



E-ISSN: 2676-4253

Journal of Technology in Aerospace Engineering

Vol. 8, No. 2, pp. 67-82, 2024

<https://doi.org/10.22034/jtae.2024.8.2.6>

Journal Homepage: <https://jtae.ari.ac.ir>



Scientific Extension Paper

Emerging Applications and Challenges of Multi-Rotor Systems: A Comprehensive Review

Saman Yazdannik¹ and Morteza Tayefi^{2*} 

1. Department of Aerospace Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

2. Department of Aerospace Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article History:

Received 13 August 2023

Revised 24 September 2023

Accepted 01 October 2023

Available Online 01 October 2023

Keywords:

UAV

Multi-rotor

Wireless coverage

Remote sensing

Search and rescue

Goods delivery

ABSTRACT

In the contemporary landscape, utilizing multi-engine drone technology or multi-rotors in scientific, industrial and commercial fields, etc. has had a significant increase. These multifaceted systems have assumed pivotal roles encompassing surveillance, wireless network coverage, remote sensing, search and rescue operations, efficient package delivery, telemedicine facilitation, security enforcement, monitoring, precision agriculture, traffic management, and infrastructure inspection, among others. The trajectory of technological advancement underscores the impending significance of intelligent quadcopters as a transformative force within the industry, promising to forge novel avenues and redefine conventional paradigms. In effect, this paradigm shift is poised to mitigate operational risks and financial outlays, thereby fostering heightened assimilation of these technological innovations. Projections underscore that drones' market penetration within the civil infrastructure sector is slated to culminate in an approximately \$45 billion valuation by the end of this decade. This discourse delves into an all-encompassing exploration of the manifold applications and associated challenges intrinsic to multi-rotor systems, with a particular emphasis on quadcopters across research arenas and diverse industries. Furthermore, the discourse offers an incisive analysis of prevailing trends while shedding light on the contours of forthcoming developments in the utilization of these transformative devices. Due to the introduction of various applications of multi-rotors and new applications of multi-rotors made possible by the development of technology, we can expect the ecosystem of unmanned aerial vehicles to become more integrated, and due to the need created in different sectors of the industry, more investors, and specialists in this sector.

* Corresponding Author's E-mail: tayefi@kntu.ac.ir

How to Cite this Article:

S. Yazdannik and M. Tayefi, "Emerging Applications and Challenges of Multi-Rotor Systems: A Comprehensive Review," *Journal of Technology in Aerospace Engineering*, Vol. 8, No. 2, pp. 67-82, 2024, (in Persian), <https://doi.org/10.22034/jtae.2024.8.2.6>.

COPYRIGHTS

Authors retain the copyright and full publishing rights.

Published by Aerospace Research Institute. This article is an open access article licensed under the [Creative Commons Attribution 4.0 International \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).





مقاله ترویجی

مروری بر کاربردها و چالش‌های سیستم‌های مولتی روتور

سامان یزدان نیک^۱ و مرتضی طایفی^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

۲- استادیار، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

چکیده

در عصر حاضر، استفاده از تکنولوژی پهنادهای چند موتور یا مولتی روتورها در زمینه‌های علمی، صنعتی و تجاری و ... افزایش قابل توجهی داشته است. این سیستم‌های هوایی چندمنظوره نقش‌های کلانی از جمله نظارت، پوشش شبکه‌های بی‌سیم، سنجش از راه دور، عملیات جستجو و نجات، تحویل مرسولات، تسهیل انتقال خدمات پزشکی، امنیت، کشاورزی دقیق، مدیریت ترافیک و بازرسی زیرساخت و دیگر زمینه‌ها را به خود اختصاص داده‌اند. خط سیر پیشرفت تکنولوژی بر اهمیت قریب الوقوع مولتی روتورها هوشمند به‌عنوان یک نیروی دگرگون‌کننده در صنعت تاکید می‌کند که نویدبخش راه‌های جدید و بازتعریف روش‌ها و الگوهای معمول است. در واقع، این تغییر رویکرد برای کاهش ریسک‌های عملیاتی و هزینه‌های مالی استفاده خواهد شد و در نتیجه باعث افزایش جذب نوآوری‌های تکنولوژیکی می‌شود. پیش‌بینی‌ها نشان می‌دهد که نفوذ پهنادهای در بخش زیرساخت‌ها و پروژه‌های عمرانی بزرگ تا پایان دهه سوم قرن ۲۱ به حدود ۴۵ میلیارد دلار خواهد رسید. این مقاله به بررسی کاربردها و چالش‌های وابسته به سیستم‌های مولتی روتور و با تمرکز ویژه بر مولتی روتورها در زمینه‌های تحقیقاتی و صنایع مختلف پرداخته است. علاوه‌براین، این مقاله تجزیه و تحلیلی عمیق از روندهای فعلی را ارائه داده و به بررسی زوایای توسعه‌های آتی در استفاده از این وسایل هوافضایی نوین می‌پردازد. با توجه به معرفی کاربردهای متنوع مولتی روتورها و کاربردهای جدید مولتی روتورها که با توسعه تکنولوژی میسر شده می‌توان نتیجه گرفت که اکوسیستم وسایل نقلیه هوایی بدون سرنشین یکپارچه‌تر شده و با توجه به نیاز ایجاد شده در بخش‌های مختلف صنعتی و پژوهشی، این بخش جایگاه ویژه‌ای در بین سرمایه‌گذاران و متخصصان پیدا کرده است. بنابراین با شناخت کاربردها و چالش‌ها و سیاست‌گذاری درست و به موقع، می‌توان هر روز وظایف و مسئولیت‌های بیشتری را به این پرنده‌های بدون سرنشین محول کرد و انتظار داشت که این وظایف را بهتر از شیوه‌های موجود به سرانجام رسانند.

