

طراحی، ساخت و مدلسازی دینامیکی ربات دو ملخه هم محور مقاوم به برخورد برای محیط های بسته

نیما ساعی^{۱*}، بهنام داداش زاده^۲، اکبر اللهوردی زاده^۳

۱- کارشناس ارشد مهندسی مکترونیک، دانشگاه تبریز، nima.saei2@gmail.com

۲- استادیار، مهندسی مکترونیک، دانشگاه تبریز، b.dadashzadeh@tabrizu.ac.ir

۳- استادیار، مهندسی مکترونیک، دانشگاه تبریز، allahverdizadeh@tabrizu.ac.ir

*نویسنده مخاطب

چکیده

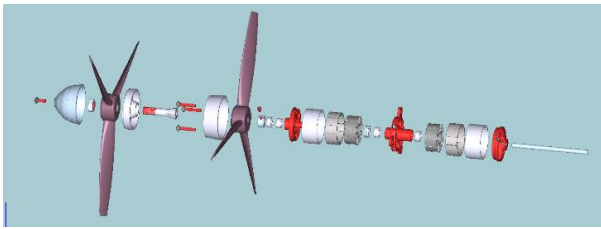
ربات های پرنده درون محیط های بسته دارای موانع با توانایی مکان یابی کاربرد های بسیار دارند که از آن جمله می توان به کمک به افراد در مکان های صعب العبور، فیلم برداری و همچنین اکتشافات غارها را نام برد. ولی برخورد با موانع در چنین محیط هایی برای ربات ها به عنوان یک چالش مطرح می باشد که می تواند به از کار افتادن ربات منجر شود به خصوص زمانی که این برخورد به صورت ضربه بوده و اثر خود را به صورت گشتاور نمایان کند. در این مقاله سازه ای طراحی می شود که در مقابل ضربه مقاوم بوده و آسیبی به آن نمی رسد که به مکانیزم گیمبال شهرت دارد. در اکثر سازه های موجود ربات های پرنده در اثر برخورد تعادل خود را از دست داده و قادر به حفظ تعادل خود نمی باشد همچنین در ربات های موجود نیاز به استفاده از سنسور برای تشخیص موانع و همچنین واحد پردازنده برای پردازش حجم عظیم اطلاعات دریافتی می باشد. در مدل ارائه شده دیگر نیازی به استفاده از تعداد زیادی سنسور برای تشخیص موانع نبوده و تنها مقوله مطرح استفاده از پایدار کننده حرکت و همچنین سیستم پیشران می باشد که به کاهش وزن کمک کرده و زمان پرواز ربات را افزایش می دهد. در سیستم طراحی شده فقط نیاز به یک کنترلر برای نگه داشتن ربات به صورت عمودی می باشد که به وسیله دو بالک پایینی انجام می شود. در برخورد با موانع این سیستم بایستی ربات را به حالت عمود باز گرداند.

کلید واژه ها : گیمبال، پهپاد، موتور هم محور، مقاوم به برخورد

۱. مقدمه

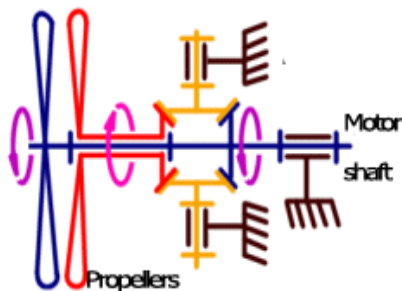
در سالهای اخیر، هواپیماهای بدون سرنشین خودمختار مجهز به دستگاه های کنترل خودکار که با عنوان وسایل نقلیه بدون سرنشین هوایی UAV و وسایل نقلیه کوچک هوا MAVs ساخته میشوند، توسعه زیادی یافته اند. از زمان اولین پرواز یک هواپیمای تحت کنترل خودکار در سال ۱۹۱۶، کاربردهای نظامی و غیرنظامی هواپیماهای بدون سرنشین UAVs به میزان قابل توجهی افزایش یافته است. این وسایل پرنده به عنوان "هواپیمای رباتیک" مشهور شده اند و محدوده استفاده از آنها بسیار گسترده شده است. این وسیله پرنده از نیروهای آیرودینامیکی برای پرواز در مسیر دلخواه استفاده می کند. پهپاد ها یا بوسیله کنترل از راه دور یا با برنامه های پیش پروازی ریخته شده از قبل یا با سامانه های خودکار دینامیک هدایت میشوند. پهپاد ها در حال حاضر در برنامه های نظامی که شامل جاسوسی، حملات انتحاری، حمله موشکی و بمباران می شود فعالیت میکنند. این هواپیماها

