



Material Selection Perspective for Size-Adaptive Quadcopters

Afshin Abyaz ^a, Siavash Fathollahi Dehkordi ^{a*}, Foad Hamzeh ^a, Alireza Naeimifard ^a

^a Department of Mechanical Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

Original Article

Use your device to scan
and read the article online



Citation: : Abyaz A, Fathollahi Dehkordi S, Hamzeh F, Naeimifard A. Material Selection Perspective for Size-Adaptive Quadcopters. *Mechanics of Advanced and Smart Materials*. 2023;3(3):346-362.

 <https://10.61186/masm.3.3.346>

KEYWORDS

Quadcopter design,
Time Dependent Dimensions,
Mechanical design,
High-performance materials,
Sustainable materials.

ABSTRACT

The aim of this article is to select material for the components of the quadrotor drones with a time-variable structure. Although the use of a time-variable structure provides the capability to maneuver along various paths and exhibit diverse functionalities, dimensional changes may lead to component failures due to loads, vertical forces, and drag forces from the motors. Therefore, in the design process, in addition to considering weight and cost, parameters related to the durability and load-bearing capacity of the robot's structure must be examined. There are various criteria for selecting suitable materials for construction, and in this regard, the effectiveness of each criterion is specified in the design tables. Ultimately, the optimal materials for use are identified. The results indicate that by selecting Aluminum 7075-T6 and ABS+ Filament materials, the deformation of the drone's body under maximum motor loads is minimal, and the factors of weight and total cost are also optimized.

Extended Abstract

1. Introduction

In recent times, the value of mobile robots has risen substantially [1, 2], mainly due to their increased accessibility and low depreciation costs. Although often limited to surface mobility [3], operational expenses for these robots remain high owing to proliferating obstacles and complexities in reaching target locations [4]. Despite advancements with flying robots [5], demand for ground robots persists – albeit shifted [6]. Flying robots are now preferred for applications where their capabilities excel. However, limitations exist, like dependence on open environments devoid of barriers. The intricate programming and constrained mobility of aerial robots has attracted considerable research attention [7, 8].

The energy constraints of flying drones are a pivotal concern [9, 10]. Though designed with defined energy capacities for loading and movement, functional scopes are frequently restricted - stemming from reliance on batteries and atmospheric impacts of wind and rain. These environmental factors impede the full potential and applications of such robotic systems [11].

While battery innovations have partially mitigated energy limitations, investigations continue on optimizing materials and dimensions [12]. The goal is attaining the ideal balance of efficiency, weight, and mobility through novel methodologies and structural developments [13,14].

* Corresponding author. Tel.: 989124891075

E-mail address: sfdehkordi@scu.ac.ir

DOI: <https://10.61186/masm.3.3.346>

Received: October 08, 2023; Received in revised form: November 21, 2023; Accepted: December 10, 2023.

© Author



Navigation versatility for obstacle avoidance is another limiting factor [15,16]. Early design stage definitions of coverage spaces become essential, inherently restricting roles [17]. This entails either initial mapping to constrain utility or complex real-time data gathering [18, 19]. Utilizing larger drones can enable energy-efficient load transferal, eliminating size adjustments and higher energy needs through the flight [20]. However, applications emphasizing motion stability and payload may necessitate periodic dimensional increases.

Mr. Karmi pour and colleagues, designed a robot that can adjust its height to cross obstacles. The aim of building this robot was to enhance its capability to navigate paths seamlessly without deviating from its trajectory, so that the robot can cross obstacles without changing its path by adjusting its height. The simulation conducted in ADAMS software validated the effectiveness of the design, showcasing a high level of accuracy in the kinematic equations obtained through the process [21, 22]. The key objective here is introducing an optimal adjustable flying robot structure. While movement planning is vital, the material selections for components are equally significant considering maneuverability and resilience across missions. Comprehensive evaluations of various materials have been conducted on parameters such as cost, weight, and resistance indices to achieve this.

2. Methodology

This article details the design and simulation of a shape-morphing quadcopter using SolidWorks and ANSYS software. The key design challenge was enabling the smooth, vibration-free extension and retraction of the wings using lightweight mechanisms. As seen in the concept image, servo motors control the linear motion of each wing along threaded shafts, while smooth support shafts counteract propeller thrusts.

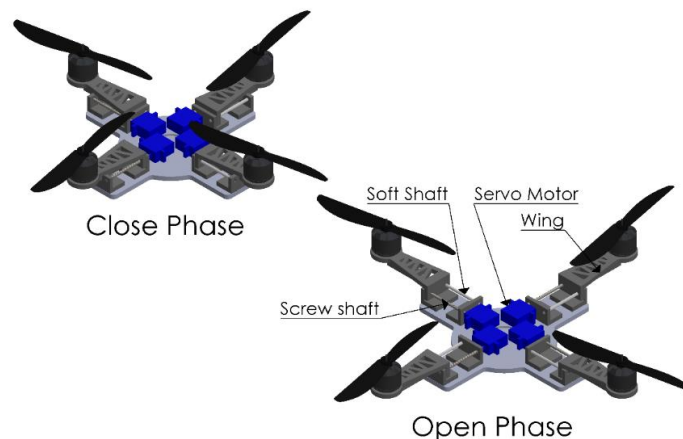


Figure 1. The overall schematic of the quadcopter in two open and closed states

As shown in the image, each wing is capable of linear movement with the help of its dedicated servo motor. This movement is achieved as the servo motor applies torque to the threaded shaft, resulting in linear wing motion. Additionally, a smooth shaft provides support for the wing's movement, allowing for easy counteraction of the thrust force from the propeller motor.

3. Numerical Simulation

ANSYS software was used for simulation due to its advanced analysis capabilities and tools suitable for various stress analysis types. The quadcopter model was simplified to streamline analysis and prevent delays from components with minimal impact on results. The simplified model for simulation omits servo motors, propeller motors, and propellers.

Since the open configuration is more critical than the closed one, the stress analysis from the open configuration was used to analyze the closed configuration. The von Mises criterion was used to select an appropriate quadcopter material due to its high reliability. ANSYS provides maximum von Mises stress values for components, which was utilized. The quadcopter configuration was defined and simulated with applied forces to identify high-stress components. Finally, required yield strengths for critical components were determined, with a 1.5 safety factor, ensuring structural integrity by selecting materials with adequate yield strengths based on maximum von Mises stress calculations.

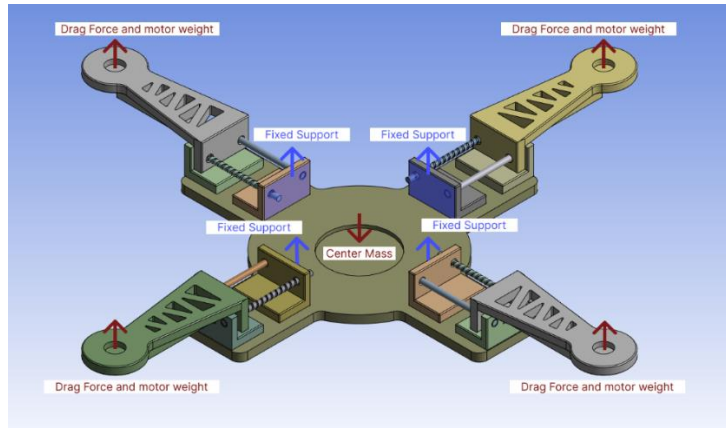


Figure 2. A simplified model of a quadcopter with the location of supports and powers.

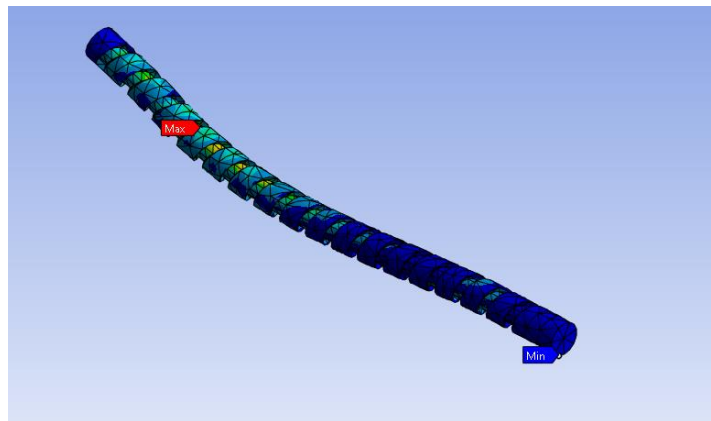


Figure 3. Stress tensor on the shaft

Simulations showed the shaft experiences the highest stress. Therefore, the shaft material should have high yield strength. Additionally, increasing shaft diameter can improve stress resistance. However, in aerospace applications, weight is critical and diameter increases impact performance, efficiency, and safety. While larger diameters improve strength, material selection is crucial to balance structural integrity and weight constraints.

