

# تدوین نقشه راه برای آزمون پروازی پرنده‌های بدون سرنشین مولتی‌روتور

محسن دهقانی محمدآبادی<sup>۱\*</sup>، محمد امین حسینی<sup>۲</sup>، ایمان امانی<sup>۳</sup>

۱- استادیار، گروه دینامیک پرواز و کنترل، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه هوایی شهید ستاری، تهران، ایران

۲- کارشناسی ارشد هوانوردی، دانشگاه هوایی شهید ستاری، تهران، ایران

۳- دانشجوی دکتری، گروه دینامیک پرواز و کنترل، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

(دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۱۰/۲۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۲۳ تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۸/۲۶)

## چکیده

از مهم‌ترین مراحل توسعه یک هواپیما، آزمون پروازی آن است که می‌تواند برای کاربردهای مختلف برنامه‌ریزی و انجام شود. آزمون پرواز باید مطابق با اهداف مأموریتی یک پهپاد یا هر وسیله پرنده دیگر و با رعایت الزامات و استانداردهای از پیش تهیه شده در این دسته و با حضور چندین متخصص انجام شود. با توجه به ضرورت اعتبارسنجی و پذیرش ساخت و عملکرد یک پهپاد، این مقاله به پیشنهاد و تدوین آزمون پروازی برای یک پرنده‌ی بدون سرنشین چند پره نمونه می‌پردازد. در این پژوهش ابتدا بر اساس استانداردها و الزامات موجود، آزمون‌های پروازی مختلف برشمرده می‌شوند، سپس با استفاده از ادبیات موجود به تدوین و تحلیل کارکرد یک روند آزمون پروازی پرداخته می‌شود. برنامه اجرایی فرآیند آزمون پرواز مولتی‌روتور و فلوچارت روند انجام آزمون‌ها به عنوان دستاورد پژوهش در این مقاله آورده شده است.

واژه‌های کلیدی: آزمون پروازی، مولتی‌روتور، هواپیمای بدون سرنشین، روش‌های آزمون

## Development of a road map for the flight test of multi-rotor drones

Mohsen Dehghani-mohamadabadi, Mohamad-Amin Hosseini, Eman Amani

### Abstract

Flight test is one of the most important stages of an aircraft development that can be used for various applications. The flight test should be carried out in accordance with the mission objectives of a drone or any other flying device and by observing the requirements and standards provided in this category and by the presence of several specialists. Due to the necessity of design and operation of a drone, this paper proposes and developed a flight test for a multi – rotor, which is a type of drone. In this paper, based on the existing standards and requirements, different flight tests will be considered. Then, by using existing literature, the performance analysis of a flight test procedure is presented. The executive program of the multi-rotor flight test process and the flow chart of the test process are given as research achievements in this article.

**Key words:** Flight test, Multi-rotor, UAV, Test methods.

## مقدمه

هوایمی بدون سرنشین به وسایل نقلیه پرنده‌ای گفته می‌شود که هیچ سرنشینی را با خود حمل نمی‌کنند و از نیروهای آیرودینامیکی برآ استفاده کرده و می‌تواند به صورت خودکار یا با کنترل از راه دور، پرواز کنند. این هواپیماها می‌توانند یک بار مصرف و یا قابل بازیافت بوده و محموله‌های انفجاری یا غیر انفجاری را با خود حمل نمایند. هر جا که امکان به‌کارگیری نیروی انسانی به دلایل مختلف وجود نداشته باشد و یا مقرون به صرفه نباشد، وسایل هدایت‌پذیر زمینی، دریایی و هوایی می‌توانند جایگزین شوند و با پیشرفت علم و فناوری هر روز عملیات پیچیده‌تری را انجام دهند. استفاده از هواپیماهای بدون سرنشین امروزه در بسیاری از کشورها رواج بسیاری پیدا کرده و دارای مزایا و معایب گوناگون می‌باشد. استفاده از هواپیماهای بدون سرنشین امروزه در بسیاری از کشورها رواج فراوانی یافته و به یکی از اجزای کلیدی صنایع مختلف تبدیل شده است. این وسایل به دلیل قابلیت‌های منحصر به فرد خود، نظیر توانایی دسترسی به مناطق غیرقابل دسترس، کاهش هزینه‌های عملیاتی و افزایش ایمنی در مأموریت‌های خطرناک، نقش مهمی در حوزه‌هایی مانند کشاورزی، نظارت بر زیرساخت‌ها، عکاسی هوایی و امنیت عمومی ایفا می‌کنند. به علاوه، پیشرفت‌های تکنولوژیکی در زمینه حسگرها، ریزپردازنده‌ها و سیستم‌های ناوبری، به‌طور چشمگیری کارایی و دقت پرواز این دستگاه‌ها را بهبود بخشیده و امکان استفاده از آن‌ها در مأموریت‌های پیچیده‌تر را فراهم کرده است. از جمله این مأموریت‌ها می‌توان به بازرسی از خطوط لوله، نقشه‌برداری هوایی و حتی عملیات جستجو و نجات اشاره کرد. در نتیجه، نیاز به تدوین استانداردهای جامع برای آزمون‌های پروازی و ارزیابی عملکرد این پرنده‌ها، به منظور اطمینان از ایمنی و کارایی آن‌ها، بیش از پیش احساس می‌شود. این مقاله با بررسی دقیق اجزای مختلف مولتی‌روتورها و فرآیندهای آزمون پروازی، به دنبال پاسخ به این نیازهای اساسی و ارائه یک روند استاندارد و قابل اجرا برای ارزیابی این وسایل هوایی است. در شکل ۱ دسته‌بندی عمومی پرنده‌ها بر اساس مرجع [۱] نمایش داده شده است.

هوایمی بدون سرنشین (پهپادها) برای مدتی طولانی وجود داشته و برای اهداف نظامی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. استفاده از آن‌ها در برنامه‌های ایمنی عمومی و غیرنظامی به

یک دهه قبل بازمی‌گردد و در طیف گسترده‌ای از بخش‌ها از جمله ساخت و ساز، معدن، کشاورزی، نقشه‌برداری، امنیت عمومی، زیرساخت‌ها، رسانه‌ها و سرگرمی و... به کار گرفته شده‌اند.

تحقیقات نشان داد که ارزش بازار جهانی پهپاد در سال ۲۰۱۸، ۲۵،۵۹ میلیارد دلار بوده و پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۰۲۹ ارزش این بازار به بیش از ۴۳ میلیارد دلار برسد.

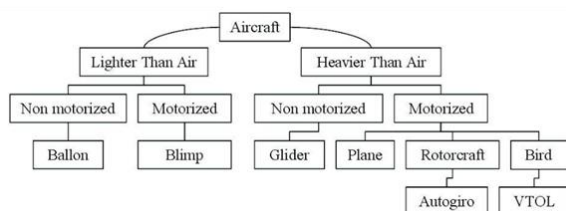
در سال ۲۰۱۸، شرکت آلمانی Drone Industry Insights، ۲۰ اپراتور برتر در صنعت هواپیماهای بدون سرنشین را رتبه‌بندی کرد که در شکل ۲ می‌توان مشاهده کرد [۲-۴].

واتس و همکارانش انواع مختلفی از طبقه‌بندی‌ها را در زمینه پهپادها توصیف کردند. آن‌ها هر یک از طبقه‌بندی‌ها را دارای مزایایی متناسب با خواسته‌های کاربران پهپادها می‌دانند. آن‌ها پرنده‌های علمی و نظامی را با ویژگی‌هایی چون اندازه، پایداری پرواز و سایر قابلیت‌ها، طبقه‌بندی کردند.

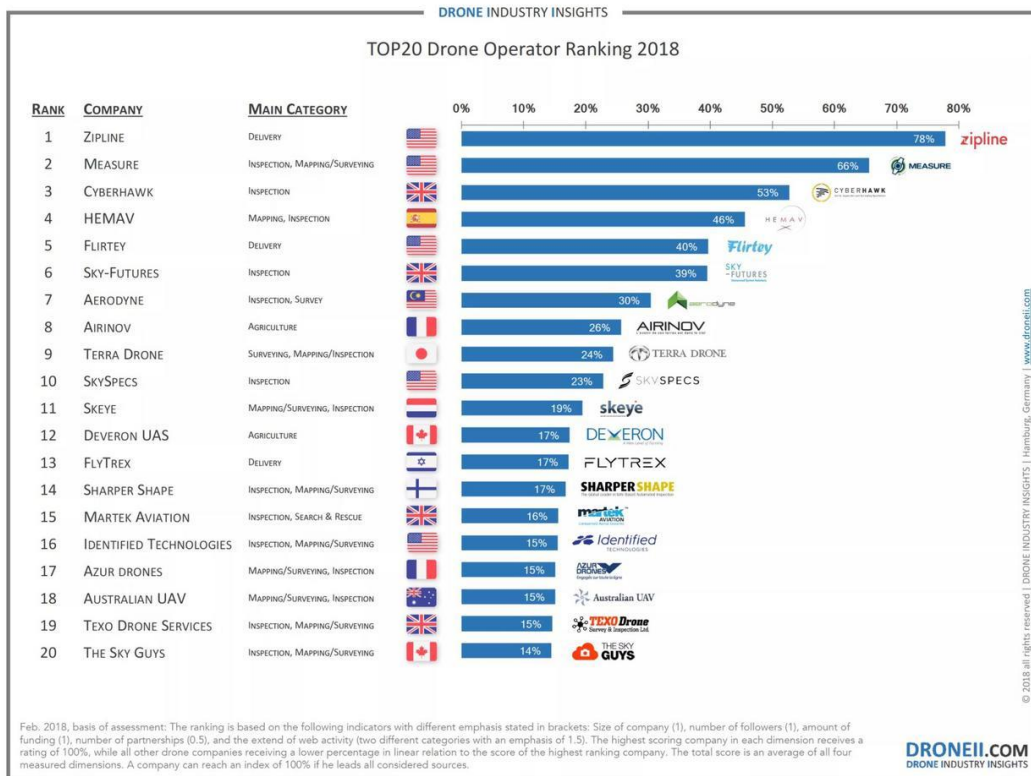
امروزه انواع مختلفی از پهپادها با پیشرفت کوچک‌سازی مولفه‌های الکترونیکی مانند حسگرها، میکروپروسورها، باتری و سیستم‌های ناوبری تکامل یافته‌اند.

