i sigurnost, broj 3, 2017.

[18] https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_UAV-related_incidents
Članak: List of UAV – related incidents; objavljeno: 28. siječnja 2019.

[19] https://www.dnevno.hr/vijesti/hrvatska/sigurnosni-propust-inauguraciju-je-nadlijetao-neprijavljeni-dron-145048/
Članak: SIGURNOSNI PROPUST: Inauguraciju je nadlijetao neprijavljeni dron!; objavljeno: 16. veljače 2015.

[20] https://en.wikipedia.org/wiki/2015_Tokyo_Drone_Incident
Članak: 2015 Tokyo Drone Incident; objavljeno: 16. veljače 2019.

[21] Akrap, G., Kalinić, P.: Bezposadne letjelice i terorizam, National security and the future, broj 1 – 2, 2018.

[22] https://digitalno.hr/2016/12/04/ne-svida-vam-se-dron-upucajte-ga/
Članak: Ne sviđa vam se dron? Upucajte ga; objavljeno: 04. prosinca 2016.

[23] Ministarstvo mora, prometa i infrastrukture: Pravilnik o sustavima bespilotnih zrakoplova, Narodne novine broj 104/2018, Zagreb, 2018.

[24] Ministarstvo mora, prometa i infrastrukture: Pravilnik o sustavima bespilotnih zrakoplova, Narodne novine broj 49/2015, Zagreb, 2015.

[25] Ministarstvo mora, prometa i infrastrukture: Pravilnik o sustavima bespilotnih zrakoplova – Dodatak 1, Narodne novine broj 49/2015, Zagreb, 2015.

[26] https://en.wikipedia.org/wiki/PTC_(software_company)
Članak: PTC (software company); objavljeno: 21. veljače 2019.

[27] https://www.ptc.com/en/

[28] https://www.linkedin.com/company/ptc

[29] https://www.ptc.com/en/case-studies/

[30] https://www.ptc.com/en/partners

[31] https://en.wikipedia.org/wiki/PTC_Creo
Članak: PTC Creo; objavljeno: 13. siječnja 2019.

[32] http://www.eag.hr/index.htm

[33] Hadi, A., Vignat, F., Villeneuve, F.: Design Configurations and Creation of Lattice Structures for Metalic Additive Manufacturing, University of Grenoble, France, 2015.

[34] Hao, L., Raymont, D., Yan, C., Hussein, A., Young, P.: Design and Additive Manufacturing of Cellular Lattice Structures, University of Exeter, Devon, United Kingdom, October 2011.

[35] https://www.sculpteo.com/blog/2018/04/18/3d-printing-lattices-find-the-best-lattice-generation-tools/
Članak: 3D printing lattices: Find the best lattice generation tools!; objavljeno: 18. travnja 2018.

[36] Hadi Azman, A.: Method for integration of lattice structures in design for additive manufacturing, University of Grenoble, France, 2017.

[37] http://support.ptc.com/help/creo/creo_pma/usascii/index.html#page/part_modeling%2Fpart_modeling%2Fpart_nine_sub%2FAbout_Lattice_Feature.html%23

[38] https://www.sculpteo.com/blog/2017/05/24/optimize-your-3d-printed-parts-with-lattice-structures/
Članak: Optimize your 3D Printed Parts with Lattice Structures; objavljeno: 24. svibnja 2017.

[39] Pilipović, A.: Aditivna proizvodnja, Iz svijeta plastike i gume, broj 33, 2012.

[40] Čičak, N.: Dosezi u zamjeni zgloba kuka, Vaše zdravlje, broj 77, 2011.

[41] https://www.core77.com/posts/65066/adidas-Departs-from-Traditional-3D-Printed-Design-with-Help-from-Carbons-Digital-Light-Synthesis
Članak: adidas Departs from Traditional 3D Printed Design with Help from Carbon's Digital Light Synthesis; objavljeno: 07. travnja 2017.

[42] http://struna.ihjj.hr/naziv/optimizirati/4463/

[43] http://hjp.znanje.hr/index.php?show=search_by_id&id=eFluUBY%3D

[44] Gukov, I.: Topološka optimizacija betonskih konstrukcija, Tehničko veleučilište u Zagrebu, Graditeljski odjel, podloge za predavanje

[45] https://en.wikipedia.org/wiki/Topology_optimization
Članak: Topology optimization; objavljeno: 05. veljače 2019.