In aircraft and aerospace applications, every gram of weight is carefully considered, as it directly impacts vehicle performance, fuel efficiency, and overall safety. Therefore, while increasing shaft diameter can improve strength, it must be done judiciously to maintain a balance between structural integrity and weight constraints. Selecting the right high yield strength material becomes crucial to ensure component reliability while minimizing weight.

Table 1. Maximum von Mises stress in the mechanism

(1.5) Maximum von Mises stress considering the reliability factor			Forces	
Screw shaft (MPa)	Wing (MPa)	Panel (MPa)	Center mass(N)	Trust force (N)
90	9	1/5	10	5
270	30	3	30	15
540	60	6	50	30
730	75	9	60	40
900	90	12	70	50

4. Conclusion

This article explores designing and constructing a flying robot with dynamic, changing dimensions. A key issue is selecting appropriate materials that can adapt to mid-flight dimension changes and resulting dynamic and static critical states. Using the maximum number of motors and achieving maximum carrying capacity introduces structural complexity and vulnerability due to the inherent structure and material composition.

To address this effectively, parameters influencing performance were methodically defined and resistance levels thoroughly assessed. This strategic approach not only meets the demands of a dimension-changing flying robot but also ensures an optimal balance between structural integrity, material resilience, and operational

efficiency. Completed investigations ascertain the minimum stress threshold for the chosen material, enabling judicious selection from available market options. Various materials exist for different components, allowing tailored choices based on project requirements. For instance, steel materials are advantageous for high-stress shafts due to heightened stress resistance.

Alternatively, 3D filament printing is suitable for quadcopter parts. The optimal material and production method depends on specific project needs and conditions. Aligning selection and processes with these needs enhances both component performance and durability.

Table 2. Examples of materials that can be used for Arms and Panel

Suitable material for shaft	Tensile yield (MPa)	Density (gr/cc)	Price per kilo(\$)
Steel AISI 304	215	8	1.5-3.5
Aluminum 7075-t6	503	2.81	2-4
Stainless Steel AISI 316	290	8	2-5

Prices in Iran and in 2023/11/4

Table 2 presents three common and accessible shaft materials. While impractical to examine every potential material, these are frequently used and readily available, making them feasible choices. Other shaft materials likely have similar characteristics.

Table 3. Examples of materials that can be used for shafts.

Suitable material for panel and arm	Tensile yield (MPa)	Density (gr/cc)	Price per kilo(\$)
PETG filament	52	1.27	23
PLA+ filament	60	1.23	24
ABS+ filament	40	1.06	24
Nylon carbon fiber filament(ePA-CF)	140	1.24	53
ePA12-CF	108	1.24	90

Prices in Iran and in 2023/11/4

Table 3 outlines suitable quadcopter wing filaments. Sheet composites are also an option but introduce construction complexity at smaller dimensions. Filament mechanical properties and pricing vary by manufacturer. To simplify selection, a top manufacturer was used for representative data. Other manufacturers likely offer similar options.

Table 4. General decision table for quadcopter

Shaft Materials(alloys)	Mark	Filament Materials	Mark	Total mark
Steel AISI 304	23/6	PETG filament	34/6	58/2
		PLA+ filament	38/4	62
		ABS+ filament	44/6	68/2
		ePA-CF	38/3	61/9
		ePA12-CF	37/9	61/5
Aluminum 7075-t6	35/19	PETG filament	34/6	69/79
		PLA+ filament	38/4	73/59
		ABS+ filament	44/6	79/79
		ePA-CF	38/3	73/49
		ePA12-CF	37/9	73/09
Stainless Steel AISI 316	24/6	PETG filament	34/6	59/2
		PLA+ filament	38/4	63
		ABS+ filament	44/6	69/2
		ePA-CF	38/3	62/9
		ePA12-CF	37/9	62/5

Ultimately, a comprehensive table compiled pertinent data to facilitate selecting the most suitable materials based on decision criteria. Analysis revealed 7075-T6 Aluminum as optimal for the shaft and steel accessories, while ABS+ filament was preferred for the panel and arms. The material selection utilized readily available options, although the full range is too extensive to fully encompass here. For example, resin was omitted due to its generally higher cost over filaments. Additionally, the steel assessment focused on three primary accessible types. In conclusion, this quadcopter material selection method first examines steel components separately given their higher strength. A table is then generated to facilitate selecting the optimal material based on defined decision criteria.



روند انتخاب مواد برای ساخت پهپاد چهارروتوره با ابعاد زمان-متغیر

افشین ابیض الف^۱، سیاوش فتح‌اللهی دهکردی ب^{۲*}، فؤاد حمزه ج^۳، علیرضا نعیمی فرد د^۴

الف کارشناسی، مهندسی مکانیک، فنی و مهندسی دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران، afshinabyaz@gmail.com

ب استادیار، مهندسی مکانیک، فنی و مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران، sfdehkordi@scu.ac.ir

ج کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، فنی و مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران، foadhamzeh76@gmail.com

د استادیار، مهندسی مکانیک، فنی و مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران، naeimifard.a@scu.ac.ir

واژگان کلیدی	چکیده
طراحی پهپاد چهارروتوره، ساختار متغیر با زمان، طراحی مکانیکی پهپاد چهارروتوره، طراحی جنس مواد تشکیل‌دهنده.	هدف این مقاله انتخاب مواد برای اجزای پهپاد چهار روتوره با ساختار زمان-متغیر است. استفاده از ساختار زمان-متغیر اگرچه امکان حرکت در مسیریها و قابلیت‌های متنوع را فراهم می‌کند، اما تغییر ابعاد احتمال شکست به دلیل اثرات بارگذاری، نیروهای عمودی و نیروی درگ موتورها را بیشتر می‌کند؛ بنابراین در فرایند طراحی علاوه بر در نظر گرفتن وزن و هزینه، باید پارامترهای مربوط به دوام و تحمل بار سازه ربات نیز بررسی شود. بدین منظور ابتدا شبیه سازی به صورت جداگانه در محیط نرم‌افزاری انجام گرفته است و نتایج تحلیل تنش قطعات پهپاد چهار روتوره در جداول مربوطه قرار داده شدند. معیارهای مختلفی در انتخاب مواد مناسب برای ساخت وجود دارند که به این منظور در جداول طراحی اثربخشی هر معیار مشخص شده و در نهایت این که کدام مواد انتخاب بهینه‌تری برای استفاده است مشخص شده است. نتایج نشان می‌دهد با انتخاب مواد Aluminum 7075-T6 و ABS+ Filament، تغییر شکل بدنه در بار حداکثر موتورها بسیار اندک است و فاکتورهای وزن و هزینه تمام‌شده نیز بهینه می‌گردد.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۷/۱۶	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۸/۳۰	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۹/۱۹	

۱- مقدمه

امروزه استفاده از سیستم‌های رباتیکی سیار اعم از ربات‌های متحرک [۱، ۲]، پرنده و همچنین ربات‌های رو و زیر سطحی [۳] به دلیل قابلیت دسترسی بالا و استهلاک پایین از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد. این ربات‌ها اگرچه اغلب قابلیت حرکت بر روی سطوح را دارند اما با افزایش موانع و پیچیدگی‌های دسترسی به نقاط مورد انتظار، جهت انجام ماموریت‌ها، هزینه‌ی بهره‌برداری را بالا می‌برند [۴]. این در حالی است که با گذشت زمان و توسعه ربات‌های پرنده از تقاضای ربات‌های سیار کاسته و به کاربردهای ربات‌های پرنده افزوده شده است [۵، ۶]. از سوی دیگر محدودیت‌های حرکتی ربات‌های پرنده و مقید بودن اغلب آن‌ها به محیط‌های باز و بدون موانع از یک سو و قابلیت برنامه ریزی این نوع از ربات‌ها که دارای پیچیدگی‌های خاص خود می‌باشند از سوی دیگر موجب گردیده است این نوع از ربات‌ها مورد توجه بسیاری از محققین باشند [۷، ۸]. اولین اهمیت ربات‌های پرنده به واسطه محدودیت ظرفیت انرژی این نوع از ربات‌ها می‌باشد [۹، ۱۰]. این موضوع موجب می‌گردد از پهپاد چهارروتوره در شرایط خاص و ظرفیت مشخص شده جهت جابجایی بار استفاده شود. این در حالی است که علاوه بر انرژی مورد نیاز که از طریق باتری تامین می‌شود، اثرات جانبی ناشی از پدیده‌های جوی از جمله باد، باران و ... نیز سبب می‌گردد، استفاده از این نوع ربات‌ها محدود گردد [۱۱]. اگرچه با گذشت زمان این موضوع که ظرفیت انرژی این نوع از ربات‌ها محدود است، با استفاده از انواع مختلف باتری‌ها رفع می‌شود. اما انتخاب جنس مناسب و ابعاد بهینه خود از مسائلی است که هنوز مورد مطالعه محققین

می‌باشد [۱۲]. از این رو تلاش می‌شود با استفاده از روش‌های نوین و ارائه ساختارهای مناسب به ترکیب بهینه از کارائی، وزن و قابلیت حرکت در این نوع از ربات‌ها دست یافت [۱۴، ۱۳].