در این پژوهش در کنار بررسی انواع پهپادها و دسته‌بندی آن‌ها از لحاظ ساختار و وزن و کاربرد و ... به تفصیل در مورد مولتی‌روتورها و روش‌های آزمون پروازی برای این پرنده‌های بدون سرنشین پرداخته شده است. لازم به ذکر است که اولین گواهینامه صلاحیت پرواز UAS، در راستای داکيومنت FAA 8130.34 و در سال ۲۰۰۸ صادر شد [۶].

از مهم‌ترین مراحل توسعه یک پرنده، آزمون پروازی آن است که می‌تواند برای کاربردهای مختلف برنامه‌ریزی و انجام شود. آزمون پرواز باید مطابق با اهداف مأموریتی یک پهپاد و با رعایت الزامات و استانداردهای از پیش تهیه شده در این حوزه و با حضور چندین متخصص انجام شود.



شکل ۱ - دسته بندی عمومی پرنده ها [۱]



شکل ۲- رتبه بندی ۲۰ اپراتور برتر هواپیماهای بدون سرنشین در سال ۲۰۱۸ [۵]

باتوجه به ضرورت اعتبارسنجی و پذیرش ساخت و عملکرد یک پهپاد، این پژوهش به پیشنهاد و تدوین آزمون پروازی برای یک پرنده‌ی بدون سرنشین چندپره نمونه می‌پردازد. در این پژوهش ابتدا بر اساس استانداردها و الزامات موجود، آزمون‌های پروازی مختلف برشمرده می‌شوند، سپس با استفاده از ادبیات موجود به تدوین و تحلیل کارکرد یک‌روند آزمون پروازی پرداخته می‌شود.

به طور کلی انجام آزمون‌های پروازی پرنده‌های بدون سرنشین از جهت نداشتن خلبان و کاهش قابلیت اطمینان سیستم، دارای جنبه‌های منحصر به فرد و چالش برانگیزی است و استخراج روش‌های کلی برای آزمون‌های پروازی به دلیل وجود پیکره‌بندی‌های متفاوت و الزامات متفاوت آزمون، امکان‌پذیر نیست و با مرور تحقیقات گذشته نتایج زیر به دست آمد:

۱- بیشتر آزمون‌های پروازی انجام شده در تحقیقات گذشته باهدف صحت‌سنجی یک خصیصه یا زیرسیستم و اجزاء بوده است.

۲- آزمون‌های پروازی می‌تواند از جنبه‌های مختلف انجام شود.

۳- آزمون‌های پروازی از منظر کاهش ریسک ضروری است.  
۴- تاکنون یک آزمون پروازی جامع و استاندارد برای کلاس‌های وزنی مختلف طراحی نشده است.

با مرور مرجع [۷] که اشاره به ده سال تجربه‌ی آزمون‌های پروازی در مرکز هوافضای آلمان (DLR) می‌کند، مشخص می‌شود که در طول این سالها، هواپیماهای بدون سرنشین پیچیده‌تر شده و تیم‌های سازنده‌ی آن‌ها رشد کردند و ماموریت‌هایشان افزایش یافته، به طوری که استانداردسازی، برنامه‌ریزی و رویه‌های آزمون پرواز ضروری شده است.

در مرجع [۷]، یک روش برای برنامه‌ریزی و تحقق آزمون پرواز ابتکاری ارائه گردیده که موفقیت‌آمیز بوده است. این فرآیند شامل ارزیابی ریسک و کاهش ریسک در طول آزمون پرواز می‌باشد.

آزمون‌های پروازی، مجموعه‌ای از ارزیابی‌های دقیق و سیستماتیک هستند که بر روی یک پرنده‌ی بدون سرنشین، به‌ویژه مولتی‌روتورها، انجام می‌شود تا عملکرد، ایمنی و قابلیت اطمینان آن در شرایط مختلف پروازی تأیید شود. این آزمون‌ها از مراحل اولیه طراحی تا تولید انبوه و حتی پس از بهره‌برداری،

در این مقاله، نیز پس از بررسی مراجع به تدوین و پیشنهاد یک‌روند آزمون استاندارد قابل‌اجرا برای بررسی عملکرد مولتی‌روتورهای ساخته شده در ایران پرداخته می‌شود و مراحل و الزامات انجام آزمون شرح داده می‌شود. این روند استاندارد می‌تواند به کاهش ریسک و هزینه، در آزمون‌های پروازی به ما کمک کند.

در این مقاله آزمون‌های پروازی به صورت زیر دسته‌بندی شده است:

نقش حیاتی در چرخه عمر یک مولتی‌روتور ایفا می‌کنند. اهمیت آزمون‌های پروازی در این است که اطمینان حاصل می‌شود این پرند‌ها قادر به انجام ماموریت‌های محوله با بالاترین سطح ایمنی و کارایی هستند. تاریخچه آزمون‌های پروازی به دوران اولیه هوانوردی بازمی‌گردد و با تکامل هواپیماها، روش‌های آزمون نیز پیچیده‌تر و دقیق‌تر شده‌اند. امروزه با پیشرفت فناوری و افزایش پیچیدگی مولتی‌روتورها، آزمون‌های پروازی به یک حوزه تخصصی تبدیل شده است که نیازمند دانش فنی گسترده و تجهیزات پیشرفته می‌باشد.

### جدول ۱ - دسته‌بندی آزمون‌های پروازی

توضیحات	زیر مجموعه آزمون‌ها	دسته‌بندی اصلی آزمون‌ها
بررسی عملکرد اجزای مختلف سیستم مانند موتور، ملخ، سنسورها و ... در شرایط ثابت	عملکردی	آزمون‌های زمینی
بررسی استحکام و مقاومت سازه در برابر نیروهای وارد شده	سازه‌ای	
بررسی عملکرد سیستم در شرایط محیطی مختلف مانند دما، رطوبت و ...	محیطی	
بررسی مقاومت سیستم در برابر تداخلات الکترومغناطیسی	سازگاری الکترومغناطیسی (EMC)	آزمون‌های هوایی
بررسی عملکرد پروازی مانند پایداری، مانورپذیری، سرعت و ...	عملکرد پروازی	
بررسی عملکرد سیستم‌های خودکار مانند ناوبری، هدایت و کنترل خودکار	سیستم‌های خودکار	
بررسی عملکرد سیستم‌های ارتباطی و انتقال داده	ارتباطات	
بررسی عملکرد سیستم‌های ایمنی مانند چتر نجات، سیستم قطع اضطراری	ایمنی	
بررسی عملکرد سیستم در شرایط جوی مختلف مانند باد، باران و ...	محیطی	

### مولتی‌روتورها

مولتی‌روتور یا مولتی‌کوپتر دسته‌ای از انواع پهپادهاست که دارای بیش از دو موتور برای تولید نیروی برآ است. مزیت این نوع پرند‌های چند ملخی، مکانیک ساده‌تر ملخ مورد نیاز برای کنترل پرواز است. برخلاف هلیکوپترهای تک ملخه و دو ملخه که از ملخ‌های پیچ متغیر پیچیده به همراه سواش پلیت استفاده می‌کنند که گام آنها متفاوت است، مولتی‌روتورها اغلب از تیغه‌های گام ثابت استفاده می‌کنند. کنترل حرکت وسیله با تغییر سرعت نسبی هر ملخ برای تغییر نیروی پیشرانش و گشتاور تولید شده توسط هر یک به دست می‌آید [۸].

### انواع مولتی‌روتورها

مولتی‌روتورها در انواع و سایزهای مختلفی طراحی و ساخته می‌شوند که شامل موارد زیر هستند و در ادامه به معرفی مختصر انواع آن‌ها پرداخته شده است:

- تری‌کوپتر (دارای ۳ موتور)
- کوادکوپتر (دارای ۴ موتور)
- هگزاکوپتر (دارای ۶ موتور)
- اوکتاکوپتر (دارای ۸ موتور)
- مولتی‌روتور (بیش از ۸ موتور)

تری‌کوپتر: موتورها با زاویه‌ای (عموماً ۱۲۰ درجه) نسبت به هم قرار می‌گیرند. بیشتر برای مسابقات استفاده می‌شوند. قابلیت اطمینان مطلوبی نسبت به تعداد موتورهایش دارد که با

اکتاکوپتر: این مدل‌ها دارای جثه و ابعاد بزرگی برای حمل دوربین‌های خاص و تخصصی هستند. در اکتاکوپتر معمولاً از چهار نوع طرح برای نصب موتورها استفاده می‌شود. با توجه به نیاز کاربر می‌تواند اسمبل متفاوتی داشته باشد. به لحاظ قابلیت اطمینان این پرنده از سطح بسیار بالایی برخوردار است. اما اینرسی بالای آن، کنترل آن را بسیار سخت می‌کند. در برخی مدل‌ها حتی در صورت از دست دادن سه موتور توانایی ادامه مأموریت را دارد. یک نمونه از آن در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۵ - یک نمونه پنتاکوپتر [۹]



شکل ۶ - یک نمونه اکتاکوپتر [۹]

### اجزای مولتی‌روتور

مولتی‌روتورها در عین داشتن ساختار ساده، پیچیده هستند و شامل زیر سیستم‌های پیشرانش، سازه و کنترل و فرمان هستند که هر یک از اجزایی تشکیل شده است. سازه شامل بدنه و ارابه فرود است. پیشرانش شامل ملخها، موتورها، درایور موتور و باتری می‌باشد. قسمت کنترل و فرمان شامل فرستنده RC، سیستم خلبان خودکار، GPS، دستگاه سنسج لختی، سنسورهای ارتفاع سنج و ژيروسکوپ و ... می‌باشد [۸].