[46] Bakhtiary, N., Allinger, P., Friedrich, M., Mulfinger, F., Sauter, J., Müller, O., Puchinger, M.: A New Approach for Sizing, Shape and Topology Optimization,
1996 SAE International Congress and Exposition, Detroit, Michigan USA, 1996.

[47] https://en.wikipedia.org/wiki/Shape_optimization
Članak: Shape optimization; objavljeno: 24. studenog 2018.

[48] Larsson, R.: Methodology for Topology and Shape Optimization: Application to a Rear Lower Control Arm, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 2016.

[49] https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/tosca/structure/sizing-optimization/
Članak: Tosca Structure – Sizing Optimization with Abaqus, or Ansys

[50] Rao, J. S., Kiran, S., Chandra, S., Kamesh, J. V., Padmanabhan, M. A.: Topology Optimization of Aircraft Wing, Driving innovation with enterprise simulation, HTC 08, Strasbourg, France, 2008.

[51] Pehnec, I.: Doprinos optimiranju oblika i topologije primjenom level set metode i parametrizacije, Sveučilište u Splitu, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje, Split, 2013.

[52] http://help.solidworks.com/2019/english/SolidWorks/cworks/c_simp_method_topology.htm
Članak: SIMP Method for Topology Optimization

[53] https://caeai.com/blog/what-topology-optimization-and-why-use-it
Članak: What is Topology Optimization and Why Use It?; objavljeno: 22. svibnja 2017.

[54] https://www.altair.com/optimization/

[55] Altair: Special Report: Generative Design and Topology Optimization by Altair, Troy, Michigan USA

[56] https://www.ruag.com/en/products-services/space/spacecraft/satellite-structures/3d-printed-parts
Članak: 3D Printed Parts – SUCCESS STORY: Additive Manufacturing

[57] https://en.wikipedia.org/wiki/Sentinel-1B
Članak: Sentinel – 1B; objavljeno: 26. travnja 2018.

[58] https://www.altair.com/c2r/ws2016/3d-printed-satellite-component-presents-lesson-rethinking-design.aspx
Članak: 3D – Printed Satellite Component Presents a Lesson in Rethinking Design; objavljeno: 2016.

[59] https://www.eos.info/case_studies/additive-manufacturing-of-antenna-bracket-for-satellite
Članak: Aerospace: RUAG – Additive Manufacturing of Satellite Components

[60] Godec, D., Šercer, M.: Aditivna proizvodnja, Udžbenici Sveučilišta u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.

[61] http://support.ptc.com/help/creo/creo_pma/usascii/index.html#page/manufacturing%2F3d_printing%2Fabout_3d_printing.html%23

[62] http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=69979
Članak: aditivna proizvodnja

[63] https://en.wikipedia.org/wiki/3D_printing
Članak: 3D printing; objavljeno: 05. ožujka 2019.

[64] http://mg.tripod.com/asm_prop.htm

[65] Kraut, B.: Strojarski priručnik, Sajema, Zagreb, 2009.

[66] http://support.ptc.com/help/creo/creo_pma/korean/index.html#page/simulate%2Fsimulate%2Fmodstr%2Fconstrnt%2Freference%2Fsingular.html%23

[67] http://support.ptc.com/help/creo/creo_pma/usascii/index.html#page/simulate%2Fsimulate%2Fmodstr%2Ffem_mesh%2Freference%2Ff_create_mesh.html

[68] http://support.ptc.com/help/creo/creo_pma/usascii/index.html#page/simulate%2Fsimulate%2Fmodstr%2Felements%2Freference%2Fsol_elem.html

[69] http://support.ptc.com/help/creo/creo_pma/usascii/index.html#page/simulate%2Fsimulate%2Fmodstr%2Felements%2Freference%2Fag_tetra.html%23wwconnect_header

[70] http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=1e6da46b21ba4b63b47acbe0377ceaee&ckck=1

