

Proračun čvrstoće konvencionalne i 3D printane izvedbe konstrukcije krila bespilotne letjelice

Draganić, Marin

Undergraduate thesis / Završni rad

2025

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:235:144199>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-04-03**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Marin Draganić

Zagreb, 2025.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Izv. prof dr. sc. Darko Ivančević

Student:

Marin Draganić

Zagreb, 2025.

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

Zahvaljujem se svom mentoru, izvanrednom profesoru Darku Ivančeviću, na njegovom stručnom vođenju, podršci i korisnim savjetima tijekom cijelog procesa izrade ovog završnog rada. Njegova pomoć i strpljenje bili su od neprocjenjive važnosti za moj rad. Posebnu zahvalnost upućujem svojoj obitelji i prijateljima na bezuvjetnoj podršci, strpljenju i motivaciji kroz sve faze ovog izazovnog puta.

Marin Draganić



Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 – 04 / 25 – 06 / 01	
Ur.broj: 15 – 25 –	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Marin Draganić** JMBAG: **0035230559**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Proračun čvrstoće konvencionalne i 3D printane izvedbe konstrukcije krila bespilotne letjelice**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Stress analysis of a conventional and 3D printed wing structure for unmanned aircraft**

Opis zadatka:

S obzirom na ubrzani razvoj aditivnih tehnologija i sve širu primjenu 3D printanja u zrakoplovnom inženjerstvu, istražuju se potencijali ove tehnologije u optimizaciji konstrukcija, smanjenju mase te povećanju učinkovitosti bespilotnih letjelica. Kako bi se procijenila primjenjivost ove tehnologije proizvodnje za izradu dijelova konstrukcije, cilj rada je usporedba standardne i 3D printane izvedbe krila bespilotne letjelice te utvrđivanje njihovih prednosti i nedostataka.

U radu je potrebno:

- opisati tehnologije proizvodnje i korištene materijale za aditivnu proizvodnju konstrukcije krila bespilotnih letjelica
- navesti prednosti i izazove primjene 3D printanja u zrakoplovnom inženjerstvu
- odabrati odgovarajuću geometriju i definirati parametre potrebne za numerički proračun čvrstoće krila bespilotne letjelice, i to za izvedbu proizvedenu konvencionalnim metodama te za izvedbu proizvedenu aditivnim tehnologijama
- izraditi CAD modele za obje izvedbe konstrukcije krila
- provesti numeričku analizu čvrstoće u programu *Abaqus*® za oba modela
- kritički evaluirati dobivene rezultate usporedbe, uzimajući u obzir faktore poput mase, čvrstoće, i troškova izrade.

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

Zadatak zadan:

30. 11. 2024.

Datum predaje rada:

1. rok: 20. i 21. 2. 2025.
2. rok: 10. i 11. 7. 2025.
3. rok: 18. i 19. 9. 2025.

Predvideni datumi obrane:

1. rok: 24. 2. – 28. 2. 2025.
2. rok: 15. 7. – 18. 7. 2025.
3. rok: 22. 9. – 26. 9. 2025.

Zadatak zadao:


Izv. prof. dr. sc. Darko Ivančević

Predsjednik Povjerenstva:


Prof. dr. sc. Milan Vrdoljak

SADRŽAJ

POPIS SLIKA	II
POPIS TABLICA	III
POPIS OZNAKA	IV
SAŽETAK	V
SUMMARY	VI
1. UVOD	1
2. ADITIVNA TEHNOLOGIJA	4
2.1 FDM (engl. <i>Fused Deposition Modeling</i> - FDM)	4
2.2 Selektivno sinteriranje laserskom tehnologijom (engl. <i>Selective laser sintering</i> - SLS)	5
2.3 Stereolitografija (engl. <i>Stereolithography</i> - SLA)	5
2.4 PolyJet	6
2.5 Izravno taljenje energetskom depozicijom (engl. <i>Directed energy desposition</i> - DED)	7
2.6 Prednosti i izazovi 3D printanja u zrakoplovnom inženjerstvu	8
3. MODELIRANJE GEOMETRIJE KRILA	9
4. MATERIJALI	12
5. NUMERIČKA ANALIZA	13
5.1 Definiranje opterećenja	13
5.2 Rubni uvjeti	15
5.3 Mreža konačnih elemenata	16
6. REZULTATI	17
6.1 Konvergencija rješenja s obzirom na progib vrha krila za različitu mrežu konačnih elemenata	17
6.2 Analiza progiba	19
6.3 Analiza von Mises naprezanja	20
6.4 Usporedba razmatranih modela konstrukcije krila	24
7. ZAKLJUČAK	25
LITERATURA	26

POPIS SLIKA

Slika 1. Titanijski nosač motora zrakoplova Airbus A350 XWB proizveden konvencionalnom a) i aditivnom b) metodom proizvodnje [3].....	1
Slika 2. Usis motora napravljen od ULTEM smole [2]	2
Slika 3. 3D printane konstrukcije napravljene od polipropilena, 3D Kagome (lijevo) i heksagonalna dijamantna konstrukcija (desno) [5]	3
Slika 4. Američka izviđačka bespilotna letjelica Shadow-200 [6].....	3
Slika 5. FDM metoda [8].....	4
Slika 6. SLS metoda [9]	5
Slika 7. SLA metoda [10].....	6
Slika 8. PolyJet metoda [11].....	7
Slika 9. DED metoda [13]	7
Slika 10. Prikaz standardnog modela krila, bez oplata, sa odgovarajućim dimenzijama, c_r - korijenska tetiva, c_t - vršna tetiva, RR - razmak rebara, b - poluraspon krila, sve dimenzije su u [mm].....	9
Slika 11. Prikaz presjeka 3D printanog modela krila.....	10
Slika 12. Prikaz debljina konstrukcijskih površina standardnog krila	10
Slika 13. Prikaz debljina konstrukcijskih površina 3D-printanog krila	11
Slika 14. Tlak uzgona na standardnom modelu krila	14
Slika 15. Tlak uzgona na 3D-printanom modelu krila	15
Slika 16. Rubni uvjeti.....	15
Slika 17. Mreža konačnih elemenata na 3D-printanom modelu, lijevo - prikaz bez oplata, desno prikaz s oplatom	16
Slika 18. Mreža konačnih elemenata na standardnom modelu, lijevo - prikaz bez oplata, desno prikaz s oplatom.....	16
Slika 19. Konvergencija progiba [mm] 3D-modela krila.....	18
Slika 20. Konvergencija progiba [mm] standardnog modela krila.....	18
Slika 21. Raspodjela pomaka [mm] na standardnom modelu krila za $n=4$	19
Slika 22. Raspodjela pomaka [mm] na 3D-printanom modelu krila za materijal PA12 za $n=4$	19
Slika 23. Raspodjela pomaka [mm] na 3D-printanom modelu krila od materijala teške smole 2000 za $n=4$	19
Slika 24. Raspodjela pomaka [mm] na standardnom modelu krila za $n=-1.5$	20
Slika 25. Raspodjela pomaka [mm] na 3D-printanom modelu krila za materijal PA12 za $n=-1.5$	20
Slika 26. Raspodjela pomaka [mm] na 3D-printanom modelu krila od materijala teške smole 2000 za $n=-1.5$	20
Slika 27. Raspodjela von Mises naprezanja [MPa] na konvencionalnom krilu za $n=4$	21
Slika 28. Raspodjela von Mises naprezanja [MPa] na 3D-printanom modelu krila za materijal PA12 i $n=4$	21
Slika 29. Raspodjela von Mises naprezanja [MPa] na 3D-printanom modelu krila od materijala teške smole 2000 za $n=4$	22
Slika 30. Raspodjela von Mises naprezanja [MPa] na konvencionalnom krilu za $n=-1.5$	23
Slika 31. Raspodjela von Mises naprezanja [MPa] na 3D-printanom modelu krila za materijal PA12 i $n=-1.5$	23
Slika 32. Raspodjela von Mises naprezanja [MPa] na 3D-printanom modelu krila od materijala teške smole 2000 za $n=-1.5$	24

POPIS TABLICA

Tablica 1. Svojstva materijala [15], [16], [17], [18].....	12
Tablica 2. Iznos sile uzgona u ovisnosti o faktoru opterećenja.....	14
Tablica 3. Podaci o mrežama konačnih elemenata za oba modela.....	16
Tablica 4. Broj konačnih elemenata za 3D-printani model od čvrste smole 2000 i standardno krilo.....	17
Tablica 5. Usporedba rezultata progiba i von Mises naprežanja za $n=4$	24

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
E	GPa	modul elastičnosti
f	-	faktor sigurnosti
L	N	sila uzgona
ρ	kg/m ³	gustoća
$MTOW$	N	maksimalna dopuštena težina polijetanja
n	-	faktor normalnog opterećenja
p_L	Pa	tlak uzgona
R_e	Pa	granica razvlačenja
R_m	Pa	vlačna čvrstoća
S	m ²	referentna površina
ν	-	Poissonov koeficijent
b	m	poluraspon krila
c_r	m	korijena tetiva
c_t	m	vršna tetiva
RR	m	razmak rebara

SAŽETAK

Cilj ovog završnog rada je provesti proračun čvrstoće konstrukcije krila bespilotne letjelice konvencionalne i 3D printane izvedbe te napraviti usporedbu. Pojednostavljena geometrija krila modelirana je u programu *SolidWorks* te zatim uvezena u program *Abaqus* u kojem je provedena numerička analiza. U prvom dijelu rada opisana je aditivna tehnologija, vrste proizvodnje, korišteni materijali te prednosti i nedostaci tih tehnologija u zrakoplovnoj industriji. U drugom dijelu rada opisana je izrada oba modela krila, postupak numeričkog modeliranja, korišteni materijali, rubni uvjeti i opterećenja. U posljednjem dijelu je provedena usporedba rezultata analize i donesen je zaključak.

Ključne riječi: analiza čvrstoće, aditivna tehnologija, konstrukcija krila

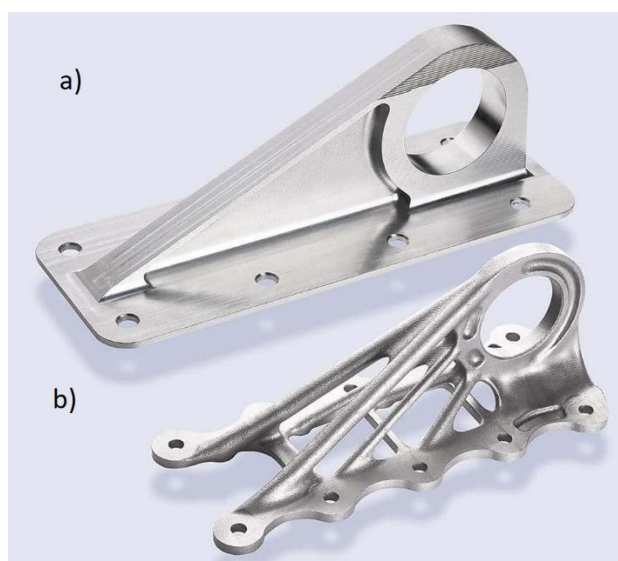
SUMMARY

The aim of this Bachelor's thesis is to perform a stress analysis of the wing structure of an unmanned aerial vehicle in two different designs: conventional and 3D printed, and to compare the results. The simplified wing geometry was modeled in SolidWorks and then imported into Abaqus, where a numerical analysis was performed. The first part of the thesis describes additive technology, types of production, materials used, and advantages and disadvantages of these technologies in the aerospace industry. The second part of the thesis describes the generation of both wing models, the numerical modeling procedure, materials used, boundary conditions, and loads. In the last part, a comparison of the analysis results was made and a conclusion was drawn.