همچنین در برنامه های غیرنظامی مانند عملیات امداد و نجات، خاموش کردن آتش سوزی ها در جایی که پرواز برای خلبان خطر دارد، کنترل پلیس در نا آرامی ها و اغتشاشات، مرز بانی و شناسایی بیشتر حوادث غیر مترقبه طبیعی استفاده می شوند. بیشترین سرمایه گذاری در جهان در زمینه ساخت و تجهیز پهپاد ها را وزارت دفاع ایالات متحده آمریکا انجام داده است. روبات های پرنده این مزیت منحصر به فرد را دارند که می توانند برای اپراتور های انسانی یک نقطه دید مرتفع از نواحی ای ایجاد کنند که در حالت عادی قابل دسترسی نیستند. آنها به طور ویژه برای کنکاش در نواحی دور از دسترس نظیر ساختمان های آسیب دیده، نیروگاه های انرژی اتمی دارای تشعشع و معادن زیر زمینی ای که به خاطر درهم ریختگی روی سطح زمین روبات های زمینی قابلیت بررسی شان را ندارند، مفید هستند. با این حال، وجود مقدار زیادی از موانع به همراه دشواری موقعیت سنجی و دید کم، اجتناب از موانع را دشوار کرده و تصادم را غیر قابل اجتناب می سازد. بنابراین سیستم های پروازی اگر بخواهند در چنین محیط هایی سالم بمانند، نیازمند ساختارهای محافظتی هستند. اغلب سازه های فعلی [۱] از مکانیسم های محافظتی صلب متصل به یک فریم داخلی با درجه صلب برابر استفاده می کنند تا از طریق مواد متراکم انرژی تصادم را جذب کند [۲] یا اینکه طراحی این سیستم آسان است، محافظ صلب تمام انرژی ضربه یک تصادم را به فریم سکو منتقل می کند. از آنجا که فاصله جذب کمینه است، نیروی روی فریم به سرعت به بیشترین مقادیر می رسد. در صورت وجود فیبر کربن (معمول ترین متریال مورد استفاده برای فریم سکوها های فعلی)، صدمه ضربه مستقیماً به نیروی ضربه روی سازه مرتبط است [۴]. یک تصادم ساده می تواند ایجاد ترک [۵]، لایه لایه شدگی و کاهش مقاومت متریال شده [۶] و آن را در برابر سایر تصادمات آسیب پذیرتر کند. می توان نیروی ضربه روی فریم داخلی را با افزایش فاصله ای که در آن انرژی تصادم جذب می شود، کاهش داد. برخی سیستم های پروازی نظیر AR.Drone [۷] از حلقه های فوم دور روترشان استفاده می کنند. این راه حل برای تصادمات کم انرژی جواب می دهد اما برای ضربه های پر انرژی به دلیل صلب بودن اندکش بسیار سنگین است. یک ساختار محافظتی معمول دیگر قفس کروی است [۸] که اغلب از میله های فیبر کربنی ساخته شده است. چنین سازه هایی در مقایسه با فوم برای یک وزن معین انرژی بیشتری جذب می کند اما دو ایراد دارند. اول اینکه نوعاً از میله های صافی که کروی خم شده اند ساخته شده اند که انرژی مهمی در ساختار ذخیره می کنند که نمی تواند برای جذب انرژی تصادم مورد استفاده قرار بگیرد. دوم اینکه نصب آنها دور فریم داخلی بدون استفاده از نقاط اتصال صلب (که در یک



شکل 1- مدل انفجاری موتور

مزیت های استفاده از سیستم کنترا سیستم کنترا اثرات ژيروسکوپی حاصل از حرکت یک ملخ را به طور کامل خنثی می کند [۱۱]. که این اثرات موجب چرخش yaw جسم پرنده به دور خود می شود. که پیچش ایجاد شده به وسیله ملخ دوم خنثی می شود. در سیستم های معمولی به دلیل چرخش ملخ موجب ایجاد گشتاور در بدنه می شود که مثلا برای سیستمی با N.M5 گشتاور که به وسیله ی چرخش ملخ ایجاد می شود و به بدنه اعمال می شود باید یک گشتاور در جهت عکس این گشتاور ایجاد کنیم تا بتوانیم سیستم را در حالت پایا نگه داریم. در موتوری که با استفاده از سیستم کنترا این گشتاور به صورت کلی خنثی می شود.