اطلاعات مقاله

ناریخچه مقاله:

دریافت ۲۲ مرداد ۱۴۰۲
بازنگری ۲ مهر ۱۴۰۲
پذیرش ۹ مهر ۱۴۰۲
اولین انتشار ۹ مهر ۱۴۰۲

واژه‌های کلیدی:

پهناد
مولتی روتور
ارائه پوشش شبکه بی‌سیم
سنجش از راه دور
جستجو و نجات
تحویل مرسولات

* پست الکترونیکی نویسنده مسئول: tayefi@kntu.ac.ir

How to Cite this Article:

S. Yazdannik and M. Tayefi, "Emerging Applications and Challenges of Multi-Rotor Systems: A Comprehensive Review," *Journal of Technology in Aerospace Engineering*, Vol. 8, No. 2, pp. 67-82, 2024, (in Persian), <https://doi.org/10.22034/jtae.2024.8.2.6>.

COPYRIGHTS

Authors retain the copyright and full publishing rights.

Published by Aerospace Research Institute. This article is an open access article licensed under the [Creative Commons Attribution 4.0 International \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).



عمودی (VTOL). ما در این مقاله به صورت خاص به کاربردهای مولتی روتور در زمینه‌های ذکر شده بالا می‌پردازیم. در ابتدا در ادامه بخش مقدمه، به شرح مختصر چند مقاله مروری که کاربردها یا جنبه‌های خاصی از پهپادها را مورد بررسی قرار داده‌اند، می‌پردازیم.

نویسنده‌ها در [۱] از دیدگاه ارتباطات و شبکه به ارائه الزامات و ویژگی‌های شبکه پهپادی برای کاربردهای غیرنظامی می‌پردازند. سپس، کیفیت خدمات موردنیاز، پارامترهای مربوط به شبکه، الزامات و حداقل داده‌هایی که باید از طریق شبکه منتقل نمود را بررسی می‌نمایند. همچنین در مورد الزامات عمومی مرتبط با شبکه مانند اتصال، سازگاری، ایمنی، حریم خصوصی، امنیت و مقیاس‌پذیری صحبت می‌کنند. در نهایت نتایج تجربی بسیاری از پروژه‌ها را ارائه کرده و مناسب بودن فناوری‌های ارتباطی موجود را برای پشتیبانی از شبکه‌های هوایی قابل اعتماد بررسی می‌نمایند.

در مرجع [۲] نویسندگان به تحقیقات در زمینه مسیریابی و تحویل به صورت بهینه و زیرساخت موردنیاز برای پهپادهای غیرنظامی می‌پردازند. در [۳] نویسندگان به موضوع پوشش شبکه و ایرلس به کمک پهپاد می‌پردازند و شیوه پایه معماری آن را بیان می‌کنند و به موقعیت‌ها و فرصت‌های موجود در این بخش اشاره می‌کنند.

در مرجع [۴] به ارتباط جمعی و گروهی پهپادها و سیستم‌های چندعاملی پرداخته می‌شود که پردازش توزیع شده را بدین صورت طبقه‌بندی می‌کنند: (۱) هدف کلی رایانش توزیع شده مناسب برای کاربرد عمومی (۲) تشخیص اشیا (۳) ردیابی (۴) نظارت (۵) جمع‌آوری داده (۶) برنامه‌ریزی مسیر (۷) ناوبری (۹) اجتناب از برخورد با اشیا و دیگر عامل‌ها (۹) هماهنگی (۱۰) نظارت بر محیط. با این حال، این بررسی چالش‌های پیش‌روی پهپادها در این کاربردها و نقش بالقوه فناوری‌های جدید در استفاده از پهپادها را در نظر نمی‌گیرد. در [۵] نویسنده به نقش و استفاده پهپادها در ارسال و دریافت مرسولات می‌پردازد و استفاده از اینترنت اشیا^۱ را در پهپادها بررسی می‌نماید. در منبع [۶] نیز نویسندگان به ایجاد یک شبکه بی‌سیم پهپاد پایه و الزامات و ابزار موردنیاز برای این امر می‌پردازند.

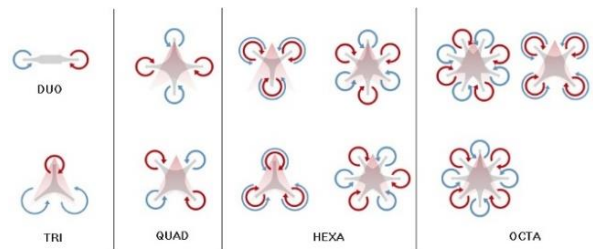
۲ کاربردهای و چالش‌های حال و آینده مولتی روتورها

علاقه تولیدکنندگان و سرمایه‌گذاران به این بخش و نیاز به سیستم‌های خودمختار در بسیاری از مأموریت‌ها و ایجاد نقش‌های جدید برای مولتی روتورها در دهه اخیر، باعث شده بازار کاربرد غیرنظامی این پرنده‌ها بسیار

۱ مقدمه

اصطلاح "مولتی روتور" به دسته‌ای از وسایل نقلیه هوایی بدون سرنشین یا پهپادها اطلاق می‌شود که برای رسیدن به پرواز کنترل شده بر چیدمان مناسبی از روتورها یا ملخ‌های متعدد متکی هستند. مولتی روتورها با داشتن پیکربندی بیش از دو روتور مشخص می‌شوند که معمولاً به صورت متقارن با چهار، شش یا هشت روتور سازماندهی می‌شوند. هر روتور به یک موتور مستقل متصل است، و رانش جمعی ایجاد شده توسط این روتورها، مولتی روتور را قادر می‌سازد تا برخاست را انجام دهد و همچنین در جهات مختلف مانور حرکتی دهد.