Key words: stress analysis, additive technology, wing structure

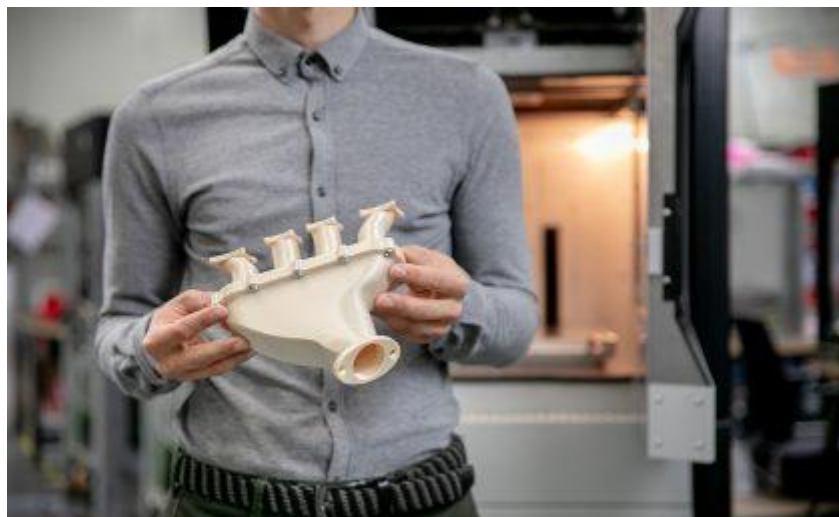
1. UVOD

Razvoj bespilotnih letjelica (engl. *Unmanned Aerial Vehicle* - UAV) značajno je unaprijedio mnoge industrije, od vojne do civilne primjene, zahvaljujući svojoj sposobnosti da obavljaju zadatke u teškim ili nepristupačnim uvjetima. Danas bespilotne letjelice imaju ključnu ulogu u mnogim industrijama, uključujući poljoprivredu, meteorologiju, praćenje prirodnih katastrofa i druge. Jedan od ključnih faktora za postizanje optimalnih performansi bespilotnih letjelica jest razvoj njihovih komponenti kroz napredne proizvodne tehnologije. Tradicionalne metode proizvodnje, kao što su CNC obrada ili lijevanje, sve se više zamjenjuju novim pristupima poput aditivne proizvodnje. Aditivna proizvodnja (3D printanje) omogućuje izradu složenih i laganih konstrukcija koje su prilagođene specifičnim potrebama bespilotnih letjelica, uz niže troškove i kraće vrijeme proizvodnje. Osim toga, korištenje novih materijala, uključujući kompozite, omogućuje postizanje visokih zahtjeva za izdržljivost, čvrstoću i smanjenje težine letjelica [1]. 3D printanje u zrakoplovnoj industriji danas se koristi za proizvodnju raznih dijelova kao npr. izrada kabinskih dijelova poput držača i ukrasnih elemenata. Također se koristi za proizvodnju metalnih dijelova, poput titanijskih nosača, odnosno kao dio pilona koji spaja krila s motorima, na zrakoplovima kao što je Airbus A350 XWB [2], prikazano na slici 1. Uz to, specijalizirani materijali poput ULTEM smole, koji su otporni na visoke temperature i kemikalije, sve se češće koriste u zrakoplovima zbog svojih sigurnosnih svojstava, uključujući nisku zapaljivost i toksičnost, a uglavnom se koristi u proizvodnji električnih i rasvjetnih sustava.



Slika 1. Titanijski nosač motora zrakoplova Airbus A350 XWB proizveden konvencionalnom a) i aditivnom b) metodom proizvodnje [3]

3D-printani dijelovi mogu se koristiti i kao određeni dijelovi motora i turbina, ali zbog sigurnosnih razloga samo za dijelove koji nisu preopterećeni [2]. Slika 2. prikazuje 3D-printani usis motora napravljen od ULTEM smole.



Slika 2. Usis motora napravljen od ULTEM smole [2]

U ovom radu analizirana je pojednostavljena konstrukcija krila serije NACA-4415 u 3D printanom i standardnom obliku. Profil i oblik krila izabrani su sukladno američkom izviđačkoj bespilotnoj letjelici Shadow-200 [4], prikazanoj na slici 4., koji koristi profil serije NACA-4415 te pravokutno krilo. Presjek 3D-printanog modela definiran je sukladno članku [5], u kojem je testirano više različitih unutarnjih uzdužnih elemenata konstrukcije krila. Najviše se ističu heksagonalna dijamantna konstrukcija koja je pokazala najveću sposobnost apsorpciji energije te 3D Kagome konstrukcija koja ima najveću nosivost. 3D Kagome konstrukcija formirana je parovima tetraedara koji su okomito obrnuti i rotacijski pomaknuti jedan od drugog za 60° . Oblik te dvije konstrukcije prikazan je na slici 3. Kao profil za unutarnje uzdužne elemente krila za ovaj rad korištena je pojednostavljena verzija 3D Kagome konstrukcije.



Slika 3. 3D printane konstrukcije napravljene od polipropilena, 3D Kagome (lijevo) i heksagonalna dijamantna konstrukcija (desno) [5]



Slika 4. Američka izviđačka bespilotna letjelica Shadow-200 [6]

2. ADITIVNA TEHNOLOGIJA

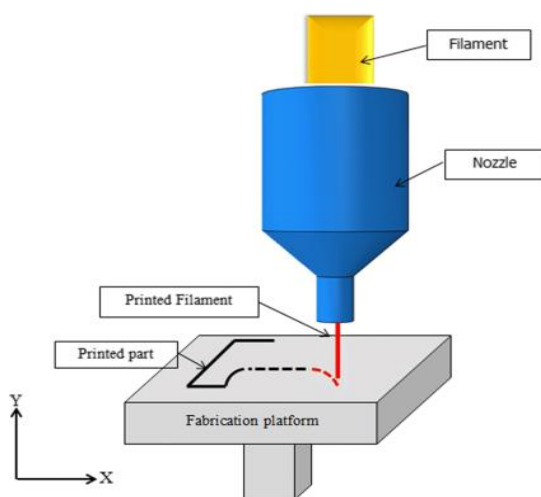
Aditivna proizvodnja (engl. *Additive Manufacturing* - AM) nudi napredne metode za izradu konstrukcija krila bespilotnih letjelica, omogućujući stvaranje složenih, laganih i čvrstih dijelova. Različite tehnologije aditivne proizvodnje koriste se za postizanje optimalnih karakteristika, kao što su smanjenje težine, poboljšanje aerodinamičnosti i povećanje čvrstoće. Svaka tehnologija ima specifične prednosti, a odabrani materijali omogućuju ispunjavanje različitih zahtjeva u proizvodnji krila bespilotnih letjelica.

2.1 FDM (engl. *Fused Deposition Modeling* - FDM)

FDM je široko korištena metoda u aditivnoj proizvodnji koja koristi plastične materijale u obliku filamenata. U ovom procesu, filament se topi i nanosi sloj po sloj dok ne nastane 3D objekt. Ova tehnika je pristupačna i često se koristi za brzu izradu dijelova u početnim fazama projektiranja. Ova metoda je pogodna za izradu prototipova i komponenti koje ne zahtijevaju izuzetno visoku preciznost [1,7]. Skica procesa prikazana je na slici 5.

Neki od materijala koji se upotrebljavaju za ovu metodu su:

- polilaktična kiselina (PLA): Koristi se za početne prototipove zbog svoje jednostavnosti i lakoće obrade, no nije dovoljno otporna za stvarne uvjete leta,
- poliamidna vlakna: Dugotrajna i otporna na habanje, idealna za konstrukcijske dijelove koji moraju izdržati opterećenja u letu,
- ultem (PEI): Visokokvalitetna termoplastika koja je otporna na visoke temperature i naprezanja, a koristi se za komponente koje zahtijevaju veću izdržljivost.



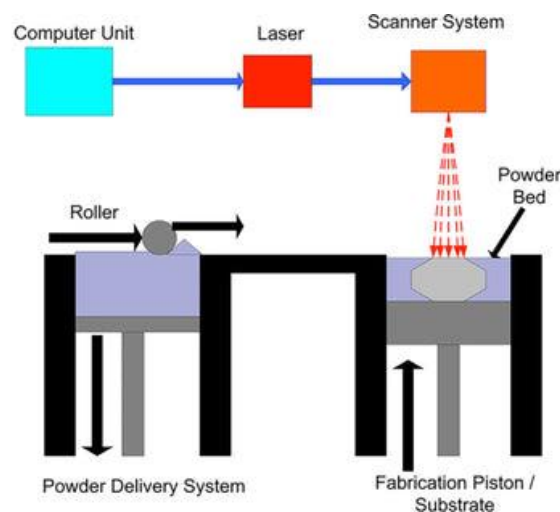
Slika 5. FDM metoda [8]

2.2 Selektivno sinteriranje laserskom tehnologijom (engl. *Selective Laser Sintering - SLS*)

SLS koristi laser za spajanje praha u čvrste slojeve što omogućuje izradu vrlo složenih oblika. Ova tehnologija omogućuje izradu dijelova koji ne zahtijevaju vanjske potpore jer nesinterirani prah djeluje kao podrška za preostale slojeve. SLS je pogodan za proizvodnju detaljnih dijelova unutrašnjih elemenata konstrukcije krila, kao što su ojačanja ili komponente koje zahtijevaju specifične unutarnje šupljine za poboljšanje aerodinamičnih svojstava ili smanjenje težine [1,7]. Skica procesa prikazana je na slici 6.

Neki od materijala koji se upotrebljavaju za ovu metodu su:

- poliamid (PA12): Otporan na trošenje, fleksibilan i čvrst, idealan za komponente koje moraju podnijeti visoka naprezanja,
- kompoziti i metali: Kao što su ugljična vlakna ili titan, koriste se za izradu čvrstih i laganih dijelova koji moraju izdržati visoke sile.



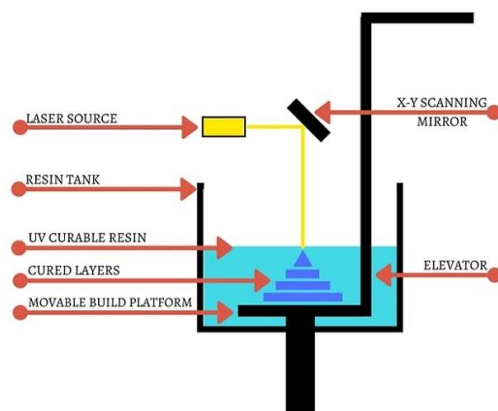
Slika 6. SLS metoda [9]

2.3 Stereolitografija (engl. *Stereolithography - SLA*)

Stereolitografija koristi UV svjetlo za očvršćivanje tankih slojeva fotopolimernih smola. Ova metoda omogućava izradu dijelova s vrlo glatkim i preciznim površinama, idealnim za finije komponente. Koristi za izradu manjih, preciznih dijelova krila, kao što su unutarnji mehanički sustavi ili dijelovi koji zahtijevaju visoku preciznost, ali nisu podložni velikim opterećenjima [1,7]. Skica procesa prikazana je na slici 7.

Neki od materijala koji se upotrebljavaju za ovu metodu su:

- fotopolimerni materijali: Pruža visoku preciznost i glatke površine, no nisu dovoljno čvrsti za konstrukcijske dijelove krila,
- fleksibilne smole: Koriste se za dijelove koji zahtijevaju određenu fleksibilnost.