شکل 2- نمای شماتیک contra گشتاور معکوس که نیروی گشتاور تولید شده توسط ملخ ها خنثی می شود

سیستم های کنترا در حدود ۱۵٪ الی ۲۰٪ نسبت به دیگر سیستم ها بازده بالاتری دارند [۱۲]. این به دلیل استفاده از دو ملخ می باشد که در آن هوا در دو مرحله شتاب دهی میشود تا نیروی تراست به دست آید به جای استفاده از یک ملخ و این بدان معنا است که هر یک از ملخ ها برای یک تراست معین نصف کار مورد نیاز را انجام می دهند که این همراه با اتلاف ویسکوز کمتر و همچنین اتلاف کمتر جریان هوای شعاعی در طول ملخ می باشد. در سیستم های معمولی ایجاد نیروی برا به وسیله ملخ، هوای عبور کرده از ملخ میل به پیچش دارد در صورتی که در سیستم کنترا این میل به وسیله چرخش خلاف جهت ملخ دوم خنثی می شود که این دو مزیت عمده دارد. نیروی چرخشی ایجاد شده در هوا به طور موثری به نیروی تراست تبدیل می شود که بازده ملخ را افزایش می دهد. هوای عبور کرده از ملخ دوم دیگر داری نیروی پیچ نبوده و به صورت مستقیم حرکت می کند که دیگر موجب ایجاد گشتاور در بدنه نمی شود. با توجه به انواع موتور های موجود در بازار از چند تولید کننده متفاوت بهترین موتور که در آن نسبت تراست به وزن موتور بیشترین مقدار ممکن یعنی ۱۶٫۷ را مد نظر قرار دادیم. در انتخاب موتور بایستی به این نکته توجه شود که میزان تراست ایجاد شده به وسیله موتور بتواند وزن کلی سازه به همراه ادوات موجود بر

تصادم از بین می روند) دشوار است. همچنین در سالهای اخیر کنترل این رباتها توجه محققان زیادی را به خود جلب کرده است [۱۶-۱۴].

۲. طراحی

مواردی که در طراحی در اولویت قرار دارند عبارتند از:

- انتخاب موتور مناسب
- انتخاب جنس قفس محافظ
- طراحی سیستم گیمبال
- در نظر گرفتن کمینه ی وزن در طی کل مراحل طراحی- طراحی و پیاده سازی کنترلر

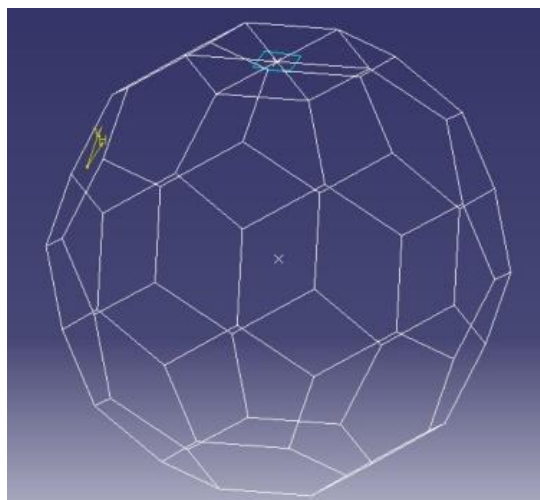
۲-۱- انتخاب موتور

برای رسیدن به یک سیستم ایده ال که نسبت نیرو بالا بری نسبت به وزن مناسبی داشته باشد موتور های معمول بدون جاروبک مورد بررسی قرار گرفت ولی با توجه به اینکه اینگونه موتورها در طی چرخش ملخ یک نیروی عکس العمل ایجاد می کنند که موجب گردش موتور به دور خود می شود مناسب تشخیص داده نشد. باید این موضوع را در نظر بگیریم که در کواد کوپترهای معمولی از چهار موتور استفاده شده. در طراحی ربات مقاوم به برخورد به جای استفاده از چهار موتور به طبع آن افزایش هزینه های ربات و همچنین افزایش وزن ربات از یک موتور که به دو سیم پیچ مجهز می باشد استفاده شده است که به این ساختار که در آن محور چرخش این سیم پیچ ها در یک راستا می باشد و فقط جهت چرخش آنها در خلاف یکدیگر می باشد مکانیزم کنترا گفته می شود [۹] در این موتورها تکنولوژی استفاده شده از نوع بدون جاروبک (بدون جاروبک) بوده که این امکان رو به موتور می دهد تا با سرعت های بالا دوران کرده و میزان انرژی اتلاف شده را به حداقل برساند به دلیل عدم وجود جاروبک و استفاده کمتر از قطعات مکانیکی این گونه موتورها نسبت به بیشتر موتور های جاروبک دار نسل قدیمی تر پر بازده تر می باشد [۱۰]. در ساختار استفاده شده در ساخت این موتور ها قسمت استاتور در وسط قرار گرفته و سیم پیچ بر روی آنان می باشد که به وسیله ی واحد کنترل الکترونیکی سرعت، کنترل می شود. قسمت روتور بر روی قسمت بیرونی قرار دارد و آهن رباهای ثابت بر روی آن قرار گرفته اند شفت دورانی نیز به قسمت روتور متصل می باشد. نکته حائز اهمیت در مورد موتور های بدون جاروبک کنترا هم محور بودن شفت دورانی دو موتور می باشد یکی از شفت ها از داخل شفت دیگر عبور کرده و این موجب سبک، وزن شدن و همچنین کاهش حجم موتور و قطعات استفاده شده در آن می شود. ذکر این نکته حائز اهمیت است که در وسایل پرنده هر قدر میزان وزن وسیله کمتر باشد موجب کاهش مصرف انرژی برای غلبه بر وزن وسیله پرنده میشود. موتور های بدون جاروبک گشتاور بیشینه را در در لحظه سکون فراهم می آورند این گشتاور به صورت خطی با افزایش سرعت کاهش می یابد. برخی محدودیت های موتورهای جاروبک دار را می توان در موتورهای بدون جاروبک جبران کرد. این موتورها کارایی بالاتری دارند و همچنین حساسیت کمتری نسبت به سایش مکانیکی کموتاتور یا جاروبک دارند. نحوه کنترل موتورهای بدون جاروبک به وسیله کنترل فاز سیم پیچ ها می باشد که فاز سیم پیچ ها را دائما سویچ می کند تا موتور را به گردش در آورد.