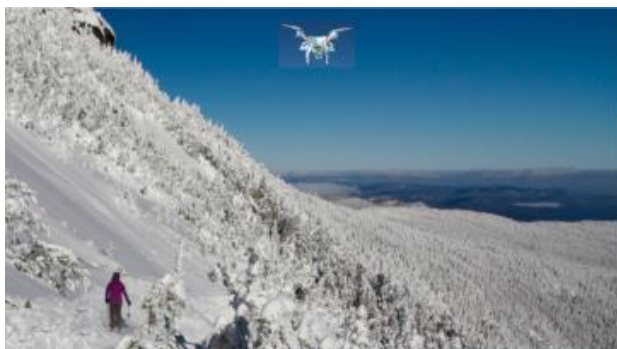
در میان پیکربندی‌های مختلف مولتی روتورها قابل مشاهده در شکل، کوادکوپترها با چهار روتور و هگزاکوپترها با شش روتور رایج‌ترین هستند. اوکتاکوپترها که مجهز به هشت روتور هستند، در کاربردهای خاصی که مستلزم افزایش ظرفیت محموله یا افزایش پایداری هستند، استفاده می‌شوند. با تعدیل سرعت و جهت چرخش روتورهای منفرد، مولتی روتورها می‌توانند دقیقاً حرکات خود را از جمله صعود، فرود، شناور شدن و اجرای مانورهای چابک را کنترل کنند.



شکل ۱- پیکربندی‌های مختلف مولتی روتورها

مولتی روتورها را به علت سهولت استقرار، هزینه نگهداری کم، تحرک و توانایی هاور کردن (شناوری) می‌توان در بسیاری از کاربردهای غیرنظامی و نظامی استفاده نمود. این دسته از پرنده‌های بدون سرنشین (UAV) در کاربردهای متعارفی که دیگر پهپادها نیز ممکن است استفاده شوند، مانند نظارت لحظه‌ای ترافیک، ارائه پوشش شبکه بی‌سیم، سنجش از راه دور، جستجو و نجات، تحویل مرسولات، امنیت و شناسایی، کشاورزی دقیق، بازرسی زیرساخت‌ها، شناسایی و حمله مورد استفاده قرار می‌گیرند؛ ولی باتوجه به ریسک و هزینه کمتر اقبال بیشتری دارند. در مقالات مروری این حوزه، بیشتر به صورت کلی به کاربرد پهپادها پرداخته شده که فاقد دسته‌بندی خاص پهپادی است و بیشتر آن‌ها را بر اساس وزن یا شیوه پرواز آن‌ها دسته‌بندی کرده‌اند، مانند پهپادهای بال ثابت و پهپادهای باقابلیت نشست و برخاست

1. Internet of Things (IoT)



شکل ۲- عملیات جستجو و نجات با یک عامل

در سیستم‌های چندعاملی، در قدم اول یک مولتی روتور وارد محیط حادثه شده و اطلاعات موردنیاز مانند تصاویر و اطلاعات سونار^۲ را از حسگر خود دریافت می‌کند و تلاش می‌کند موقعیت افراد حادثه‌دیده یا گم شده را پیدا کند. همچنین یک نقشه دقیق از عوارض محیطی و موانع ایجاد می‌نماید. در قدم دوم تیم هدایت بر اساس داده‌های مولتی روتور اول خط سیر هدایت مناسب و بهینه برای تک‌تک اعضای تیم دوم را آماده می‌نماید و تیم شناسایی چندعاملی وارد منطقه حادثه می‌گردد. هر مولتی روتور مسیر از پیش تعیین شده خود را می‌پیماید و به بررسی و پوییدن محیط می‌پردازد تا بتواند مصدومان را پیدا کرده و شناسایی کند. در قدم بعدی مولتی روتورها می‌توانند مانند یک شبکه در نقاط تعیین شده که حادثه‌دیده‌ها حضور دارند شناور شوند و یک شبکه را برای ایجاد پوشش شبکه بی‌سیم و ارتباطی تشکیل دهند و دیگر مولتی روتورها نیز نقش تقویت کننده این شبکه را اجرا نمایند. تعدادی دیگر نیز باتوجه به توانایی حمل تجهیزات، تجهیزات امداد موردنیاز تیم امداد یا مواد خوراکی را به محل‌های موردنیاز انتقال دهند [۷]. محققان روش دیگری مانند [۸] پژوهشگران از دو سیستم خودمختار به صورت موازی یکی شامل تعدادی عامل مولتی کوپتر برای شناسایی مصدومان و تعدادی عامل خودمختار به صورت قابق برای نجات مصدومان در دریا در نظر گرفته شده‌است.

باتوجه به مساحت کشور ایران و محدودیت نیروهای امدادی در زمینه تجهیزات هوایی امدادی این نوع مولتی روتورها می‌توانند کاربردهای زیادی در نیروهای هلال‌احمر داشته باشند. اما متأسفانه این سازمان هنوز به صورت گسترده مولتی روتورها را به خدمت نگرفته است و استفاده از این نوع پرنده در نیروهای امدادی ایران تنها به صورت محدود و با استفاده از مولتی روتورهای با کنترل از راه دور می‌باشد.

گسترده شود. راحتی استفاده از این سیستم‌ها و کاهش تلفات انسانی در مأموریت‌های خطرناک نجات یا افزایش دقت و سرعت در تحویل مرسولات، بازرسی زیرساخت‌ها و نظارت سبب شده این پرنده‌ها به یک موضوع جذاب برای محققین و فعالان این حوزه تبدیل شود.

۱.۲ جستجو و نجات

در زمان حوادث غیرمترقبه مانند سیل، زلزله، طوفان یا حوادثی با منشأ انسانی مانند حملات تروریستی، آتش‌سوزی و... احتمال اینکه زیرساخت‌های حیاتی مانند تأسیسات برق و گاز، سیستم‌های مخابراتی و راه‌های ارتباطی به صورت کامل یا جزئی صدمه ببینند وجود دارد. در این زمان مهم‌ترین عامل نجات بازماندگان سرعت عمل، ایجاد ارتباط و پوشش حداکثری عملیات نجات است. در بسیاری از موقعیت‌های ذکر شده دسترسی بی‌خطر به محیط برای انسان امکان‌پذیر نمی‌باشد. مولتی روتورها می‌توانند به راحتی و بدون خطر به محیط حادثه وارد شوند و اطلاعات مفیدی از وجود مصدومین، علائم حیاتی، مکان افراد، تهدیدات و... فراهم کنند. همان‌طور که اشاره شد یکی دیگر از مشکلات به وجود آمدن در زمان حوادث مختل شدن ارتباطات است. در این زمان پهپادها و مولتی روتورهای که توانایی ارائه پوشش شبکه بی‌سیم را دارند می‌توانند به ارتباط بازماندگان و تیم‌های امدادی کمک کنند [۱].