از دست دادن یک موتور، همچنان می‌تواند به صورت ایمن فرود آید، یک نمونه از آن در شکل ۳ نشان داده شده است. کوادکوپتر: کنترل ساده‌ای دارند و به همین دلیل پرمخاطب‌ترینند. به دو ساختار + و ساختار X اسمبل می‌شوند که ساختار X به دلیل دید بهتر و ایجاد پایداری بیشتر متداول‌تر است. قابلیت اطمینان چندان بالایی ندارند و در صورت از کار افتادن حتی یک موتور، امکان فرود ایمن آن کم می‌شود. یک نمونه از آن در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۳ - یک نمونه تری‌کوپتر [۹]



شکل ۴ - یک نمونه کوادکوپتر [۹]

پنتاکوپتر: ثبات و تعادل این مدل‌ها در سطح بسیار بالایی است و بیشتر برای مصارف سم‌پاشی و عکس‌برداری و فیلم‌برداری حرفه‌ای هوایی استفاده می‌شود. یک نمونه از آن در شکل ۵ نشان داده شده است.

هگزاکوپتر: موتورها با زاویه ۶۰ درجه نسبت به هم قرار گرفته‌اند. هر چه تعداد موتورها رو به افزایش می‌رود کاربری و استفاده از آن مولتی‌روتور برای مصارف صنعتی بوده و کنترل دشوارتر است. طراحی کنترلر برای این پرنده سخت‌تر از موارد قبلی اما با قابلیت اطمینان بسیار بیشتر است.

### ۳. اندازه و وزن پهپاد

- **پهپادهای سبک وزن:** پهپادهای کوچک و سبک معمولاً برای مأموریت‌های کوتاه‌تر با پیچیدگی کمتر استفاده می‌شوند. پروسیجرهای تست آن‌ها نسبتاً ساده‌تر است و بیشتر بر بررسی سلامت باتری، سیستم‌های کنترل و پایداری پرواز تمرکز دارد.

- **پهپادهای سنگین و بزرگ:** پهپادهای بزرگتر و سنگین‌تر مانند آن‌هایی که برای حمل محموله‌های بزرگ یا انجام مأموریت‌های طولانی استفاده می‌شوند، نیاز به پروسیجرهای پیچیده‌تری دارند. این پروسیجرها شامل بررسی دقیق سیستم‌های پیش‌ران، پایداری سازه و مدیریت سوخت (در صورت استفاده از موتورهای احتراقی) می‌شود.

### ۴. شرایط محیطی پرواز

- **پرواز در شرایط محیطی دشوار:** پهپادهایی که برای پرواز در شرایط دشوار مانند ارتفاعات زیاد، مناطق قطبی یا بیابانی طراحی شده‌اند، به تست‌های ویژه‌ای برای اطمینان از عملکرد درست در این شرایط نیاز دارند. این تست‌ها شامل ارزیابی توانایی پهپاد در مقابله با بادهای شدید، تغییرات دما و فشار هوا است.

- **پرواز در مناطق شهری:** پهپادهایی که در مناطق پرتراکم شهری پرواز می‌کنند، نیاز به تست‌های بیشتری برای جلوگیری از برخورد با موانع و اطمینان از پایداری پرواز در محیط‌های پیچیده دارند. سیستم‌های جلوگیری از برخورد و ارتباطات رادیویی در این موارد به دقت تست می‌شوند.

### ۵. نوع سیستم‌های پیش‌ران

- **پهپادهای با موتور الکتریکی:** پروسیجرهای تست پهپادهای مجهز به موتورهای الکتریکی معمولاً بر ارزیابی عملکرد باتری و مدیریت انرژی تمرکز دارند. همچنین تست‌های مرتبط با مدیریت حرارت و پایداری سیستم‌های الکتریکی انجام می‌شود.

- **پهپادهای با موتور احتراقی:** پهپادهایی که از موتورهای احتراقی استفاده می‌کنند، پروسیجرهای بیشتری برای بررسی مصرف سوخت، مدیریت دما، و عملکرد سیستم‌های پیچیده‌تر

پروسیجرهای پرواز هواپیماهای بدون سرنشین بال ثابت بسته به نوع مأموریت، پیچیدگی سیستم، و کاربرد خاصی که برای آن طراحی شده‌اند، تفاوت‌های متنوعی دارند. این تفاوت‌ها در مراحل مختلف پرواز قابل مشاهده هستند. در ادامه به تفاوت‌های کلیدی در پروسیجرهای تست پرواز پهپادهای بال ثابت پرداخته شده است:

### ۱. نوع مأموریت و کاربرد پهپاد

- **پهپادهای نظامی و تجاری:** پهپادهای نظامی اغلب دارای پروسیجرهای پیچیده‌تر و دقیق‌تری هستند که شامل سناریوهای پروازی خاص، بررسی قابلیت‌های تهاجمی یا دفاعی و مقاومت در برابر شرایط سخت محیطی است. در مقابل، پهپادهای تجاری و تحقیقاتی به طور عمده برای مأموریت‌های نقشه‌برداری، بازرسی و حمل و نقل استفاده می‌شوند و تست‌های آن‌ها بیشتر بر عملکرد حسگرها، دقت داده‌ها و بهره‌وری انرژی متمرکز است.

- **پهپادهای تحقیقاتی:** در پروسیجرهای تست پهپادهای تحقیقاتی، سیستم‌های جمع‌آوری داده و اندازه‌گیری بسیار اهمیت دارند. این پهپادها ممکن است به سیستم‌های پیچیده‌تر برای بررسی داده‌های محیطی مجهز باشند و بنابراین تست‌ها شامل ارزیابی دقیق ابزارهای علمی نصب شده بر روی پهپاد است.

### ۲. سیستم‌های ناوبری و خودکار

- **پهپادهای کاملاً خودکار:** پهپادهایی که به صورت خودکار و بدون نیاز به مداخله اپراتور پرواز می‌کنند، به پروسیجرهای ویژه‌ای برای تست سیستم‌های خودکار نیاز دارند. این شامل تست دقیق الگوریتم‌های ناوبری، تشخیص موانع، و بازگشت خودکار به پایگاه است.

- **پهپادهای نیمه‌خودکار یا کنترل از راه دور:** در این نوع پهپادها، ارتباط مستقیم با اپراتور در زمان‌های حساس اهمیت دارد. بنابراین، پروسیجرهای تست شامل بررسی کیفیت ارتباطات رادیویی، پاسخگویی سریع به دستورات و تست قابلیت‌های کنترل از راه دور است.

پیشراهنه دارند. این نوع پهپادها برای ماموریت‌های طولانی‌تر و سنگین‌تر طراحی شده‌اند و بنابراین تست‌های پیشرفته‌تری را می‌طلبند.

### ۶. سیستم‌های بازگشت به خانه و بازبایی

- بازگشت خودکار به خانه: بسیاری از پهپادها به سیستم‌های بازگشت خودکار به پایگاه در مواقع اضطراری مجهز هستند. پهپادهای پیچیده‌تر نیاز به پروسیجرهای بیشتری برای تست این سیستم دارند تا در صورت قطع ارتباط یا مشکلات فنی بتوانند به صورت ایمن به پایگاه بازگردند.

- سیستم‌های بازبایی پس از فرود: پهپادهای سنگین یا با ماموریت‌های خاص نیاز به سیستم‌های بازبایی دارند، مانند چترهای نجات یا سیستم‌های فرود کنترل‌شده. پروسیجرهای تست این سیستم‌ها باید به دقت بررسی شوند تا از آسیب به پهپاد در زمان فرود جلوگیری شود.

### انواع آزمون پروازی

آزمون پرواز برای کمک به فرآیند طراحی و توسعه مهندسی و تأیید دستیابی به مشخصات و اهداف فنی عملکرد انجام می‌گیرد. مرحله آزمون پروازی می‌تواند از آزمایش یک سیستم جدید برای یک پرنده موجود تا توسعه کامل و صدور گواهی‌نامه‌های پروازی یک هواپیمای جدید را شامل شود؛ بنابراین، مدت یک برنامه آزمایش پرواز خاص می‌تواند از چند هفته تا چندین سال متغیر باشد [۷]. به‌طور کلی، مراحل برنامه‌ریزی اولیه آزمون پرواز برای هواپیمای بدون سرنشین با برنامه‌ریزی آزمون پروازی هواپیمای سرنشین‌دار متفاوت نیست. ابتدا اهداف مستند شده و محدودیت‌های پرواز جمع‌آوری می‌شوند. برخی محدودیت‌ها دائمی هستند و می‌توانند از منابع مختلف، مانند مقررات رسمی یک کشور، تیم آزمون، سیستم‌های اویونیک و نرم‌افزار تحمیل شوند. در واقع هدف از انجام آزمون‌های پروازی عبارت‌اند از:

- بررسی تطابق داده‌های محاسبه‌شده با داده‌های واقعی و عملیاتی و صحت‌سنجی آن‌ها
- بهبود اطلاعات برای توسعه و طراحی و به‌دست‌آوردن اطلاعات تحقیقاتی

در کل انواع مختلفی از آزمون پروازی وجود دارد که متناسب با هدف باید آزمون پروازی مناسب آن انتخاب و انجام شود. در ادامه انواع آزمون‌های پروازی برشمرده می‌شود.

### آزمون تجربی

این آزمون برای بررسی نمونه‌های تازه تولید شده و یا پهپادهای باز طراحی شده یا بهینه‌سازی شده برای مشخص کردن مشخصات پروازی انجام می‌گیرد. آزمون تجربی همچنین برای مشخص کردن عملکردهای نامعین، کیفیت پروازی و یا عملکرد سیستم‌ها انجام می‌گیرد [۱۰].

### آزمون مهندسی پرواز

این نوع آزمون بر روی هواپیماهای موجود و در حال بهره‌برداری به‌منظور تعیین آزمون‌های قابلیت اطمینان عملکرد سیستم‌ها و قابلیت عملکرد وسیله پرنده انجام می‌گیرد [۱۱].

### آزمون پرواز تولید

بعد از تولید یک وسیله پرنده به‌منظور تأیید سازمان‌های مربوطه و اخذ مجوزهای لازم برای انجام پرواز صورت می‌گیرد. در حال حاضر کارگروه‌هایی در کشورها برای ثبت مجوز پرواز پرنده‌های بدون سرنشین و همچنین گواهی‌نامه پرواز تشکیل شده است [۱۰].

