



Design and Simulation of Micro-UAV Using Topology Optimization and Additive Manufacturing Technology

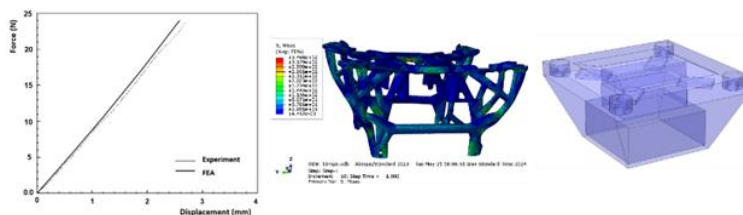
Seyed Mostafa Mirtabaei , Aliasghar Naderi

Assistant Professor, Faculty of Engineering and Aviation, Imam Ali Officer University, Tehran, Iran

HIGHLIGHTS

- Ultra-lightweight structures can be designed using topology optimization and manufactured through additive manufacturing.
- The properties of PETG material for constructing the micro-UAV body were determined through experimental tests.
- The optimized model has the ability to lift a weight equivalent to 100 times its own mass.

GRAPHICAL ABSTRACT



ARTICLE INFO

Article history:

Article Type: Research paper

Received: 3 June 2024

Received in revised form: 4 July 2024

Accepted: 20 July 2024

Available online: 1 August 2024

*Correspondence: mirtabaei@iamu.ac.ir

How to cite this article:

S.M. Mirtabaei. A. Naderi. Design and simulation of micro-UAV using topology optimization and additive manufacturing technology. Journal of Aerospace Mechanics. 2024; 20(3):59-74.

Keywords:

Topology optimization

Micro-UAV

Generative design

3D-printing

Additive manufacturing

ABSTRACT

The expansion of capabilities and the continuous development of additive manufacturing technology have led to a reduction in costs for custom product manufacturing and have enabled the production of complex structures for micro-drones. Weight is generally one of the primary design features of micro-drones, often considered a trade-off against durability and other functionalities. However, ultra-lightweight structures can be achieved through additive manufacturing and topology optimization without compromising structural integrity. This study examines the use of these two technologies for designing and fabricating optimized lightweight micro-drones. Generative design using artificial intelligence algorithms performs topology optimization for optimal load distribution, demonstrating its efficiency in various simulations. This research addresses the complexities of micro-drone design and the interdependence between geometry, manufacturing methods, and materials. In this study, a square-frame micro-drone was constructed using Fused Deposition Modeling (FDM) with PETG filament. The selected material's properties were determined through mechanical testing and literature review. Subsequently, topology optimization was conducted to create a lightweight body structure with an X configuration. The optimized design was 3D printed and validated through load testing to verify finite element simulation results. The experimental and simulation results indicated that the combination of topology optimization and 3D printing can be safely and reliably used for the rapid design and production of micro-drones. The final optimized model produced through additive manufacturing could withstand a load 100 times its own weight, demonstrating superior performance compared to previous designs.

This is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution Non-Commercial (CC BY-NC) license.



طراحی و شبیه‌سازی میکروپهاد با استفاده از بهینه‌سازی توپولوژی و فناوری ساخت افزودنی

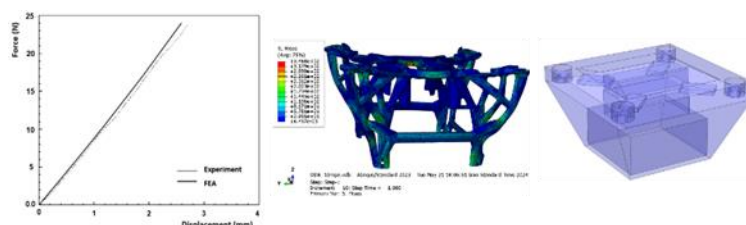
سید مصطفی میرطبايي[✉]، علی اصغر نادری^{ID}

استادیار دانشکده مهندسی و پرواز، دانشگاه افسری امام علی، تهران، ایران

چکیده گرافیکی

برجسته‌ها

- ساختارهای فوق سبک را می‌توان با استفاده از بهینه‌سازی توپولوژی طراحی و توسط ساخت افزودنی تولید نمود.
- برتری خواص ماده PETG برای ساخت بدنه میکروپهاد از طریق آزمایش‌های تجربی حاصل شد.
- مدل بهینه‌سازی شده بلند کردن وزنه‌ای معادل ۱۰۰ برابر جرم خود را دارد.



مشخصات مقاله

چکیده

تاریخچه مقاله:
نوع مقاله: علمی پژوهشی
دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۱۴
بازنگری: ۱۴۰۳/۰۴/۱۴
پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۳۰
ارائه برخط: ۱۴۰۳/۰۵/۱۱
*نویسنده مسئول: mirtabaei@iamu.ac.ir

گسترش قابلیت‌ها و توسعه روزافزون فناوری ساخت افزودنی، سبب کاهش هزینه‌ها در تولید محصولات سفارشی شده است و همچنین امکان تولید ساختارهای پیچیده برای میکروپهادها را فراهم کرده است. وزن عموماً یکی از اصلی‌ترین ویژگی‌های طراحی میکروپهادها است، اما اغلب به‌عنوان معاوضه‌ای در برابر دوام و سایر قابلیت‌ها می‌باشد. با این حال، ساختارهای فوق سبک می‌توانند با استفاده از ساخت افزودنی و بهینه‌سازی توپولوژی، بدون به خطر انداختن یکپارچگی سازه، تحقق یابند. این مطالعه به بررسی استفاده از این دو فناوری برای طراحی و ساخت میکروپهادهای سبک‌وزن بهینه‌سازی شده می‌پردازد. طراحی مولد با استفاده از الگوریتم‌های هوش مصنوعی، بهینه‌سازی توپولوژی را برای توزیع بار بهینه انجام می‌دهد و کارایی خود را در شبیه‌سازی‌های مختلف نشان داده است. پژوهش حاضر به پیچیدگی‌های طراحی میکروپهاد و وابستگی متقابل بین هندسه، روش ساخت و مواد پرداخته است. در این پژوهش، قاب میکروپهاد از نوع مربعی، با روش چاپ سه‌بعدی رسوب ذوب‌شده (FDM) و فیلامنت PETG ساخته شد. خواص مطلوب ماده انتخاب‌شده از طریق آزمایش مکانیکی و بررسی مطالعات پیشین مشخص گردید. سپس، بهینه‌سازی توپولوژی برای ایجاد ساختار بدنه سبک‌وزن با پیکربندی X انجام گرفت. طرح بهینه‌شده چاپ سه‌بعدی شد و از طریق آزمون بارگذاری برای اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی المان محدود ارزیابی گردید. نتایج آزمایش‌ها و شبیه‌سازی‌ها نشان داد که ترکیب بهینه‌سازی توپولوژی و چاپ سه‌بعدی می‌تواند به‌طور ایمن و قابل اعتماد برای طراحی و تولید سریع میکروپهادها به کار رود. مدل بهینه‌سازی شده نهایی که توسط ساخت افزودنی تولید شد، قادر به تحمل وزنی معادل ۱۰۰ برابر جرم خود بود که نشان‌دهنده بهینه‌تر بودن این مدل نسبت به طرح‌های مطالعات پیشین است.

کلیدواژه‌ها:
بهینه‌سازی توپولوژی
میکروپهاد
طراحی مولد
پرینت سه‌بعدی
ساخت افزودنی

۱- مقدمه

افزایش تقاضا و محبوبیت پهپادها و توسعه روزافزون این فناوری، نیاز به تحقیق در مورد وسایل نقلیه هوایی بدون سرنشین^۱ را بیشتر کرده است. عملی بودن این وسایل در کاربردهای مختلف، درحالی که هزینه های تولید و عملیات نسبتاً پایین را حفظ می کنند، آن ها را در بین حوزه ها و صنایع مختلف مورد توجه قرار داده است. پهپادها یا وسایل نقلیه هوایی بدون سرنشین، هواپیماهایی هستند که به صورت خودکار یا از راه دور هدایت می شوند. عدم حضور خدمه پرواز در این وسایل، امکان طراحی کارآمدتر و انجام مأموریت هایی را فراهم می کند که برای هواپیماهای دارای سرنشین امکان پذیر نیست [۱]. کاربردهای گسترده پهپادها در زمینه های دفاعی و استراتژیک [۲-۴]، کشاورزی [۵]، مراقبت های بهداشتی [۶]، لجستیک [۷]، مسافر و پهپادهای مصرفی [۸] گواه قابلیت های این فناوری برای تحول در عرصه های مختلف است.