گروه‌های جستجو و نجات^۱ (SAR) سنتی بیشتر بر پایه استفاده از هلیکوپتر و هواپیما کار می‌کنند. این گروه‌ها نیاز به تعدادی هواپیما و هلیکوپترهای مخصوص عملیات امداد و نجات دارند که هزینه زیادی به سیستم‌های دولتی وارد می‌کند و بسیاری از کشورها توانایی استفاده و به خدمت‌گیری این سیستم‌ها را برای نیروهای امداد و نجات خود ندارند. یکی دیگر از مواردی که ایجاد و استفاده از گروه‌های امداد و نجات هوا پایه را محدود کرده است، نیاز به آموزش زیاد کادر پروازی و کادر درمانی در این زمینه است. اما استفاده از پهپادها و مولتی روتورها می‌تواند این خلأ بزرگ در زمینه هزینه بالا و نیاز به آموزش بالا را رفع نماید. عملیات جستجو و نجات پهپادی به دو شیوه تک پهپاد و چند پهپادی صورت می‌گیرد. مدل تک عاملی آن را می‌توانید در شکل ۲ مشاهده نمایید. در این روش یک مولتی روتور مجهز به حسگر جستجوی محیطی، دوربین یا دوربین حرارتی به دنبال بازماندگان و مصدومین می‌گردد و به صورت لحظه‌ای تصاویر به مرکز فرماندهی نجات ارسال و سپس بعد از شناسایی و دریافت اطلاعات در مورد راه‌های ارتباطی و موقعیت‌های موردنیاز تیم امداد زمینی به منطقه موردنظر ارسال می‌شود.

2. Sonar

1. Search and Rescue

روتورهای کوچک را به راحتی تغییر دهد [۱۵]. برای فائق آمدن می‌توان از روش‌های تشخیص خرابی و مقابله با نویز استفاده نمود [۱۶].

(۳) محدودیت‌های انرژی: بر اساس مأموریت تعریف شده برای مولتی روتورهای جستجو و نجات این پرنده‌ها باید از حسگرهای زیادی مانند حسگرهای گرمایی، تصویربرداری و محیطی استفاده کننده و با توجه استفاده مولتی روتورها از باتری توسعه دهندگان و سازندگان باید این تصمیم سرنوشت‌ساز را بگیرند که آنالیز تصاویر و داده‌های دریافتی از حسگرهای هر پرنده باید بر روی خود پرنده و کامپیوتر داخلی آن اجرا شود یا به یک واحد دیگر منتقل شود و این تصمیم چقدر بر مصرف انرژی پرنده تأثیر خواهد گذاشت [۲] و [۱۷].

۳.۱.۲ اقدامات قابل اجرا در آینده

مولتی روتورهای عملیات جستجو و نجات می‌توانند از تکنیک‌های پردازش تصویر هم‌زمان بهره ببرند تا بتوانند اشیاء و اهداف موردنظر خود را به صورت خودمختار انتخاب کنند. این تکنیک‌ها می‌توانند در سیستم‌های تک عاملی و چندعاملی مورد استفاده قرار گیرند و در مرحله بعدی تصاویر را به موقعیت‌های آن‌ها برچسب جغرافیایی نمایند تا اهداف به راحتی برای عوامل دیگر قابل شناسایی باشند [۱۸]. استفاده از یادگیری ماشین: تکنیک‌های یادگیری ماشین می‌توانند بر روی تصاویری که توسط مولتی روتور ضبط می‌شوند اجرا گردند تکنیک‌هایی مانند CNN و SVM می‌توانند در یافتن افراد گم شده کارا باشد [۱۹].

برای تحقیقات در آینده نیاز به زمینه‌هایی مانند الگوریتم‌های تصمیم‌گیری و همجوشی داده‌ها است. الگوریتم‌هایی که بتوانند نتایج دریافتی از چند حسگر را با هم ترکیب کنند به عنوان مثال ترکیب موقعیت‌یابی GPS با نتایج حسگر واحد دیده‌بان زیر قرمز^۱ و حسگر دوربین‌های حرارتی تا سیستم بتواند تصمیم‌های دقیق‌تر و بهتری بگیرد [۲۰]. با اینکه تا به حال الگوریتم‌های یادگیری ماشین توانایی خود را در مولتی روتورها و دیگر انواع پهپادها ثابت نموده‌اند؛ اما جای کار زیادی در زمینه یادگیری عمیق برای این سیستم‌ها وجود دارد هرچند که در حال حاضر به علت سخت‌افزار محدود و میزان مصرف انرژی این مورد با اجرا فاصله زیادی دارد. مورد دیگر طراحی و اجرای الگوریتم‌های پردازشی هم‌زمان برای سیستم‌های چندعاملی با چند مولتی روتور است که بتوانند هم زمان تصاویر دریافتی را در کنار هم قرار دهند و آن را پردازش نمایند.

۲.۱.۲ موارد و مزایای استفاده از مولتی روتور در عملیات جستجو و نجات

(۱) تصویربرداری با کیفیت از محل حادثه و فیلم‌برداری از محیط‌های موردنظر و اهداف در منطقه حادثه، این تصویربرداری می‌تواند برای شناسایی محل حادثه‌دیده‌ها یا برآورد خسارت به محل و ارزیابی خسارت وارد به زیرساخت‌ها باشد [۹].

(۲) عملیات نجات و جستجو می‌تواند به صورت مستقل، دقیق و بدون ایجاد خطرات اضافی انجام شود [۱۰]. در مرجع [۱۱] یک مولتی روتور سبک با GPS طراحی گردیده که کمک می‌کند افراد گم شده در بهمن پیدا شوند. در مرجع [۱۲] یک مولتی روتور مخصوص عملیات جستجو و نجات در بهمن و آب‌وهوای کوهستانی طراحی شده که می‌توان بازماندگان را شناسایی کند.