شکل 3- موتور مورد استفاده (شرکت سازنده هابی گینگ)

آنها عبور کند در ۲ بعد استوانه و در حالت سه بعدی کره می باشد [۱۳] که توانایی غلتیدن را دارا می باشد در طراحی این سازه باید توانایی استحکام در برخورد و همچنین قابلیت عبور هوا از بین آن را مد نظر قرار دارد بدین منظور از ساختار سیمی یک کره استفاده شد که از ۱۲ عدد پنج ضلعی و ۲۰ عدد ۶ ضلعی تشکیل شده است. این شکل حاصل از قطع گنچ های یک ۲۰ وجهی منتظم می باشد که در کنار یکدیگر قرار گرفته اند. در اثر قطع گنچ ها یک ۵ ضلعی به وجود می آید. هر یک از ۵ ضلعی ها از یکدیگر مستقل می باشند. ولی ۶ ضلعی ها در اطراف آن به صورت یک حلقه قرار می گیرند. ۱۰ عدد از شش ضلعی ها به صورت زیگ زاگ در اطراف کره می باشند. با کمی دقت در ساختار متوجه می شویم که تمامی اجزا به صورت قرینه می باشند که این موجب استقرار مرکز جرم درست در وسط مرکز جرم ربات می شود و به ما در کنترل ربات کمک شایانی می کند. میزان زاویه داخلی بین اضلاع این کره برابر ۱۳۸,۱۹ می باشد و طول ضلع اضلاع شش ضلعی α برابر $R = 2.47\alpha$ می باشد که در آن R برابر شعاع کره می باشد. اگر بخواهیم حجم سازه را بدست آوریم برابر کره ای به شعاع $R=2.36\alpha$ خواهد بود این سازه در شیمی با ساختار ماده (فلورن) مشابه است.



شکل 4- (شکل وایر فریم طراحی شده در CATIA) ساختار مورد استفاده برای بدنه بیرونی ربات

روی آن غلبه کند. وزن قطعات ربات در جدول زیر آمده است. با توجه به جداول متوجه می شویم که وزن کلی ربات برابر ۸۳۷ گرم می باشد که برای غلبه بر آن حداقل باید از موتوری استفاده شود که نیروی تراست آن بتواند بر این وزن غلبه کند.

جدول ۱- وزن اجزای ربات

نام قطعه	وزن
ساختار محافظ بیرونی	۱۵۰g
گیمبال	۲×۹۲g
موتور	۷۹g
ادوات الکترونیکی	۱۰۰g
باتری	۱۰۰g
سررو موتورها E max 08 Ma II	۲×۱۲g
پایه موتور و برد اصلی	۱۵۰g
نگه دارنده باتری	۵۰g
مجموع	۸۳۷g

جدول ۲- مشخصات موتور های موجود

مدل	وزن موتور (g)	تراست ایجاد شده (g)	توان مصرفی (W)	واحد کنترل الکترونیکی	T/W
S۲۳CR	۶۴	۵۸۰	-	A۱۰ESC-	۹,۰۶
M۲۸CR	۷۹	۱۳۲۰	۳۷۵	A۲۵ESC-	۱۶,۷
	۲۸۰۵	۵۶۰	۱۲۰		۹,۴۹
	۲۸۱۶	۲۰۱۶	۴۴۰		۱۲
	۳۵۱۶	۳۵۲۸	۸۰۰		۱۲,۶
	۵۰۲۵	۷۷۰۱	۲۰۵۰		۱۱

۲-۲- طراحی قفس محافظ

در طراحی قفس محافظ میبایست چندین فاکتور مهم مد نظر قرار گیرد

۱. وزن سبک سازه
۲. ساختار هندسی سازه برای عبور راحت از موانع
۳. توانایی عبور هوا از بین سازه ها
۴. کمترین میزان درگ تولید شده در اثر برخورد باد عبوری از سازه