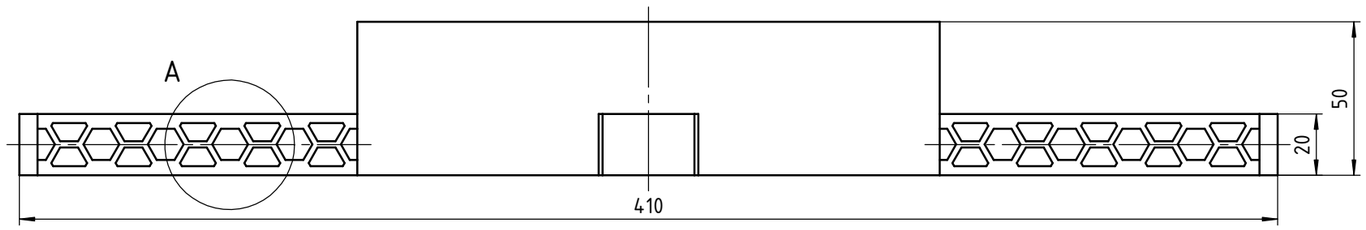
[71] http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=899868f99cc54a3fa8f927a000a85118&ckck=1

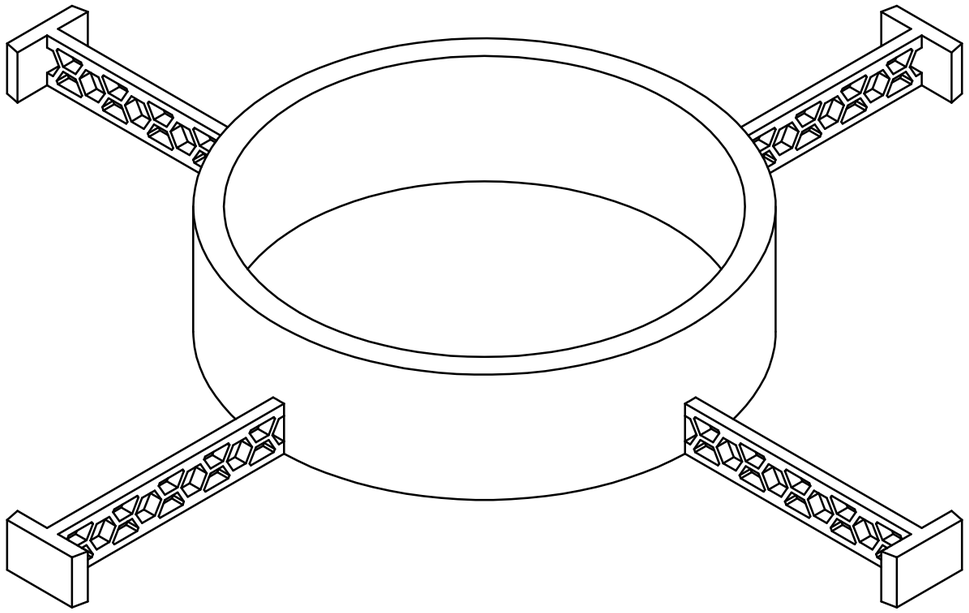
[72] Pogreške – radni nerecenzirani materijal za predavanja, kolegij Primijenjena i inženjerska matematika, Svučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Odjel za matematiku