(۳) تحویل دارو، غذا و آب آشامیدنی به آسیب‌دیدگان و تحویل تجهیزات به کادر امدادی. هرچند یکی از مشکلات بزرگ مولتی روتورها ظرفیت محدود حمل بار آن‌ها است. اما در مرجع [۱۳] نویسندگان اقدام به طراحی و ساخت مولتی روتوری برای عملیات جستجو و نجات پرداخته‌اند که توانایی حمل ۱۰ تا ۱۵ کیلوگرم بار را دارد که می‌تواند در شرایط بحرانی نجات‌بخش باشد.

(۴) تبدیل به کانون و ارائه‌دهنده پوشش ارتباطی و شبکه بی‌سیم، مولتی روتورها با توجه به امکان شناسایی^۱ می‌توانند یک منطقه وسیع را تحت پوشش خود قرار دهند و با اتصال چند مولتی روتور و ایجاد یک شبکه متصل می‌توان منطقه وسیعی را تحت پوشش قرارداد.

۲.۱.۲ چالش‌ها

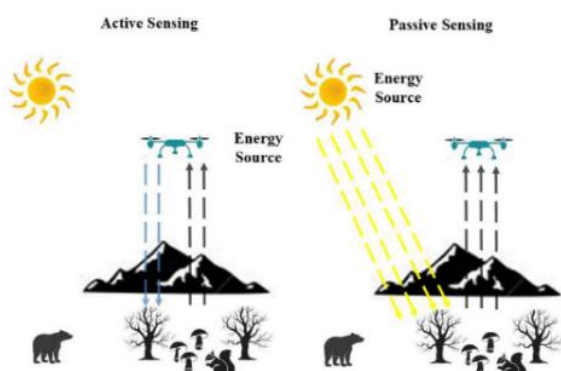
(۱) منع قانونی: در آمریکا اداره هوانوردی فدرال^۲ هنوز اجازه استفاده تجاری از دسته پرنده‌های بدون سرنشین یا سیستم‌های چندعاملی خودمختار^۳ را نمی‌دهد [۱۴]. در ایران نیز به نظر می‌آید سازمان هواپیمایی ایران هنوز دستورالعملی برای سیستم‌های چندعاملی پرنده تدوین نکرده است. اما می‌توان با تغییر قوانین این سیستم‌ها را در نقش سامانه جستجو و نجات استفاده نمود.

(۲) آب‌وهوا: در حوادث غیرمترقبه همانند طوفان و سونامی وضعیت آب‌وهوا به گونه‌ای غیر منظره و شدید هر لحظه می‌تواند تغییر کند و بادهای شدید می‌توانند مسیر مولتی

3. Autonomous
4. FLIR

1. Hover
2. FAA

این سیستم‌ها شامل حسگرهای مانند شتاب‌سنج، پرتوسنج فراطیفی، رادیومتر تصویربرداری، ژرفاسنج مادون قرمز، طیف‌سنج و طیف‌سنج رادیومتر هستند. شماتیک این دو سیستم در شکل ۳ مشخص است. مولتی روتورهایمانند مدل همراه با حسگر لیدار در این مأموریت‌ها به صورت گسترده استفاده می‌شوند. مأموریت‌هایمانند ارزیابی لحظه‌ای، نقشه‌برداری و نظارت بر فعالیت‌های محیطی، این مأموریت‌ها نیاز به تنظیم الگوریتم‌هایی دارند که بتواند نقطه مقابل‌هایی در مکان مأموریت تعریف نماید و بعد از آن تصاویر دریافتی و اطلاعات جمع شده در این فرایند را بعد از گردآوری کردن به یک مدل جامع از محیط تحت بررسی درآورد. این اطلاعات باید شامل مدل سطح زمین به صورت دقیق از جمله ارتفاعات، اجسام موجود بر سطح مانند درختان، ساختمان‌ها و اطلاعاتی دیگر مانند اطلاعات ابرها و اطلاعات اتمسفری باشد [۲۴].



شکل ۳- سیستم سنجش از راه دور فعال و غیرفعال

اگرچه مأموریت‌های در زمینه سنجش از راه دور بسیار متنوع و متفاوت هستند و هر استفاده نیاز به یک مولتی روتور و پهپاد مناسب با مأموریت دارد، اما قدم اول تمامی این مأموریت‌ها با برنامه‌ریزی مسیر پرواز شروع می‌گردد. این قدم به موارد زیادی بستگی دارد؛ مانند وجود تصاویر ماهواره‌ای و هوایی از پیش تهیه شده این موارد می‌تواند به تعیین ویژگی‌های بعدی مأموریت پروازی مانند ارتفاع مناسب پرواز و مسیرهای موردنیاز منجر شود. سپس الگوریتم برنامه‌ریزی پرواز یک راه بهینه برای دریافت اطلاعات موردنیاز را پیدا می‌کند و این عمل تا زمان به دست آمدن اطلاعات موردنیاز تیم تحقیقاتی انجام می‌گیرد [۲۵].

باتوجه به وسعت جغرافیایی ایران و محدود بودن ماهواره سنجش از راه دور ایرانی به تنها یک ماهواره به نام خیام که از سال ۱۴۰۱ در مدار قرار گرفته، مولتی روتورهای سنجش از راه دور می‌توانند کمک بزرگی در این مأموریت مهم باشند. در این زمینه مولتی روتور ایرانی پیشگر استورم ۲ ویژن نمونه خوبی از مولتی

همان‌طور که اشاره شد در ایران نیروهای امدادی هنوز به صورت گسترده به پهپادهای مولتی روتور جستجو و نجات مجهز نشده‌اند و مولتی روتورهای مورد استفاده نیز از نمونه‌های مبتنی بر کنترل از راه دور با مداومت پروازی کم می‌باشند. به عنوان اقدام قابل اجرا می‌توان به تحقیق و توسعه مولتی روتور جستجو نجات با مداومت پرواز بالا و به صورت خودمختار برای کمک به نیروهای امدادی مانند هلال احمر اشاره نمود.