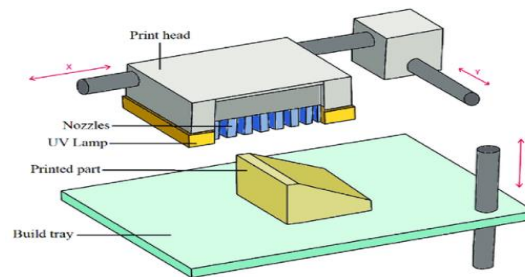
Slika 7. SLA metoda [10]

2.4 PolyJet

PolyJet je napredna metoda koja koristi inkjet mlaznice za precizno nanošenje slojeva fotoosjetljivih smola, koje se potom očvršćuju UV svjetlom. Omogućava izradu dijelova od više materijala u jednom procesu. PolyJet je idealan za izradu dijelova krila koji zahtijevaju visoku preciznost i integraciju različitih materijala, kao što su dijelovi koji moraju kombinirati visoku čvrstoću u jednom dijelu i fleksibilnost u drugom [1,7]. Skica procesa prikazana je na slici 8.

Neki od materijala koji se upotrebljavaju za ovu metodu su:

- fotopolimerni materijali: Različite vrste smola omogućuju stvaranje dijelova s raznim mehaničkim svojstvima, od fleksibilnih do čvrstih.



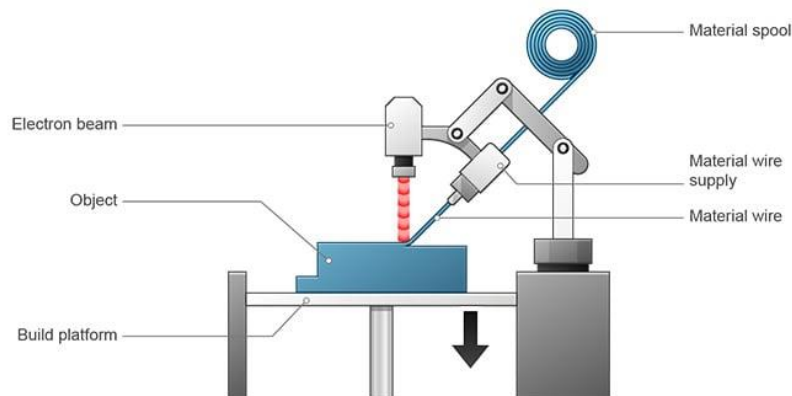
Slika 8. PolyJet metoda [11]

2.5 Izravno taljenje energetskom depozicijom (engl. *Directed Energy Deposition* - DED)

DED koristi energiju u obliku lasera ili elektronskog snopa za taljenje metalnog praha koji se zatim izravno nanosi na površinu objekta. Ova tehnologija je posebno korisna za dodavanje materijala na postojeće dijelove ili za popravak konstrukcija. DED se koristi za izradu čvrstih metalnih dijelova ili ojačanja unutar krila, kao što su spojevi ili dijelovi koji podnose velike sile [12]. Skica procesa prikazana je na slici 9.

Neki od materijala koji se upotrebljavaju za ovu metodu su:

- titan: Lagan i izdržljiv materijal koji se koristi za izradu čvrstih, ali laganih konstrukcija koje su otporne na koroziju,
- aluminij i čelik: Često se koriste za izradu komponenata koje moraju podnijeti visoka naprezanja.



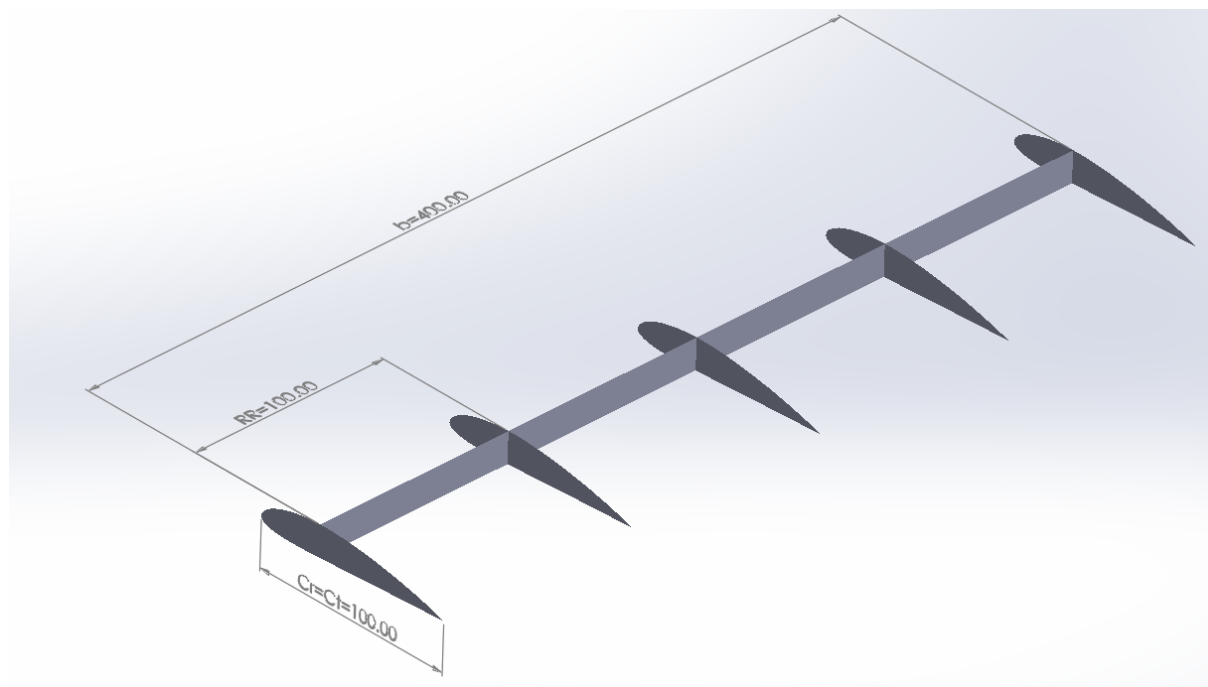
Slika 9. DED metoda [13]

2.6 Prednosti i izazovi 3D printanja u zrakoplovnom inženjerstvu

3D printanje donosi značajne prednosti u zrakoplovnom inženjerstvu, posebno u pogledu fleksibilnosti projektiranja i smanjenja težine dijelova. Omogućuje proizvodnju složenih dijelova s unutarnjim šupljinama i jedinstvenim oblicima koji bi bili teško izvedivi tradicionalnim metodama. To rezultira smanjenjem težine zrakoplova i većom energetsom učinkovitošću. Također, brzina prototipiranja omogućuje brže testiranje i usvajanje novih tehnologija, što ubrzava razvoj i smanjuje potrebu za velikim skladištima rezervnih dijelova. Iako 3D printanje ima mnoge prednosti, suočava se i s izazovima. Jedan od glavnih problema je manja čvrstoća materijala u usporedbi s tradicionalnim materijalima kao što su čelik i aluminij, što može biti problem za dijelove koji podnose velika opterećenja. Također, površina tiskanih dijelova često zahtijeva dodatnu obradu za postizanje željene preciznosti [1]. Visoki troškovi specijalizirane opreme i materijala, kao i potreba za certifikacijom, također mogu otežati primjenu ove tehnologije u zrakoplovnoj industriji. Iako 3D printanje nudi mnoge prednosti, integracija s postojećim proizvodnim procesima može biti izazovna. Unatoč tome, s daljnjim razvojem tehnologije, očekuje se da će 3D printanje imati sve važniju ulogu u budućnosti zrakoplovnog inženjerstva.

3. MODELIRANJE GEOMETRIJE KRILA

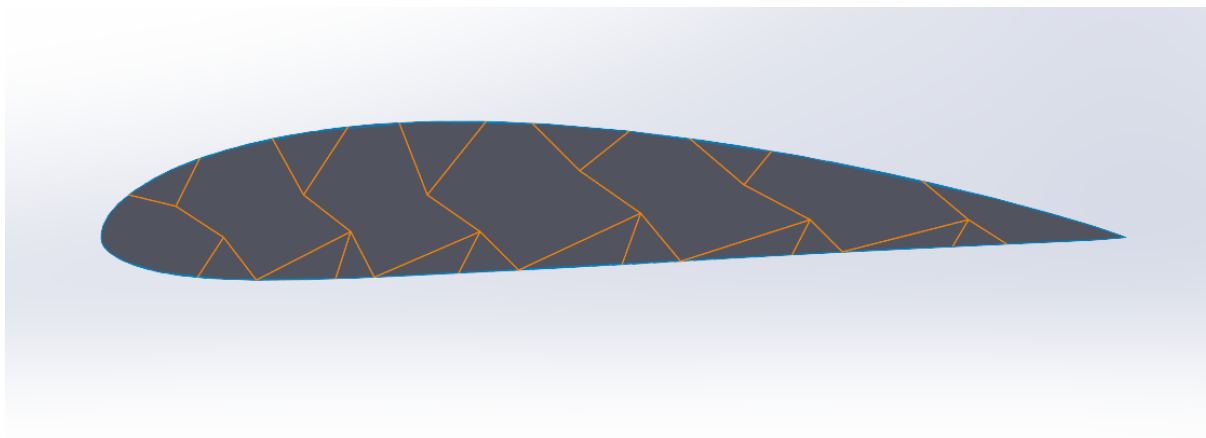
Osnovna komponenta u konstruiranju oba modela krila je aeroprofil NACA-4415, koji je nesimetričan profil s maksimalnom debljinom od 15 % širine krila na 30.9 % tetive. U SolidWorksu je oblik profila definiran s pomoću seta točaka koji odgovaraju NACA-4415 standardu [14]. Na temelju tih podataka nacrtana je osnovna kontura profila, koja je poslužila kao polazna točka za daljnje oblikovanje geometrije krila. Nakon što je osnovni profil definiran, postavljene su dimenzija krila. Krilo ima raspon od 400 mm. Standardni model se sastoji od jedne ramenjače koja je smještena na najdebljem dijelu profila, odnosno na oko 30 % tetive. Ramenjača je ključna komponenta jer osigurava konstrukcijsku stabilnost i krutost krila. Za daljnje ojačanje krila, definirana su rebra koja će osigurati dodatnu čvrstoću i stabilnost. Pet rebara ravnomjerno je raspoređeno duž cijelog raspona krila, a razmak između svakog rebara iznosi 100 mm. Dimenzije standardnog modela prikazane su na slici 10. Ovaj raspored rebara omogućava ravnomjernu raspodjelu opterećenja i smanjuje mogućnost deformacije krila pod različitim uvjetima opterećenja.