### آزمون پرواز زیرسیستم‌ها

زمانی که سیستم‌های جدید به روی وسیله پرنده نصب می‌گردد به‌منظور تعیین عملکرد سیستم‌های جدید این آزمون صورت می‌گیرد.

در تمام سیستم‌ها خصوصاً در صنعت با فناوری بالایی همچون هوافضا که هزینه اجزای آن نیز بسیار بالاست، قابلیت اطمینان زیرسیستم‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار هستند. چراکه عملکرد ناقص یک سیلندر هیدرولیک ساده در الویتور یک هواپیمای بزرگ همچون ۷۴۷ می‌تواند باعث کشته‌شدن چند صد نفر و ازدست‌رفتن یک پرنده چند صد میلیون‌دلاری شود؛ بنابراین باید تمام زیرسیستم‌ها به‌صورت مجزا تحت آزمون‌های مخرب تا سرحد نابودی و همچنین آزمون‌های دوره‌ای همچون eddy current برای یافتن ترک روی بال و ملخ قرار گیرند.

در این پژوهش، با شناسایی دقیق روندهای کلیدی در حوزه مولتی روتورها و ترسیم سناریوهای محتمل برای آینده، یک نقشه راه جامع و عملیاتی ارائه شده است. این نقشه راه با تعیین اهداف بلندمدت و کوتاه مدت، مشخص نمودن گام‌های اجرایی و ارائه پیشنهادات سیاست‌گذاری، چشم‌اندازی روشن از آینده توسعه مولتی روتورها در کشور ارائه می‌دهد. انتظار می‌رود این نقشه راه به عنوان یک سند راهبردی، مورد توجه پژوهشگران، صنعتگران، سیاست‌گذاران و سرمایه‌گذاران قرار گرفته و در جهت توسعه پایدار این فناوری در کشور مورد استفاده قرار گیرد.

#### هدف آزمون:

کتابچه راهنمای آزمایش پرواز ایگارد، سه هدف از آزمون پرواز هواپیماها را فهرست می‌کند:

- ۱- برای تعیین ویژگی‌های واقعی پرند در مقابل ویژگی‌های محاسبه شده یا پیش‌بینی شده
  - ۲- برای بهبود اطلاعات توسعه‌دهنده
  - ۳- برای به دست آوردن اطلاعات تحقیقاتی
- با بررسی مراجع گذشته و استانداردها، برای یک مولتی روتور، آزمون‌هایی در محیط باز شرح داده شده که هدف از این آزمون‌ها تأیید عملکرد زیرسیستم‌هایی مانند سازه، پیشرانس و کنترل و فرمان می‌باشد. [۱۵]

#### الزامات آزمون:

بر اساس استانداردها باید الزامات مختلف مانند الزامات محیطی و عملکردی برای انجام یک آزمون رعایت گردد که به شرح زیر است:

- ۱- الزامات محیطی: در زمان انجام آزمون، شرایط محیطی مانند شرایط آب و هوایی باید بررسی گردد.
- ۲- الزامات عملکردی: بر اساس مأموریت مولتی روتور الزامات عملکردی از جمله حداکثر ارتفاع، حداکثر سرعت کروز، مداومت پروازی باید رعایت و تأیید شود.
- ۳- الزامات ایمنی: در تمام مراحل آزمون باید شرایط و الزامات ایمنی رعایت گردد [۱۵].

انجام آزمون پرواز، یک عملیات گروهی است که موفقیت آن منوط به همکاری چندین متخصص است و در طول سال‌های گذشته نقش‌ها و مسئولیت‌های زیر به اثبات رسیده

البته سامانه‌های ارزان‌قیمت و بدون سرنشین نیازی به این سطح از بررسی و آزمون ندارند؛ اما کارخانه‌های معتبر تولید زیرسیستم‌هایی چون موتور و ملخ به طور مستقل این آزمون‌ها را انجام می‌دهند و داده‌های آن را در اختیار ما قرار می‌دهند [۲].

#### آزمون عملکرد

برای تأیید عملکرد زیرسیستم‌های جدید و یا پس از تعمیرات اساسی این آزمون انجام می‌شود. این آزمون می‌تواند در حد یکبار روشن و خاموش کردن ساده باشد. همچنین می‌تواند به پیچیدگی تولید مدل ریاضی و مقایسه آن با داده‌های کارخانه برای تأیید قطعه باشد. در مواردی که قابلیت اطمینان برای ما با اهمیت هستند، می‌بایست از شرکت معتبر خرید خود را بدون واسطه انجام دهیم. ضمناً در صورت خرید انبوه می‌بایست از یک خط تولید مشخص خریداری نموده و از خرید کردن قطعه صرفاً به اعتبار نام شرکت خودداری نماییم. علاوه بر یک خط تولید خاص نیز سری تولیدهای متفاوت می‌توانند عملکرد متفاوتی داشته باشند. پس بهتر است با مشورت گرفتن از یک مهندس صنایع، آزمون عملکردی روی یک سری تولید از یک خط تولید شرکت معتبر انجام داده و این کار در هر خرید تکرار شود [۱۱].

#### فرآیند آزمون پرواز

در این بخش به ارائه یک روش آزمون پروازی برای یک مولتی روتور نمونه می‌پردازیم که عملی و قابل اجرا و مطابق استانداردها باشد. این آزمون پروازی برای مولتی روتورهای ساخته شده در ایران قابل اجراست و می‌تواند طبق الزامات در یک فرودگاه معین انجام شود. این آزمون به جهت صحت‌سنجی عملکرد مولتی روتور تدوین شده است و شامل آزمون‌های برخاست و فرود، ارتفاع پروازی، حداکثر سرعت، برد پروازی و مداومت پروازی است.

#### نقشه راه

برای تدوین نقشه راه از استانداردهای مطرح جهانی نظیر داکيومنت‌های ASTM، FAA، ICAO، JARUS استفاده شده و آزمون‌ها در محیط باز قابل اجراست و به ترتیب هدف آزمون، کلیات و مراحل اجرایی آزمون در ادامه آورده شده است. [۱۴-۱۲]

است. این شش نقش در تیم تعیین می‌شود تا از انحراف و ناکارآمدی آزمون، جلوگیری شود: [۷]

- ۱- سرگروه آزمون پرواز
- ۲- اپراتور ایستگاه زمینی
- ۳- اپراتور محموله
- ۴- مسئول اویونیک و سیستم
- ۵- خلبان ایمنی
- ۶- خدمه کمکی زمینی

ارتباط بین اعضای تیم آزمون پرواز در شکل ۷ نشان داده شده است.

### مراحل کلی انجام آزمون‌های پروازی

#### مرحله آماده‌سازی (توسعه):

ابتدا تجهیزات مورد نیاز به همراه مولتی‌روتور گردآوری می‌شود. فهرست تجهیزات که از قبل تهیه شده چک می‌شود. نکات ایمنی قبل از انجام آزمون که به صورت یک فهرست از قبل تهیه شده بررسی می‌شود و طبق فهرست به ترتیب رعایت می‌گردد. سپس تجهیزات و گروه آزمون گیرنده در جایگاه خود مستقر شده و آماده انجام آزمون می‌شوند.

داده‌های نادرست، خطایابی انجام شده و آزمون بار دیگر تکرار می‌گردد.

#### مرحله ارزیابی:

پس از تأیید آزمون‌ها و جمع آوری و ارزیابی اولیه اطلاعات مطابق با اهداف و تأیید عملکرد مولتی‌روتور، تجهیزات جمع‌آوری می‌گردد [۶].

#### تجهیزات مورد نیاز

برای انجام هر آزمونی نیاز به تجهیزاتی است. که این تجهیزات به شرح زیر هستند:

- تجهیزات ایستگاه زمینی: لپ‌تاپ، نرم‌افزار ایستگاه زمینی و لینک ارتباطی برای دریافت داده
- تجهیزات تعمیر و نگهداری: شامل انواع آچار، پیچ‌گوشتی و سائز ابزارآلات
- تجهیزات اندازه‌گیری سرعت و جهت باد
- تجهیزات اندازه‌گیری دما و فشار هوا

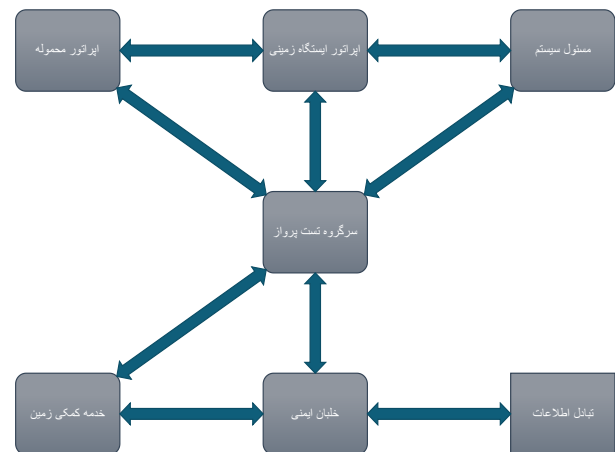
#### آزمون‌های بررسی طراحی و ساخت مطلوب

در این بخش صرفاً به بررسی کاتالوگ ارائه شده توسط سازنده پرداخته و پارامترهای مختلف نظیر سرعت، مداومت پروازی، وزن برخاست و ... با مقادیر مطلوب مقایسه می‌شود.

#### کنترل کیفی و تعمیر و نگهداری

کنترل کیفی یکی از مهم‌ترین بخش‌ها در تحویل‌گیری یک وسیله است. هدف یک سیستم کنترل کیفیت این است که اطمینان حاصل شود که محصولات و اقلام می‌توانند به طور مکرر تولید شوند که مطابق با طراحی تایید شده آنها بوده و در شرایط کارکرد ایمن هستند. یک برنامه تضمین کیفیت (QA) / کنترل کیفیت (QC) در ایجاد فرآیندها و رویه‌ها حیاتی است. پیشنهاد می‌شود برای این منظور مطابق با استاندارد F3001-14 عمل شود [۶]. این استاندارد تمام موارد مهم و قابل اهمیت در حوزه ساخت را شرح داده است.