۲.۲ سنجش از راه دور

در این نوع خاص از مأموریت که نیاز به جمع‌آوری انواع داده‌ها از حسگرهای متنوع است، مولتی روتورها می‌توانند در نقش جمع‌آوری کننده داده از حسگرهای زمینی عمل نمایند [۲۱]. همچنین خود مولتی روتورها می‌توانند به عنوان یک کانون به حسگرهای متنوع مورد نیاز مجهز شوند تا بتوانند اطلاعات مورد نیاز محیطی را دریافت و مخابره نمایند [۲۲]. تاکنون مجموعه داده‌های زیادی به این شیوه توسط مولتی روتورها برای تیم‌های تحقیقاتی در زمینه‌هایی مانند نظارت بر محصول، برآورد عملکرد، پایش خشکسالی، پایش کیفیت آب، شناسایی گونه‌های گیاهی، تشخیص بیماری‌های موجود در میان یک گونه جانوری و غیره جمع‌آوری شده است [۲۳].

۱.۲.۲ سیستم سنجش از راه دور

دو گونه کلی سیستم سنجش از راه دور وجود دارد: سیستم سنجش از راه دور فعال و سیستم سنج از راه دور غیرفعال [۲۳]. در سیستم‌های فعال حسگرها خودشان امواج رادیویی و تابش را به طور مستقیم ایجاد می‌نمایند و به هدف می‌تابانند تا بتوانند اطلاعات را بازتاب از هدف دریافت و بررسی نمایند این نوع حسگرها که بیشتر از طول موج‌های ماکروویو استفاده می‌نمایند به راحتی می‌توانند در هر نوع آب‌وهوایی حتی در خارج از جو و اتمسفر نیز اطلاعات خود را دریافت نمایند که این بخش در زمینه مولتی روتورها کارایی ندارد و فقط همان بحث دریافت اطلاعات در هر شرایط جوی برای توجیه‌پذیر و جذاب است. قالب حسگرهای موجود در سیستم‌های فعال شامل ارتفاع‌سنج لیزری، لیدار، رادار، ابزار اندازه‌گیری محدوده، پراکندگی سنج و ژرفاسنج مادون قرمز است. در سیستم‌های سنجش از راه دور غیرفعال نحوه کار سیستم تماماً برعکس سیستم‌های فعال می‌باشد. حسگرهای این سیستم‌ها اطلاعات خود را از تشعشعات طبیعی ساطع شده از سطوح اجسام و گیاهان دریافت می‌کنند. اکثریت حسگرهای غیرفعال در محدوده مرئی، مادون قرمز، مادون قرمز حرارتی، مایکروویو و الکترومغناطیس فعالیت می‌نمایند.

ترکیب سنجش از راه دور و پردازش ابر^۴ : استفاده از نقشه‌های دیجیتال در مدیریت ریسک و مصورسازی داده‌ها و فرایند تصمیم‌گیری نقش بسزایی ایفا می‌کند و تبدیل به یک استاندارد برای شرکت‌های بیمه شده است. شرکت‌های بیمه از این تکنولوژی برای ایجاد شاخص پوشش گیاهی نرمال شده^۵ برای بررسی خسارت بلایای طبیعی به محصولات کشاورزی استفاده می‌کنند. ترکیب تکنولوژی شناسایی از راه دور و پردازش ابری به این شرکت‌ها اجازه می‌دهد به صورت لحظه به اطلاعات در سراسر محدوده تحت پوشش خود دسترسی داشته باشند [۲۸].

تعدادی از موارد کمتر کار شده در این مأموریت تثبیت دوربین در هنگام پرواز [۲۵]، باتری و زمان شارژ، مدل‌سازی دیجیتالی سطح [۲۹]، پردازش تصویر در همپوشانی تصاویر ثبت شده و تغییر ارتفاع برای عدم برخورد به موانع می‌باشد. در پژوهش [۳۰] نویسندگان به روشی برای تلفیق یادگیری تقویتی با سیستم چندعاملی برای غلبه بر همپوشانی مرزهای تصاویر و شناسایی مناطق ناشناخته دست یافته‌اند.

۳.۲ نظارت و بازرسی از ساختمان‌ها و زیرساخت

در مرجع [۳۱-۳۲] نویسندگان از این نوع مولتی روتور برای بررسی خطوط انتقال برق فشارقوی استفاده نموده‌اند که در این مأموریت مولتی روتور به صورت خودمختار دکل‌های انتقال برق و مسیرهای از پیش تعیین شده را می‌پیماید و مشکلات موجود را شناسایی و به مرکز کنترل اطلاع دهد. در مرجع [۳۳] نیز نویسنده یک پهپاد کاملاً خودکار را طراحی کرده که می‌تواند در مسیرهای خطوط انتقال برق گشت‌زنی نماید و فواصل درختان با سیم‌های برق را محاسبه نماید و در صورت نزدیک شدن بیش از حد درختان به این سیم‌ها به مرکز کنترل اطلاع دهد. همچنین این پهپاد با تجهیز به دوربین مادون قرمز حرارتی می‌تواند رسانایی سیستم‌ها را مشاهده نماید و مشکلات موجود در خط انتقال را به مرکز اعلام نماید. در مرجع [۳۴] نیز نویسنده یک پهپاد کوچک را پیشنهاد می‌دهد که با استفاده از حسگر کنترل گاز می‌تواند میزان وجود هوا و گاز و نشتی گاز را محاسبه نماید. در [۳۵] نویسندگان ایده پهپادهای مولتی روتور و زمینی هیبرید را برای بازرسی معادن پیشنهاد می‌دهند. در بازرسی از پل‌ها نیز که یکی از شریان‌های حیاتی زیرساختی کشور می‌باشند می‌توان از مولتی روتورها استفاده نمود [۶۲].

روتور سنجش از راه دور با ویژگی‌های منحصربه‌فرد مانند حمل دوربین‌های دید در شب، سنسورهای حرارتی و مداومت پروازی ۵۰ دقیقه‌ای از معدود مولتی روتورهای سنجش از راه دور توسعه یافته در ایران می‌باشد.