Slika 10. Prikaz standardnog modela krila, bez oplata, sa odgovarajućim dimenzijama, c_r - korijenska tetiva, c_f - vršna tetiva, RR - razmak rebara, b - poluraspona krila, sve dimenzije su u [mm]

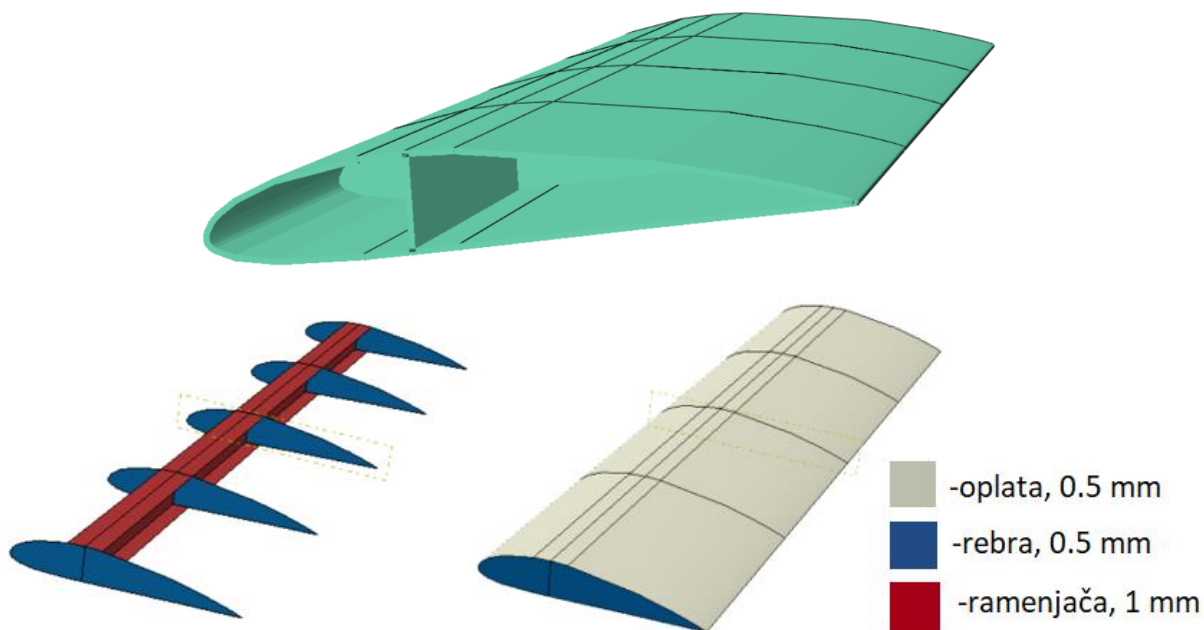
3D printani model jednostavnije je konstrukcije jer ne sadrži ramenjaču, već se sastoji od proizvoljno kreiranog poprečnog presjeka, sukladno 3D Kagome konstrukciji, ekstrudiranog

duž cijelog raspona krila. Za izradu površina korištena je funkcija „Surface Extrude“ koja omogućava generiranje površina na temelju skiciranih kontura. Presjek ovog krila prikazan je na slici 11.



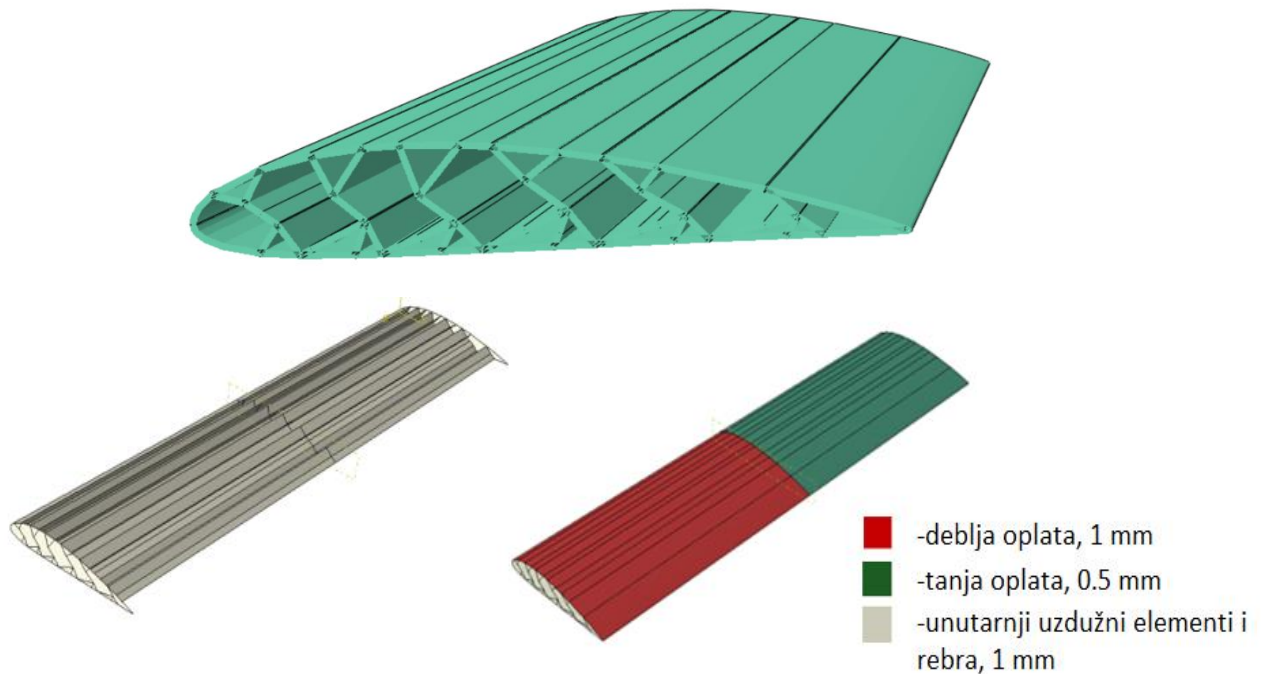
Slika 11. Prikaz presjeka 3D printanog modela krila

Oba modela definirana su kao ljuskaste (shell) konstrukcije. Debljina oplata i rebara na konvencionalnom krilu iznosi 0.5 mm, dok debljina ramenjače iznosi 1 mm jer je to glavni nosivi element krila koji preuzima većinu naprezanja. Slika 12. prikazuje debljinu konstrukcije konvencionalnog krila.



Slika 12. Prikaz debljina konstrukcijskih površina standardnog krila

Oplata 3D-printanog krila podijeljena je na dva dijela. Prvi dio oplata (od korijenskog rebra do polovice krila) deblji je nego ostatak zbog većih napreznja koja se javljaju u području korijena krila zbog uklještenja s trupom. Deblji dio oplata iznosi 1 mm, dok tanji iznosi 0.5 mm. Unutarnji uzdužni elementi krila također su 1 mm zbog toga što mora preuzeti veći dio napreznja. Slika 13. prikazuje debljinu konstrukcije 3D-printanog krila.



Slika 13. Prikaz debljina konstrukcijskih površina 3D-printanog krila

4. MATERIJALI

Kao materijal za ramenjaču i rebra standardnog modela krila korištena je aluminijska legura 6061-T6 [15] zbog svojih izvanrednih svojstava koja uključuju visok omjer čvrstoće i mase. Zbog svoje male težine i visoke čvrstoće koristi se za izradu važnih dijelova zrakoplova poput krila, trupa i podvozja. Ova legura osigurava povećanje energetske učinkovitosti zrakoplova jer smanjenje mase pozitivno utječe na performanse i potrošnju goriva. Ovaj materijal također ima visoku otpornost na koroziju. Zbog manjih zahtjeva za čvrstoću, kao materijal za oplatu korištena je balza [16]. Za 3D-printanu verziju napravljena su 2 modela. U prvom je korišten poliamid PA12 [17], a u drugom čvrsta smola 2000 [18]. Oba materijala imaju visoku specifičnu čvrstoću, malu masu te su vrlo izdržljivi. Svojstva materijala prikazana su u tablici 1.

Tablica 1. Svojstva materijala [15], [16], [17], [18]

Materijal	E [GPa]	n [-]	ρ [kg/m ³]	R_m [MPa]	R_e [MPa]
Al 6061-T6	68.9	0.33	2700	310	276
PA12	1.85	0.33	930	50	50
balza	3.0	0.38	120	14	14
čvrsta smola 2000	1.2	0.33	1110	29	29

5. NUMERIČKA ANALIZA

5.1 Definiranje opterećenja

U ovoj analizi razmatra se utjecaj sile uzgona na konstrukciju krila, pri čemu se pretpostavlja da ta sila ravnomjerno djeluje na cijelu referentnu površinu polukrila. Simulacije su provedene u programu Abaqus/Standard te su one linearne i statičke. U program Abaqus, opterećenje se modelira kao tlak uzgona koji je raspodijeljen po površini krila. Takav pristup pojednostavljuje izračune, ali omogućuje dovoljno točno određivanje osnovnih sila koje djeluju na konstrukciju. Za izračun ukupne sile opterećenja koristi se formula koja uključuje nekoliko ključnih faktora. Masa konstrukcije krila pojednostavljeno se uzima kao polovina maksimalne dopuštene mase polijetanja, pri čemu je za potrebe ovog rada pretpostavljena vrijednost od 5 kg. Ukupna sila koja djeluje na konstrukciju krila dobiva se množenjem ukupne mase s koeficijentom opterećenja, gravitacijskom konstantom i faktorom sigurnosti. Koeficijent opterećenja postavljen je na 4, kako bi se uzeli u obzir svi mogući režimi leta, uključujući one s naglim zaokretima, a ne samo horizontalni let. Ovaj koeficijent omogućuje simulaciju uvjeta leta koji uključuju i veća dinamička opterećenja koja nastaju prilikom manevriranja zrakoplova. U zrakoplovnom inženjerstvu, takvi režimi leta mogu biti zahtjevniji za izdržljivost konstrukcije, stoga se koeficijent opterećenja koristi za bolje modeliranje stvarnih uvjeta leta. Također, faktor sigurnosti postavljen je na 1.5, što je uobičajeno u zrakoplovstvu. Ovaj faktor uzima u obzir nepredviđene uvjete, varijacije u opterećenju ili pogreške u konstrukciji te osigurava da konstrukcija zrakoplova može podnijeti dodatne sile koje možda nisu potpuno predviđene u normalnim uvjetima rada. Korištenje faktora sigurnosti od 1.5 također je standardni pristup u inženjerstvu koji doprinosi većoj pouzdanosti konstrukcije i smanjuje rizik od popuštanja konstrukcije.

Izraz za silu uzgona glasi:

$$L = \frac{MTOW}{2} * n * f, \quad (5.1)$$

gdje su:

L -sila uzgona

$MTOW$ -maksimalna poletna težina zrakoplova

n -normalno opterećenje

f -faktor sigurnosti.

Također, pomoću izraza (5.1), se može dobiti rezultantna sila uzgona za različita normalna opterećenja koja bespilotna letjelica može izdržati (od $n=4$ pa sve do $n=-1.5$), prikazano u tablici 2. [19].