آزمون مولتی‌روتورها بر اساس استاندارد F3001-14 شامل چندین مرحله و فرآیند است که به ارزیابی عملکرد، ایمنی و قابلیت اطمینان این سیستم‌ها کمک می‌کند. در زیر، مراحل کلیدی آزمون مولتی‌روتور با توجه به این استاندارد آورده شده است:



شکل ۷ - روابط اعضای تیم در یک آزمون پروازی

#### مرحله آزمون پروازی:

آزمون‌های مختلف انجام می‌شود و در حین انجام آزمون، داده‌برداری صورت گرفته و به ایستگاه زمینی ارسال می‌گردد. تحلیل داده‌ها، خطایابی و تأیید داده‌ها مطابق اهداف و دستورالعمل در این مرحله انجام می‌گیرد. در صورت دریافت

## ۱. آزمون طراحی و ساختار

- بررسی مواد: اطمینان از استفاده از مواد مناسب و با کیفیت در ساختار مولتی‌روتور.
- تحلیل سازه‌ای: انجام تحلیل‌های فنی برای اطمینان از مقاومت و پایداری ساختار در شرایط مختلف.

## ۳. آزمون عملکرد

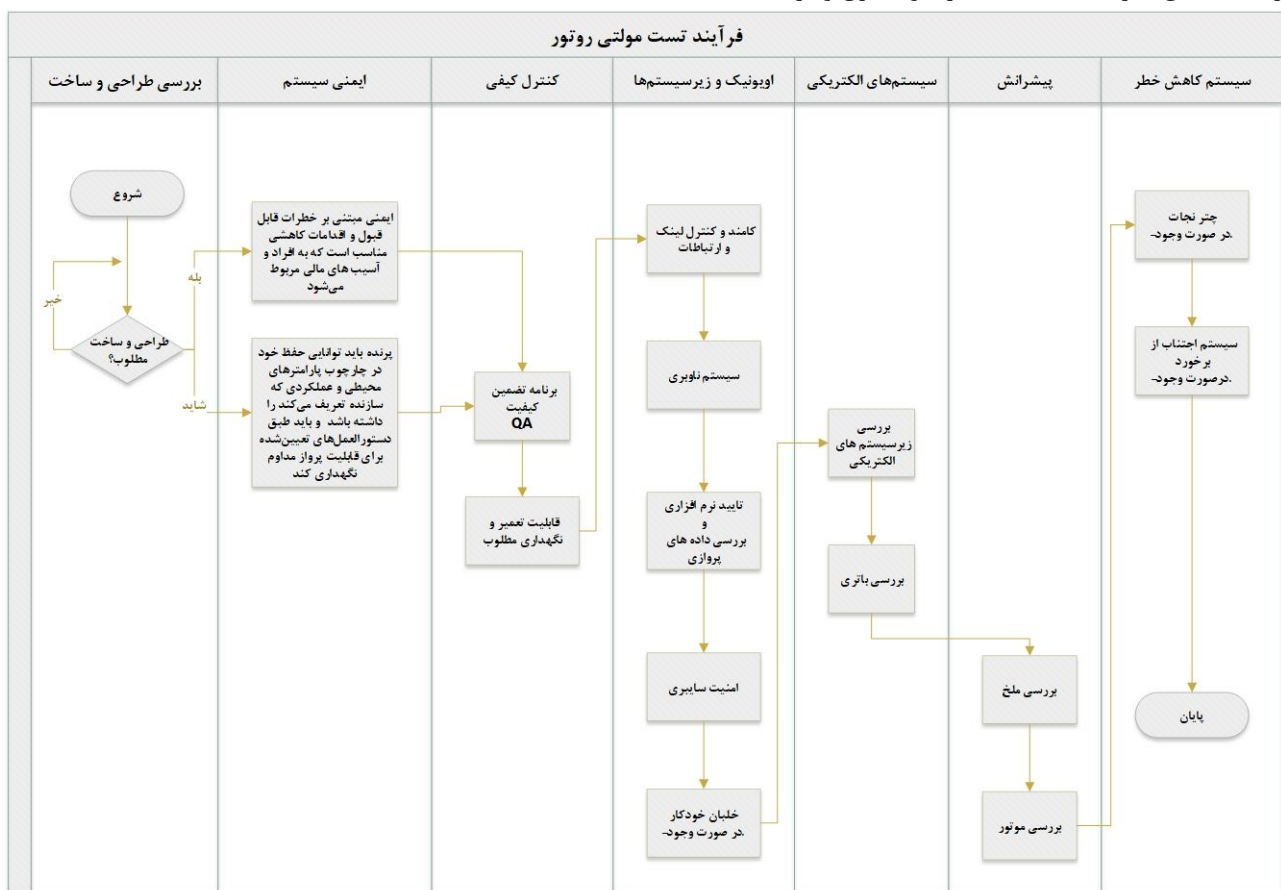
- آزمون پرواز: انجام پروازهای آزمایشی برای ارزیابی پایداری، کنترل و قابلیت مانور.
- آزمون در شرایط مختلف: آزمایش مولتی‌روتور در شرایط جوی مختلف (باد، باران و ...) و بررسی تأثیر آن بر عملکرد.

## ۲. آزمون سیستم‌های کنترلی

- کنترل پرواز: بررسی عملکرد سیستم‌های کنترل پرواز و اطمینان از دقت و پاسخ‌دهی مناسب در شرایط مختلف.
- آزمایشات سیم‌کشی و ارتباطات: اطمینان از صحت عملکرد ارتباطات بین اجزای مختلف مانند رادیو کنترل و فرستنده‌ها.

## ۴. آزمون ایمنی

- آزمون سقوط: بررسی رفتار مولتی‌روتور در صورت سقوط و ارزیابی ایمنی آن برای جلوگیری از آسیب به انسان‌ها و اموال.



شکل ۸ - فرآیند آزمون چندپره [۶]

- آزمون کیفیت باتری: بررسی عملکرد و عمر باتری در شرایط مختلف.

- آزمون سیستم‌های اضطراری: بررسی عملکرد سیستم‌های اضطراری مانند فرود اضطراری یا بازگشت به خانه.

## ۶. مدارک و گزارش‌ها

- ثبت نتایج: تمامی نتایج آزمون‌ها باید به دقت ثبت و گزارش شوند تا به عنوان مرجع برای بهبود طراحی و فرآیند تولید استفاده شوند.

## ۵. آزمون عمر و قابلیت اطمینان

- آزمون دوام: ارزیابی توان مولتی‌روتور در استفاده‌های مکرر و طولانی‌مدت.

- تایید انطباق با استانداردها: اطمینان از اینکه تمامی مراحل آزمون مطابق با الزامات F3001-14 انجام شده است [۲۰ و ۲۱].

### اویونیک و زیرسیستمها

اویونیک، سیستم‌های الکترونیکی هستند که در هواپیما (سرنشین دار یا بدون سرنشین) و/یا ایستگاه کنترل (CS) برای انجام و مدیریت عملکردهای مختلف از جمله ارتباطات، ناوبری، نمایش و کنترل هواپیما استفاده می‌شوند. در این راستا پیشنهاد می‌شود از استاندارد DO-362 استفاده شود [۶]. استاندارد DO-362 که توسط RTCA (Radio Technical Commission for Aeronautics) توسعه یافته، به سیستم‌های هوایی بدون سرنشین (UAS) اختصاص دارد و به بررسی الزامات و شیوه‌های عملیاتی آن‌ها می‌پردازد. این استاندارد به ویژه بر روی جنبه‌های ایمنی و قابلیت اطمینان سیستم‌های UAS تمرکز دارد.

مراحل تست مولتی‌روتور بر اساس استاندارد DO-362:

۱. تست طراحی و ارزیابی

- تجزیه و تحلیل خطرات: شناسایی و ارزیابی خطرات مرتبط با طراحی و عملکرد مولتی‌روتور.

- بررسی طراحی: اطمینان از اینکه طراحی مولتی‌روتور به طور کامل با الزامات ایمنی و عملکردی مطابقت دارد.

۲. تست عملکرد سیستم

- تست پرواز: ارزیابی عملکرد پرواز در شرایط واقعی، شامل:

- پایداری و کنترل: بررسی توانایی مولتی‌روتور در حفظ پایداری و کنترل در شرایط مختلف.

- عملکرد در حالت‌های مختلف: آزمایش حالت‌های مختلف پرواز مانند اوج‌گیری، نزول، و مانورهای پیچیده.

۳. تست ایمنی و قابلیت اطمینان

- آزمایشات سقوط: شبیه‌سازی شرایط اضطراری و ارزیابی رفتار مولتی‌روتور در صورت سقوط.

- تست سیستم‌های اضطراری: ارزیابی عملکرد سیستم‌های اضطراری مانند فرود اضطراری و بازگشت به خانه.

- تست باتری و منبع تغذیه: بررسی عملکرد باتری و تأثیر آن بر روی ایمنی و عملکرد مولتی‌روتور.

۴. تست‌های محیطی

- آزمایش در شرایط مختلف جوی: انجام تست‌ها در شرایط جوی مختلف (باد، باران، دما) برای ارزیابی عملکرد مولتی‌روتور.

- تست‌های EMI/EMC: بررسی تأثیرات الکترومغناطیسی و اطمینان از اینکه سیستم در برابر تداخلات الکترومغناطیسی مقاوم است.

۵. تست‌های نرم‌افزاری و سخت‌افزاری

- تست نرم‌افزار: بررسی و تست نرم‌افزار کنترلی و اطمینان از عملکرد صحیح آن.

- تست یکپارچگی سیستم: ارزیابی هماهنگی بین اجزای سخت‌افزاری و نرم‌افزاری [۲۰ و ۲۱].