یکی دیگر از محدودیت‌های ربات‌های پرنده، نحوه عبور آن‌ها از مسیرهای گوناگون است یعنی این نوع ربات‌ها صرفاً برای محیط‌های باز مورد استفاده قرار نمی‌گیرند و برخی از آن‌ها بر اساس نوع کاربرد برای ساختمان‌ها، کانال‌ها و ... جهت بهره برداری‌های متنوع مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱۶، ۱۵]. از این رو قابلیت عبور کردن و جلوگیری از برخورد با موانع برای این نوع از ربات‌ها حائز اهمیت است [۱۷]. برای این منظور لازم است در طراحی اولیه ربات پرنده، فضایی را که پوشش می‌دهد ترسیم گردد که خود موجب محدودیت استفاده شده و یا آنکه نسبت به مطالعه اولیه تمام فضای کاری ربات اطلاعات مورد نیاز جمع‌آوری گردد که خود در عمل کاری دشواری است [۱۹، ۱۸]. این در حالی است که استفاده از ربات‌های پرنده در ابعاد بزرگ به منظور جابجایی بار در مصرف کمتر انرژی موثر است و همچنین این نکته را شاخص نماید که در تمام زمان پرواز نیاز به آن نیست که ابعاد ربات بزرگ و مصرف انرژی آن بیشتر گردد و در برخی زمان‌ها به واسطه نوع حرکت به منظور پایداری حرکتی و نوع بار ابعاد بزرگ برای ربات لازم گردد [۲۰].

آقای کرمی پور و همکاران رباتی طراحی کردند که برای عبور از موانع توانایی تنظیم ارتفاع خود را دارد. هدفی که از ساخت این ربات داشتند توانایی عبور ربات از مسیرها بدون انحراف ربات بود تا ربات بتواند بدون اینکه مسیر خود را تغییر بدهد با تنظیم ارتفاع خود از موانع عبور کند. شبیه سازی که در نرم‌افزار ADAMS صورت گرفت و معادلات سینماتیکی که بدست آوردند با دقت قابل بالایی مشابه یکدیگر بودند [۲۲، ۲۱]. اگرچه این طرح حرکت از اهمیت زیادی برخوردار است اما در فرآیند طراحی، انتخاب جنس مناسب برای اجزاء به واسطه توانایی حرکتی و مقاومت آن در مانورها و انجام ماموریت‌ها نیز حائز اهمیت است. برای این منظور با در نظر گرفتن پارامترهای مورد نظر از جمله هزینه، وزن و شاخص‌های مقاومت، برای جنس‌های مختلف و برای ساختار ربات اقدام گردیده و در ادامه با بررسی نتایج به دست آمده و شرایط مختلف عملکردی نسبت به بررسی و انتخاب نهایی اقدام می‌شود. در ادامه این مقاله در بخش ۲ به طراحی قاب، در بخش ۳ به تحلیل عملکرد آن و در بخش ۴ به منظور بررسی شرایط بحرانی حرکت ربات پرنده جهت انتخاب جنس، نسبت به شرح طرح و نحوه عملکرد آن و نقاط بحرانی آن در طی حرکت پرداخته می‌شود. در بخش ۵ نیز فرآیند انتخاب جنس سازه از طریق انتخاب پارامترهای حائز اهمیت توضیح داده می‌شود و در ادامه نیز شبیه سازی‌ها و نتایج ارائه شده است.

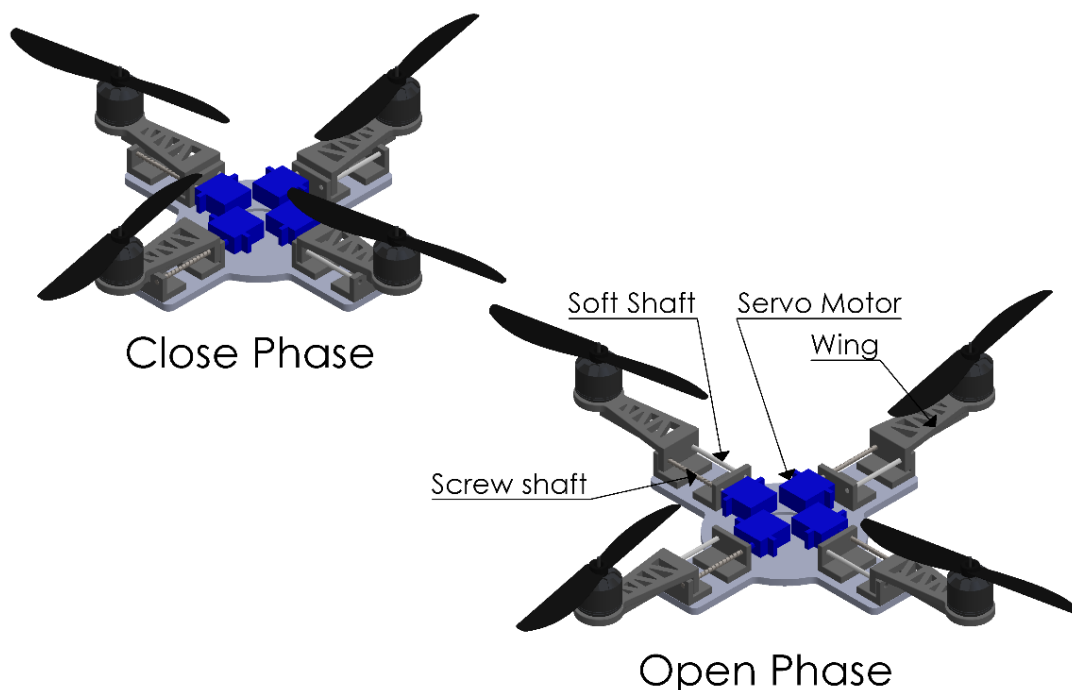
۲- طراحی قاب برای پهپاد چهارروتوره با ابعاد زمان-متغیر

نمونه طراحی شده در شکل ۱ نشان داده شده است و مشاهده می‌شود که پهپاد چهار روتوره طراحی شده در ۲ فاز بال بسته و بال باز قرار می‌گیرد. سرو موتورها^۱ که نیروی محرکه برای حرکت خطی بال‌ها را فراهم کرده و گشتاور لازم را به شفت مارپیچ منتقل می‌کنند. همچنین بال با حرکت خطی بر روی شفت مارپیچ به جلو و عقب حرکت می‌کند. علاوه بر شفت مارپیچ، از یک شفت صاف نیز استفاده شده است تا بال با پایداری و تحمل نیروی بیشتری حرکت کند. در زمانی که بال‌ها در حالت باز قرار گرفته‌اند به علت افزایش بازوی گشتاور نیروی تراست^۲، مکانیزم افزایشنده و کاهشنده طول بازو در بیشینه تنش خود قرار دارند. تحلیل‌هایی که برای حالت باز صورت می‌گیرد، برای حالت بسته نیز قابل استفاده می‌باشند و حالت باز، قطعات در حالت بحرانی تری نسبت به حالت بسته هستند. مبنای تحلیل‌ها و شبیه‌سازی‌ها را حالت باز قرار داده‌ایم از این جهت که طراحی قطعات باید بر مبنای حالت بحرانی انجام گیرد و حالت بحرانی در پهپاد زمانی است که بال‌ها باز شده‌اند و نیروی تراست، که به موجب حرکت پروانه‌ها ایجاد می‌شود گشتاور بیشتری را به شفت‌ها، پندل و بازو به علت فاصله بیشتر محل نیرو وارد می‌کند. در جدول ۱ و ۲ تفاوت بین حالت باز و بسته و تغییرات شکلی که در پهپاد چهار روتوره در اثر تغییرات نیرو در مرکز جرم به وجود می‌آید نشان داده شده است. به‌خوبی می‌توان متوجه شد که در صورت استفاده از حالت باز پهپاد، تنش‌ها و تغییرات شکل در پهپاد

¹ servo motors

² Trust force

بسیار بیشتر می‌شوند.