Tablica 2. Iznos sile uzgona u ovisnosti o faktoru opterećenja

n	F [N]
4	147.15
-1.5	-55.181

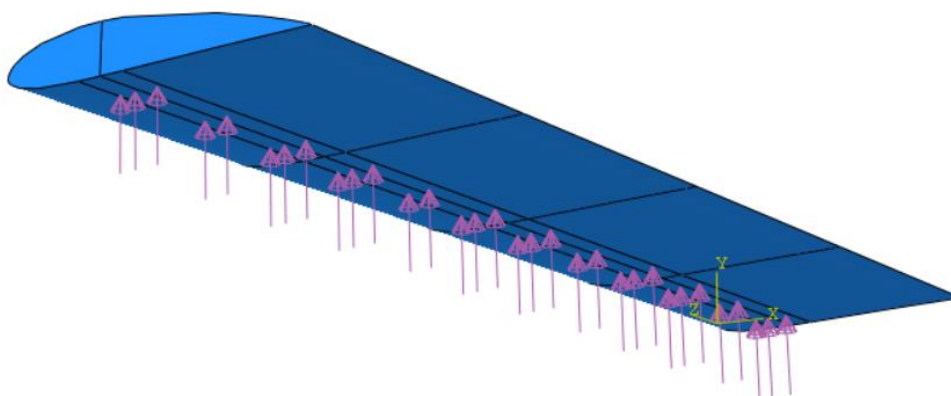
Pomoću sile uzgona i površine krila na kojoj tlak djeluje $S=6000$ [mm²], moguće je izračunati intenzitet tlaka:

$$p_L = \frac{F}{S} \text{ [N/mm}^2\text{]}, \quad (5.2)$$

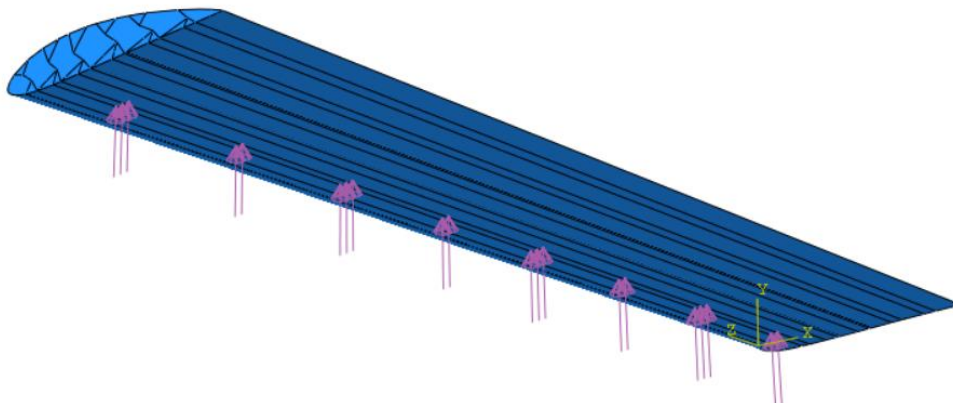
gdje je:

p_L -tlak uzgona.

U programu Abaqus, tlak je raspoređen na mjestu gdje se nalazi pojas ramenjače standardnog krila te na otprilike tom istom području i na drugome modelu, što je prikazano na slikama 14. i 15.



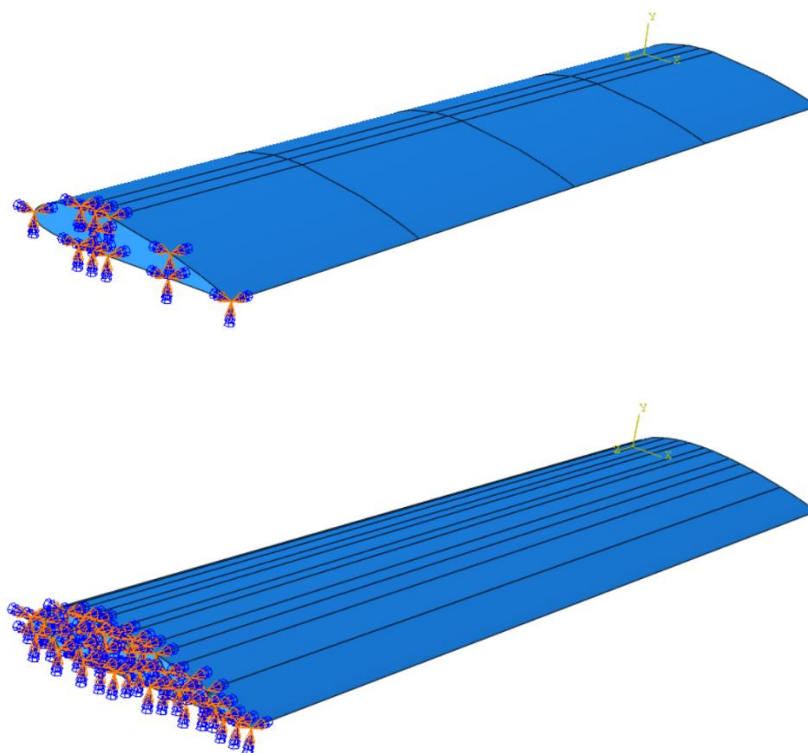
Slika 14. Tlak uzgona na standardnom modelu krila



Slika 15. Tlak uzgona na 3D-printanom modelu krila

5.2 Rubni uvjeti

Jedini rubni uvjet u okviru ovog završnog rada, prikazan na slici 16., bio je spoj trupa i krila. To je aproksimirano uklještenjem krila u korijenu, odnosno na početnom rebru.



Slika 16. Rubni uvjeti

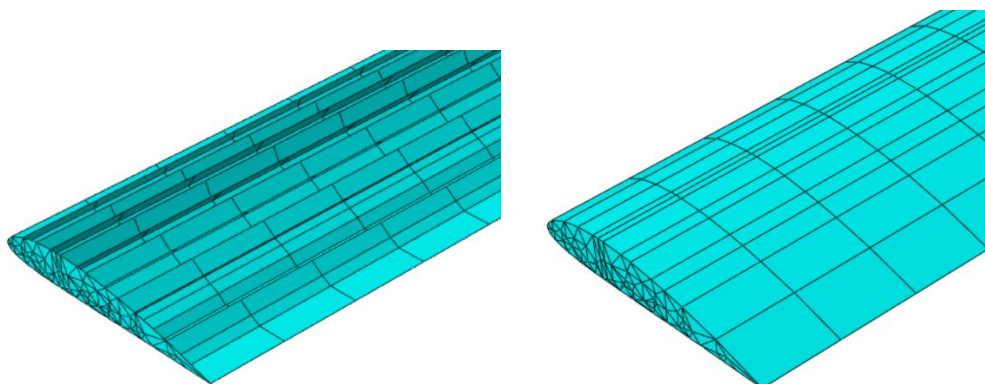
5.3 Mreža konačnih elemenata

U analizi krila modeli su diskretizirani ljuskastim četverokutnim elementima S4R te trokutastim elementima S3. Tablica 3. prikazuje broj i vrstu konačnih elementa i čvorova koji definiraju oba modela.

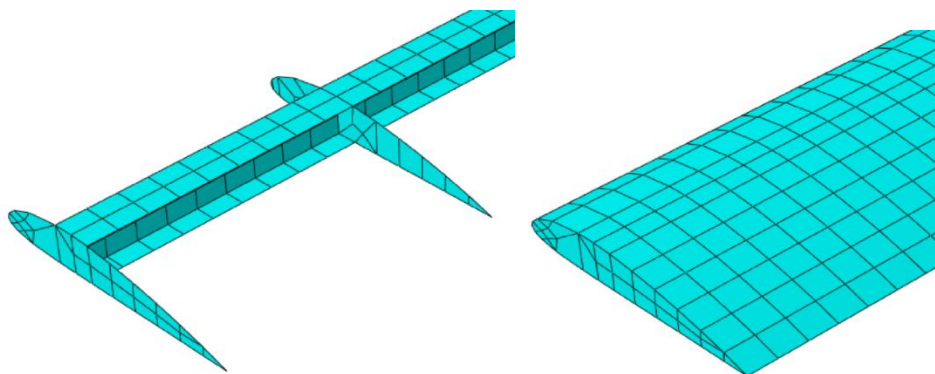
Tablica 3. Podaci o mrežama konačnih elemenata za oba modela

Model	S4R	S3	Ukupan broj elemenata	Ukupan broj čvorova
Standardni	1014	22	1036	957
3D-printani	1134	229	1363	977

Slika 17. prikazuje mrežu konačnih elemenata 3D-printanog modela, a slika 18. mrežu konvencionalnog krila.



Slika 17. Mreža konačnih elemenata na 3D-printanom modelu, lijevo - prikaz bez oplata, desno prikaz s oplatom



Slika 18. Mreža konačnih elemenata na standardnom modelu, lijevo - prikaz bez oplata, desno prikaz s oplatom

6. REZULTATI

Cilj ove analize je razmotriti glavne razlike u ponašanju oba tipa krila pod opterećenjem, fokusirajući se na progib i naprezanje prema von Misesu.

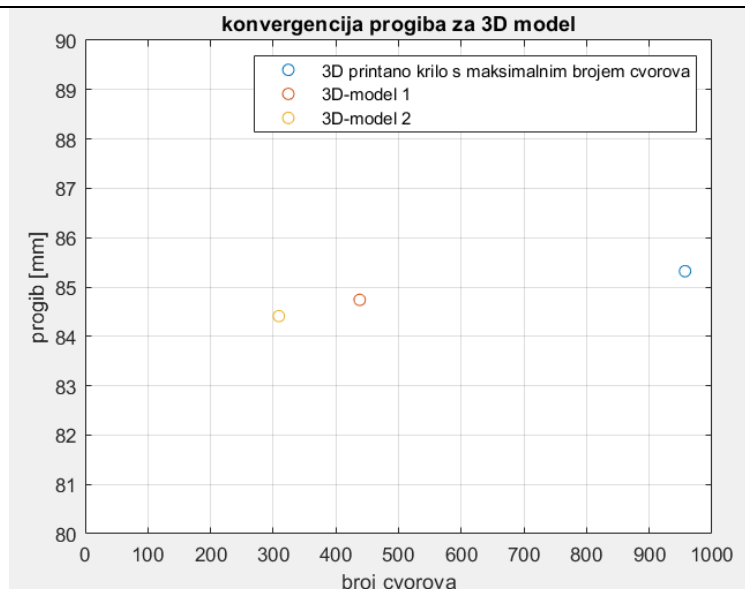
6.1 Konvergencija rješenja s obzirom na progib vrha krila za različitu mrežu konačnih elemenata

U ovom radu analizirana je i konvergencija rješenja u odnosu na progib modela. S obzirom na to da studentska verzija Abaqusa ima ograničenje u broju čvorova, koji mogu biti maksimalno 1000, pristupilo se izradi dvije dodatne mreže, s manjim brojem elemenata, prikazanih u tablici 4. Cilj ove analize bio je usporediti kako broj konačnih elemenata utječe na progib modela, čime se željelo dobiti uvid u to koliko manji broj elemenata može utjecati na preciznost rješenja u simulacijama. Simulacija je provedena za 3D-printani model od čvrste smole 2000 te za kovencionalno krilo.

Tablica 4. Broj konačnih elemenata za 3D-printani model od čvrste smole 2000 i standardno krilo

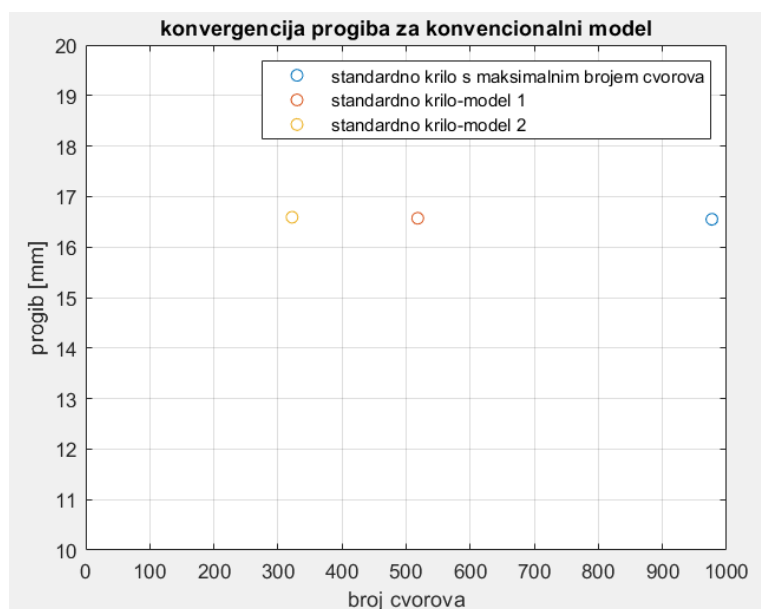
	S4R	S3	Ukupan broj elemenata	Ukupan broj čvorova
3D-model 1	474	200	674	438
3D-model 2	312	198	510	309
standardno krilo-model 1	557	19	576	518
standardno krilo-model 2	352	15	367	322

Na slici 19. prikazane su vrijednosti konvergencije progiba 3D-modela. Konkretna rješenja simulacije pokazala su da za 3D-model 1, maksimalni progib iznosi 84.74 mm. Za manju mrežu, tj. 3D-model 2, progib je bio nešto manji, 84.41 mm. Glavni rezultat analize, koji je ostvaren za mrežu sa skoro maksimalnih 1000 čvorova, detaljnije analiziran u idućem poglavlju, pokazao je progib od 85.32 mm.