۲.۲.۲ چالش‌ها و اقدامات قابل اجرا در آینده

شرایط محیطی متخاصم: مولتی روتورهای سنجش از راه دور در بعضی از مأموریت‌ها در شرایط جوی نامناسب مانند طوفان یا ابرهای اسیدی شکل گرفته توسط آتشفشان‌ها به مأموریت می‌پردازند که برای تجهیزات آن‌ها یا خود پرنده مضر و آسیب‌زا می‌باشد [۲۶]. به‌عنوان مثال نویسندگان مرجع [۲۷] مولتی روتور سنجش از راه دور ساخته شده‌اش را برای انجام مأموریت در شرایط قطبی با دمای منفی ۲۰ درجه استفاده می‌کنند. در این شرایط باید اویونیک پرنده به صورت کامل ایزوله شود، سرووها باید به فناوری ضد یخ مجهز شوند، تیغه‌های موتور نیز باید مجهز به سیستم گرمایی و ضد یخ باشند.

مشکلات دوربین: محدودیت‌های رادیومتری و هندسی

تحلیل شده توسط نسل کنونی دوربین‌ها دیجیتال به مولتی روتورهای سنجش از راه دور بسیار است. عمده این مشکلات نیز به علت این مورد است که این دوربین‌ها برای بازار عمومی طراحی شده‌اند و دوربین‌های بهتر نیز بسیار حجیم و بزرگ هستند و مولتی روتورها توانایی حمل آن‌ها را ندارند.

مشکل روشنایی: در یک روز آفتابی و بدون ابر تصاویر

به خوبی ثبت و توسط الگوریتم کنار هم قرار می‌گیرند؛ اما در روزهایی که شرایط جوی مناسب نیست و این مورد به یک چالش بزرگ تبدیل می‌شود حتی سایه ابرهایی که به سرعت حرکت می‌کند بر روی تصاویر می‌تواند الگوریتم‌های شناسایی تصویر را به اشتباه بیندازد [۲۵].

یادگیری ماشین: یادگیری ماشین در مأموریت شناسایی از

راه دور از همان مرحله اول و جمع‌آوری داده‌ها شروع می‌شود و در قدم بعدی به پاک‌سازی داده‌ها و دسته‌بندی و قابل مدیریت کردن داده‌ها می‌رسد این مرحله می‌تواند شامل کم‌کردن متغیرهای موردنظر برای گرفتن نتایج بهتر هم باشد. در زمینه سنجش از راه دور سه الگوریتم مورد استفاده وجود دارد: (۱) جنگل تصادفی^۱ (۲) ماشین بردار تکیه‌گاه^۲ (۳) سیستم عصبی مرکزی^۳ این الگوریتم‌ها بر اساس شکل مسئله انتخاب می‌شوند.

4. Cloud Computing
5. NDVI

1. Random Forest
2. Support Vector Machine
3. Artificial Neural Network

بتوانند الگوریتم یادگیری عمیقی را توسعه دهند تا با استفاده از تصاویر اچ دی بتوانند مشکلات این نوع دکل‌ها را شناسایی نمایند. این پروژه توسط مولتی روتور فالدون اینتل به انجام رسید. (۳) حوزه بررسی داخل زیرساخت‌های عظیم - دولت کانادا - از ۱۹۹۴ این دولت تمامی زیرساخت‌ها مانند مخازن ذخیره‌سازی و زیرساخت‌های غرب کشور خود را توسط مولتی روتور موریک و با استفاده از داده‌های موجود این سازه‌ها در نرم‌افزارهای سه‌بعدی بررسی می‌نماید.

(۴) حوزه بررسی در شرایط سخت - شرکت بلواستریم - بررسی زیرساخت‌های ساحلی و اقیانوسی: این شرکت ارائه‌دهنده خدمات بررسی به شرکت‌های نفتی و گازی مستقر در مناطق با شرایط سخت مانند اقیانوس یا مناطق ساحلی می‌باشد.

۲.۳.۲ چالش‌ها و اقدامات قابل اجرا در آینده

چالش‌های موجود در این بخش بیشتر در زمینه محدودیت‌های پرواز مولتی روتورها و محدودیت‌های حمل بار این پرنده‌ها می‌باشد. چالش بزرگ دیگر حل موضوع پرواز خودمختار این پرنده‌گان داخل زیرساخت‌ها می‌باشد؛ زیرا در داخل زیرساخت‌ها دسترسی به GPS وجود ندارد. استفاده از یادگیری ماشین و توسعه الگوریتم‌هایی که بتواند به سرعت و دقت بیشتری ایرادات را پیدا کند و به اطلاع مراجع برساند یکی از مواردی است که هنوز زیاد به آن پرداخته نشده است. استفاده از یادگیری عمیق هم می‌تواند نور تازه‌ای به داده‌های موجود بتابد؛ مانند استفاده AT&T از این تکنولوژی مورد دیگر می‌تواند استفاده گسترده از پردازش تصویر باشد. همان‌طور که اشاره شد بیشتر استفاده این سیستم‌ها از دوربین‌های آن‌ها برای تصویربرداری و شناسایی مشکلات است و این بخش می‌تواند با توسعه الگوریتم‌های پردازش تصویر اطلاعات بیشتری برای کار بر روی آن استخراج نماید.

۴.۲ کشاورزی دقیق

استفاده پهپادها در کشاورزی را می‌توان برای مدیریت و نظارت بر محصولات [۳۶]، تشخیص علف‌های هرز [۳۷]، برنامه ریز آبیاری [۳۸]، تشخیص آفات و بیماری [۳۹]، سم‌پاشی و آفت‌کشی [۳۶]، جمع‌آوری داده از حسگرهای محیطی نصب شده در مزرعه (رطوبت، خواص خاک و ...) [۴۰] و کنترل گله‌های حیوانات مانند گاوها و گوسفندان [۴۱] استفاده نمود. استفاده از مولتی روتورها در امر کشاورزی می‌تواند به صرفه‌جویی در هزینه و زمان و افزایش بهره‌وری کمک شایانی نماید. علاوه بر این مورد پایش اطلاعات موجود می‌تواند جلوی ضررهای احتمالی مانند حمله آفات و دیگر موارد مانند سم‌پاشی نشدن بخشی از زمین را بگیرد و کشاورزان را در این مسیر یاری نماید [۶۵].