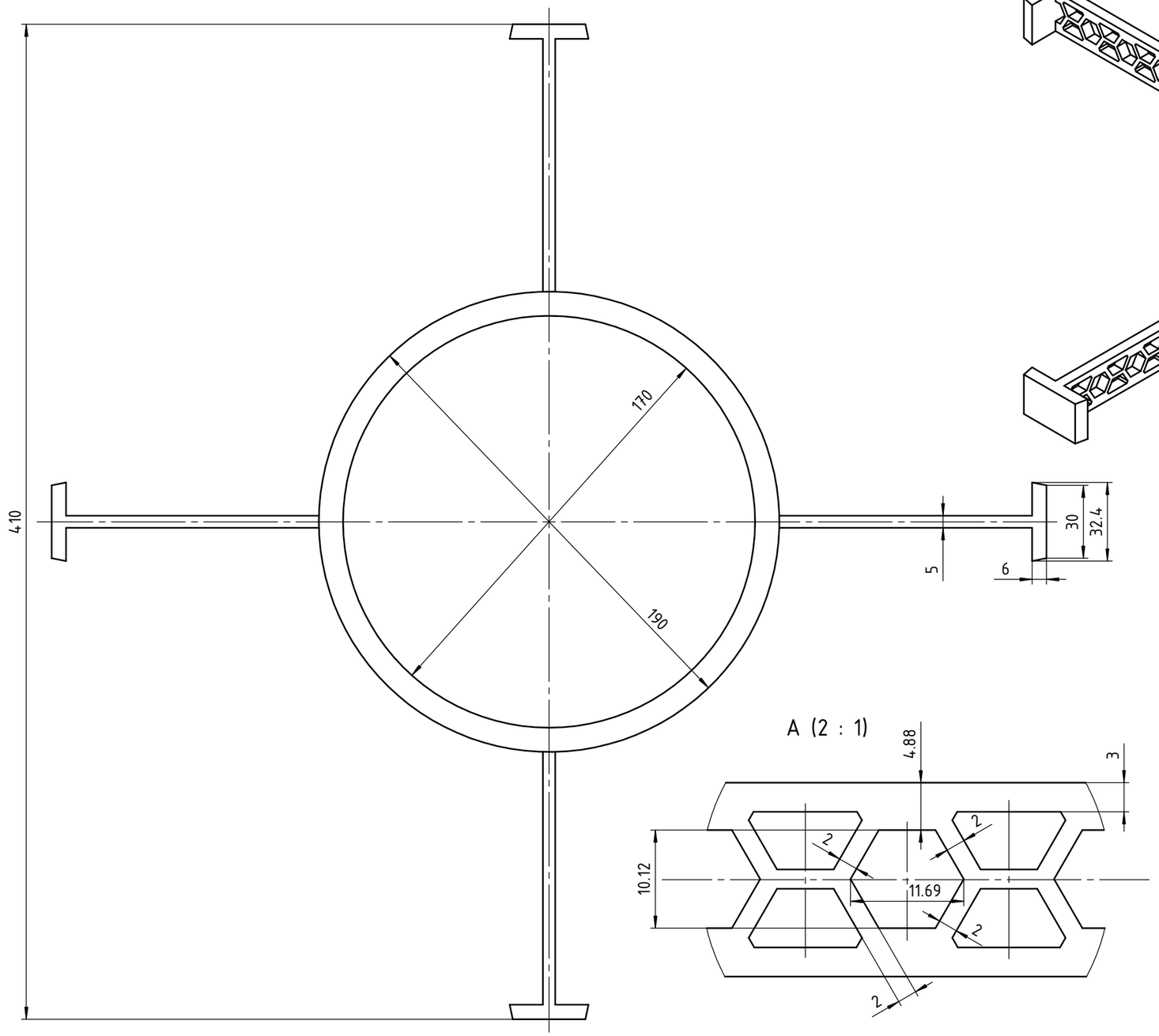
PRILOZI

I. CD-R disc

II. Tehnička dokumentacija







A (2 : 1)

Napomena: uz tehničku dokumentaciju priložen je CD sa STL datotekom komponente gdje je definirana geometrija modela za aditivnu proizvodnju. Svi unutarnji kutevi u šesterokutu iznose 120 °.

	Datum	Ime i prezime	Potpis
Projektirao	25.03.'19.	Stjepan Drašner	
Razradio	25.03.'19.	Stjepan Drašner	
Crtao	25.03.'19.	Stjepan Drašner	
Pregledao	25.03.'19.	prof.dr.sc. Nenad Bojčetić	
Mentor	25.03.'19.	prof.dr.sc. Nenad Bojčetić	

FSB Zagreb

STUDIJ STROJARSTVA

Objekt: Bespilotna letjelica		Objekt broj:	
		R. N. broj:	
Napomena:		Smjer: Konstrukcijski	Kopija
Materijal: PA 30GF	Masa: 435 g	DIPLOMSKI RAD	
Mjerilo originala: M 1:2	Naziv: **Nosivo tijelo bespilotne letjelice** *Verzija 3*	Pozicija:	Format: A3
	Crtež broj: BL-001-001		Listova: 1
			List: 1

Design by CADLab

0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100