Slika 19. Konvergencija progiba [mm] 3D-modela krila

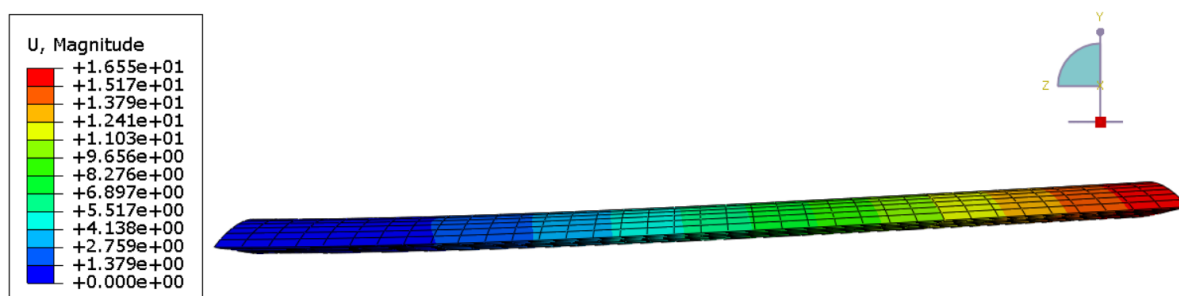
Na slici 20. prikazane su vrijednosti konvergencije progiba konvencionalnog krila. Maksimalni progib za model 1 pri 518 čvorova i 576 elemenata, iznosi 16.57 mm, a za drugi model sa još manjim brojem elemenata iznosi 16.59 mm. Obje vrijednosti iznose više nego progib koji je dobiven sa većom mrežom konačnih elemenata, detaljnije analiziran u idućem poglavlju, u iznosu od 16.55 mm. Ovi rezultati ukazuju na to da povećanje broja čvorova i elemenata vodi ka neznatnoj promjeni u progibu, što potvrđuje da broj konačnih elemenata ima određeni utjecaj na točnost simulacije, ali u ovom slučaju razlika nije bila značajna.



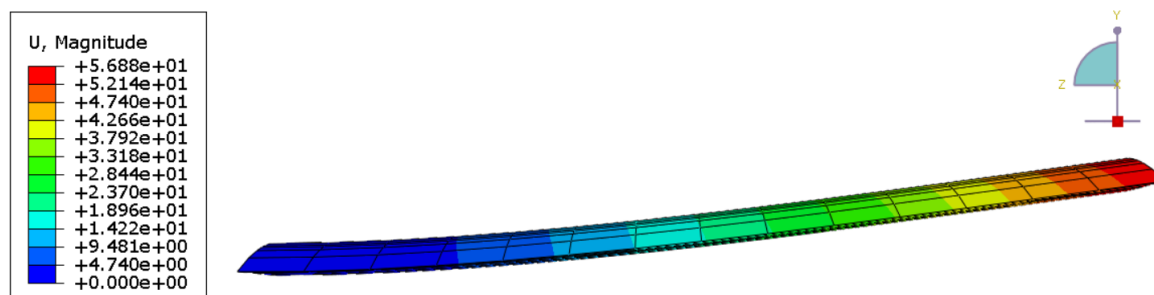
Slika 20. Konvergencija progiba [mm] standardnog modela krila

6.2 Analiza progiba

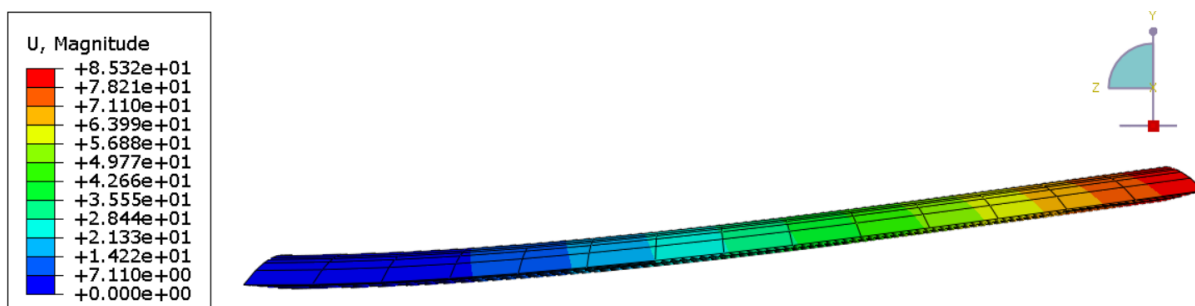
Raspodjela pomaka za sva 3 modela prikazana je na slikama 21., 22., i 23. Najveći progib postignut je na 3D-printanom modelu od teške smole 2000, a iznosi 85.32 mm, dok model od poliamida PA12 iznosi 56.88 mm. Najmanji progib dobiven je na konvencionalnom krilu u iznosu od 16.55 mm. Progib 3D-modela od teške smole iznosi oko 20 % raspona polukrila te bi se u nastavku rada trebao provjeriti utjecaj geometrijske nelinearnosti, što je van opsega ovog rada. Sve navedene vrijednosti se odnose za maksimalno opterećeno krilo odnosno dok je $n=4$.



Slika 21. Raspodjela pomaka [mm] na standardnom modelu krila za $n=4$



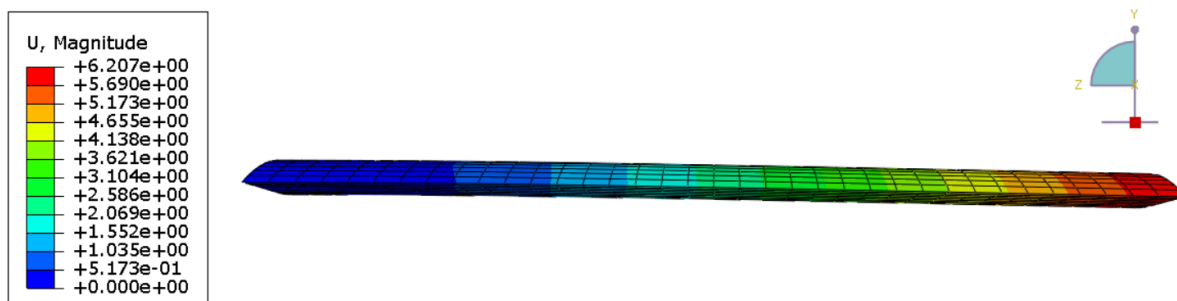
Slika 22. Raspodjela pomaka [mm] na 3D-printanom modelu krila za materijal PA12 za $n=4$



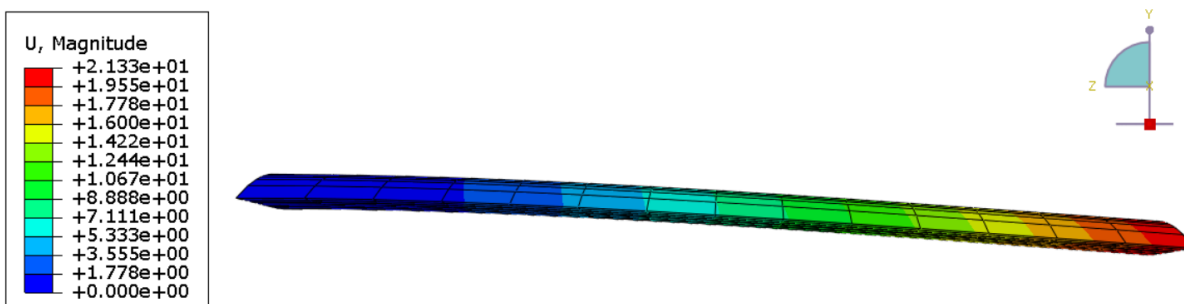
Slika 23. Raspodjela pomaka [mm] na 3D-printanom modelu krila od materijala teške smole 2000 za $n=4$

Progib 3D-printanog krila pod ovim opterećenjem puno je veći u odnosu na standardno krilo. Ovaj rezultat ukazuje na to da 3D-printano krilo ima značajno nižu krutost i sposobnost otpornosti na deformacije. Krila proizvedena tradicionalnim metodama često koriste materijale

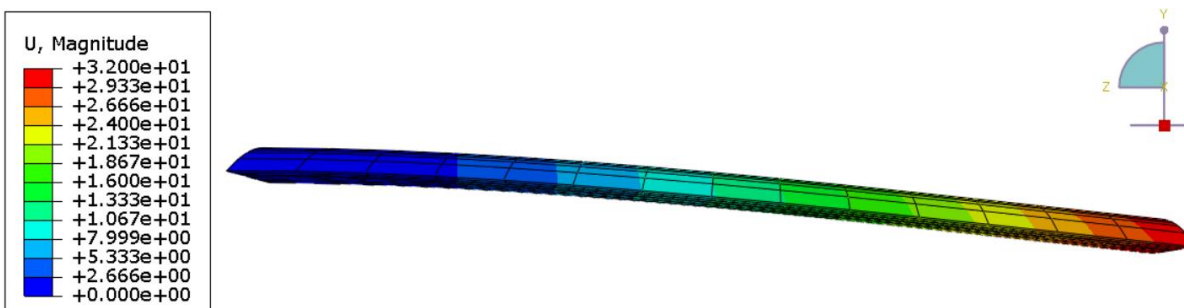
s višom čvrstoćom i krutošću, dok 3D-printani materijali, iako korisni za prilagodljive i lagane konstrukcije, mogu imati nižu krutost zbog svoje unutrašnje konstrukcije i postupka proizvodnje. Kao i u prethodnoj analizi, slična razlika u rezultatima dobivena je i s opterećenjem $n=-1.5$, prikazanih na slikama 24., 25., 26. Za standardnu konfiguraciju krila najveći progib iznosi 6.2 mm, za poliamidno 3D-printano krilo iznosi 21.33 mm, a za 3D-printano krilo od teške smole iznosi 32 mm.