شکل ۱ شماتیک پهپاد چهارروتوره در دو حالت باز و بسته

جدول ۱ تغییرات شکل و مقادیر تنش در حالت بال باز

تنش در شفت (MPa)	تنش کلی کواد (MPa)	نیروی تراست (N)	نیرو در مرکز جرم (N)
۵۰/۵۷۵	۵۰/۵۷۵	۴	۵۰
۴۹/۷۳۳	۴۹/۷۳۳	۴	۳۰
۳۶/۷۳۳	۳۶/۷۳۳	۳	۱۰

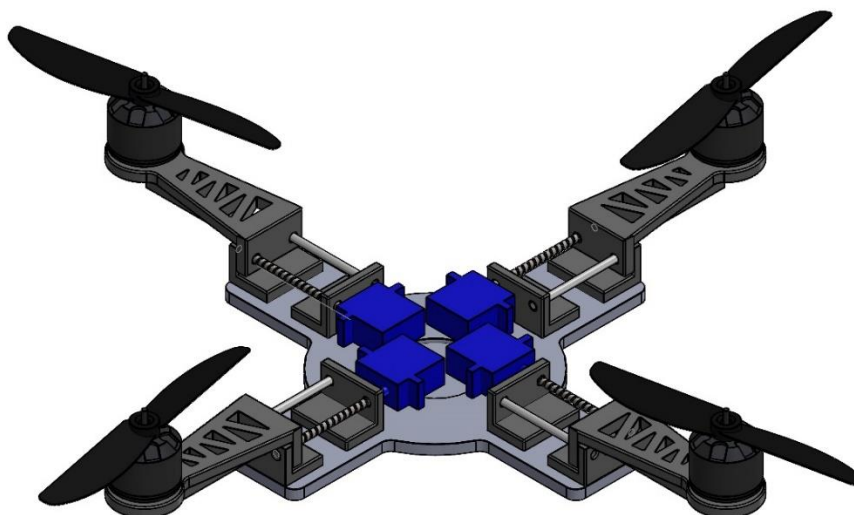
جدول ۲ تغییرات شکل و مقادیر تنش در حالت بال بسته

تنش در شفت (MPa)	تنش کلی کواد (MPa)	نیروی تراست (N)	نیرو در مرکز جرم (N)
۱۷/۱۹۳	۱۷/۱۹۶	۴	۵۰
۱۶/۳۹۶	۱۶/۳۹۹	۴	۳۰
۱۱/۸	۱۱/۸۰۱	۳	۱۰

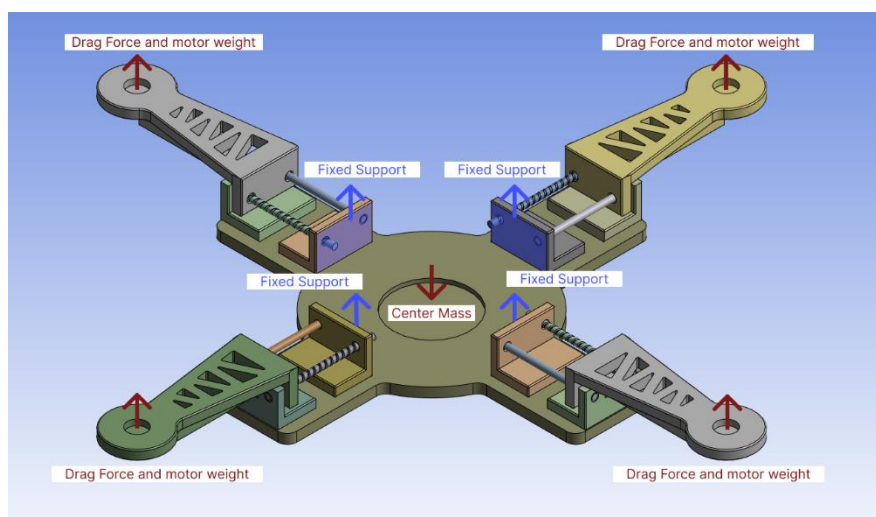
۳- تحلیل قاب ارائه شده برای پهپاد چهارروتوره با ابعاد زمان-متغیر

برای انجام تحلیل‌ها باید ساده‌سازی صورت می‌گرفت تا بتوان نتایج را به دست آورد. مدل اصلی تا حد امکان ساده شده تا برای مش‌بندی‌ها و تحلیل‌ها زمان شبیه‌سازی کوتاه و تنوع آن بیشتر شود. موتورها و پروانه‌ها حذف شده و اثر آن‌ها به صورت نیروی تراست در نظر گرفته می‌شوند. وزن موتورها نیز در نیروی تراست گنجانده شده است. موتورهایی که در قسمت میانی کواد برای حرکت خطی بال‌ها استفاده شده‌اند، حذف گردیده و اثر آن‌ها را به صورت نیروی وزن در مرکز پهپاد در نظر گرفته شده است.

عمده تحلیل‌هایی که صورت گرفته بر روی مدل ساده‌سازی شده مطابق شکل ۳ صورت پذیرفته است. در صورتی که بخشی حذف شود، اثر آن به صورت نیرو در تحلیل‌ها اضافه می‌شود تا تحلیل‌هایی که صورت می‌گیرند تا حد امکان صحیح باشند.



شکل ۲ مدل کامل و ساده نشده پهپاد چهارروتوره



شکل ۳ مدل ساده شده برای تحلیل به همراه محل نگهدارنده‌ها و نیروها

۴- شبیه‌سازی و انتخاب جنس برای پهپاد چهارروتوره با ابعاد زمان-متغیر

معیار فون میسز^۳ یکی از بهترین معیارها برای بررسی کیفیت قطعات است. با استفاده از این معیار می‌توان بیشینه تنش وارد شده را محاسبه کرد. به همین منظور در ابتدا مقدار بیشینه تنش را در قطعات شناسایی کرده و از نتایج به دست آمده، مشاهده می‌شود که بال‌ها، شفت مارپیچ و پنل نگهدارنده متحمل بیشترین تنش‌ها می‌شوند. به همین منظور این قطعات را به‌طور جداگانه تحلیل کرده و مقدار ماکزیمم تنش فون میسز را در هر کدام به دست آورده و تعیین شده به ازای چه مقدار نیرو، جنس مورد استفاده لازم است چه مقدار حداقل تنش تسلیم داشته باشد. در فرایند انتخاب جنس، ضریب اطمینان برای تمامی حالات ۱/۵ در نظر گرفته شده است.

$$SF_y = \frac{S_y}{\sigma_e} \quad (1)$$

معادله (۱) مقدار بیشینه تنش فون میسز σ_e را نرم‌افزار برای قطعه نشان می‌دهد و می‌توان مقدار حد تسلیم ماده S_y را از

³ Von Mises

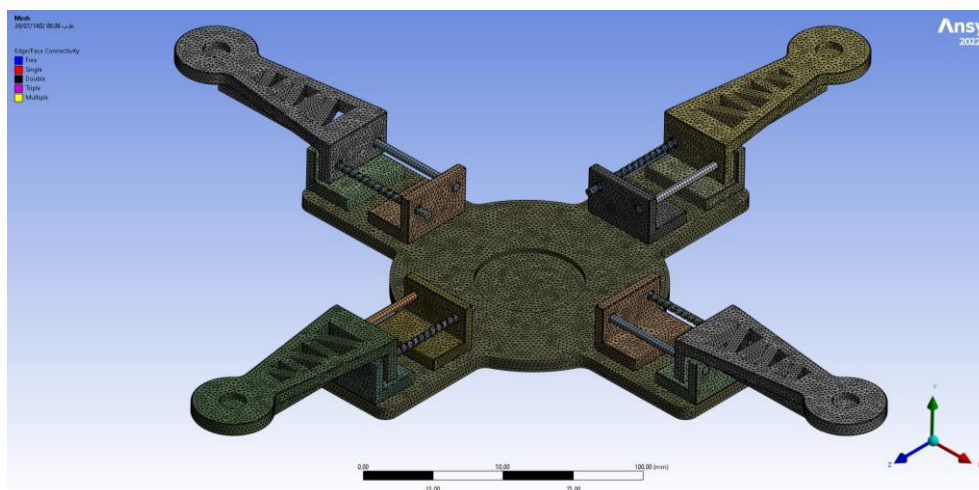
مشخصات مکانیکی ماده به دست آورد. در جدول ۳ مشخصات مکانیکی فولاد را که می‌توان برای شفت استفاده کرد نشان داده شده است. داده‌های زیر با استفاده از کتاب‌خانه مواد نرم‌افزار انسیس^۴ به دست آمده است.