تطبیق پذیری و قابلیت چندکاره بودن پهپادها در کاربردهای مختلف، همراه با پیشرفت های فناوری، بازار پهپادهای تجاری را در سال های اخیر به طور چشمگیری رونق بخشیده است. در سال ۲۰۲۰، تعداد کل محموله های پهپادهای تجاری در سراسر جهان به ۵۲۶۰۰۰ واحد رسید که نسبت به سال ۲۰۱۹ افزایش ۵۰ درصدی را نشان می دهد [۹] و پیش بینی می شود تا سال ۲۰۲۴ این رقم به ۱/۳ میلیون واحد برسد. پتانسیل رشد بازار جهانی UAV بسیار چشمگیر است و گزارش های مختلف تحقیقاتی رشد نمایی آن را پس از سال ۲۰۲۰ پیش بینی می کنند. گزارش بازار پهپاد ۲۰۲۱ توسط شرکت آلمانی نرخ رشد ترکیبی سالانه ۹/۴ درصدی را از ۲۶ میلیارد دلار در ۲۰۲۱ به ۴۱/۴ میلیارد دلار در ۲۰۲۶ پیش بینی می کند. گزارش دیگر توسط Levitate Capital نرخ رشد ترکیبی سالانه ۲۰ درصدی را برای اندازه بازار جهانی پهپاد از ۱۵ میلیارد دلار در ۲۰۲۰ به ۴۰ میلیارد دلار در ۲۰۲۵ و ۹۰ میلیارد دلار در ۲۰۳۰ پیش بینی کرده است. در همین حال، Business Insider

Intelligence چشم اندازی حتی خوش بینانه تر با نرخ رشد ترکیبی سالانه ۶۶.۸ درصدی در ۲۰۲۲ ارائه می دهد [۱۰]. روند روبه رشدی در استفاده از فناوری ساخت افزودنی^۳ (چاپ سه بعدی) برای تولید سازه های پهپادها مشاهده می شود. این امر ناشی از توانایی چاپ سه بعدی در ساخت هندسه های پیچیده و سبک وزن با حداقل ابزارهای مورد نیاز است [۱۱]. روش های تولید سنتی مانند قالب گیری برای پلاستیک ها و کامپوزیت ها، ماشین کاری و تراشکاری برای فلزات نیازمند نیروی کار زیاد بوده و منجر به محدودیت در آزادی طراحی می شوند. فناوری ساخت افزودنی مجموعه ای از فرآیندهای ساخت است که شامل تکنیک های مختلفی مانند تف جوشی لیزری انتخابی^۴ (SLS)، استریولیتوگرافی^۵ (SLA) و مدل سازی رسوب ذوب شده^۶ (FDM) برای سیستم های پلیمری و کامپوزیتی و ذوب لیزری انتخابی^۷ (SLM) و ذوب با پرتو الکترونی^۸ (EBM) برای فلزات می شود [۱۲]. هر تکنیک دارای خواص منحصربه فردی است که مزایا و معایب خاص خود را دارد و به همین دلیل برای کاربردهای مختلف مناسب است. اولین پهپاد ساخته شده با استفاده از تولید افزودنی، هواپیمای دانشگاه ساوتهمپتون است که در سال ۲۰۱۱ با استفاده از تکنیک SLS و ماده نایلون پلی آمید P730 چاپ شد [۱۳] و نیروی دریایی بریتانیا نیز این پهپاد را در سال ۲۰۱۶ با موفقیت برای نظارت و گشت دریایی به کار گرفت [۱۴]. وزارت دفاع ایالات متحده نیز از روش FDM برای ساخت نمونه های پهپاد جهت اهداف آموزشی استفاده کرده است [۱۵]. کلیپستین و همکاران بر پتانسیل بالقوه ی فناوری FDM در توسعه ی صنعت پهپادها تأکید کرده اند. مطالعه ی آن ها نشان داده است که ساختارهای پیچیده و حتی محفظه هایی برای قطعات الکترونیکی تعبیه شده در پهپادها می توانند با استفاده از این فناوری با موفقیت ساخته شوند [۱۶]. روش بهینه سازی توپولوژی در دهه های اخیر به دلیل توسعه و اجرای گسترده ساخت افزودنی، یک فناوری پیشرفته برای

³ Additive Manufacturing

⁴ Selective Laser Sintering

⁵ Stereolithography

⁶ Fused Deposition Modeling

⁷ Selective Laser Melting

⁸ Electron Beam Machining

¹ Unmanned aerial vehicles (UAVs)

² Compound annual growth rate (CAGR)

ساخت هندسه‌ها و ساختارهای پیچیده، مورد توجه قرار گرفته است. با پیروی از روش بهینه‌سازی توپولوژی، هندسه موجود را می‌توان با کمینه‌سازی یا حداکثر کردن توابع هدف، مانند سختی، حجم یا کاهش وزن، به‌طور مؤثری بهینه کرد [۱۷]. ایده بهینه‌سازی توپولوژی نخستین بار در سال ۱۸۷۰ توسط ماکسول مطرح شد [۱۸] و اولین نرم‌افزار مرتبط در سال ۱۹۹۴ منتشر گردید [۱۹]. از آن زمان تاکنون، تلاش‌های بسیاری برای بهبود و تکامل این تکنیک صورت گرفته است. بهینه‌سازی توپولوژی به‌عنوان روشی برای طراحی اجزای سبک‌وزن در صنایع هوافضا مورد توجه قرار گرفته [۲۰] و در اجزایی همچون سازه‌های محافظ و تقویت‌کننده‌ها [۲۱]، بدنه [۲۲] و پوسته [۲۳] بکار گرفته شده است. با این حال، محدودیت‌هایی در کاربرد این روش وجود داشت، از جمله اینکه ساخت سازه‌های بهینه‌شده معمولاً با روش‌های سنتی و نیازمند اتصالات و هندسه‌های ساده انجام می‌شد. همچنین، بهینه‌سازی معمولاً فقط بر روی اجزای منفرد هواپیما و هواگرد انجام می‌گرفت و نه کل آن، اما این محدودیت‌ها با ترکیب بهینه‌سازی توپولوژی و فناوری چاپ سه‌بعدی برطرف می‌شوند. ادغام این دو فناوری یک تطابق ایده‌آل است؛ بهینه‌سازی توپولوژی بهترین طراحی وزن ساختار را ارائه می‌دهد، اما تولید آن با روش‌های سنتی محدودیت‌هایی دارد که چاپ سه‌بعدی با امکان ساخت هندسه‌های بسیار پیچیده، این شکاف فنی را پر می‌کند [۲۴، ۲۵]. همچنین تولید افزودنی، کاهش تعداد قطعات و پیچ و مهره‌ها را فراهم می‌کند که منجر به کاهش وزن، زمان تولید و هزینه‌ها می‌شود که با اصول طراحی برای تولید و مونتاژ هماهنگ است [۲۶]. به‌علاوه، با تولید افزودنی، امکان طراحی ساختارهای چندمنظوره برای ادغام قطعات کاربردی مانند مدارهای الکتریکی وجود دارد [۲۷]. در سال‌های اخیر، تحقیقات گسترده‌ای در زمینه استفاده از بهینه‌سازی توپولوژی برای اهداف ساخت افزودنی انجام شده است که در مقالات مروری خلاصه‌شده است [۲۸، ۲۹]. همچنین، بهینه‌سازی توپولوژی برای بهبود ساختارهای شبکه‌ای نیز پیشرفت یافته است [۳۰، ۳۱]. علاوه بر این، گزارش‌ها از پهپادهای چهارموتوره تولید افزودنی با مونوکوک‌های بهینه‌سازی شده توپولوژی (ساختاری که

دارای پوسته یا بدنه‌ی یکپارچه است) ارائه شده‌اند [۳۱-۳۵]. در مطالعه اخیر لطفی الحداد و همکاران [۳۶] در سال ۲۰۲۴، روشی برای بهینه‌سازی قاب کوادکوپتر با ترکیب تکنیک‌های بهینه‌سازی توپولوژی و ساخت افزودنی ارائه می‌نماید. نتایج نشان می‌دهد این روش با بهبود پایداری، کاهش وزن و افزایش مقاومت در برابر ضربه، عملکرد کلی کوادکوپتر را ارتقا داده و به پیشرفت فناوری UAV کمک می‌کند. همچنین سوفیا گوتیرز و همکاران [۳۷] در پژوهشی در سال ۲۰۲۳، به طراحی و ساخت یک نمونه اولیه نوآورانه از ساختار کوادکوپتر برای حل دو مانع مرتبط با سیستم‌های کوادکوپتر یعنی طراحی و دسترسی، با هدف بهبود کارایی و زمان پرواز از طریق بهینه‌سازی توپولوژی می‌پردازند. از سوی دیگر به دسترسی کشورهای درحال توسعه به فناوری هوافضا پرداخته و با استفاده از طراحی مدولار و بهینه‌سازی مبتنی بر هوش مصنوعی، برنامه‌های آموزشی و صنعتی در این حوزه را تقویت می‌کند [۳۸]. برای مدل‌سازی دقیق پهپاد تحت بارهای واقعی، تعیین خواص مواد مورد استفاده برای ساخت افزودنی امری ضروری است. مواد انتخابی باید قادر باشند بارهای وارده ناشی از وزن و نیروی پیشران [۳۹] را تحمل کنند. همچنین، مواد باید با هندسه بدنه و روش ساخت همخوانی داشته باشند، زیرا نیروهای متمرکز ممکن است نقاط شکست را در سازه ایجاد کنند. لذا، ترکیبی از آزمون‌های مکانیکی و مقایسه بین مواد کاربردی متناسب با روش ساخت انجام شده است که می‌تواند خواص ماده بهینه را برای انتخاب جهت چاپ سه‌بعدی با دقت بالا مشخص کنند. پژوهش حاضر به ارائه چهارچوبی برای طراحی مولد و ساخت یک سازه میکروپهپاد سبک با بهینه‌سازی توپولوژی از طریق تولید افزودنی می‌پردازد. ابتدا، خواص الاستیک و تسلیم ماده PETG چاپ‌شده توسط پرینتر سه‌بعدی از آزمون‌های کشش و مطابق مطالعات پیشین به دست آمد. سپس دقت خواص الاستیک به‌دست‌آمده با مقایسه شبیه‌سازی المان محدود و نتایج تجربی آزمون‌های خمش مورد بررسی قرار گرفت. پس‌از آن، بهینه‌سازی توپولوژی در چندین مرحله انجام شد تا ساختار بهینه بر اساس شرایط اولیه به دست آید. درنهایت، بر اساس نتایج بهینه‌سازی

انجام شده، سازه مجدداً مدل سازی و برای آزمون های اعتبارسنجی چاپ سه بعدی شد.