Slika 24. Raspodjela pomaka [mm] na standardnom modelu krila za $n=-1.5$



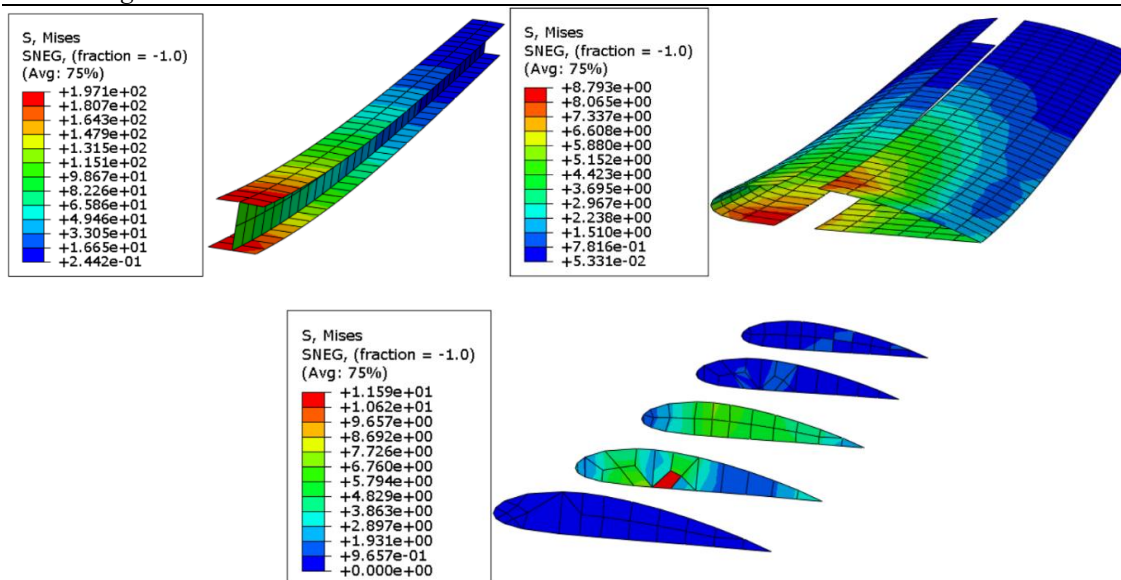
Slika 25. Raspodjela pomaka [mm] na 3D-printanom modelu krila za materijal PA12 za $n=-1.5$



Slika 26. Raspodjela pomaka [mm] na 3D-printanom modelu krila od materijala teške smole 2000 za $n=-1.5$

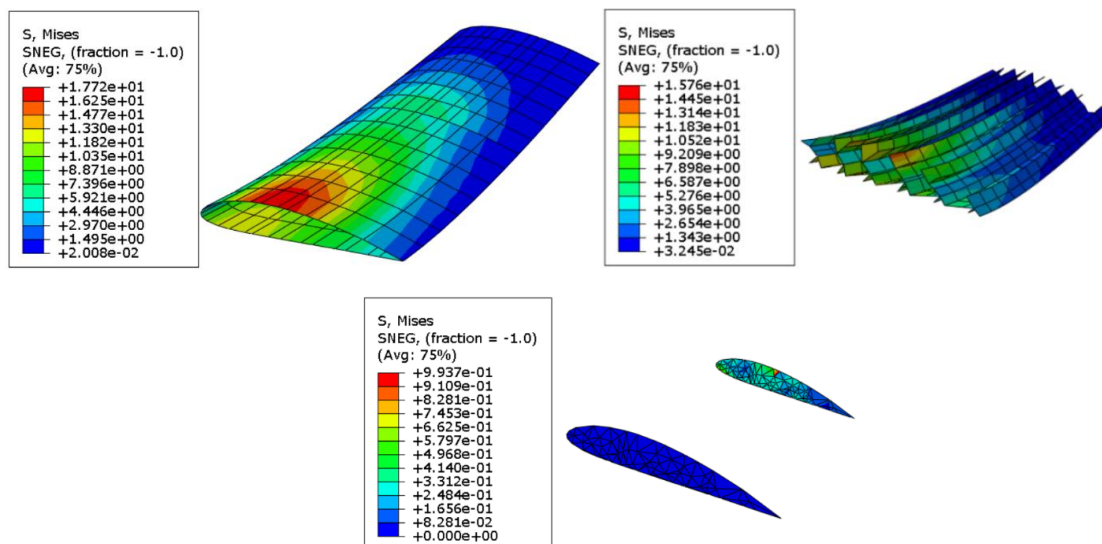
6.3 Analiza von Mises naprezanja

Naprezanje prema von Misesu je kriterij koji omogućava preciznu procjenu kada materijal prelazi u plastično područje, što može dovesti do trajnih deformacija ili oštećenja. Slika 23. prikazuje raspodjelu von Mises naprezanja na standardnom modelu krila.



Slika 27. Raspodjela von Mises naprezanja [MPa] na konvencionalnom krilu za $n=4$

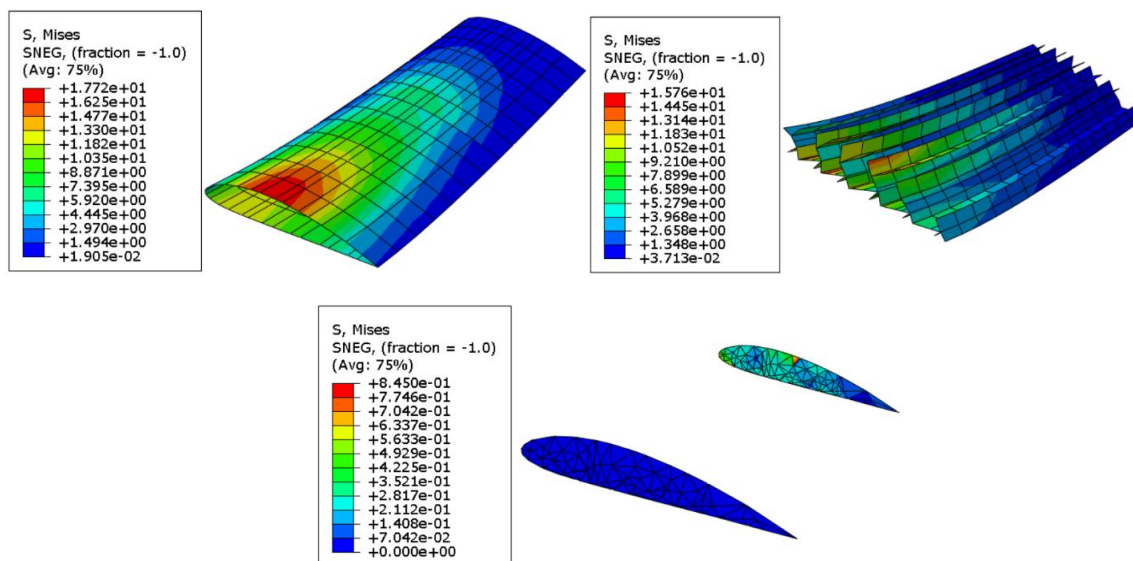
Najveće naprezanje na ovom modelu iznosi 197.1 MPa i nalazi se na ramenjači. Oplata i rebra pokazuju iznimno manja opterećenja. Na najkritičnijem dijelu oplata naprezanja iznose 8.79 MPa, a na rebrima 11.59 MPa. Sve vrijednosti naprezanja manje su od granice tečenja i vlačne čvrstoće materijala. Slika 28. prikazuje raspodjelu von Mises naprezanja na 3D-printanom modelu od poliamida PA12.



Slika 28. Raspodjela von Mises naprezanja [MPa] na 3D-printanom modelu krila za materijal PA12 i $n=4$

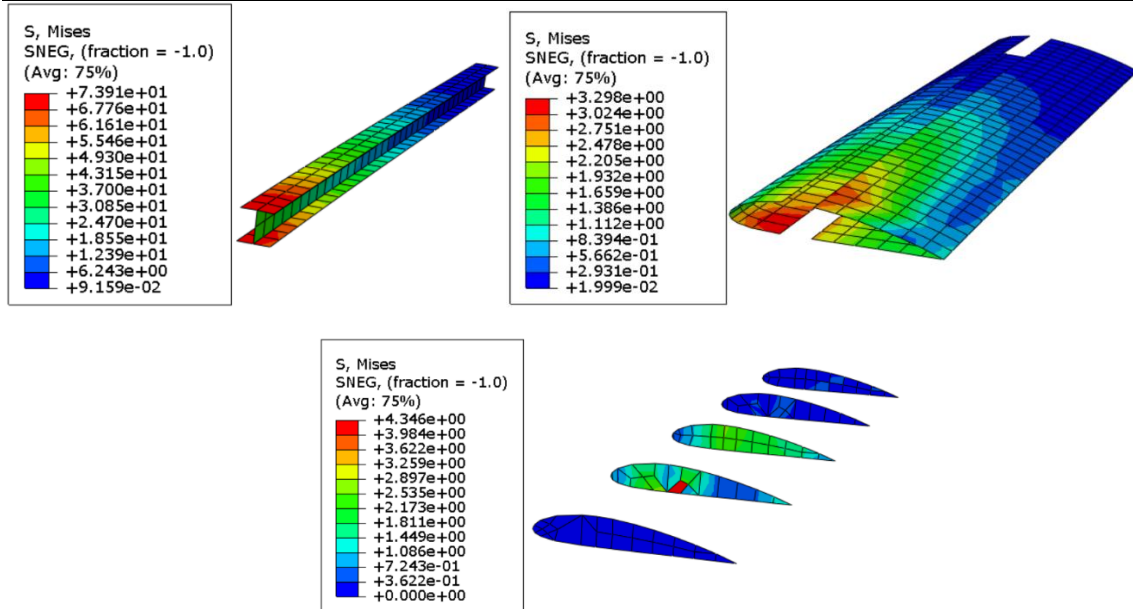
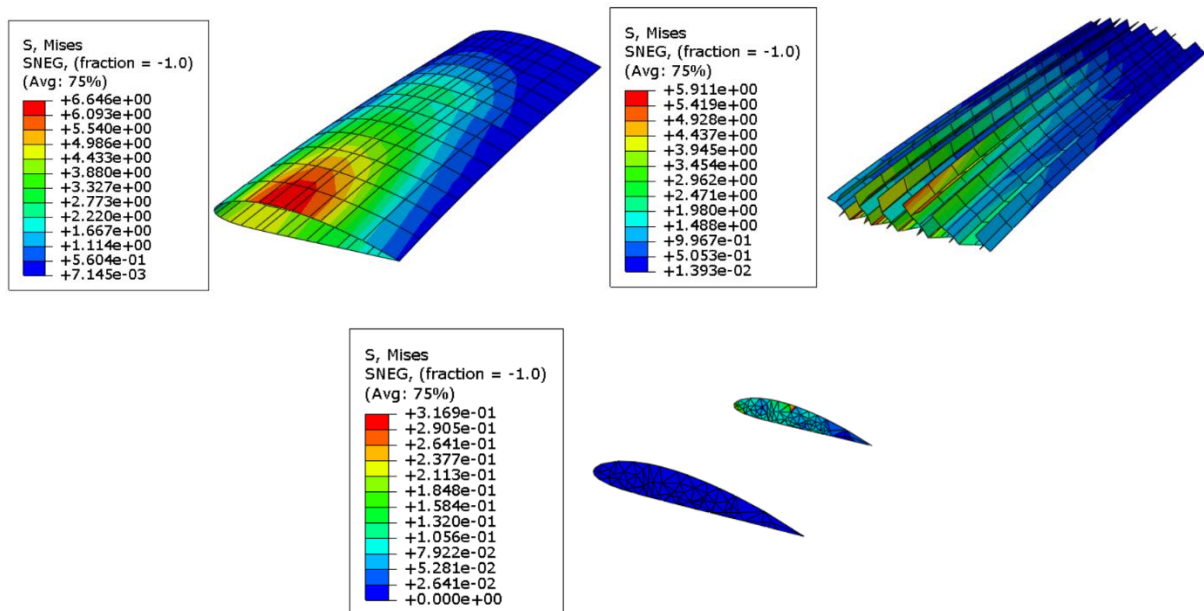
U ovom modelu, najveća naprezanja javljaju se na oplati, u iznosu od 17.72 MPa. Naprezanja u unutarnjim uzdužnim elementima konstrukcije imaju slične iznose naprezanja, maksimalne vrijednosti od 15.76 MPa. Rebra su u ovom slučaju najmanje opterećena, sa 0.99 MPa. Sve vrijednosti naprezanja su i u ovom slučaju manje od granice tečenja i vlačne čvrstoće materijala.