جدول ۳ مشخصات مکانیکی جنس انتخابی در نرم‌افزار انسیس

Structural Steel	
حد تسلیم (MPa)	حد تسلیم نهایی (MPa)
۲۵۰	۴۶۰
PLA +	
حد تسلیم (MPa)	حد تسلیم نهایی (MPa)
۵۹	۷۴

طبق معیار فون میسز در صورتی که تنش فون میسز از حد تسلیم ماده بیشتر باشد، آن قطعه تسلیم می‌شود. بدین ترتیب تنش تسلیم در قطعات با استفاده از نرم‌افزار محاسبه شده و با مقایسه تنش تسلیم جنس با تنش فون میسزی که نرم‌افزار تعیین نموده، حداقل تنش تسلیم مناسب برای انتخاب جنس به دست می‌آید.

به علت در نظر گرفتن اثر گشتاور نیرویی که در مرکز جرم به پهپاد وارد می‌شود نمی‌توان قطعات را به‌طور جداگانه مورد بررسی قرار داد. از این جهت برخی قطعات به‌طور جداگانه مورد بررسی قرار گرفت تا از نتایج به دست آمده اطمینان حاصل شود.



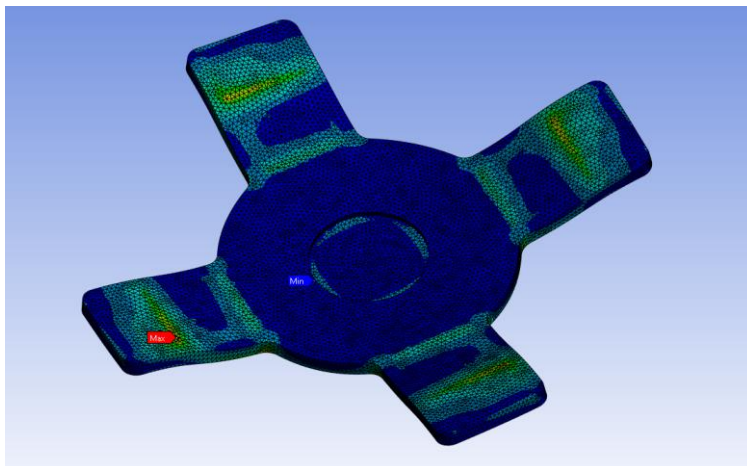
شکل ۴ مش‌بندی در مکانیزم

پهپاد از قطعات متفاوتی تشکیل شده است که به یکدیگر متصل شده‌اند. بعد از اینکه هر قطعه در نرم‌افزار طراحی شد، به صورت کامل با یکدیگر جفت می‌شوند و در نهایت برای تحلیل تنش مدل مونتاژ شده از نرم‌افزار انسیس استفاده می‌شود. در نرم‌افزار انسیس جفت‌شدن بین قطعات به صورت پیوند خورده (bonded) مشخص می‌شود. در صورت استفاده از المان مثلثی (Tri) به صورت پارتیشن‌بندی شده و نیز همگرایی پاسخ تا حد ممکن، اختلاف اندکی بین نتایج تحلیل تنش با نتایج تحلیل حاصل از مش‌بندی اتوماتیک نرم‌افزار وجود دارد؛ اما سرعت تحلیل تنش در مش‌بندی اتوماتیک نرم‌افزار به مراتب بیشتر است. برای مش‌بندی از المان مثلثی استفاده شده است. با وجود اینکه معمولاً المان چهارگوش (Quad) نسبت به المان مثلثی (Tri) نتایج بهتری را به دنبال دارد؛ اما در صورت استفاده از المان چهارگوش، تمامی فیلت‌ها^۵ در پهپاد باید حذف می‌شدند و بیشینه تنش ماکزیمم در محل‌هایی قرار داشتند که فیلت‌ها در بال‌ها حذف شدند در صورتی که فیلت‌ها بیشینه تنش را به طرز چشمگیری کاهش می‌دهند. المان‌های مثلثی از لحاظ هندسی انعطاف‌پذیرتر هستند و می‌توانند به خوبی به شکل‌ها و تغییرات هندسی مختلف تطبیق یابند. این ویژگی می‌تواند در مدل‌سازی ساختارهای پیچیده و غیرمنظم به‌مانند ساختار پهپاد چهارروتوره بسیار مفید باشد. از این جهت از المان‌های مثلثی در هندسه‌هایی از جمله فیلت‌ها که ساختار متفاوت‌تری دارند انعطاف‌پذیرتر عمل می‌کنند. هدف از این نوع مش‌بندی مشخص شدن قطعه‌ای بود که متحمل بیشترین تنش می‌شود در صورتی که هر قطعه به‌طور

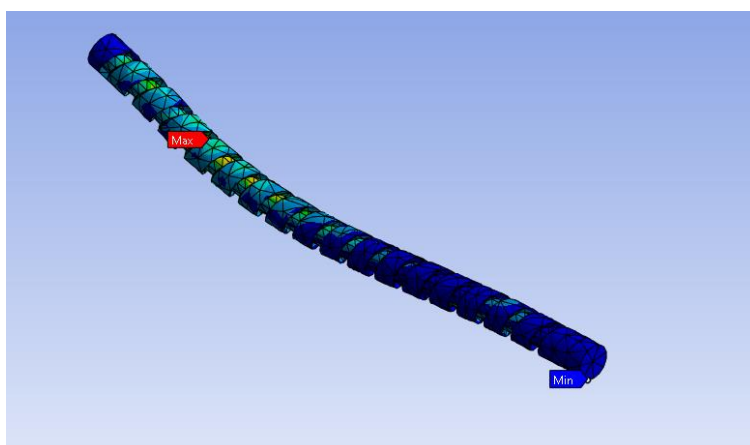
^۴ ANSYS

^۵ Fillets

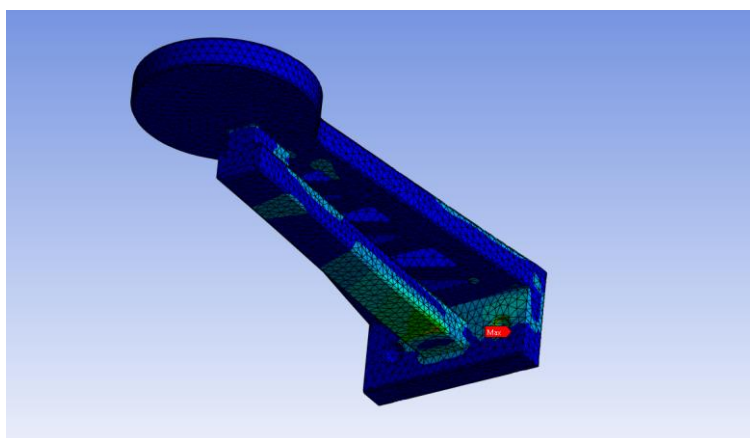
جداگانه بررسی گردد می‌توان از المان‌های چهارگوش استفاده کرد و تمامی فیلت‌ها را در قطعه حذف کرد و به بررسی تحلیل تنش در قطعه پرداخت. تحلیلی که صورت گرفت بر روی مدل کامل پهپاد انجام شد. برای اینکه تأثیر نیروی مرکز جرم در قطعات پهپاد مشخص شود مدل مونتاژ شده پهپاد به صورت کامل مورد بررسی قرار داده شده. فرض بر این است که مکان نگهدارنده پهپاد به نوعی مشابه است که یک فرد پهپاد را از بالا نگه می‌دارد. این نوع تحلیل باعث می‌شود که تأثیرات نیروی مرکز جرم در هنگام استفاده و عملکرد پهپاد بهتر درک شود و تصمیم‌گیری‌های بهینه‌تر در طراحی و بهبود قطعات پهپاد انجام شود.