۲- چهارچوب طراحی سازه سبک وزن

برای فرآیند سبک سازی در طراحی سازه با استفاده از بهینه سازی توپولوژی و ساخت افزودنی، ما یک چهارچوب پیشنهادی ارائه می نماییم که به سه فاز تقسیم می شود: شناسایی < طراحی > بهینه سازی و بهبود. فاز اول، شناسایی، به منظور به دست آوردن خواص مکانیکی دقیق مواد چاپی است تا مدل های المان محدودی ایجاد شوند که نمایانگر خواص واقعی قطعه باشند. به دلیل ماهیت فرایند چاپ سه بعدی، مواد چاپ شده ممکن از بسته به شرایط چاپ دارای خواص متفاوتی باشند. اگرچه مواد عرضه شده توسط تولیدکنندگان معمولاً با برگه های خواص ماده و برخی ویژگی ها همراه هستند، اما اغلب به دلیل عدم حضور تمام پارامترهای مورد نیاز یا ارائه تنها خواص عمومی ماده، مشخصات ارائه شده کافی نیستند و برای حصول نتایج دقیق، لازم است تست های آزمایشگاهی انجام شود. سپس، با به دست آوردن خواص دقیق مواد چاپ شده، از بهینه سازی توپولوژی برای تعیین ساختار بهینه استفاده می شود به طوری که توزیع ماده به سبک ترین شکل ممکن بتواند حداکثر بار را تحت شرایط بارگذاری واقعی تحمل کند. فرایند بهینه سازی توپولوژی توسط ابزار طراحی مولد چندین بار تکرار می شود تا فضای طراحی و شرایط بارگذاری به طور مداوم بهینه سازی شوند، به طوری که هندسه بهینه شده تمام الزامات عملکردی را برآورده کند.

پس از فرآیند بهینه سازی توپولوژی، ساختار به گونه ای بهبود می یابد که سطوح و لبه های صاف، جایگزین لبه های دندان داری شوند که از نتایج بهینه سازی توپولوژی حاصل شده اند. سپس مدل بهبود یافته تحت تحلیل سازه ای قرار می گیرد تا تعیین شود آیا ساختار تمامی الزامات محدودیت سازه ای را برآورده می کند یا خیر. فرآیند بهبود مدل به صورت تکراری انجام می شود زیرا تفاوت های جزئی بین مدل بهبود یافته و ساختار بهینه سازی شده وجود دارد. هنگامی که طراحی تمامی محدودیت ها را برآورده می کند، به مرحله چاپ برای اعتبارسنجی نهایی تجربی می رود. این

اعتبارسنجی نهایی تجربی به منظور تأیید ساختار نهایی طراحی شده در فرآیند طراحی کاملاً عددی انجام می شود و انتظار می رود که نیازی به تکرارهای بیشتر نباشد. با این حال، در صورت بروز انحرافات از پیش بینی های عددی در این مرحله، فرآیند بهبود طراحی دوباره تکرار خواهد شد. سپس، طراحی نهایی شده و برای تولید توسط پرینتر سه بعدی چاپ می شود. در شکل ۱ نمودار روند نمای ساختار پیشنهادی ارائه شده است.

۳- مواد و روش ها

۳-۱- مشخصات مواد و چاپ

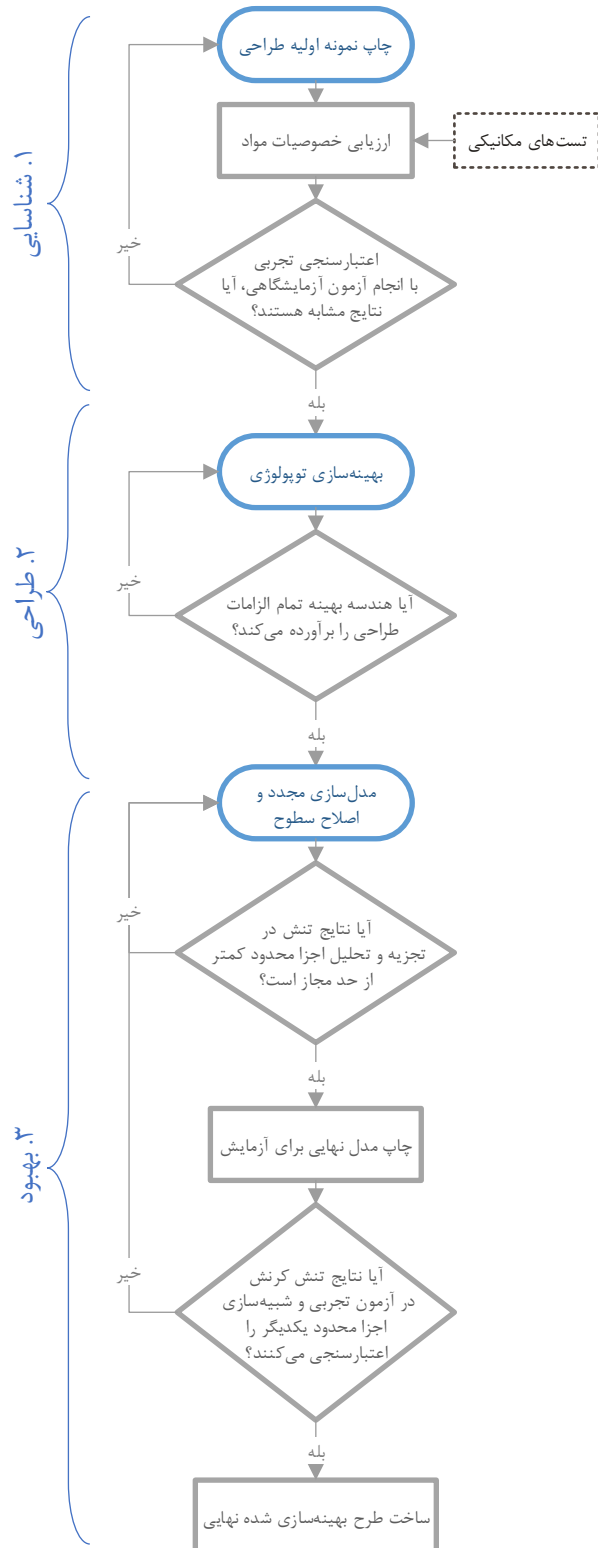
برای ساخت سازه های سبک وزن، ماده پلیمری به جای فلز انتخاب شده است. تکنیک FDM یا ساخت مدل از طریق ذوب مواد برای ساخت میکروپهاد استفاده شده است. چاپ سه بعدی FDM برای تولید سازه های سبک و سریع نسبت به SLS و SLA دارای مزیت های متعددی است. مواد ترموپلاستیک مورد استفاده در این تکنیک دارای خواص مکانیکی مناسبی از جمله استحکام کششی و چقرمگی بالا هستند که باعث افزایش تحمل سازه ها در برابر ضربه می شود. این ویژگی ها به سازه های تولید شده امکان می دهد تا در شرایط مختلف محیطی و بارگذاری مقاومت بیشتری داشته باشند. هزینه های کمتر تجهیزات و فرآیند ساده تر FDM نیز موجب می شود که این روش برای تولید سریع و مقرون به صرفه مناسب باشد. در روش FDM پرینتر سه بعدی از یک فیلامنت پلیمری به عنوان ماده اولیه استفاده می کند. در این روش، رشته های ماده از یک رول فیلامنت وارد پرینتر می شود و از طریق یک اکسترودر به دمای ذوب می رسند. سپس، فیلامنت مذاب از یک نازل به عنوان یک مهره متصل به ماشین به دقت بر روی بستر ساخت دستگاه قرار داده می شود. هنگامی که یک لایه از مواد روی بستر ریخته می شود و سریعاً خنک شده و پرینتر به لایه بعدی می رود و این فرآیند تا چاپ کامل قطعه ادامه پیدا می کند. در نهایت، پس از اتمام چاپ، قطعه از بستر جدا شده و پس از پرداخت سطح، آماده استفاده می شود.

برای ساخت نمونه‌ها و مدل‌های پهپاد، از چاپگر سه‌بعدی 3D-PE و با استفاده از فیلامنت PETG (پلی‌اتیلن ترفتالات گلیکول) با قطر رشته ۱/۷۵ میلی‌متر (FILATECH-3D) استفاده شد. برای داشتن بهترین خواص مکانیکی در قطعات ساخته‌شده از ماده PETG با فرایند FDM، مقدار حداقل ضخامت لایه ۰/۱۷ میلی‌متر پیشنهاد شده است [۴۰]. از این‌رو، مشخصات ورودی به چاپگر برای ساخت افزودنی تمام نمونه‌های PETG، مطابق جدول ۱ استفاده شد.

جدول (۱): مشخصات انتخابی ساخت توسط چاپگر سه‌بعدی

پارامتر	مقدار
ضخامت لایه	۰/۲ mm
پرکننده	مستقیم‌الخط
چگالی پرکننده	۱۰۰٪
حداکثر زاویه برآمدگی برای تکیه‌گاه‌ها	۴۵°
درصد پرکننده تکیه‌گاه	۲۰٪
سرعت چاپ	۴۵ mm/s

در این پژوهش، از نرم‌افزارها و ابزارهای مختلفی برای مراحل طراحی، تحلیل و ساخت استفاده شده است. فرایند بهینه‌سازی توپولوژی توسط ابزار طراحی مولد نرم‌افزار Autodesk Fusion 360 با الگوریتم SIMP^۱ و به کمک قابلیت هوش مصنوعی آن انجام گردید. این ابزار به دلیل کارایی بالا و توانایی حل مسائل پیچیده سازه‌ای، برای بهبود طراحی بسیار مفید است و با توزیع بهینه مواد در ساختار بدنه پهپاد، چندین طرح مختلف را مرحله‌به‌مرحله با کاهش وزن ایجاد و تحلیل می‌نماید تا مدل بهینه نهایی حاصل گردد. [۴۱] سپس مدل خروجی در نرم‌افزار SOLIDWORKS 2023 برای اصلاح سطوح و آماده‌سازی برای ساخت افزودنی طبق قوانین طراحی برای پرینت سه‌بعدی DFAM^۲ [۴۲] انجام شد. تحلیل المان محدود طرح بهینه‌سازی شده توسط نرم‌افزار ABAQUS CAE 2023 انجام گردید و داده‌ها جهت تأیید و اعتبارسنجی طراحی و ساخت تحلیل شدند. برای انتخاب مشخصات ساخت افزودنی، از نرم‌افزار Simplify3D 2017 استفاده شد و



شکل (۱): چهارچوب پیشنهادی برای طراحی سازه به روش بهینه‌سازی توپولوژی و تولید توسط ساخت افزودنی.