در طراحی ساختار هندسی سازه مهمترین شکل هندسی که در فضا توانایی حرکت داشته باشد و در برخورد با موانع نیز بتواند به راحتی از روی

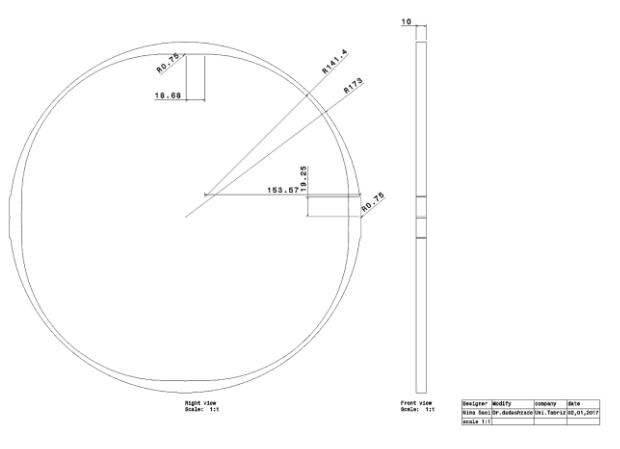
جدول ۴- خواص مکانیکی برای لوله کربنی

Tensile strength	۱,۶۵ GPa
Tensile modulus	۱۳۴ GPa
Ultimate shear strain	۴۱,۳ MPa
Ultimate tensile strain	۱,۴ %
Flexural strength	۱,۳۷ GPa
Flexural modulus	۱۲۷ GPa
Fiber volume	۶۰%
Thermal expansion coefficient	۰,۲- pp m/°C
Density	۱,۵ g/cm ³
Diameter tolerance	±0.003"
Martin metered ¹	Disphenol epoxy vinyl ester

در جدول بالا خواص مکانیکی برای لوله مورد نظر از سوی شرکت سازنده ارائه شده است که در آن حجم فیبر کربن موجود برابر ۶۰٪، حجمی بوده و از ماده epoxy به عنوان رزین استفاده شده است جهت قرار گیری فیبرهای کربنی در یک جهت بوده و نسبت به محور لوله دارای زاویه ۰ درجه می باشند.

۳-۲- طراحی سیستم گیمبال

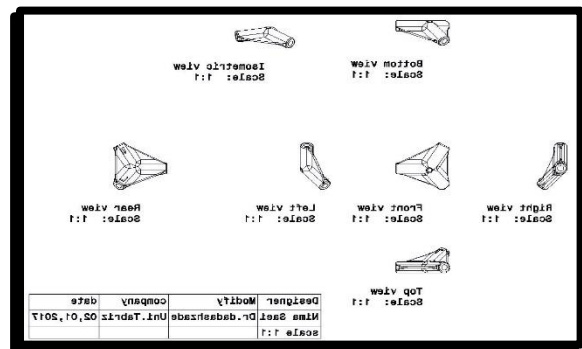
برای طراحی سیستم گیمبال از نرم افزار CATIA استفاده شد که به کمک آن توانستیم وزن کمینه برای سیستم را بدست آوریم در طراحی اولیه سیستم دو حلقه در نظر گرفته شده بود که می بایستی با استفاده از کامپوزیت ساخته می شد ولی به دلیل عدم در دسترس بودن کامپوزیت صفحه ای با ضخامت بالا مجبور به استفاده از شیشه پلکسی شدیم که با دانستیه کمتر نسبت به کامپوزیت دارای استحکام به مراتب کمتر بود که مجبور به افزایش ضخامت سازه می شدیم که این نیز موجب افزایش وزن می شد و موجب ایجاد اتلاف انرژی بیشتر برای ربات پرنده بود برای رفع این مشکل شکل سازه به طور خاص بهینه سازی شد تا بتوانیم بیشترین استحکام را با کمترین مواد مصرفی یعنی ضخامت داشته باشیم. شکل مربوط به قطعه مورد نظر نیز در زیر آماده است.



شکل ۶- اسکچ سیستم گیمبال برای قسمت دوران سازه داخلی

طراحی اتصالات بین اضلاع

طراحی اتصالات بین اضلاع به کمک نرم افزار کتیا صورت پذیرفت در طی فرآیند طراحی سعی شد تا به بهترین شکل ممکن که دارای کمترین وزن بوده و بیشترین مقاومت را داشته باشد برسیم. برای تسریع کار نمونه سازی به کمک فرآیند پرینت سه بعدی صورت پذیرفت و با توجه به در دسترس بودن دو ماده ABS و PLA بعد از ساخته شدن نمونه اولیه نمونه ها مورد آزمایش استحکام قرار گرفت و وزن آنها نیز با مقدار محاسبه شده به وسیله نرم افزار که برابر ۱۳ g تخمین زده شده بود برابر بود از آزمون استحکام مشخص شد که نمونه ABS دارای مقاومت و انعطاف پذیر کمتر می باشد به همین دلیل نمونه ای از مواد PLA ساخته شده در طی فرآیند تست متوجه ضعف نمونه در اثر بارهای عرضی شدیم فرآیند طراحی دوباره صورت گرفت و نمونه سازی شد.