### الکترونیک

ادامه عملکرد صحیح سیستم‌های الکترونیکی به مواردی از جمله سیم‌کشی، تحلیل بار الکتریکی و غیره، به دانش و تکنیک مکانیکی که نصب، بازرسی و نقشه راه استانداردسازی ANSI UASSC برای سیستم‌های هواپیمای بدون سرنشین را انجام می‌دهد، بستگی دارد. در این راستا توصیه می‌شود از استانداردهای سری TSO-C استفاده شود.

استاندارد TSO-C (Technical Standard Order) به

تأسیس الزامات و معیارهای کیفیت برای تجهیزات هواپیماها، از جمله هواپیماهای بدون سرنشین (UAV) می‌پردازد. این استاندارد به تولیدکنندگان کمک می‌کند تا محصولات خود را با الزامات ایمنی و عملکردی مشخصی تطبیق دهند.

مراحل تست هواپیماهای بدون سرنشین بر اساس TSO-C:

۱. تعریف الزامات طراحی:

- تولیدکننده باید الزامات طراحی و عملکرد هواپیماهای بدون سرنشین را مشخص کند. این شامل ویژگی‌های ایمنی، قابلیت اطمینان و عملکرد در شرایط مختلف است.

۲. تست‌های عملکردی:

- تست پرواز: انجام تست‌های پرواز برای ارزیابی ثبات، کنترل و قابلیت مانور UAV در شرایط مختلف.

- تست بارگذاری: بررسی توانایی UAV برای حمل بار و ارزیابی عملکرد آن در شرایط بارگذاری متفاوت.

مرتبط با کنترل و آزمون موتور الکتریکی است، استفاده می‌کنیم.

استاندارد ARP 7490 (Aerospace Recommended Practice) که توسط SAE International منتشر شده است، به موضوعات مرتبط با تست و ارزیابی عملکرد مولتی‌روتورها و سایر سیستم‌های پروازی بدون سرنشین (UAS) می‌پردازد. این استاندارد شامل الزامات و روش‌های توصیه‌شده برای ارزیابی عملکرد و ایمنی این سیستم‌ها است.

مراحل تست مولتی‌روتورها بر اساس ARP 7490:

#### ۱. تعریف الزامات طراحی:

- مشخص کردن الزامات طراحی برای مولتی‌روتور، شامل ویژگی‌های عملکردی، ایمنی و قابلیت اطمینان.

#### ۲. تست‌های عملکردی:

- تست پرواز: ارزیابی رفتار مولتی‌روتور در شرایط مختلف پروازی. این تست شامل بررسی ثبات، کنترل و مانورپذیری در شرایط مختلف است.

- تست بارگذاری: ارزیابی توانایی مولتی‌روتور برای حمل بار و انجام مأموریت‌های مشخص در شرایط بارگذاری مختلف.

#### ۳. تست‌های ایمنی:

- بررسی و ارزیابی سیستم‌های ایمنی و قابلیت‌های fail-safe برای اطمینان از عملکرد مناسب در شرایط اضطراری.

#### ۴. تست‌های محیطی:

- آزمایش مولتی‌روتور تحت شرایط جوی مختلف (حرارت، رطوبت، باد) برای اطمینان از کارایی و مقاومت در برابر عوامل محیطی [۲۷].

### چتر نجات

هم وزارت دفاع آمریکا و هم ناسا از سیستم‌های چتر نجات به عنوان یک سیستم افزایش ایمنی برای بازیابی ایمن سیستم‌های حیاتی مانند هواپیماهای بدون سرنشین، سیستم‌های دراپ هوایی<sup>۱</sup> (پرسنل، غذا، تجهیزات اضطراری و غیره)، هواپیماهای نظامی و غیره استفاده کرده‌اند. در این راستا به اسناد AC 105-2E و TSO-C23f ارجاع داده می‌شود که استانداردهای موجود در زمینه چتر نجات هستند [۶].

#### ۳. تست‌های ایمنی:

- ارزیابی سیستم‌های ایمنی، شامل بررسی قابلیت‌های fail-safe، که اطمینان حاصل شود در صورت بروز مشکل، UAV به صورت ایمن به زمین می‌نشیند یا کنترل خود را حفظ می‌کند.

#### ۴. تست‌های محیطی:

- آزمایش UAV تحت شرایط جوی مختلف (سرما، گرما، رطوبت، باد) برای اطمینان از عملکرد مناسب در محیط‌های متنوع [۲۲].

### آزمون ملخ‌ها

در ارتباط با آزمون و بررسی ملخ‌ها موارد متعددی باید در نظر گرفته شود که به تفصیل در استاندارد ISO/NP 5312 به تمام آن‌ها اشاره شده است.

استاندارد ISO/NP 5312 به بررسی و تست پهپادها و سیستم‌های مولتی‌روتور می‌پردازد و شامل الزامات فنی و روش‌های آزمایش برای ارزیابی عملکرد و ایمنی این دستگاه‌ها است. برای تست مولتی‌روتورها بر اساس این استاندارد، مراحل زیر معمولاً دنبال می‌شود:

۱. تحلیل خطر: شناسایی خطرات بالقوه مربوط به طراحی، ساخت و استفاده از مولتی‌روتور. این مرحله شامل ارزیابی ریسک‌های عملیاتی و محیطی است.

۲. تست عملکرد: انجام تست‌های مختلف عملکردی، شامل:

- تست پرواز: ارزیابی ثبات، کنترل و قابلیت مانور مولتی‌روتور در شرایط مختلف.

- تست بارگذاری: بررسی تحمل وزن و قابلیت حمل بار در شرایط واقعی.

۳. تست‌های محیطی: آزمایش دستگاه در شرایط مختلف جوی (باد، دما، رطوبت) برای ارزیابی مقاومت و کارایی.

۴. تست سیستم‌های الکتریکی و ارتباطی: ارزیابی سیستم‌های ناوبری، ارتباطی و کنترل از راه دور [۲۳].

### آزمون موتور

موتورهای استفاده شده روی مولتی‌روتورها عموماً الکتریکی هستند. در اینجا نیز از ARP7490 که استاندارد

<sup>1</sup> airdrop

استاندارد AC 105-2E (Advisory Circular 105-2E) که توسط FAA (سازمان هوانوردی فدرال ایالات متحده) منتشر شده، به موضوعات مربوط به پرواز و ارزیابی هواپیماهای بدون سرنشین (UAV) و پهپادها می‌پردازد. این استاندارد شامل راهنمایی برای تأمین ایمنی و عملکرد مناسب این وسایل است.

مراحل تست مولتی روتورها بر اساس AC 105-2E:

۱. تعریف الزامات طراحی:

- تعیین الزامات ایمنی و عملکردی برای طراحی مولتی روتور، شامل ویژگی‌های مورد نیاز برای کنترل پرواز، مانورپذیری و استقامت.

۲. تست‌های پرواز:

- تست عملکردی: انجام تست‌های مختلف پرواز برای ارزیابی رفتار مولتی روتور در شرایط عادی و اضطراری. این تست‌ها شامل بررسی توانایی کنترل، ثبات و واکنش به تغییرات ناگهانی هستند.

- تست بارگذاری: بررسی توانایی مولتی روتور برای حمل بار و ارزیابی عملکرد در شرایط مختلف بار.

۳. تست ایمنی:

- انجام ارزیابی‌های ایمنی شامل بررسی سیستم‌های fail-safe و قابلیت بازگشت به حالت ایمن در صورت بروز مشکلات.

۴. تست‌های محیطی:

- آزمایش مولتی روتور در شرایط جوی مختلف (رطوبت، دما، باد) برای اطمینان از عملکرد در محیط‌های متنوع [۲۴]. استاندارد TSO-C23f (Technical Standard Order) که توسط FAA (سازمان هوانوردی فدرال ایالات متحده) منتشر شده، به الزامات تجهیزات اضطراری در هواپیماها، شامل سیستم‌های پرواز خودکار و مولتی روتورها مربوط می‌شود. این استاندارد بیشتر بر روی تجهیزات ایمنی و عملکردی که برای پرواز استفاده می‌شوند، تمرکز دارد.

مراحل تست مولتی روتورها بر اساس TSO-C23f:

۱. تعریف الزامات طراحی:

- تولیدکنندگان باید الزامات طراحی را بر اساس ویژگی‌های عملکردی، ایمنی و قابلیت اطمینان مولتی روتور تعیین کنند.

۲. تست‌های عملکردی:

- تست پرواز: ارزیابی عملکرد پروازی مولتی روتور در شرایط مختلف، شامل تست‌های کنترل و مانور.

- تست بارگذاری: ارزیابی توانایی مولتی روتور برای حمل بار و عملکرد در شرایط بارگذاری مختلف.

۳. تست‌های ایمنی:

- بررسی و ارزیابی سیستم‌های ایمنی، شامل آزمایش سیستم‌های fail-safe که در شرایط اضطراری به کار می‌روند.

۴. تست‌های محیطی:

- آزمایش مولتی روتور در شرایط جوی مختلف (حرارت، رطوبت، باد) برای اطمینان از عملکرد در محیط‌های متنوع [۲۵].

### اجتناب از برخورد

استانداردهای تجهیزات برای ارائه تشخیص ترافیک در پرواز مشارکتی در استانداردهای حداقل عملکرد عملیاتی سیستم هشدار ترافیک و جلوگیری از برخورد DO-185، موجود است [۶].

استاندارد DO-185 (یعنی RTCA DO-185)، به نام Minimum Operational Performance Standards for Unmanned Aircraft Systems (UAS) Detect and Avoid Systems شناخته می‌شود و توسط RTCA, Inc منتشر شده است. این استاندارد به الزامات عملکردی و تست‌های سیستم‌های "تشخیص و جلوگیری از تصادف" (Detect and Avoid) در سیستم‌های هوایی بدون سرنشین می‌پردازد.

مراحل تست مولتی روتورها بر اساس DO-185:

۱. تعریف الزامات طراحی:

- تولیدکننده باید الزامات طراحی و عملکرد سیستم‌های تشخیص و جلوگیری از تصادف را بر اساس نوع و کاربرد مولتی روتور تعیین کند.