شکل ۵ بیشینه تنش فون میسز در پنل



شکل ۶ بیشینه تنش فون میسز در شفت



شکل ۷ بیشینه تنش فون میسز در بال

جدول ۴ حداقل تنش تسلیم مورد نیاز برای قطعات پهپاد چهارروتوره

ماکزیم تنش فون میسر با در نظر گرفتن ضریب اطمینان (۱/۵)					
نیروها	تراست	مرکز جرم	پنل	بال	شفت
۵	۱۰	۱/۵	۹	۹۰	
۱۵	۳۰	۳	۳۰	۲۷۰	
۳۰	۵۰	۶	۶۰	۵۴۰	
۴۰	۶۰	۹	۷۵	۷۳۰	
۵۰	۷۰	۱۲	۹۰	۹۰۰	

با در نظر گرفتن داده‌های جدول ۴ که با استفاده از تنش فون میسر برای ۵ حالت مختلف نیرو جمع آوری شده است، مشخص می‌گردد که جنسی که برای هر قطعه استفاده می‌شود باید چه تنش تسلیمی را تحمل کند. در انتخاب جنس برای پنل محدودیتی وجود ندارد و می‌توان از جنسی استفاده شود که بهای کمتری داشته باشد و نیازی نیست که تنش تسلیم بالایی داشته باشد. در مورد بال، در نیروهای تراست پایین می‌توان از جنس‌هایی با تنش تسلیم پایین استفاده کرد اما در صورتی که نیروهای تراست افزایش یافته و حجم موتور و به دنبال آن وزن موتور نیز بیشتر شود، بهتر است از جنس‌های با تنش تسلیم بالاتر استفاده شود.

در مورد شفت داده‌ها متفاوت با سایر قطعات هستند و تنش‌ها در شفت بسیار بالاتر از سایر قطعات است و بحرانی‌ترین قطعه در مکانیزم شفت است. از این جهت برای شفت باید از جنسی استفاده شود که تنش تسلیم بالایی دارد؛ چراکه علاوه بر نیروی تراست نیروی گرانش نیز تأثیر زیادی بر تنش‌های وارد بر شفت دارد. مهم است که جنسی که برای شفت انتخاب می‌شود با دقت انتخاب شده باشد تا شفت و به دنبال آن مکانیزم آسیب نبینند. در جدول ۲ مشاهده می‌شود در صورتی که مقادیر نیروی تراست از ۱۵ نیوتن و نیروی مرکز جرم از ۳۰ نیوتن بیشتر شود، تنش وارده بر شفت معادل ۲۷۰ مگاپاسکال می‌شود که مقدار تنش بسیار بالایی است. مقادیر تنش به دست آمده برای پهپاد چهارروتوره در حالت آزمایشی بوده در صورتی که پهپاد چهارروتوره با اندازه‌های بزرگ‌تر و توانایی جابجایی بار بیشتر مورد نیاز باشد، می‌توان ابعاد پهپاد چهارروتوره و به دنبال آن شفت را بزرگ‌تر طراحی کرد که به میزان قابل توجهی از حداکثر تنش کاسته می‌شود.

۵- بررسی نتایج و انتخاب مواد برای ساخت پهپاد چهارروتوره با ابعاد زمان-متغیر

در این مقاله به منظور طراحی و ساخت یک ربات پرنده با ابعاد متغیر در زمان، مسئله انتخاب جنس مناسب برای ساخت ربات پرنده مورد توجه قرار می‌گیرد. با توجه به این موضوع که ربات در هنگام پرواز امکان تغییر ابعاد می‌یابد، این تغییرات در ساختار ربات موجب می‌گردد که حرکت ربات در حالتی که از نظر دینامیکی و استاتیکی در نقاط بحرانی قرار دارد و بیشینه ظرفیت موتورها در حال استفاده هستند و ربات در حالت بیشینه حمل مقدار بار باشد، به واسطه ساختار خود و جنس آن آسیب‌پذیر باشد. از این رو برای حل این مشکل نسبت به تعریف پارامترهای تأثیرگذار در عملکرد و همچنین تعیین مقاومت آن‌ها اقدام شده است.

بعد از انجام بررسی‌های مربوط، می‌توان مقدار حداقل تنش مورد نیاز برای ماده انتخابی را تعیین کرده و از بین مواد موجود یک انتخاب مناسب صورت گیرد. در بازار، تنوع زیادی از مواد برای ساخت قطعات مختلف در دسترس است و این انتخاب وابسته به نیازهای خاص پروژه می‌تواند انجام شود. فرایند انتخاب مواد مناسب برای ساخت قطعات باید بر اساس نیازها و شرایط مختلفی که پهپاد با آن‌ها مواجه می‌شود انجام گیرد. از جمله معیارهایی که در انتخاب جنس برای ساخت یک قطعه باید در نظر گرفت می‌توان به ویژگی‌های مکانیکی، مقاومت در برابر خوردگی، دمای کار، وزن، هزینه و دسترسی به مواد، پایداری شیمیایی و... اشاره کرد. برخی از معیارهایی که مورد نظر نبوده و تأثیری در عملکرد پهپاد نداشته‌اند کنار گذاشته شدند. پهپادها از این جهت که عملیات خود را در هوای آزاد انجام می‌دهند، می‌توان از معیارهای دمای کار، مقاومت در برابر خوردگی و پایداری شیمیایی صرف نظر کرد. البته در صورتی که از پهپاد برای عملیاتی مانند اطفای حریق استفاده شود در نظر گرفتن معیار دمای کار امری ضروری است. از سوی دیگر معیارهایی که در عملکرد پهپاد تأثیر مستقیم دارند؛ مانند ویژگی‌های مکانیکی، وزن، هزینه و

دسترسی به مواد در نظر گرفته شدند و برای هرکدام درصد تأثیرگذاری قرار داده شده است. ویژگی‌های مکانیکی مواد خواص بسیار زیادی از جمله ازدیاد طول تا پارگی، حد تسلیم، مقاومت خمشی و مدول خمشی را شامل می‌شود. در نرم‌افزار به علت اینکه تسلیم نشدن قطعه ضرورت دارد از ویژگی‌های مکانیکی، حد تسلیم انتخاب شده است. معیارهایی مانند وزن و دسترسی به مواد از جمله مهم‌ترین معیارها در انتخاب مواد مناسب برای ساخت پهپادها است. در انتخاب مواد مورد استفاده در صنایع هوایی، معیارهای مختلفی ذکر شد و از میان موارد ذکر شده معیارهایی که اثری مستقیم در عملکرد پهپاد دارند مشخص شدند. اما می‌توان گفت که معیار اصلی و بسیار حیاتی در صنعت هوایی عمدتاً به استحکام و وزن مواد وابستگی دارد. برای مثال، استفاده از مواد فولادی برای شفت‌هایی که در تنش‌های بالایی را متحمل می‌شوند انتخاب بهتری است. از این جهت که این مواد مقاومت بیشتری در برابر تنش‌ها دارند. همان‌طور که در جداول ۳ و ۴ مشخص شده است. برای ساخت قطعات پهپاد چهاررو توره، از فرآیندهای چاپ سه‌بعدی با فیلامنت^۶ می‌توان استفاده کرد. انتخاب مناسب ماده و فرآیند تولید بستگی به نیازهای ویژه پروژه و شرایط کاربردی دارد.