^۱ Solid Isotropic Material with Penalization (SIMP)

^۲ Design for Additive Manufacturing (DFAM)

روش‌های آزمون ASTM D618 تحت آزمون کشش قرار دادند. نتایج نشان داد که در زاویه ۰ درجه (موازی با نیرو)، PETG ازدیاد طول در نقطه شکست، استحکام و چقرمگی به مراتب بالاتری نسبت به PLA و ABS داشت که نشان‌دهنده شکل‌پذیری و مقاومت به ضربه برتر آن می‌باشد [۴۵].

بر اساس مقاله گوساسما و همکاران [۴۶]، خواص و رفتار ماده پلی اتیلن ترفتالات گلیکول (PETG) در فرایند پرینت سه‌بعدی با تکنیک مدل‌سازی رسوب ذوب شونده (FDM) مورد بررسی قرار گرفت. مشخص شد دمای مناسب پرینت برای این ماده در محدوده ۲۴۰ تا ۲۵۵ درجه سانتی‌گراد است تا چسبندگی کامل لایه‌ها و پرینت به‌خوبی حاصل شود. تصویربرداری میکروتوموگرافی اشعه ایکس از نمونه‌های چاپ‌شده در این محدوده دمایی، میزان تخلخل را بین ۱۶ تا ۱۹ درصد نشان داد. آزمایش‌های کششی انجام‌شده بر روی نمونه‌های چاپ‌شده، کاهش قابل‌توجهی در سفتی (۳۸ تا ۴۰ درصد)، استحکام کششی (۳۷ تا ۴۱ درصد) و ازدیاد طول در نقطه شکست (تا ۹۸ درصد) در مقایسه با نمونه خام را آشکار کرد. با این حال، چقرمگی شکست نمونه‌های چاپ‌شده در دمای ۲۵۰ درجه، تقریباً معادل نمونه خام بود. خلاصه‌ای از خواص اندازه‌گیری شده برای PETG خام و پرینت سه‌بعدی شده در دماهای ۲۴۰ و ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد به شرح زیر است:

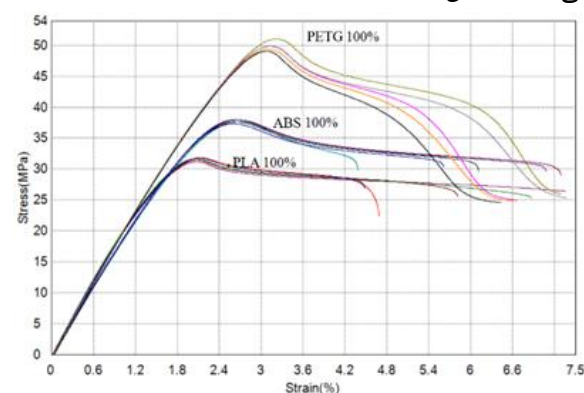
جدول (۲): خواص ماده PETG به‌دست‌آمده از آزمایش کشش بر روی نمونه پرینت سه‌بعدی شده [۴۶].

ماده	دمای چاپ (°C)	چگالی (g/cm ³)	تخلخل (%)
پیش از چاپ	-	۱/۲۶ - ۱/۲۸	۰
پس از چاپ	۲۴۰	۱/۰۳ ± ۰/۰۱	۱۹ ± ۰/۹
چگالی پرکننده	۲۵۰	۱/۰۷ ± ۰/۰۲	۱۶ ± ۱/۶
مدول یانگ (MPa)	مقاومت کششی (MPa)	کشیدگی شکست (%)	چقرمگی شکست (MPa·m ^{1/2})
۷۹۱ ± ۹۱	۵۴/۳ ± ۱/۳	۴۰۰ ± ۲۲۰	۲/۱۱ - ۲/۵۴
۴۹۱ ± ۱۳	۳۲/۳ ± ۳/۲	۸/۸ ± ۰/۲	۱/۸۱ - ۰/۰۱

شرایط ساخت مطابق خواص ماده از طریق G-Code خروجی به پرینتر سه‌بعدی وارد شد.

۳-۲- خواص مکانیکی

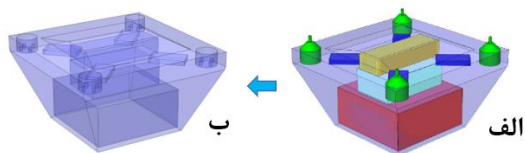
با انجام تست‌های مکانیکی و آزمایشگاهی نشان می‌دهد که ماده PETG تولیدشده با تکنیک FDM در مقایسه با مواد PLA [۴۳] و ABS، از استحکام کششی، استحکام تسلیم و کرنش شکست بیشتری برخوردار است. در این پژوهش به‌منظور تأیید خواص مکانیکی، آزمون کشش بر روی ۵ نمونه پرینت سه‌بعدی شده با تراکم داخلی ۱۰۰٪ از فیلامنت PETG انجام شد که نشان‌دهنده مزایای قابل‌توجهی از نظر خواص مکانیکی و عملکرد برای این ماده بود. نمونه‌ها با استفاده از فناوری FDM و بر اساس استاندارد ISO 527-2 تولید شدند. نتایج آزمون کشش نشان‌دهنده تنش تسلیم در حدود ۵۰ مگاپاسکال و کرنش تا حدود ۷٪/ پیش از شکست بود که با نتایج پژوهش پانژیچ و هودزیچ [۴۴] که خواص مکانیکی مشابهی را برای این ماده گزارش کرده‌اند، مطابقت داشت. این تطابق نتایج، صحت و قابلیت اعتماد داده‌های مکانیکی به‌دست‌آمده از فیلامنت PETG در این مطالعه را تأیید می‌کند و اعتبارسنجی نتایج را تضمین می‌نماید (شکل ۲).



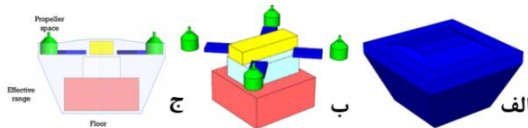
شکل (۲): نمودار تنش-کرنش برای مواد PETG، ABS و PLA با ساختار ۱۰۰٪ تراکم پرشوندگی داخلی [۴۴].

همچنین خواص مکانیکی قطعات پرینت شده از PETG با دو ماده رایج در چاپگر FDM یعنی PLA و ABS، در مطالعه سپاهی و همکاران بررسی و مقایسه شد. آن‌ها ۷۵ نمونه با ۵ زاویه لایه‌گذاری مختلف را پرینت و بر اساس استاندارد

ممکن است باعث آسیب‌های مرگبار به سر شوند را ۲۵۰ گرم توصیه کرده است [۵۲]. همچنین در ایران پرنده‌های بالای ۲۰۰ گرم برای پرواز نیاز به مجوز دارند. سپس بر اساس مطالعاتی که نشان داد که قاب پهپاد معمولاً حدود ۲۰ الی ۳۰٪ از کل جرم را تشکیل می‌دهد [۳۹]، جرم بدنه پهپاد به ۲۰٪ از کل جرم پهپاد محدود شد. در نتیجه برای وزن نهایی بدنه میکروپهپاد بهینه‌سازی شده در این پژوهش، جرم سازه کمتر از ۵۰ گرم هدف‌گذاری شد (شکل ۳ و ۴).

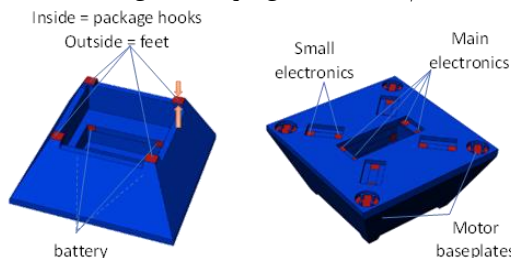


شکل (۳): (الف) کل فضای طراحی؛ (ب) فضای اجزا کلیدی (قطعات الکترونیکی، موتورها و بار؛ ج) کل فضای مؤثر.



شکل (۴): (الف) فضای کلی طراحی با قطعات؛ (ب) فضای طراحی بدنه میکروپهپاد (بدنه تکی پس از حذف قطعات).

در مرحله بعد، چندین نقطه تماس با استفاده از تقسیم سطح پیش از شروع بهینه‌سازی ساختاری بدنه پهپاد، برای محل اتصال قطعات ایجاد و در نرم‌افزار Fusion360 مشخص شد و کاهش نهایی وزن در فرایند بهینه‌سازی ساختاری طبق شرایط مرزی و محدودیت‌های تعیین‌شده، مرحله به مرحله انجام گردید تا در نهایت حجم و وزن بهینه دارای استحکام مناسب حاصل گردید (شکل ۵).



شکل (۵): محل اتصال و نقاط تماس قطعات به بدنه پهپاد با رنگ قرمز مشخص شده است.

در بهینه‌سازی توپولوژی، هدف کاهش جرم تحت محدودیت‌های زیر تعیین شد. حد مجاز تنش، با ضریب

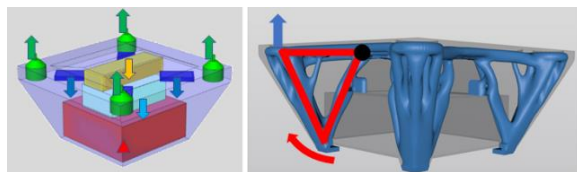
۲/۰۹ - ۰/۰۱	۱۱/۷ ± ۲/۰	۳۴/۰ ± ۳/۳	۴۷۸ ± ۵۱
-------------	------------	------------	----------

از این‌رو، دمای نازل پرینتر سه‌بعدی برای چاپ تمام نمونه‌های PETG در این پژوهش، جهت حصول بهترین خواص الاستیک در میکروپهپاد تولیدی، ۲۴۰ درجه سانتی‌گراد تنظیم شد. همچنین جهت چسبندگی بهتر سازه هنگام ساخت، دمای بستر ساخت چاپگر نیز مطابق برگه مشخصات سازنده بر روی ۶۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد.