۲. تست‌های عملکردی:

- تست‌های تشخیص و جلوگیری از تصادف: ارزیابی کارایی سیستم‌های تشخیص موانع و جلوگیری از تصادف در شرایط مختلف. این تست‌ها شامل شبیه‌سازی و تست‌های واقعی می‌شود.

- بررسی تجهیزات ایستگاه زمینی و تایید سلامت آن‌ها
- اطمینان از توجیه بودن و تسلط داشتن خلبان و اپراتورها از مراحل انجام آزمون‌ها

### چک لیست آزمون پرواز

با توجه به مباحث و توضیحات ذکر شده در قسمت‌های قبل، عملیات آزمون پرواز را می‌توان به بخش‌های مختلف تقسیم نمود. در این قسمت به تبیین هر یک از این بخش‌ها پرداخته خواهد شد.

- عملیات پیش از پرواز
- بررسی محل آزمون
- نشست و برخاست کنترل شده
- پرواز کنترل شده
- پرواز عادی
- پرواز با حداکثر توان
- پرواز در شرایط بحرانی
- پرواز در شب

### عملیات پیش از پرواز

در این فاز وظیفه اپراتور بررسی تمام زیرسیستم‌ها و همچنین اسناد مربوط به آن‌ها می‌باشد. ضمناً بررسی وجود تطابق بین اسناد و پرند ساخته شده اولیه، در این فاز انجام می‌گیرد. از جمله پارامترهای مورد اندازه‌گیری، وزن و بالانس پرند است. مورد بعدی آزمون هم‌راستایی، جهت اطمینان از صحت نصب تجهیزاتی که نسبت به وضعیت نصب حساس هستند، مانند دستگاه سنجش لختی و موتور. در نهایت اپراتور موظف است سرویس نهایی از جمله بررسی و شارژ باتری را انجام داده و پس از اطمینان از مناسب بودن وضعیت جوی، نسبت به تعیین روز آزمون پرواز اقدام نماید.

### بررسی محل آزمون

در این فاز اپراتور نسبت به بررسی محدودیت‌های پروازی اقدام می‌نماید (DO-160G). با توجه به اینکه پرند مورد بررسی عمود پرواز می‌باشد نیازی به بررسی باند فرود و برخاست نیست و صرفاً سطح صاف متناسب با ابعاد پرند مورد نیاز است. اپراتور می‌بایست، موانع طبیعی و شعاع دید مناسب را مورد نظر قرار داده و حداقل مکان در منطقه‌ای باز، آزمون انجام گیرد. ضمناً رادیو کنترل و سایر ادوات ارتباطی و الکترونیکی در این

- تست پرواز: انجام تست‌های پرواز برای بررسی پاسخ سیستم به موانع و شرایط غیرمنتظره.  
۳. تست‌های ایمنی:

- بررسی سیستم‌های ایمنی و قابلیت‌های fail-safe در شرایط اضطراری و بررسی کارایی سیستم در مواجهه با مشکلات.

۴. تست‌های محیطی:

- ارزیابی عملکرد مولتی‌روتور در شرایط جوی مختلف و تأثیر آن بر سیستم‌های تشخیص و جلوگیری از تصادف [۲۶].

### آزمون پرواز برای مولتی‌روتور

بر روی سیستم مولتی‌روتور دو سیستم به همراه سیستم کنترل پرواز آن طراحی شده است که بر آن آزمایش‌های فشرده‌ای برای تأیید عملکرد آیرودینامیکی، پایداری پرواز و استقلال سطوح سیستم انجام می‌شود.

آزمایش اول: بررسی قابلیت اطمینان کنترل‌کننده انتقال  
آزمایش دوم: آزمایش پایداری کنترلر پرواز در زمانی که مولتی‌روتور تحت کنترل خلبان فعال است  
آزمایش سوم: آزمایش برد، استقامت و ظرفیت پرواز خودکار  
آزمایش چهارم: به‌منظور تعیین سرعت بهینه پرواز

### نکات ایمنی قبل از انجام آزمون

قبل از انجام آزمون، نکات ایمنی و الزامات باید رعایت گردد تا ریسک‌های بالقوه به حداقل برسد. در این بخش این الزامات به طور جزئی برشمرد می‌شود: [۱۶]  
قبل از شروع آزمون:

- بررسی شرایط جوی
- بررسی اتصالات و سیم‌کشی‌های مولتی‌روتور
- بررسی سلامت زیرسیستم‌ها و اجزا، مانند ملخ، موتور و بدنه
- در محیط آزمون فاصله ایمنی افراد با مولتی‌روتور باید حفظ شود
- چندپره باید داخل قفسی از تور قرار گیرد
- اطمینان از کامل بودن شارژ باتری‌ها
- اطمینان از ارتباط صحیح بین مولتی‌روتور و ایستگاه زمینی

آمپر نباشند، می‌بایست تاکومتر و ولت‌متر برای سنجش این پارامتر نیز در نظر گرفته شود [۱۸].

با توجه به هزینه نسبتاً بالای این آزمون تنها در صورتی که پرنده به صورت انبوه تولید شده و یا ماموریت ویژه‌ای برای آن در نظر گرفته شده باشد، این آزمون انجام خواهد شد. در غیر این صورت تا مرحله پرواز کنترل شده ادامه داده و از مابقی آزمون‌ها صرف نظر خواهد شد.

### پرواز در شرایط بحرانی

در صورتی که مولتی‌روتور مورد بررسی، نیازمند به پرواز در شرایط خاص همچون باد و انجام مانورهای خاص و یا پرواز بر فراز شهر و جمعیت باشد، این آزمون می‌بایست مورد بررسی قرار گیرد. برای این منظور سناریو آزمون حتماً باید از قبل تدوین شده و حدود بحرانی مشخص شده باشند. این آزمون همچون آزمون قبل، هزینه بسیار زیادی داشته و برای پرنده‌های تجاری کوچک انجام نمی‌گیرد. اما در صورتی که نیاز به انجام آن توسط کارفرما تأیید شود، شرایط بحرانی مطابق با s-102.2.4-2015 مورد بررسی قرار می‌گیرد. در سند مذکور توصیه به تحلیل خرابی از پایین به بالا<sup>۲</sup> شده است [۶] اما در صورت تحلیل از بالا به پایین<sup>۳</sup> امکان به دست آوردن سریعتر و موثرتر خطاها بهتر محیا خواهد شد.

### پرواز در شب

این آزمون برای پرنده‌هایی که قابلیت بازگشت به خانه، دوربین دید در شب و یا مجهز به سنسورهای خاص هستند، صدق می‌کند و با توجه به اینکه به جز معدود مواردی همچون هلی‌شات‌ها که زیر نور چراغ پرواز می‌کنند، پرنده‌های کمی با هدایت اپراتور در شب پرواز می‌کنند و کارکرد خلبان خودکار در روز و شب تفاوت خاصی ندارد، از شرح و بسط این قسمت صرف نظر شده است. ARP4392 به صورت محدود به این موضوع پرداخته است.

در شکل ۹، نتیجه حاصله از بررسی انواع آزمون‌ها به صورت نمودار نمایش داده شده است. در این شکل سعی شده است به صورت خلاصه تمام فعالیت‌هایی که اپراتور می‌بایست به صورت سلسه‌وار انجام دهد، در کنار یکدیگر نمایش داده شود.

مرحله می‌بایست مورد بررسی مجدد قرار گرفته و از صحت عملکرد آن‌ها اطمینان حاصل شود. [۱۷ و ۱۸] در صورتی که شرایط محل آزمون مناسب انجام آزمون نباشد، ماموریت به روز و مکان دیگری منتقل خواهد شد.

### نشست و برخاست کنترل شده

در این مرحله اپراتور به‌آهستگی مولتی‌روتور مورد آزمون را از زمین بلند کرده و مجدداً بر روی زمین می‌نشانند. این فاز صرفاً برای اطمینان بیشتر و جلوگیری از آسیب شدید به مولتی‌روتور صورت می‌گیرد [۱۹].

### پرواز کنترل شده دستی

در این مرحله با حداکثر احتیاط، پرواز کوتاهی با مانورهای از پیش تعیین شده صورت می‌گیرد. در صورت تأیید شدن در این مرحله و عدم بروز حادثه مولتی‌روتور مورد بررسی حداقل شرایط قبولی را کسب می‌کند. در ادامه به آزمون‌هایی برای افزایش قابلیت اطمینان محاسبه شده برای مولتی‌روتور می‌پردازیم [۱۹]. البته در صورتی که پرنده مجهز به خلبان خودکار باشد، باید مرحله بعدی نیز مورد بررسی قرار گیرد.

### پرواز کنترل شده خودکار

در صورتی که مولتی‌روتور مجهز به خلبان خودکار باشد، پرواز کوتاهی با مانورهای از پیش تعیین شده صورت می‌گیرد. در صورت تأیید شدن در این مرحله و عدم بروز حادثه، مولتی‌روتور مورد بررسی حداقل شرایط قبولی را کسب می‌کند و گواهینامه عادی به آن تعلق می‌گیرد. در ادامه به آزمون‌هایی برای افزایش قابلیت اطمینان محاسبه شده برای مولتی‌روتور می‌پردازیم [۱۹].