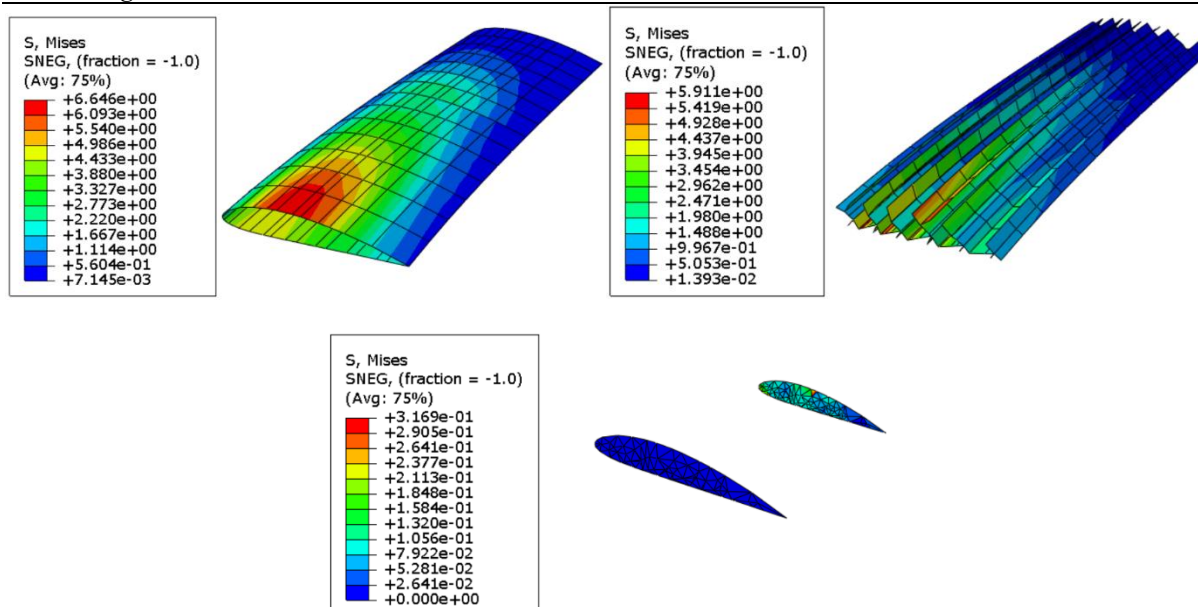
Na slici 29. prikazana je raspodjela von Mises naprezanja posljednjeg modela, 3D-printane konfiguracije, napravljenog od teške smole 2000.



Slika 29. Raspodjela von Mises naprezanja [MPa] na 3D-printanom modelu krila od materijala teške smole 2000 za $n=4$

Rezultati naprezanja ovog modela gotovo su identični rezultatima dobivenim za poliamidno 3D-printano krilo. Najveće naprezanje nalazi se na oplati u iznosu od 17.72 MPa. Ispuna je opterećena maksimalnim naprežanjem od 15.76 MPa, a rebra 0.84 MPa. Naprežanja u 3D printanim izvedbama su manja i brojčano i u relativnom smislu, odnosno manji su postoci iznosa naprežanja u odnosu na granicu tečenja. Kod standardnog modela taj postotak iznosi 71.4 %, kod 3D-modela od poliamida iznosi 35 %, a kod 3D-modela od teške smole 2000 iznosi 60 %. Takvi rezultati mogu ukazivati na manju vjerojatnost za nastanak plastičnih deformacija, ali u kombinaciji s većim progibima, ovo može značiti da 3D-printano krilo nije toliko stabilno kao standardno. U nastavku rada trebalo bi se provjeriti dolazi li do gubitka stabilnosti konstrukcije krila, ali to je izvan opega ovog rada. Pri normalnom opterećenju $n=-1.5$, najveće naprežanje po von Misesu za standardnu konfiguraciju krila iznosi 73.9 MPa, prikazano na slici 30. Slika 31. prikazuje naprežanja na 3D-printanom modelu od poliamida PA12, a najveće naprežanje iznosi 6.65 MPa. Za 3D-printani model od teške smole 2000, prikazan na slici 32., najveće naprežanje također iznosi 6.65 MPa.

Slika 30. Raspodjela von Mises naprezanja [MPa] na konvencionalnom krilu za $n=-1.5$ Slika 31. Raspodjela von Mises naprezanja [MPa] na 3D-printanom modelu krila za materijal PA12 i $n=-1.5$



Slika 32. Raspodjela von Mises naprezanja [MPa] na 3D-printanom modelu krila od materijala teške smole 2000 za $n=-1.5$

6.4 Usporedba razmatranih modela konstrukcije krila

U tablici 5. prikazane su vrijednosti stvarnih masa modela te vrijednosti najvećih progiba i naprezanja za sve modele analizirane u ovom radu za normalno opterećenje $n=4$.

Tablica 5. Usporedba rezultata progiba i von Mises naprezanja za $n=4$

	masa [kg]	najveći progib [mm]	najveće naprezanje [MPa]
Konvencionalno krilo	0.3	16.55	197.1
3D-printano krilo (PA12)	0.154	56.88	17.72
3d-printano krilo (čvrsta smola 2000)	0.169	85.32	17.72

Rezultati analize pokazuju značajne razlike u ponašanju standardnog krila u odnosu na 3D-printane modele, kao i uspoređujući različite 3D-modele međusobno. Standardno krilo, najveće mase, najviše odstupa od 3D-printanih modela u vrijednostima progiba, koje su puno manje, ali zato je 3D-printano krilo pokazalo manja naprezanja, odnosno manju vjerojatnost za stvaranje plastičnih deformacija. Usporedba 3D-printanih modela također pokazuje velike razlike u progibu, koje u ovom slučaju ovise o vrsti materijala.

7. ZAKLJUČAK

Standardno krilo, koje koristi tradicionalnu konstrukciju s rebrima i ramenjačom, obično je izrađeno od materijala poput metala ili kompozita koji mogu biti relativno teški, ali nude veću čvrstoću i stabilnost. Rezultati provedenih simulacija prema von Misesu pokazuju da standardno krilo, zbog svoje veće krutosti i čvrstoće, bolje podnosi opterećenja bez značajnih deformacija te ga čini pogodnijim za primjene koje zahtijevaju bolju stabilnost pod velikim opterećenjima, odnosno manje oscilacije progiba. Međutim, njegova veća masa može biti prepreka u primjenama koje zahtijevaju smanjenje težine, gdje niža masa može značajno poboljšati performanse i smanjiti potrošnju energije. Troškovi izrade također predstavljaju važan faktor u odabiru između ova dva tipa krila. Standardno krilo zahtijeva kompleksne proizvodne procese poput rezanja, oblikovanja i zavarivanja, koji mogu biti skupi i vremenski zahtjevni. Osim toga, materijali poput metala i kompozita koji se koriste u izradi standardnog krila često su skuplji, što povećava početne troškove. Međutim, visoka čvrstoća i dugovječnost tih materijala mogu opravdati početni trošak u proizvodnji zrakoplova koji zahtijevaju izdržljive komponente. S druge strane, 3D-printanje omogućuje bržu i jeftiniju proizvodnju, osobito za prototipe ili manje serije. Troškovi izrade 3D-printanog krila mogu biti znatno niži jer 3D-printanje ne zahtijeva skupe alate ili kompleksne obradne procese. Ipak, iako početni trošak može biti niži, 3D-printano krilo s nižom čvrstoćom može dovesti do većih troškova održavanja i zamjena, što treba uzeti u obzir pri donošenju odluke. Ova tehnologija može biti pogodna za primjene u kojima se cijeni fleksibilnost dizajna, niža masa i brza proizvodnja, ali nije idealna za primjene koje zahtijevaju visoko opterećenje i maksimalnu stabilnost, odnosno manje oscilacije progiba koji mogu utjecati na performanse čitave letjelice. Konačan odabir između standardnog i 3D-printanog krila ovisi o specifičnim zahtjevima primjene, a daljnji razvoj 3D-printanih materijala i tehnologija mogao bi omogućiti optimizaciju tih konstrukcija za širu primjenu u industriji. S obzirom na rezultate, letjelica s 3D-printanim krilom, rasponom i masom prikazanim u ovom radu, bila bi pogodna za zadaće izviđanja i nadzora, kao i operacije koje ne zahtijevaju velika opterećenja ili složene manevarske sposobnosti.

LITERATURA

- [1] Goh, Guo Dong, et al. "Additive manufacturing in unmanned aerial vehicles (UAVs): Challenges and potential." *Aerospace Science and Technology* 63 (2017): 140-151.
- [2] <https://3dgence.com/3dnews/3d-printing-aircraft/> , veljača 2025.
- [3] <https://www.3deo.co/manufacturing/success-stories-in-production-metal-3d-printing/>, veljača 2025.
- [4] Shunshun, Wang, and Guo Zheng. "Design, optimization and application of two-element airfoils for tactical UAV." *Advances in Mechanical Engineering* 14.11 (2022): 16878132221137027
- [5] Moon, Seung Ki, et al. "Application of 3D printing technology for designing light-weight unmanned aerial vehicle wing structures." *International journal of precision engineering and manufacturing-green technology* 1 (2014): 223-228.
- [6] https://en.wikipedia.org/wiki/AAI_RQ-7_Shadow , veljača 2025.
- [7] Anand, Shria, and Ankit Kumar Mishra. "High-Performance Materials used for UAV Manufacturing: Classified Review." *International Journal of All Research Education and Scientific Methods* 10.7 (2022): 2811-2819.
- [8] El Moumen, Ahmed, Mostapha Tarfaoui, and Khalid Lafdi. "Modelling of the temperature and residual stress fields during 3D printing of polymer composites." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 104 (2019): 1661-1676.
- [9] <https://coprint3d.com/blogs/guides/3d-printing-technologies-comparison-fdm-sla-sls-and-dmls> , prosinac 2024.
- [10] <https://manufactur3dmag.com/stereolithography-sla-3d-printing-works/> , prosinac 2024.
- [11] <https://blog.goldsupplier.com/polyjet-printing/> , prosinac 2024.
- [12] Ahn, Dong-Gyu. "Directed energy deposition (DED) process: state of the art." *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology* 8.2 (2021): 703-742.
- [13] <https://www.3dnatives.com/en/directed-energy-deposition-ded-3d-printing-guide-100920194/> , prosinac 2024.
- [14] <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=naca4415-il>, prosinac 2024.
- [15] <https://asm.matweb.com/search/specifcmaterial.asp?bassnum=ma6061t6>, prosinac 2024.
- [16] <https://www.makeitfrom.com/material-properties/Balsa> , veljača 2025.

- [17] chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://xometry.pro/wp-content/uploads/2023/08/Nylon-12-_-PA-12-SLS-MJF.pdf, prosinac 2024.
- [18] <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://formlabs-media.formlabs.com/datasheets/2001340-TDS-ENUS-0P.pdf>, veljača 2025.
- [19] Majka, Andrzej. "Flight Loads of Mini UAV." *Solid State Phenomena* 198 (2013): 194-199