جدول ۵ نمونه مواد قابل استفاده برای شفت

قیمت برای هر کیلوگرم (\$) (gr/cc)	چگالی (gr/cc)	حد تسلیم (MPa)	مواد مناسب برای شفت
۱/۵-۳/۵	۸	۲۱۵	Steel AISI 304
۲-۴	۲/۸۱	۵۰۳	Aluminum 7075-t6
۲-۵	۸	۲۹۰	Stainless Steel AISI 316

قیمت‌ها در کشور ایران و در تاریخ ۱۴۰۲/۰۸/۱۳

جدول ۶ نمونه مواد قابل استفاده برای پنل و بازو

قیمت برای هر کیلوگرم (\$) (gr/cc)	چگالی (gr/cc)	حد تسلیم (MPa)	مواد مناسب برای شفت و پنل
۲۳	۱/۲۷	۵۲	PETG filament
۲۴	۱/۲۳	۶۰	PLA+ filament
۲۴	۱/۰۶	۴۰	ABS+ filament
۵۳	۱/۲۴	۱۴۰	Nylon carbon fiber filament(ePA-CF)
۹۰	۱/۲۴	۱۰۸	ePA12-CF

قیمت‌ها در کشور ایران و در تاریخ ۱۴۰۲/۰۸/۱۳

در جدول ۵، سه نمونه از مواد انتخابی برای شفت ارائه شده است. البته که مواد بسیار دیگری برای شفت وجود دارند که نمی‌توان همه آن‌ها را بررسی کرد اما علت این نوع بررسی این است که این سه نوع ماده غالباً برای استفاده در تولید شفت استفاده می‌شوند و دسترسی و استفاده از آن‌ها به راحتی امکان‌پذیر است. همچنین سایر موادی که در شفت‌ها استفاده می‌شوند به نمونه‌های جدول ۵ شباهت دارند.

در جدول ۶ فیلامنت‌های قابل استفاده در بال‌ها ارائه شده است. از کامپوزیت‌های ورقه‌ای نیز می‌توان برای ساخت استفاده کرد اما مراحل ساخت در ابعاد کوچک‌تر سخت‌تر خواهد بود. مشخصه‌های مکانیکی و همچنین قیمت فیلامنت‌ها طیف وسیعی را شامل می‌شوند. به این صورت که هر تولیدکننده فیلامنت‌های با خواص مکانیکی مشخص خود را تولید می‌کند. برای انتخاب مواد مناسب یکی از بهترین تولیدکننده‌های فیلامنت انتخاب شده و جدول بر اساس خواصی که در کاتالوگ مربوط به جنس قرار داده شده بود کامل شده‌اند. سایر تولیدکننده‌هایی که در بازار وجود داشتند فیلامنت‌هایی با مشخصه‌های مکانیکی و قیمت تقریباً مشابهی تولید می‌کردند.

معیارها و انتخاب‌های تصمیم‌گیری بسیاری را می‌توان برای طراحی و ساخت قطعات مکانیکی، اتخاذ کرد. استفاده از جداول تصمیم‌گیری بهترین روش انتخاب هستند. علاوه بر جنس‌هایی که در جداول بالا ذکر شد می‌توان از جنس‌های دیگر نیز استفاده کرد و با استفاده از روشی که در ادامه مشخص شده به جداول تصمیم‌گیری اضافه کرد. در جدول ۷ بر اساس میزان رضایت‌مندی

⁶ Filament

از ۱۰۰ درصد برای شفت، پنل و بازو بر اساس انتخاب‌هایی که نشان داده شده امتیازدهی داده شده است.

جدول ۷ جدول امتیاز معیارهای پهپاد چهارروتوره

پنل و بازو (فیلامنت)				شفت (فولاد)			رضایتمندی
امتیاز از ۱۰۰	قیمت برای هر کیلوگرم (\$))	چگالی (gr/cc)	حد تسلیم (MPa)	قیمت برای هر کیلوگرم (\$))	چگالی (gr/cc)	حد تسلیم (MPa)	
۱۰۰	۱	۱۵	<۹۰	۱	۲	۴۰۰<	رضایتمندی کامل
۸۰	۱/۱	۲۵	۷۰	۲	۴	۳۰۰	رضایتمندی خوب
۶۰	۱/۲	۳۵	۵۰	۳	۶	۲۰۰	رضایتمندی متوسط
۴۰	۱/۳	۴۵	۳۰	۴	۸	۱۰۰	رضایتمندی محدود
۲۰	۱/۴<	<۵۵	۱۰	۵<	۱۰<	۲۰	رضایتمندی کم

به‌طور کلی برای پنل و بازوها ضریب وزنی ۰/۶ با توجه به اهمیت آن قرار داده شده است. و به ترتیب ضریب‌های وزنی ۰/۲، ۰/۳ و ۰/۱ را برای حد تسلیم، چگالی و قیمت قرار می‌دهیم. علت اینکه بیشترین ضریب وزنی را برای وزن قاب قرار داده‌ایم، این است که بیشتر پهپادها را این دسته از جنس تشکیل می‌دهند و معیار وزن از مهم‌ترین معیارها برای صنعت هوایی است.

جدول ۸ جدول تصمیم‌گیری برای انتخاب مواد مناسب برای پنل و بازوها

امتیاز کلی از ۶۰	قیمت برای هر کیلوگرم (\$))	چگالی (gr/cc)	حد تسلیم (MPa)	مواد مناسب برای پنل و بازوها
۰/۶	۰/۱	۰/۳	۰/۲	ضریب وزنی
۳۴/۶	۸۴	۴۶	۶۲	PETG filament
	۲۳	۱/۲۷	۵۲	
۳۸/۴	۸۲	۵۴	۷۰	PLA+ filament
	۲۴	۱/۲۳	۶۰	
۴۴/۶	۸۲	۸۸	۵۰	ABS+ filament
	۲۴	۱/۰۶	۴۰	
۳۸/۳	۲۴	۵۳	۱۰۰	ePA-CF
	۵۳	۱/۲۴	۱۴۰	
۳۷/۹	۲۰	۵۳	۱۰۰	ePA12-CF
	۹۰	۱/۲۴	۱۰۸	

در مورد شفت و لوازم فولادی به‌کاررفته در پهپاد ضریب وزنی ۰/۴ اختصاص داده شده و بیشترین ضریب وزنی به حد تسلیم اختصاص داده شده است. در مورد قیمت و چگالی به علت اینکه نسبت به ابعاد و وزن کلی مقادیر کمتری را دارند ضریب وزنی ۰/۱ از کل ۰/۴ اختصاص داده شده است.

جدول ۹ جدول تصمیم‌گیری برای انتخاب مواد مناسب شفت (فولاد)

امتیاز کلی از ۴۰	قیمت برای هر کیلوگرم (\$))	چگالی (gr/cc)	حد تسلیم (MPa)	مواد مناسب برای شفت
۰/۴	۰/۱	۰/۱	۰/۲	ضریب وزنی
۲۳/۶	۷۰	۴۰	۶۳	Steel AISI 304
	۲/۵	۸	۲۱۵	
۳۵/۱۹	۶۰	۹۱/۹	۱۰۰	Aluminum 7075-t6
	۳	۲/۸۱	۵۰۳	
۲۴/۶	۵۰	۴۰	۷۸	Stainless Steel AISI 316
	۳/۵	۸	۲۹۰	

جدول ۱۰ جدول تصمیم‌گیری کلی برای پهپاد چهارروتوره

مواد شفت (لوازم فولادی)	امتیاز	مواد فیلامنت	امتیاز	امتیاز کلی
-------------------------	--------	--------------	--------	------------

۵۸/۲	۳۴/۶	PETG filament		
۶۲	۳۸/۴	PLA+ filament		
۶۸/۲	۴۴/۶	ABS+ filament	۲۳/۶	Steel AISI 304
۶۱/۹	۳۸/۳	ePA-CF		
۶۱/۵	۳۷/۹	ePA12-CF		
۶۹/۷۹	۳۴/۶	PETG filament		
۷۳/۵۹	۳۸/۴	PLA+ filament		
۷۹/۷۹	۴۴/۶	ABS+ filament	۳۵/۱۹	Aluminum 7075-t6
۷۳/۴۹	۳۸/۳	ePA-CF		
۷۳/۰۹	۳۷/۹	ePA12-CF		
۵۹/۲	۳۴/۶	PETG filament		
۶۳	۳۸/۴	PLA+ filament		
۶۹/۲	۴۴/۶	ABS+ filament	۲۴/۶	Stainless Steel AISI 316
۶۲/۹	۳۸/۳	ePA-CF		
۶۲/۵	۳۷/۹	ePA12-CF		

در نهایت در یک جدول کلی امتیازها جمع‌آوری شده تا مواد مناسب بر اساس جدول تصمیم‌گیری مشخص گردد. طبق داده‌هایی که جمع‌آوری شده، مشخص گردید که برای شفت و لوازم فولادی مناسب است که از Aluminum 7075-t6 و برای پیل و بازوها از فیلامنت ABS+ filament استفاده گردد.