شکل ۵- نمونه دوم بعد از انجام اصلاحات برای افزایش استحکام

اتصال بین سازه ای

برای اتصال بین سازه ای در ابتدا استفاده از چوب مد نظر بود که در انجام تست های استحکام متوجه شدیم که توانایی لازم برای مقاومت در مقابل برخورد را ندارد و در برخورد با کوچکترین ضربه ای می شکنند به همین دلیل به جای استفاده از چوب که دلیل انتخاب آن سبک وزن بودن بود از مواد کامپوزیتی استفاده کردیم به دلیل اهمیت کم بودن وزن سازه در طی کل فرآیند طراحی از میله های کامپوزیتی تو خالی استفاده شد که هم دارای استحکام کافی بودند و همچنین به دلیل تو خالی بودن دارای وزن کمی بودند که وزن های بدست آمده برای ضخامت های مختلف لوله ها به طول یک متر در جدول زیر آمده است.

جدول ۳- ضخامت و وزن لوله ها

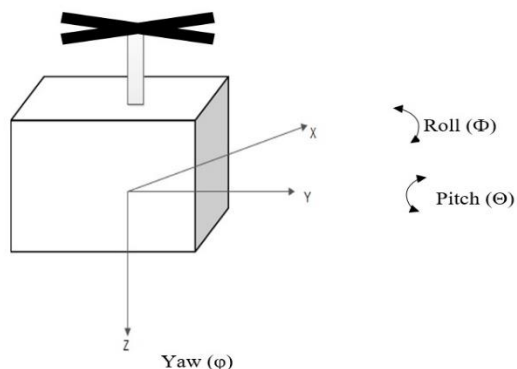
۲mm	۳mm	۴mm	۵mm
۳,۶g	۵,۶g	۸,۵g	۱۹,۶g

۳. ساخت ربات

برای ساخت ربات مورد نظر ابتدا تمامی قطعات به کمک نرم افزار کتیا طراحی شد. استند اصلی موتور و سرو ها از چوب سه لایه به دلیل مقاومت در مقابل تنش وارد شده در سه جهت انتخاب شده است. مدل استند بعد از طراحی در نرم افزار به کمک دستگاه برش لیزری برش خورده تا کمترین می زان نامتقارنی در توزیع جرم را داشته باشد. همانطور که در شکل مشخص است ابتدا شروع به مونتاژ شفت هایی نمودیم که بالک های پایینی بر روی آنها سوار می باشند. مونتاژ شفت نگه دارنده پره های جفت در یک راستا و استفاده از ۳ عدد بلبرینگ (شفت استفاده شده از جنس کامپوزیت) انجام می شود. در قدم بعدی پایه نگه دارنده بر روی سیستم گیمبال نصب می شود. در نصب سیستم گیمبال باید این نکته را مد نظر قرار داد که تمامی محور ها هم مرکز باشند و از یک نقطه عبور کنند تا دچار قفل گیمبال نشویم. همانطور که در شکل نشان داده شده است شفت ها کاملا با زاویه ۹۰ درجه نسبت به هم نصب می کنیم و در داخل پایه نگه دارنده نیز بلبرینگ تعبیه شده است تا هم جلوی اعوجاج سیستم و همچنین خارج از محل تلاقی بودن شفت ها گرفته شود. در نهایت مکان نگه دارنده باطری در زیر مجموعه تعبیه شد تا کمترین میزان درگ در مجموعه ایجاد شود. بعد از مونتاژ تمامی مجموعه نوبت به نصب موتور رسید که به وسیله ۴ پیچ سایز ۳ بر روی استند طراحی شده محکم شد. به دلیل دور بالای موتور و جلوگیری از شل شدن پیچ ها از دو مهره برای سفت کردن استفاده شد و مهره دوم نیز به وسیله ماده ضد گیر ایمن سازی شد. خود پایه نگهدارنده نیز به وسیله ۸ عدد پرچ بر روی تخته سه لایه محکم شد. برای به حداقل رساندن فضای موجود در بین پره ها نصب موتور و سروو های کنترلی برای کنترل زاویه باله های پایینی از بلبرینگ با قطر داخلی ۲ mm مینیمم قطر موجود در بازار استفاده شد. در شکل ۷ نمای ربات تکمیل شده نمایش داده شده است.