۴- بهینه‌سازی توپولوژی

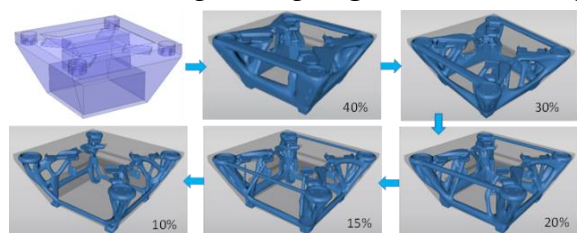
بهینه‌سازی توپولوژی که اغلب به‌عنوان روش توزیع مواد شناخته می‌شود، در زمینه‌های مختلفی کاربرد گسترده دارد. ایده اساسی حول توزیع کارآمد مواد در یک ناحیه مشخص طراحی بدون هیچ ساختار از پیش تعیین‌شده‌ای می‌گردد. رویکردهای مختلفی مانند همگن‌سازی و روش‌های تنظیم سطح وجود دارند؛ اما در اینجا ما از یک رویکرد مبتنی بر چگالی استفاده کرده‌ایم، به‌طوری‌که میزان تنش و چگالی عناصر بر توزیع مواد تأثیر می‌گذارد. به‌طور خاص، ما از تکنیک مواد جامد ایزوتروپیک با جریمه (SIMP) استفاده کرده‌ایم که تفاوت‌های واضحی بین مناطق با چگالی بالا و پایین نشان می‌دهد [۴۱] و در نتیجه به بهبود طراحی منجر می‌شود [۴۷]. در این بخش، از خواص مکانیکی به‌دست‌آمده قبلی برای طراحی بدنه یک میکروپهپاد مربعی X شکل [۴۸]، از طریق بهینه‌سازی توپولوژی (TO) و طراحی مولد به کمک نرم‌افزار Fusion360 استفاده گردید [۴۹]. با استفاده از بهینه‌سازی توپولوژی، می‌توان توزیع مواد و وزن بهینه سازه را بر اساس الزامات طراحی به دست آورد. همچنین برای تعیین ابعاد پهپاد، به منابع مختلفی در این زمینه مراجعه گردید. در مطالعه حسعلیان و همکاران [۵۰] در سال ۲۰۱۷، بحث درباره پهپادهای پرنده، از جمله وسایل نقلیه با بال ثابت و بال چرخان، به‌صورت جامع و اساسی موردبررسی قرار گرفت و برای اولین بار یک طبقه‌بندی جدید از پهپادها ارائه کرد که شامل کلاس‌های مختلفی مانند وسایل نقلیه هوایی بدون سرنشین [۵۱]، پهپادهای میکرو، پهپادهای نانو و پهپادهای پیکو هوشمند می‌باشد. سازمان هوانوردی فدرال حد ایمن برای پهپادهایی که

روبرو است. در فرایند بهینه‌سازی، قلاب‌ها به کناره‌های بسته‌بندی متصل می‌شوند، درحالی‌که در شرایط واقعی، ساختار به‌سادگی قلاب‌ها را از زیر بسته‌بندی می‌چرخاند. این بهینه‌سازی واقع‌بینانه‌ترین بود، ولی همچنان به پیشرفت نیاز دارد.



شکل (۷): نمایش نیروهای وارده در رویکرد دینامیکی روی سازه بدنه پهباد.

در مجموع، مطابق اهداف طراحی، قیود و شرایط مرزی و بارگذاری مشخص‌شده، نرم‌افزار Fusion360 با استفاده از الگوریتم‌های هوش مصنوعی چندین مدل ارائه داد و برای تحقق مدل نهایی ۵ تکرار طراحی مولد انجام گردید. مدل بهینه به‌دست‌آمده مطابق شکل ۸ نمایش داده‌شده است:



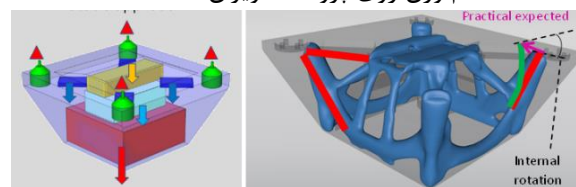
شکل (۸): مقایسه کاهش وزن ساختاری در مدل‌های خروجی، حاصل از هر مرحله بهینه‌سازی توپولوژی.

با بررسی نتایج مختلف بهینه‌سازی، مدل قابی با ۲۰٪ وزن بدنه، نسبت به فضای طراحی اولیه به‌عنوان بهینه‌ترین ساختار از بین خروجی‌ها انتخاب گردید. این قاب بدنه، تمامی قسمت‌های ساختاری که از هندسه انتظار می‌رود را در برمی‌گیرد و پیوستگی مناسبی در کل مدل ارائه می‌دهد. در این طرح اتصالات بین مکان‌های اصلی هنگام بلند شدن و هنگام تحمل وزن پهباد، از ساختارهای محکم‌تری تشکیل شده است. همچنین با بررسی شبیه‌سازی بارگذاری نیروها انتظار می‌رود که اتصال به قطعات و اجزای الکترونیکی اصلی، تحت نیروی فشاری قرار بگیرد (شکل ۹). برای اعتبارسنجی طراحی، هندسه بهینه‌شده تحت تجزیه و تحلیل اجزای محدود قرار گرفت تا اطمینان حاصل شود که تنش‌ها در محدوده مجاز هستند. این تجزیه و تحلیل

اطمینان ۲ و به میزان ۵۰٪ از استحکام نهایی ماده PETG که از آزمایش‌های کششی به دست آمد، معادل ۲۵ مگاپاسکال تنظیم شد. حداکثر جابه‌جایی مجاز ساختار به ۵ میلی‌متر، به میزان ۵٪ از طولانی‌ترین بعد ۱۰۰ میلی‌متر، محدود شد. علاوه بر این، محدودیت حداقل ضخامت تولید به اندازه ۱ میلی‌متر اعمال شد. فرآیند طراحی به‌صورت تکراری انجام می‌شود، به‌طوری‌که نتایج اولیه بهینه‌سازی توپولوژی، بینش و بهبودهایی برای فضای طراحی تحلیل‌ها و بهینه‌سازی‌های بعدی را فراهم می‌کند.

هنگام بررسی بارگذاری‌ها برای پرواز، باید میان پرواز دینامیکی (که در آن پهباد در حال بلند شدن و مانور دادن است) و پرواز استاتیکی (زمانی که پهباد در یک موقعیت پایدار در هوا و یا بر روی زمین قرار دارد و بار عمدتاً توسط پروانه‌ها پشتیبانی می‌شود) تفاوت قائل شد (شکل ۶ و ۷).

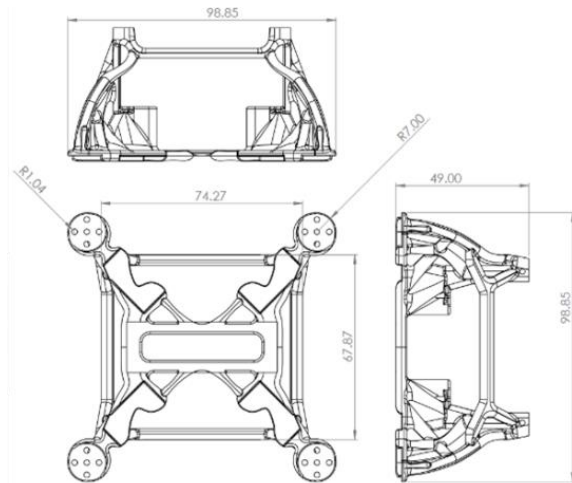
- در رویکرد دینامیکی، نیروی بالابر توسط حداکثر نیروی پیشران پروانه‌ها تولید می‌شود. بیشترین مقاومت توسط بیشترین وزن (به دلیل بالاترین جرم لختی) ایجاد می‌شود.
- در رویکرد استاتیک، در این شرایط به‌طور اساسی تمام وزن روی پروانه‌ها آویزان است.



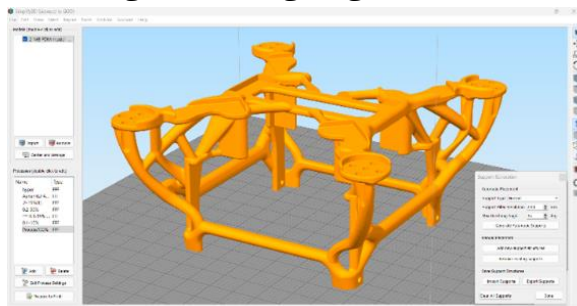
شکل (۹): نمایش نیروهای وارده در رویکرد استاتیکی روی سازه بدنه پهباد.

نتایج حاصل از رویکرد استاتیک برخی سؤالات را مطرح کرد، زیرا ممان اینرسی در نقاط نصب ملخ‌ها بسیار پایین بود. این مسئله به دلیل عدم وجود ارتفاع کافی در ساختار برای استحکام، قابل‌مشاهده است. اتصال در قسمت ملخ منجر به ساختاری بیش‌ازحد صلب شده است. (زیرا اتصال نه‌تنها حرکت عمودی، بلکه حرکت افقی و چرخش داخلی را نیز قفل می‌کند). رویکرد دینامیکی باعث شد که رفتار سختی موتورها واقع‌بینانه‌تر به نظر برسد؛ به‌طوری‌که یک ممان اینرسی در بالا شکل مثلثی ایجاد می‌شود. باین‌حال، در اتصال به بسته‌بندی دوباره با ساختاری بیش‌ازحد صلب

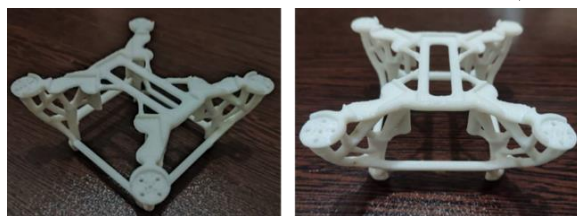
برای تأیید و اعتبارسنجی پیش‌بینی‌های عددی طراحی بهینه، ساختار بهینه‌سازی شده نهایی برای تست‌های تجربی چاپ شد (شکل ۱۲). نمونه ساخته‌شده با استفاده از دستگاه آزمون کشش یونیورسال STM-1، واقع در آزمایشگاه مقاومت مصالح دانشکده مهندسی پزشکی دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تحت بارگذاری قرار داده شد.