### پرواز با حداکثر توان

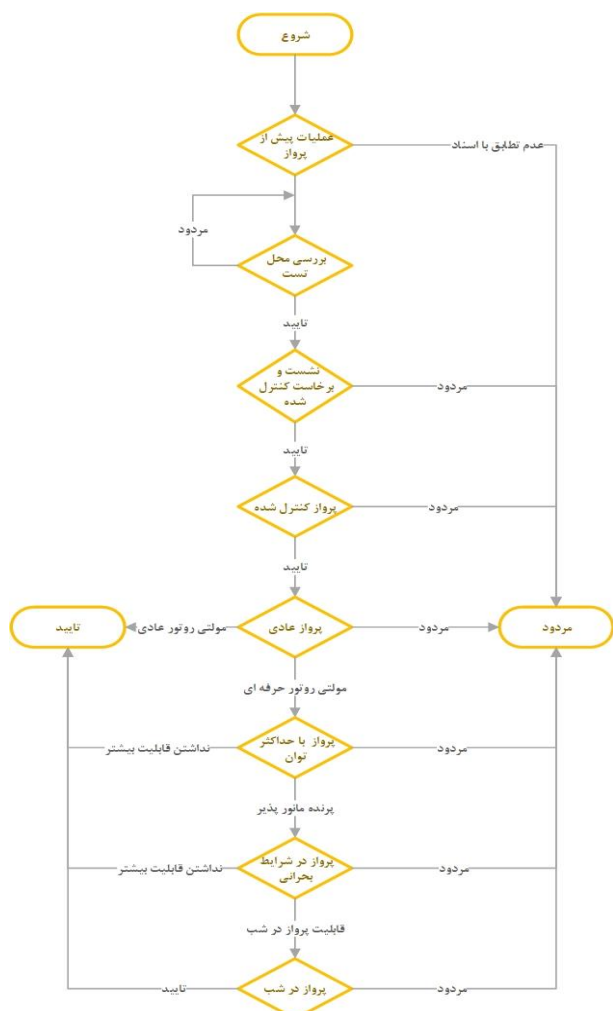
در این بخش، اپراتور می‌بایست به‌دقت پارامترهایی همچون دمای باتری، بورد و موتورها را مورد بررسی قرار دهد تا در صورت بروز کوچک‌ترین اشکال و خروج از دامنه مشخص شده توسط سازنده پرنده، عملیات متوقف شود. برای این آزمون، نیازمند اتصال دماسنج روی تک‌تک المان‌های مشخص شده در فوق خواهیم بود. بعلاوه در صورتی که درایورهای مورد استفاده برای موتورهای برآشلس، مجهز به محدود کننده دور و

<sup>2</sup> FMEA (Failure mode and effects analysis)

<sup>3</sup> FTA (Fault tree analysis)

### آینده پژوهی مولتی روتورها و ماموریت‌های آن

با توجه به اهمیت روزافزون مولتی روتورها در صنایع مختلف و پیشرفت‌های سریع فناوری‌های مرتبط، آینده پژوهی در این حوزه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این پژوهش، با هدف ارائه یک چشم‌انداز جامع از آینده مولتی روتورها، بخش مستقلی به این موضوع اختصاص داده شده است. در این بخش، ضمن بررسی روندهای کنونی و فناوری‌های نوظهور، به تحلیل کاربردهای بالقوه آینده، چالش‌های پیش رو و فرصت‌های موجود پرداخته شده است. توسعه فناوری‌های مرتبط با پیشرفت‌های سریع در حوزه هوش مصنوعی، باتری‌ها و سنسورها، شاهد تحولات چشمگیری در قابلیت‌ها و کارایی مولتی روتورها خواهد بود. این فناوری‌ها امکان توسعه سیستم‌های خودکار، افزایش برد پرواز و بهبود دقت در انجام ماموریت‌ها را فراهم خواهند آورد. کاربردهای جدید و نوآورانه: آینده مولتی روتورها فراتر از کاربردهای کنونی آن‌ها در زمینه‌های عکاسی هوایی و فیلمبرداری است. این سیستم‌ها می‌توانند در حوزه‌های مختلفی از جمله حمل‌ونقل شهری، کشاورزی هوشمند، بازرسی زیرساخت‌ها، امداد و نجات، و حتی سرگرمی‌های شخصی مورد استفاده قرار گیرند. چالش‌ها و فرصت‌ها: توسعه گسترده مولتی روتورها با چالش‌هایی مانند مقررات گذاری، ایمنی پرواز، حریم خصوصی و امنیت سایبری همراه است. با این حال، این فناوری‌ها فرصت‌های بی‌نظیری را برای ایجاد کسب‌وکارهای جدید، بهبود بهره‌وری و ایجاد خدمات نوآورانه فراهم می‌آورند. سناریوهای آینده: با توجه به روندهای کنونی و فناوری‌های نوظهور، می‌توان سناریوهای مختلفی را برای آینده مولتی روتورها به عنوان بخشی جدایی‌ناپذیر از سیستم‌های حمل‌ونقل شهری عمل کرده و خدمات تحویل کالا و مسافر را به صورت خودکار ارائه می‌دهند. در سناریوی دیگر، مولتی روتورها به عنوان ابزارهای نظارتی قدرتمندی در حوزه‌های مختلف مانند کشاورزی، محیط زیست و امنیت مورد استفاده قرار می‌گیرند. با توجه به مطالب ارائه شده در این بخش، می‌توان نتیجه گرفت که آینده مولتی روتورها بسیار روشن است و این فناوری‌ها نقش مهمی در شکل‌دهی به زندگی روزمره ما در آینده ایفا خواهند کرد. با برنامه‌ریزی دقیق و سرمایه‌گذاری مناسب، می‌توان از این فناوری‌ها برای ایجاد ارزش افزوده و توسعه پایدار بهره برد.



شکل ۹ - گراف روند آزمون پرواز

### جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مطالعه یک روش آزمون پرواز عمومی قابل اجرا برای انواع مولتی روتورهای ساخته شده در ایران ارائه گردید تا بر اساس این روش آزمون، بتوان عملکرد کلی یک مولتی روتور از جمله برد، مداومت پروازی و سرعت آن را ارزیابی نمود. همچنین چند نمونه آزمون پرواز مجازی مورد بررسی قرار گرفت که به لحاظ امنیت مولتی روتور و همچنین امکان انجام آزمون‌های پیچیده بسیار مناسب‌تر از آزمون میدانی است. هرچند که بدون در اختیار داشتن تونل باد، شبیه‌سازی ما از آزمون کامل نبوده و مجبور هستیم در محیط باز و با قبول ریسک سقوط و ... به تأیید یا رد پرنده بپردازیم و در صورت امکان داده‌هایی جمع‌آوری نماییم تا بتوانیم با کمک آن‌ها پرنده طراحی شده را ارتقا دهیم.

[13] Lee, D., et al., *Design, implementation, and flight tests of a feedback linearization controller for multirotor UAVs*. International Journal of Aeronautical and Space Sciences, 2017. 18(4): p. 740-756.

[14] Hwang, M.-h., H.-R. Cha, and S.Y. Jung, *Practical endurance estimation for minimizing energy consumption of multirotor unmanned aerial vehicles*. Energies, 2018. 11(9): p. 2221.

[15] Stoliker, F., *AGARD Flight Test Techniques Series. Volume 14. Introduction to Flight Test Engineering (Introduction a la Technique d'essais en vol)*. 1995, ADVISORY GROUP FOR AEROSPACE RESEARCH AND DEVELOPMENT NEUILLY-SUR-SEINE (FRANCE).

[16] Agency, E.A.S., *Concept of Operations for Drones, a Risk Based Approach to Regulation of Unmanned Aircraft*. 2015, European Aviation Safety Agency Cologne, Germany.

[17] AW-Drones, *AW-Drones proposed standards*. 2019.

[18] NLR, *Certification Specification - Light Unmanned Multi Rotor Systems (CS-LUMRS)*. 2014.

[19] AW-Drones, *Final recommendations for EASA*. 2021.

[20] ASTM F3001-14

[21] RTCA DO-362

[22] FAA TSO Information\*\*: [FAA Technical Standard Orders]([https://www.faa.gov/aircraft/part\\_21/technical\\_standard\\_orders/](https://www.faa.gov/aircraft/part_21/technical_standard_orders/))

[23] ISO: [ISO Standards](<https://www.iso.org/>)

[24] FAA AC 105-2E: [FAA Advisory Circulars]([https://www.faa.gov/regulations\\_policies/advisory\\_circulars/index.cfm](https://www.faa.gov/regulations_policies/advisory_circulars/index.cfm))

[25] FAA TSO-C23f: [FAA Technical Standard Orders]([https://www.faa.gov/aircraft/part\\_21/technical\\_standard\\_orders/](https://www.faa.gov/aircraft/part_21/technical_standard_orders/))

[26] RTCA DO-185: [RTCA Standards](<https://www.rtca.org/>)

[27] SAE ARP 7490: [SAE International Standards](<https://www.sae.org/>)

در این نوشتار سعی شده است، استانداردهای گذشته نظیر ASTM، Jarus و خلأ وجود روش آزمون استاندارد و یکپارچه بر طبق الزامات و در سطح سیستم را برطرف نماید.

## منابع و مراجع

[1] Bouabdallah, S., P.Murrieri, and R. Siegwart. *Design and control of an indoor micro quadrotor*. in *IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA'04. 2004.* 2004. IEEE.

[2] ANSI, *STANDARDIZATION ROADMAP For Unmanned Aircraft Systems, Version 2.0*. 2020, American National Standards Institute.

[3] AIAA. *Boeing Recommends Air Taxi Safety Standards Mirror Those for Commercial Jets*. 2022; Available from: <https://www.aiaa.org/news/news/2022/11/10/boeing-recommends-air-taxi-safety-standards-mirror-those-for-commercial-jets>.

[4] AIAA. *Design Competitions*. 2020; Available from: <https://www.aiaa.org/get-involved/students-educators/Design-Competitions>.

[5] Available from: <https://dronelife.com/2018/03/08/top-20-drone-service-provider-ranking/>

[6] ANSI, *STANDARDIZATION ROADMAP For Unmanned Aircraft Systems, Version 2.0*. 2020, American National Standards Institute.

[7] Dauer, J.C., F.-M. Adolf, and S. Lorenz. *Flight Testing of an Unmanned Aircraft System—A Research Perspective*. in *STO Meeting Proceedings STO-MP-SCI-269*. 2015.

[8] Quan, Q., *Introduction to multicopter design and control*. 2017: Springer.

[9] Available from: <https://www.jahanrc.com/blog/what-is-multirotor/>

[10] Valavanis, K.P. and G.J. Vachtsevanos, *Handbook of unmanned aerial vehicles*. Vol. 1. 2015: Springer.

[11] ASTM, *Quality Assurance of a Small Unmanned Aircraft System (sUAS)*. 2014.

[12] Williams, W. and M. Harris, *The challenges of flight-testing unmanned air vehicles*. 2002, Citeseer.