در جمع‌آوری ماده‌های بالا سعی شده از ماده‌های جامع و در دسترس استفاده شود. به طور واضح امکان استفاده از انواع ماده‌ها در پهباد چهارروتوره وجود دارد؛ اما نمی‌توان همه آن‌ها را در این مقاله جمع‌آوری کرد و به مقایسه پرداخت. برای مثال می‌توان برای ساخت پیل‌ها و بازوها از رزین استفاده کرد؛ اما در این مقاله به علت گران‌تر بودن کلی رزین نسبت به فیلامنت‌ها از مقایسه آن‌ها صرف‌نظر شده است. همین‌طور برای فولادها سعی شده از سه نوع فولاد اصلی و در دسترس در بازار برای مقایسه استفاده شود. در نهایت می‌توان از این نوع روش انتخاب مواد در پهباد چهارروتوره که قطعات فولادی که استحکام بسیار بیشتری نسبت به قطعات پلاستیکی دارند ابتدا به طور جداگانه بررسی کرد و در نهایت در یک جدول کلی به بهینه‌ترین موادی که می‌توان بر اساس معیارهای تصمیم‌گیری مناسب باشد را انتخاب کرد.

Authorship Contribution Statement

Afshin Abyaz



Biography: Afshin Abyaz received his Bachelor's degree in Mechanical Engineering from Shahid Chamran University of Ahvaz. His field of research is mechanical analysis and applied design.

Contribution Statement: Conceptualization, Methodology, Software, Validation, Investigation

Dr. Siavash Fathollahi
Dehkordi



Biography: Accomplished academic and researcher with over 10 years of experience in mechanical engineering and robotics. Served in various academic administration roles at Iran University of Science and Technology including Deputy Manager of Robotic Research Lab and Manager of Dormitories Management. Currently an Assistant Professor at Shahid Chamran University of Ahvaz.

Key expertise areas:

- Multi-body system dynamics and flexible dynamic systems
- Robotics including manipulators, mobile robots, and underwater robots
- Mechatronics system design, planning, and programming
- Solid mechanics and system dynamics modeling
- Experimental dynamic systems and fluid-structure interactions
- Intelligent systems and control

Authored 13 journal papers and 9 conference papers. Supervised over 20 graduate and undergraduate student projects. Received multiple research grants and awards including selection for the National Elite Foundation's young faculty development program. Fluent in English with strong skills in data analysis, programming, design, and simulation software.

Contribution Statement: Conceptualization, Methodology, Investigation, Resources, Writing - Review & Editing, Visualization, Supervision, Project administration.

Foad hamzeh



Biography: Foad Hamzeh is currently an MSc student at Shahid Chamran University of Ahvaz and his main research interests are Robotics, Mechatronics and Control Systems.

Contribution Statement: Investigation, Visualization, Validation, Formal Analysis, Writing-Original Draft Preparation.

Dr. Alireza Naeimi Fard



Biography: Alireza Naeimi Fard was born in 1967 in Dezful, Iran. He received his bachelor's degree in mechanical engineering, specializing in heat and fluids, from Abadan Institute of Technology in 1992. He also obtained his master's degree in 1995 from K.N. Toosi University of Technology. He began researching robot modeling and control during his master's program, and his thesis focused on designing and building a carpet weaving robot knoter. In 1997, he joined the Faculty of Mechanical Engineering at Shahid Chamran University of Ahvaz as a lecturer. Continuing his work at the university, he has served as the Head of the Mechanical Engineering Department at Shahid Chamran University since 2022. In 1999, as part of a research project, he succeeded in developing a 4 degree-of-freedom robotic arm. In 2013, under the supervision of Dr. Ali Ghafari at K.N. Toosi University of Technology, he completed his PhD focused on modeling blood stem cells and providing optimal treatment protocols for leukemia. His current research interests include modeling and control of robotic arms, as well as simulating the control system for oil well drilling.

Contribution Statement: Conceptualization, Methodology, Investigation, Supervision.

۶- مراجع

- [1] Ghobadi N, Dehkordi SF. Dynamic modeling and sliding mode control of a wheeled mobile robot assuming lateral and longitudinal slip of wheels. 2019 7th International Conference on Robotics and Mechatronics (ICRoM), Tehran, Iran, 2019;150-155.
- [2] Tanha SDN, Dehkordi SF, Korayem AH. Control a mobile robot in Social environments by considering human as a moving obstacle. 2018 6th RSI International Conference on Robotics and Mechatronics (IcRoM), Tehran, Iran, 2018;256-260.
- [3] Dehkordi SF. Dynamic analysis of flexible-link manipulator in underwater applications using Gibbs-Appell formulations. Noor Branch, Iran University of Science and Technology, Noor, Iran. 2021.
- [4] Ginesi M, Meli D, Roberti A, Sansonetto N, Fiorini P. Dynamic movement primitives: Volumetric obstacle avoidance using dynamic potential functions. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*. 2021;101:1-20.
- [5] Yotov Y, Zlatov N, Hristov G, Zahariev P, Le CH, Gao X, et al. Innovative development of a flying robot with a flexible manipulator for aerial manipulations. 2023.
- [6] Watkins S, Burry J, Mohamed A, Marino M, Prudden S, Fisher A, et al. Ten questions concerning the use of drones in urban environments. *Building and Environment*. 2020;167:106458.
- [7] Asti IS, Agustinah T, Santoso A. Obstacle Avoidance with Energy Efficiency and Distance Deviation Using KNN Algorithm for Quadcopter. 2020 International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications (ISITIA): IEEE, 2020; 285-91.
- [8] Afifi A, Corsini G, Sable Q, Aboudorra Y, Sidobre D, Franchi A. Physical Human-Aerial Robot Interaction and Collaboration: Exploratory Results and Lessons Learned. 2023 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS): IEEE, 2023;956-62.
- [9] Zhang J, Campbell JF, Sweeney II DC, Hupman AC. Energy consumption models for delivery drones: A comparison and assessment. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2021;90:102668.
- [10] Tamke F, Buscher U. The vehicle routing problem with drones and drone speed selection. *Computers & Operations Research*. 2023;152:106112.
- [11] Pérez Gordillo AM, Villegas Santos JS, Lopez Mejia OD, Suárez Collazos LJ, Escobar JA. Numerical and experimental estimation of the efficiency of a quadcopter rotor operating at hover. *Energies*. 2019;12:261.
- [12] Ali Valipour MHK, Mina Rakhshi, Amin Yaghootian, Hamid M Sedighi. Metamaterials and their applications: an overview. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*. 2022;236.
- [13] Derpich I, Rey C. Drone Optimization in Factory: Exploring the Minimal Level Vehicle Routing Problem for Efficient Material Distribution. *Drones*. 2023;7:435.
- [14] Seyed Mohammad Mehdi Jaafari KHS. A comparison on optimal torque vectoring strategies in overall performance enhancement of a passenger car. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-body Dynamics*. 2016;230.
- [15] Pugliese LDP, Guerriero F, Macrina G. Using drones for parcels delivery process. *Procedia Manufacturing*. 2020;42:488-97.
- [16] Alawsi AAA, Jasim BH, Raafat SM. Design and implementation of a global smart box for quadcopter delivery system. 2020 3rd International Conference on Intelligent Sustainable Systems (ICISS): IEEE; 2020. p. 1408-15.

- [17] Arafat MY, Alam MM, Moh S. Vision-based navigation techniques for unmanned aerial vehicles: Review and challenges. *Drones*. 2023;7:89.
- [18] Tullu A, Endale B, Wondosen A, Hwang H-Y. Machine learning approach to real-time 3D path planning for autonomous navigation of unmanned aerial vehicle. *Applied Sciences*. 2021;11:4706.
- [19] Pedram Masajedi AG, Mohammad Shishesaz. Optimal control designing for a discrete model of helicopter in hover. 2012 International Conference on Control Engineering and Communication Technology. 2012.
- [20] Xiong H, Hu J, Diao X. Optimize energy efficiency of quadrotors via arm rotation. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*. 2019;141:091002.
- [21] Karamipour E, Dehkordi SF, Korayem MH. Reconfigurable Mobile Robot with Adjustable Width and Length: Conceptual Design, Motion Equations and Simulation. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*. 2020;99:797-814.
- [22] Karamipour E, Dehkordi SF. Omnidirectional mobile robot design with height and width adaptation. 2019 7th International Conference on Robotics and Mechatronics (ICRoM)2019;144-9.