شکل (۱۰): نقشه مهندسی بدنه میکروپهپاد بهینه‌سازی شده که ابعاد کلی (میلی‌متر) را نشان می‌دهد.



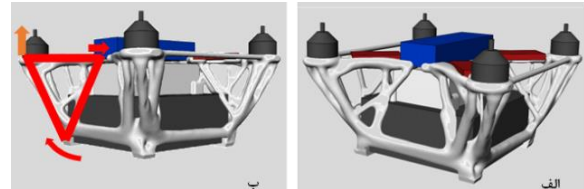
شکل (۱۱): تعیین مشخصات برای ساخت افزودنی در نرم‌افزار Simplify3D مطابق خواص تعیین‌شده ماده.



شکل (۱۲): مدل چاپ‌شده میکروپهپاد بهینه‌سازی نهایی.

مطابق شکل ۱۳ نمونه میکروپهپاد توسط دو گیره از طرف بالا و پایین طبق شرایط مرزی آزمایش بر روی دستگاه ثابت‌شده است. سازه درحالی‌که پایه‌ها به‌صورت ثابت

در شرایط بارگذاری استاتیک و با استفاده از همان شرایط مرزی و بارگذاری‌ها که برای بهینه‌سازی توپولوژی استفاده‌شده بود، انجام شد. درنهایت، نتایج حاصل از شبیه‌سازی اجزا محدود و نمونه آزمایشی ساخته‌شده توسط پرینت سه‌بعدی تحت آزمون تجربی، بررسی و اعتبارسنجی شدند.



شکل (۹): (الف) موقعیت مونتاژ الکترونیکی بر روی ساختار قاب میکروپهپاد بهینه‌سازی شده؛ (ب) بخش پایینی ساختار سفت شده و در حالت کشش است و در قسمت بالای مثلث، قطعات الکترونیکی تحت نیروی فشاری قرار می‌گیرند.

۵- تحلیل ساختاری و اعتبارسنجی طراحی

با دستیابی به یک طراحی بهینه و قابل‌قبول، هندسه به‌دست‌آمده از بهینه‌سازی توپولوژی توسط نرم‌افزار SOLIDWORKS بازطراحی شد تا ساختاری با سطوح صاف‌تر برای چاپ سه‌بعدی نمونه اولیه و تحلیل ساختاری بعدی به دست آید. نقشه مهندسی میکروپهپاد در شکل ۱۰ نشان داده‌شده است.

مطابق شکل ۱۱، مدل CAD^۱ طراحی نهایی ساختار میکروپهپاد بهینه‌شده با استفاده از ابزار CAM^۲ نرم‌افزار Simplify3D برای ساخت توسط پرینتر سه‌بعدی لایه‌لایه برش خورده^۳ و آماده می‌شود. محدودیت‌هایی مطابق مشخصات انتخابی تولید (جدول ۱) شامل، ضخامت لایه‌گذاری، شکل و درصد تراکم پرشوندگی داخلی، زاویه حداکثر بیرون‌زدگی^۴ برای سازه‌ی حمایتی^۵ و سرعت چاپ دستگاه در این بخش تعیین شدند. سپس تنظیمات موردنظر به‌صورت G-Code خروجی گرفته شد و برای انجام ساخت افزودنی بر روی دستگاه پرینتر سه‌بعدی اعمال گردید.

^۱ Computer-aided design

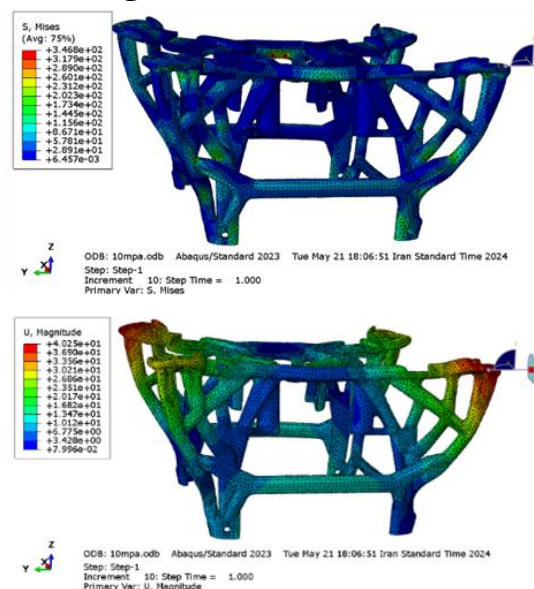
^۲ Computer-aided manufacturing

^۳ Slicing

^۴ Maximum overhang angle

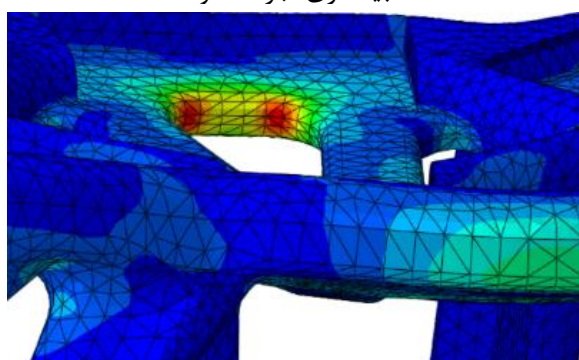
^۵ Support structure

در شکل ۱۵ نمودارهای کانتور تنش و کرنش حاصل از شبیه‌سازی عددی را نشان می‌دهد. مطابق شکل ۱۶ در این قسمت از سازه بیشترین میزان تمرکز تنش مشاهده شده است، اما با توجه به محل قرارگیری اجزای کلیدی و اینکه تغییر شکل سازه به سمت داخل اعمال می‌شود، قاب بدنه شکسته نخواهد شد و مطابق پیش‌بینی اولیه تنها سبب اعمال نیروی فشاری به قطعات در جای خود می‌شود.



شکل (۱۵): نتایج تحلیل تنش و کرنش حاصل از

شبیه‌سازی اجزا محدود.



شکل (۱۶): ناحیه بیشترین تمرکز تنش.

داده‌های نیرو-جابجایی به‌دست‌آمده از آزمایش تجربی و شبیه‌سازی با یکدیگر مقایسه شده و در شکل ۱۷ نشان داده شده‌اند. ضریب تعیین (R^2) محاسبه شده بین داده‌های تجربی و شبیه‌سازی FEA برابر با ۰/۹۹۹۸ به دست آمد که نشان می‌دهد حدود ۹۹/۹۸٪ از تغییرات در داده‌های تجربی توسط مدل شبیه‌سازی توضیح داده می‌شود. این مقدار

بسته شده‌اند، توسط دستگاه کشش از محل جایگاه نصب هر یک از موتورها با نیروی سطحی معادل ۱۰ نیوتون تحت بارگذاری کششی قرار می‌گیرد (معادل برآیند نیروهای بار اجزای کلیدی و بسته در شرایط استاتیک) تا جابجایی مربوط به سازه به‌دست‌آمده و انحراف عمودی توسط دستگاه گزارش شود.



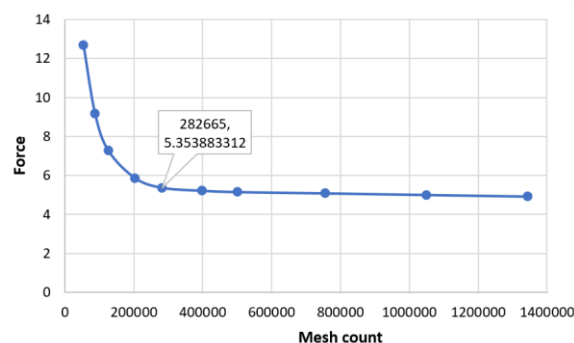
شکل (۱۳): بدنه میکروپهاد ساخته شده، برای انجام

آزمایش و تست بارگذاری قرار داده گرفته است.

۶- مدل‌سازی اجزا محدود

برای فرآیند شبیه‌سازی اجزا محدود، ابتدا فایل طراحی بهینه‌شده وارد محیط نرم‌افزار تحلیل عددی شد و سپس خصوصیات ماده PETG از قبیل مدول یانگ، چگالی و حد تسلیم، مطابق جدول ۲ و با اعمال شرایط مرزی مطابق آزمایش (تکیه‌گاه‌های ثابت در نقاط اتصال بدنه به موتورها و شرایط تکیه‌گاهی آزاد در دیگر نقاط بدنه) و اعمال بارگذاری در شرایط استاتیکی بر روی مدل تعریف گردید.

به دلیل پیچیدگی هندسه شکل حاصل از بهینه‌سازی توپولوژی برای تحلیل دقیق‌تر از نوع المان شبکه‌بندی چهاروجهی استفاده شد که تعداد ۲۸۲۶۶۵ المان مش به‌عنوان عدد بهینه برایمان به دست آمد (شکل ۱۴).



شکل (۱۴): تعیین تعداد بهینه مش در تحلیل عددی.

ماده و ساختار را فراهم می‌کند، درحالی‌که ساخت افزودنی مزایایی در پیچیدگی هندسی و کاهش تعداد قطعات نسبت به ساخت کاهشی دارد. برای ساخت این میکروپهپاد به روش‌های سنتی، نیاز بود مدل طراحی‌شده به چندین قسمت تقسیم و هر بخش به‌صورت جداگانه تولید می‌شد، سپس در فرآیند مونتاژ به کمک پیچ و مهره‌های متعدد و یا چسب اتصالات انجام می‌گردید. با این حال، به کمک ساخت توسط پرینت سه‌بعدی، کل قاب می‌تواند به‌عنوان یک قطعه واحد ساخته شود و نیاز به هرگونه بست یا چسب اضافی را حذف می‌کند. علاوه بر این، استفاده از ساخت افزودنی می‌تواند زمان و هزینه سفارشی‌سازی محصولات را به‌طور قابل‌توجهی کاهش دهد، زیرا قالب‌های مورد استفاده در روش‌های تولید سنتی دیگر مورد نیاز نیستند و ضرورت تولید در مقادیر انبوه برای دستیابی به مقیاس اقتصادی از بین می‌رود.