۴. مدل دینامیکی سیستم

هدف از مدلسازی دینامیکی بدست آوردن معادلات دیفرانسیل است که بتواند خروجی های سیستم (مکان و جهت) را به ورودی ها (نیرو و گشتاور) مرتبط کند.



شکل ۸- نحوه حرکت سیستم و حرکت های پیچشی مفروض

رابطه بین سرعت زاویه ای $\Omega = \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix}$ و نرخ زاویه اوپلر را می توان با ماتریس زیر به هم مرتبط کرد .

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\varphi} \end{bmatrix} = R_{JB} \cdot \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} R_{JB} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{s\phi s\theta}{s\theta} & \frac{s\phi s\theta}{s\theta} \\ 0 & s\phi & -s\theta \\ 0 & \frac{s\phi}{s\theta} & \frac{s\phi}{s\theta} \end{bmatrix} \quad (1)$$

قدم بعدی به دست آوردن معادلات دینامیکی سیستم بدست آوردن نیروهای وارد بر سیستم نسبت به دستگاه مختصات بدنی B می باشد .

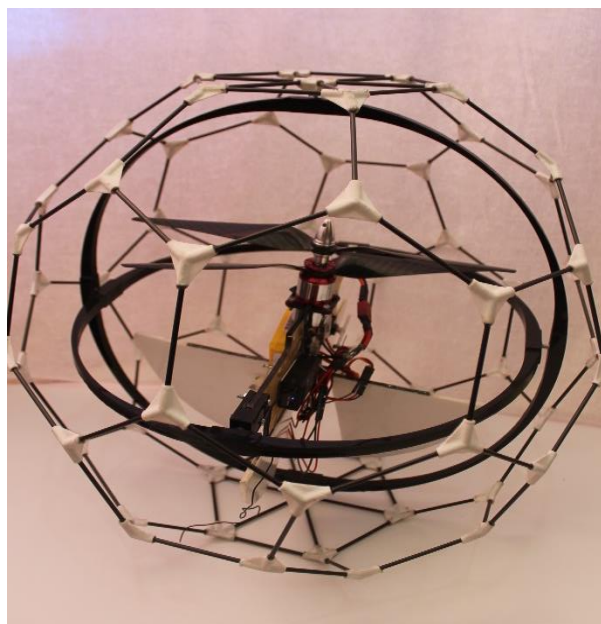
$$F_B = \frac{d}{dt}(m \cdot V_B) = m(V_B + \Omega_B \cdot V_B) \quad (2)$$

$$M_B = \frac{d}{dt}\{I_B \cdot \Omega_B\} = I_B \Omega_B + \Omega_B \times (I_B \Omega_B) \quad (3)$$

که در آن $V_B = \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix}$ و I_B همان اینرسی بدنه و F نیروی خارجی وارده و M نیز گشتاور وارد شده می باشد .
رابطه بین سرعت خطی و زاویه ای به صورت زیر می باشد .

$$\begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{w} \end{bmatrix} = \frac{1}{M} F - \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{p} \\ \dot{q} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = I^{-1}(M - \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} \times I \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix}) \quad (4)$$

در حالت شناوری در هوا نیروهای وارده بر سیستم شامل دو نیروی بالا برنده از طرف ملخ های ۱ و ۲ که با نام T_{up} و T_{dw} نام گذاری شده اند نیروی مقاومت دینامیکی که از طرف بدنه در مقابل نیروی تراست ایجاد می شود و W_{fus} و نیروی وزن G در راستای عمود محور Z می باشد. گشتاور وارد شده به سیستم شامل دو گشتاور حاصل از ملخ ها Q_{up} و Q_{dw} می باشد.