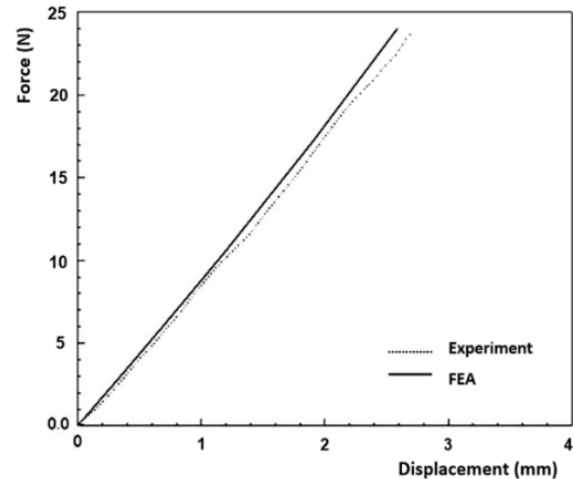


شکل (۱۸): الف) اندازه‌گیری وزن بدنه ساخته‌شده توسط ترازوی دیجیتال؛ ب) تحمل وزنه ۲.۵ کیلوگرمی.

۷- بحث و نتیجه‌گیری

در این مطالعه، چهارچوبی برای فرآیند طراحی سازه بدنه یک ریزپرنده سبک‌وزن، از طریق فناوری ساخت افزودنی و بهینه‌سازی توپولوژی، مطابق شکل ۱ ارائه شد. این چهارچوب شامل سه مرحله‌ی شناسایی، طراحی و بهبود می‌باشد. در مرحله شناسایی، خواص مکانیکی ماده انتخابی PETG با استفاده از آزمون‌های کششی شناسایی شد. داده‌های تجربی به‌دست‌آمده به کمک مطالعات پیشین تطبیق داده شد تا اعتبار و مقبولیت آن‌ها برای بهینه‌سازی توپولوژی و تحلیل اجزای محدود بعدی تأیید شود. در مرحله طراحی، این پژوهش ساختار بهینه‌سازی طراحی تکراری را با اهداف مشخص و متناسب با نیازهای بارگذاری

بیانگر همبستگی قوی بین آزمون آزمایشگاهی و شبیه‌سازی اجزای محدود است و دقت شبیه‌سازی و چاپ سه‌بعدی را در اعتبارسنجی نتایج برجسته می‌کند. نتایج حاصل با موفقیت نشان داد که شبیه‌سازی اجزای محدود و بهینه‌سازی توپولوژی می‌توانند با اطمینان در طراحی میکروپهپادهای ساخت افزودنی مورد استفاده قرار گیرند.



شکل (۱۷): منحنی نیرو-جابجایی از آزمایش تجربی و شبیه‌سازی عددی.

نتایج به‌دست‌آمده برای مدل میکروپهپاد بهینه‌سازی شده نشان می‌دهد که حداکثر تنش که در محل میانی شکل ۱۶ ایجاد شده است، معادل $3/2$ مگاپاسکال است که به‌طور قابل‌توجهی کمتر از حد مجاز تنش تسلیم ماده یعنی ۲۵ مگاپاسکال می‌باشد و این امر حاکی این است که طراحی بهینه به‌درستی انجام‌شده و سازه تحت بارگذاری‌های موردنظر با اطمینان کامل عمل می‌کند. علاوه بر این، مدل ساخته‌شده این پژوهش با وزن $25/5$ گرم توانایی بلند کردن وزنه‌ای به جرم $2/5$ کیلوگرم (معادل ۱۰۰ برابر وزن بدنه میکروپهپاد بهینه‌سازی شده) را دارد که در مقایسه با مقاله اساککی و ساگار [۳۴] نشان‌دهنده یک سازه بسیار مطلوب‌تر است (شکل ۱۸).

فرآیندهای عددی و تجربی انجام‌شده در این پژوهش، نشان دادند که ترکیب بهینه‌سازی توپولوژی با ساخت افزودنی و استفاده از فیلامنت PETG به‌عنوان ماده ساخت برای پرینتر سه‌بعدی، تأثیرات بسیار مفیدی در طراحی بدنه میکروپهپادها داشتند. بهینه‌سازی توپولوژی توزیع بهینه

Study of the Islamic Republic of Iran. Defense Policy. 2023;32(122):11-42. **DOI:** <https://doi.org/10.1001.1.26762935.1391.3.4.6.5>.

[3] Chaturvedi SK, Sekhar S, Kumar S, Subbarao PMV, Chandra H. Comparative review study of military and civilian unmanned aerial vehicles (UAVs). INCAS bulletin. 2019;11(3):181-182. **DOI:** <https://doi.org/10.13111/2066-8201.2019.11.3.16>.

[4] Hajilo M, Farzaneh H, Bagheri Dolatabadi A, Ghorbani M. Research paper: Investigating the role of small birds in future wars. Strategic Defense Studies. 2022;20(87):159-182. **DOI:** <https://doi.org/10.1001.1.20084897.1401.2.0.87.7.3>.

[5] Ayamga M, Tekinerdogan B, Kassahun A. Exploring the challenges posed by regulations for the use of drones in agriculture in the African context. Land. 2021;10(2):164. **DOI:** <https://doi.org/10.3390/LAND10020164>.

[6] Scott J, Scott C. Drone delivery models for healthcare. In Proceedings of the 50th Hawaii International Conference on System Sciences. 2017;3297-3304. **DOI:** <https://doi.org/10.24251/HICSS.2017.399>.

[7] Koetsier J. Drone Delivery Is Live Today, And It's 90% Cheaper Than Car-Based Services. Forbes. com. 2021.

[8] Kellermann R, Biehle T, Fischer L. Drones for parcel and passenger transportation: A literature review. Transportation Research Interdisciplinary Perspectives. 2020;4:100088. **DOI:** <https://doi.org/10.1016/J.TRIP.2019.100088>.

[9] Goasduff L. Gartner Forecasts Global IoT Enterprise Drone Shipments to Grow 50% in 2020. Gartner press release. 2019.

[10] Kapustina L, Vyazovskaya V, Kondratenko Y, Vlasov A. The global drone market: main development trends. In SHS Web of Conferences. 2021;93:04016. EDP Sciences. **DOI:** <https://doi.org/10.1051/shsconf/20219304016>.

[11] Goh GD, Yap YL, Agarwala S, Yeong WY. Additive manufacturing in unmanned aerial vehicles (UAVs): Challenges and potential. Aerospace Science and Technology. 2017;63:140-151. **DOI:** <https://doi.org/10.1016/J.AST.2016.12.019>.

[12] Jandyal A, Chhabra I, Agarwal V, Gaurav R, Hussain CM. 3D printing-A review of processes, materials and applications in industry 4.0. Sustainable Operations and Computers.

و قیود مختلف در مراحل متعدد ارائه داد. در این پژوهش، استفاده از نرم افزار FUSION 360 و الگوریتم SIMP برای بهینه سازی توپولوژی و ماده PETG برای ساخت سازه میکروپهپاد منجر به بهبود قابل توجهی در طراحی نسبت به مطالعات پیشین شده است. نتایج نشان داد که طرح نهایی بهبود یافته تحمل بلند کردن وزنه ای معادل ۱۰۰ برابر جرم کلی سازه بدنه میکروپهپاد را دارد که نسبت به طرح های قبلی بسیار مطلوب تر است. در نهایت، پس از برآورده شدن تمامی الزامات طراحی با بهینه سازی توپولوژی، طرح نهایی بهینه سازی شده تصحیح، مدل سازی مجدد، چاپ سه بعدی و سپس آزمایش شد. اعتبارسنجی انجام شده در مراحل مختلف فرآیند طراحی تا ساخت نشان دهنده تطابق خوب بین نتایج عددی و تجربی بود که این امر توانایی چهارچوب پیشنهادی برای طراحی سازه به روش بهینه سازی توپولوژی و تولید توسط ساخت افزودنی برای میکروپهپادها را تأیید می کند. مقدار ضریب تعیین (R^2) بین داده های تجربی و شبیه سازی FEA به دست آمده برابر با ۰/۹۹۹۸ بود که نشان دهنده تطابق بسیار بالای نتایج شبیه سازی با داده های تجربی در پژوهش است. لازم به ذکر است که این پژوهش تنها رفتار الاستیک ماده PETG و سازه های بدنه میکروپهپاد را مدنظر قرار داده و آزمایش و شبیه سازی بر اساس شرایط بارگذاری استاتیکی و شرایط مرزی مشخص انجام شده است. در پژوهش های آتی، شبیه سازی شرایط مرزی دیگر و بارهای آیرودینامیکی برای شرایط پروازی مختلف ریزپرنده ها مفید خواهد بود. همچنین به دلیل محدودیت های موجود، امکان آزمایش و ارزیابی دینامیکی در این پژوهش وجود نداشت که انجام این بررسی در مطالعات آینده پیشنهاد می گردد.

۸- مراجع

[1] Ayamga M, Akaba S, Nyaaba AA. Multifaceted applicability of drones: A review. Technological Forecasting and Social Change. 2021;167:120677. **DOI:** <https://doi.org/10.1016/J.TECHFORE.2021.120677>.

[2] Rezaei P. Investigating the Role of UAVs in the Military Strategy of Countries Using the Strategic Teachings of Sun Tzo and Clausewitz: A Case

<https://doi.org/10.1016/J.COMPSTRUC.2007.05.005>.

[22] Hansen LU, Horst P. Multilevel optimization in aircraft structural design evaluation. *Computers & Structures*. 2008;86(1-2):104-118. **DOI:** <https://doi.org/10.1016/J.COMPSTRUC.2007.05.021>.

[23] Joo JJ, Reich GW, Westfall JT. Flexible skin development for morphing aircraft applications via topology optimization. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 2009;20(16):1969-1985. **DOI:** <https://doi.org/10.1177/1045389X09343026>.

[24] Brackett D, Ashcroft I, Hague R. Topology optimization for additive manufacturing. In 22nd Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium - An Additive Manufacturing Conference, SFF 2011. 2011;348-362.