شکل ۷- ربات تکمیل شده

- [4] E. Beyer and M. Costello, "Performance of a Hopping Rotochute", *International Journal of Micro Air Vehicles*, 1, 121-137, 2009.
- [5] A. Faisal and T. Matheson, "Coordinated Righting Behaviour in Locusts", *Journal of Experimental Biology*, 204, 637-648, 2001.
- [6] L. Frantsevich and S. Gorb, "Structure and Mechanics of the Tarsal Chain in the Hornet, *Vespa Crabro* (Hymenoptera: Vespidae): Implications on the Attachment Mechanism", *Arthropod structure & development*, 33, 77-89, 2004.
- [7] A. M. Hoover, E. Steltz and R. S. Fearing, "Roach: An Autonomous 2.4 G Crawling Hexapod Robot," in *Intelligent Robots and Systems, 2008 IROS 2008 IEEE/RSJ International Conference on*, 2008, pp. 26-33.
- [8] N. O. Pérez-Arancibia, K. Y. Ma, K. C. Galloway, J. D. Greenberg and R. J. Wood, "First Controlled Vertical Flight of a Biologically Inspired Microrobot", *Bioinspiration & Biomimetics*, 6, 036009, 2011.
- [9] D. Schafroth, C. Bermes, S. Bouabdallah and R. Siegwart, "Modeling and System Identification of the Mufly Micro Helicopter," in *Selected papers from the 2nd International Symposium on UAVs, Reno, Nevada, USA June 8-10, 2009*, 2009, pp. 27-47
- [10] E. Beyer and M. Costello, "Performance of a Hopping Rotochute", *International Journal of Micro Air Vehicles*, 1, 121-137, 2009.
- [11] Faisal and T. Matheson, "Coordinated Righting Behaviour in Locusts", *Journal of Experimental Biology*, 204, 637-648, 2001
- [12] L. Frantsevich and S. Gorb, "Structure and Mechanics of the Tarsal Chain in the Hornet, *Vespa Crabro* (Hymenoptera: Vespidae): Implications on the Attachment Mechanism", *Arthropod structure & development*, 33, 77-89, 2004
- [13] G. Hoffmann, H. Huang, S. Waslander and C. Tomlin, "Quadrotor Helicopter Flight Dynamics and Control: Theory and Experiment," in *AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit*, 2007, p. 6461,
- [14] Y. Wei, H. Chen, K. Li, H. Deng, D. Li, "Research on the Control Algorithm of Coaxial Rotor Aircraft based on Sliding Mode and PID", *Electronics*, 8, 1428, 2019.
- [15] J. Xu, Y. Hao, J. Wang, L. Li, "The Control Algorithm and Experimentation of Coaxial Rotor Aircraft Trajectory Tracking Based on Backstepping Sliding Mode," *Aerospace*, 8, 337, 2021.
- [16] P.-J. Bristeau, F. Callou, D. Vissiere and N. Petit, "The Navigation and Control Technology inside the Ar. Drone Micro Uav", *IFAC Proceedings Volumes*, 44, 1477-1484, 2011.

در حالت شناوری عمود بالک های پایین به صورت عمود در نظر گرفته شده است و در حالت زاویه دار شامل نیروی F_{flap} می باشد.

$$T = T_{up} + Q_{up} = -Q_{dw} \Rightarrow Q_{up} + Q_{dw} = 0 \quad (5)$$

$$F = T + G + W_{fus} + F_{flap1} + F_{flap2} \quad (6)$$

از نیروی درگ بدنه W_{fus} به دلیل کوچک بودن نسبت به سایر نیروها می توان صرف نظر کرد .

۵. نتیجه گیری

در این مقاله یک ربات پرنده انعطاف پذیر در برابر برخورد طراحی شده و عملکرد پذیری آن با استفاده از یک نمونه اولیه مجهز به یک سیستم گیمبال که اثرات برخوردها روی پایداری سازه قابل مشاهده است نشان داده شد. علاوه بر این، این طرح اجازه برای بلند شدن از جهت های دلخواه به واسطه چرخش قاب داخلی با یک نیروی کوچک و تنظیم سطوح کنترل در جهت مناسب را می دهد. دو مشخصه مهم که قابلیت ایجاد ثبات بعد از برخورد را تحت تاثیر قرار می دهند مورد تاکید می باشد: (a) مرکز جرم قاب داخلی بایستی به دقت با محورهای سیستم گیمبال تنظیم گردد، و (b) سختی سیستم گیمبال بایستی به حداکثر برسد در حالیکه قاب محافظ بایستی جهت کاهش اثر انرژی نرم تر شود. انتظار می رود که سایر ویژگی ها نیز نقش مهمی را ایفا نمایند، مثل اصطکاک در مفاصل چرخشی منفعل که باید به حداقل رسانده شود، یا وضعیت قفل گیمبال که بایستی از آن اجتناب گردد. کارهای آینده روی ساختارهایی متمرکز خواهد شد که ربات را برخورد در محیط های خشن با افزایش میزان الاستیسته قاب محافظ خارجی محافظت نماید. در ادامه پژوهش به طراحی و پیاده سازی کنترل کنندهها برای پایداری و کنترل مسیر این ربات پرنده پرداخته خواهد شد.

۶. منابع

- [1] D. M. Schafroth, "Aerodynamics, Modeling and Control of an Autonomous Micro Helicopter," Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, 2010.
- [2] G. Wang, H. Sheng, T. Lu, D. Wang and F. Hu, "Development of an Autonomous Flight Control System for Small Size Unmanned Helicopter," in *Robotics and Biomimetics, 2007 ROBIO 2007 IEEE International Conference on*, 2007, pp. 1804-1809.
- [3] M. Itasse and J.-M. Moschetta, "Equilibrium Transition Study for a Hybrid MAV," *International Journal of Micro Air Vehicles*, vol. 3, no. 4, pp. 229-245, 2011.