[25] Thompson MK, Moroni G, Vaneker T, Fadel G, Campbell RI, Gibson I, Bernard A, Schulz J, Graf P, Ahuja B, Martina F. Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints. *CIRP annals*. 2016;65(2):737-760. **DOI:** <https://doi.org/10.1016/J.CIRP.2016.05.004>.

[26] Boothroyd G. Design for manufacture and assembly: The Boothroyd-Dewhurst experience. In *Design for X: Concurrent engineering imperatives*. Springer. 1996;19-40. **DOI:** https://doi.org/10.1007/978-94-011-3985-4_2.

[27] Goh GL, Ma J, Chua KLF, Shweta A, Yeong WY, Zhang YF. Additively manufactured multi-material free-form structure with printed electronics. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018;94:1309-1316. **DOI:** <https://doi.org/10.1007/S00170-017-0972-Z/METRICS>.

[28] Zegard T, Paulino GH. Bridging topology optimization and additive manufacturing. *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2016;53:175-192. **DOI:** <https://doi.org/10.1007/S00158-015-1274-4/FIGURES/22>.

[29] Liu J, Gaynor AT, Chen S, Kang Z, Suresh K, Takezawa A, Li L, Kato J, Tang J, Wang CCL, Cheng L. Current and future trends in topology optimization for additive manufacturing. *Structural and multidisciplinary optimization*. 2018;57(6):2457-2483. **DOI:** <https://doi.org/10.1007/S00158-018-1994-3>.

[30] Cheng L, Bai J, To AC. Coupling lattice structure topology optimization with design-

2022;3:33-42.

DOI:

<https://doi.org/10.1016/J.SUSOC.2021.09.004>.

[13] Ferraro M, Lock A, Scanlan JP, Keane AJ. Design and flight test of a civil unmanned aerial vehicle for maritime patrol: the use of 3D-printed structural components. In 27th International Conference on Unmanned Air Vehicle Systems. 2014;1-12.

[14] Moon SK, Tan YE, Hwang J, Yoon YJ. Application of 3D printing technology for designing light-weight unmanned aerial vehicle wing structures. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*. 2014;1:223-228. **DOI:** <https://doi.org/10.1007/s40684-014-0028-x>.

[15] Mallikarjuna B, Kumar A, Rao BVS, Srinivas C, Kumar GN. A review on the melt extrusion-based fused deposition modeling (FDM): background, materials, process parameters and military applications. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*. 2023;1-15. **DOI:** <https://doi.org/10.1007/s12008-023-01150-y>.

[16] Klippstein H, Diaz De Cerio Sanchez A, Hassanin H, Zweiri Y, Seneviratne L. Fused deposition modeling for unmanned aerial vehicles (UAVs): a review. *Advanced Engineering Materials*. 2018;20(2):1700552. **DOI:** <https://doi.org/10.1002/ADEM.201700552>.

[17] Ali K, Tawafik M, Jameel A. Quadcopter topology optimization based on impact analysis. In AIP Conference Proceedings. 2023;2977(1):030022. **DOI:** <https://doi.org/10.1063/5.0145650>.

[18] Lógó J, Ismail H. Milestones in the 150-year history of topology optimization: A review. *Computer Assisted Methods in Engineering and Science*. 2020;27(2-3):97-132. **DOI:** <https://doi.org/10.24423/comes.329>.

[19] Brennan J. Years of Topology Optimization: Birth and Maturation of a Disruptive Technology. Altair Hyperworks website. 2014.

[20] Zhu JH, Zhang WH, Xia L. Topology optimization in aircraft and aerospace structures design. *Archives of computational methods in engineering*. 2016;23:595-622. **DOI:** <https://doi.org/10.1007/S11831-015-9151-2>.

[21] Bojczuk D, Sztelblak W. Optimization of layout and shape of stiffeners in 2D structures. *Computers & structures*. 2008;86(13-14):1436-1446. **DOI:**

simulation. *Journal of Aerospace Mechanics*. 1384;1(2):34-42.

[40] Durgashyam K, Indra Reddy M, Balakrishna A, Satyanarayana K. Experimental investigation on mechanical properties of PETG material processed by fused deposition modeling method. *Materials Today: Proceedings*. 2019;18:2052-2059. **DOI:** <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2019.06.082>.

[41] Miller M, Uria I, Monir S, Day RJ, Jones M, Vagapov Y. A review of topology optimisation software for additive manufacturing: capability comparison. In 2023 15th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON). 2023;796-801. **DOI:** <https://doi.org/10.1109/INDUSCON58041.2023.10374974>.

[42] Redwood B, Schffer F, Garret B. The 3D printing handbook: technologies, design and applications. 3D Hubs. 2017.

[43] Hasani M, Akbari D, Behraves AH, Faraji Kalajahi P. Non-destructive evaluation of artificial defects in FDM printed parts using pulse thermography. *Journal of Aerospace Mechanics*. 2022;18(4):77-87. **DOR:** <https://dorl.net/dor/20.1001.1.26455323.1401.1.8.4.6.0>.

[44] Pandžić A, Hodžić D. Tensile Mechanical properties comparison of petg, asa and pla-strongman FDM printed materials with and without infill structure. In *Proceedings of the 33rd DAAAM International Symposium*. 2022;0223-0230. **DOI:** <https://doi.org/10.2507/33RD.DAAAM.PROCEEDINGS.031>.

[45] Sepahi MT, Mortezaei M, Zarringhalam H, Salahinejad E, Haghbin A. Mechanical properties of 3D-printed parts made of polyethylene terephthalate glycol. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2021;30:6851-6861. **DOI:** <https://doi.org/10.1007/S11665-021-06032-4/METRICS>.

[46] Guessasma S, Belhabib S, Nouri H. Printability and tensile performance of 3D printed polyethylene terephthalate glycol using fused deposition modelling. *Polymers*. 2019;11(7):1220. **DOI:** <https://doi.org/10.3390/POLYM11071220>.

[47] Balayan A, Mallick R, Dwivedi S, Saxena S, Haorongbam B, Sharma A. Optimal Design of Quadcopter Chassis Using Generative Design and Lightweight Materials to Advance Precision Agriculture. *Machines*. 2024;12(3):187. **DOI:** <https://doi.org/10.3390/machines12030187>.

dependent feature evolution for additive manufactured heat conduction design. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2018;332:408-439. **DOI:**

<https://doi.org/10.1016/J.CMA.2017.12.024>.

[31] Takezawa A, Yaji K, Kitamura M, Zhu S. Method to optimize an additively-manufactured functionally-graded lattice structure for effective liquid cooling. *Additive Manufacturing*. 2019;28:285-298. **DOI:**

<https://doi.org/10.1016/J.ADDMA.2019.04.004>.

[32] Nvss S, Esakki B, Yang LJ, Udayagiri C, Vepa KS. Design and development of unibody quadcopter structure using optimization and additive manufacturing techniques. *Designs*. 2022;6(1):8. **DOI:**

<https://doi.org/10.3390/designs6010008>.

[33] Martinez Leon A, Rukavitsyn A, Jatsun S. UAV airframe topology optimization. In *Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2020) Volume I 6*. Springer. 2021;418-427. **DOI:**

https://doi.org/10.1007/978-3-030-54814-8_41.

[34] Sagar N, Ganesan A, Hariharan P, Prasanth A, Premkumar R. Multistage mass optimization of a quadcopter frame. In *Innovative Design, Analysis and Development Practices in Aerospace and Automotive Engineering: Proceedings of I-DAD 2020*. Springer. 2021;183-194. **DOI:**

https://doi.org/10.1007/978-981-15-6619-6_19.

[35] Nvss S, Esakki B, Udayagiri C, Thondiyath A. Design and development of unibody quadcopter structure using optimization and additive manufacturing techniques. *Designs*. 2022;6(1):8. **DOI:**

<https://doi.org/10.3390/designs6010008>.

[36] Al-Haddad LA, Jaber AA, Giernacki W, Khan ZH, Ali KM, Tawafik MA, Humaidi AJ. Quadcopter unmanned aerial vehicle structural design using an integrated approach of topology optimization and additive manufacturing. *designs*. 2024;8(3):58. **DOI:**

<https://doi.org/10.3390/designs8030058>.

[37] Gutierrez S, Ocampo J, Narváez CA. Topological optimization, generative design and validation of drone structures. In *AIAA SCITECH 2023 Forum*. 2023;0964. **DOI:**

<https://doi.org/10.2514/6.2023-0964>.

[38] Marino SO. Generative design for 3d printing of advanced aerial drones. Doctoral dissertation, Toronto Metropolitan University. 2023.

[39] Ghorbani Ahmed, Jahormi Amin. Spectral analysis of airplane flight tests using flight

- [48] Castiblanco JM, Peña D, Rueda-Bayona JG, Pena-Sanchez Y, Lopez O. Experimental study on the dynamic behaviour of drones designed for racing competitions. *International Journal of Micro Air Vehicles*. 2021;13:17568293211005757. **DOI:** <https://doi.org/10.1177/17568293211005757>.
- [49] Bright J, Ganesh R, Rajamurugan G, Vijayraghavan M. Optimization of quadcopter frame using generative design and comparison with DJI F450 drone frame. In *IOP conference series: Materials Science and Engineering*. 2021;1012(1):012019. **DOI:** <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1012/1/012019>.
- [50] Hassanalian M, Abdelkefi A. Classifications, applications, and design challenges of drones: A review. *Progress in Aerospace sciences*. 2017;91:99-131. **DOI:** <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2017.04.003>.
- [51] Karbasian M, Shahibana M. Design of an Industrial Production Line in a Buried Secure Space (Unmanned Aerial Vehicle Production). *Journal of Advanced Defense Science & Technology*. 2012;3(4):315-328. **DOR:** <https://dorl.net/dor/20.1001.1.26762935.1391.3.4.6.5>.
- [52] Small U. Aviation Rulemaking Committee (ARC). Comprehensive Set of Recommendations for sUAS Regulatory Development. 2009;1.