در جدول ۱ تعدادی از مولتی روتورها و دیگر پهپادهای مورد استفاده در این نقش را می‌توانید مشاهده کنید. در این جدول مولتی روتور استورم ویژن یک پهپاد ایرانی با قابلیت نظارت و بازرسی می‌باشد.

جدول ۱- تعدادی از پهپادهای بازرسی

UAV type	Applications	Payload/Altitude/Endurance	Sensor Type
AR.Drone French Company Parrot	construction sites	No/50m/12min	Onboard HD camera, Wi-Fi connection
A Multi Rotor UAV	crack detection	100g/LAP/20min	Color imaging sensors
MikroKopter L4-ME Quadcopter	GSM towers	Up to 500g/Up to 247m/13-20min	Laser scanner
Quadrotor Helicopter UAV	Power lines	Less than 1kg/LAP/Less than one hour	Color and TIR cameras, GPS, IMU
Fixed Wing Aircraft UAV	Sketchy power lines	Less than 4kg/Up to 500m/Up to 25min(50km)	HD ultra-wide angle video camera
Quadrotor UAV	power lines	Less than 6kg/ Up to 200m/Up to 25min(10km)	TIR cameras, GPS
Quadrotor(VTOL) sUAV	gas leaks	NA/LAP/30-50mins	Gs controller unit, GPS
Storm Vision II	power lines, gas leaks	8kg/45min	wide angle video camera, night vision

۱.۳.۲ تعدادی از استقرارهای سیستم بازرسی و نظارت به صورت پهپادی

در این بخش تعدادی از استفاده‌های گسترده از مولتی روتور و پهپادها را در این نقش بررسی می‌کنیم.

(۱) حوزه نفت و گاز - شرکت PG&E - مساحت پروژه ۷۰ هزار مایل مربع: پهپادهای مورد استفاده پروژه را برای بررسی امن بودن و پیدا کردن نشتی گاز متان بررسی نمودند این مأموریت توسط مولتی روتور سایبرهاک انجام پذیرفت که تا کنون موفق به انجام ۵۰۰۰ پروژه موفق شده است.

(۲) حوزه بازرسی دکل مخابراتی - شرکت AT&T - این شرکت دارای ۶۵۰۰۰ دکل مخابراتی است: این شرکت برای انجام این پروژه با دیگر بزرگان این صنعت همچون کوالکام و اینتل همکاری نمود تا

۱) برنامه‌ریزی آبیاری: چهار مورد برای بررسی شرایط زمین برای برنامه‌ریزی آبیاری وجود دارد که باید به‌دقت بررسی شود: ۱) میزان آب موجود در خاک (۲) آب موردنیاز برای هر محصول (۳) میزان بارندگی در فصل (۴) بهره‌وری سیستم آبیاری [۴۳]

۲) تشخیص بیماری‌های گیاهان: در ایالات متحده آمریکا تخمین زده می‌شود که سالانه ۳۳ میلیارد دلار به علت بیماری‌های گیاهان محصول از بین می‌رود [۴۴]. تصور کنید با استفاده از پهپادهای سنجش از راه دور چقدر می‌توان این میزان را کاهش داد. می‌دانیم که با تصویربرداری و بررسی تصاویر حسگرهای تصویربرداری گرمایی می‌توان قارچ‌های خاکی را در مراحل اولیه رشد تشخیص داد و آن‌ها را از بین برد [۴۵].

۳) نقشه‌برداری بافت خاک: برخی خواص خاک می‌تواند نشانه کیفیت خاک باشد. کیفیت خاک می‌تواند بر روی بهره‌وری محصول تأثیرات ویژه‌ای داشته باشد؛ بنابراین می‌توان با مقایسه تصاویر حرارتی مولتی روتور در موقعیت‌های متفاوت زمین ویژگی‌های خاک مانند بافت آن و درجه حرارت خاک در نقاط مختلف را مقایسه کرد [۴۶].

۴) پوشش گیاهی و نقشه خاک‌ورزی: پوشش گیاهی و حتی وجود باقی‌مانده محصولات کشاورزی بر روی زمین برای زمین یک پوشش حفاظتی در مقابل بادو باران ایجاد می‌نماید در صورتی که این پوشش وجود نداشته باشد باید با استفاده از بقایای محصولات کشاورزی این سپر محافظتی ایجاد گردد. برای این منظور می‌توان از تصاویر هوایی استفاده نمود که توسط مولتی روتورها ثبت می‌شوند در مرجع [۴۷] ثابت شده که این تصاویر ۷۷ درصد از تصاویر مادون قرمز ماهواره‌ای دید بهتری می‌دهند.

۵) نقشه‌برداری رشد محصول: مولتی روتورها می‌توانند چشم و گوش کشاورزان در زمین‌های بزرگ برای بررسی رشد محصول و تخمین زمان برداشت محصول باشند. برای این کاربرد پهپاد مولتی روتور پلیکان ۱ تولید شده در ایران توانایی نقشه‌برداری رشد محصول را دارا می‌باشد.

۲.۴.۲ چالش‌ها و اقدامات قابل اجرا در آینده

چالش‌های این زمینه در مواردی مانند کیفیت پایین حسگرهای تصویربرداری گرمایی هستند؛ زیرا حسگرهای باکیفیت بالاتر دارای قیمت ۲ هزار دلار تا ۵۰ هزار دلار هستند. برای همین حسگرهایی که در مولتی روتورهای فعلی استفاده می‌شوند دارای وضوح ۶۴۰ در ۴۸۰ پیکسل می‌باشند. این تصاویر گرمایی می‌توانند به دلایل جوی یا بازخورد و رفلکس زمین کیفیت مطلوب خود را از دست دهند. حسگرهای بررسی دمای محیط هم می‌توانند در استیج‌های مختلف

استفاده از مولتی روتورها در مقابل هواپیماهای کشاورزی یا پهپادهای بال ثابت کشاورزی دارای دقت بیشتر و هزینه کمتری می‌باشد. هزینه در زمین‌های کوچک بیشتر به چشم می‌آید و دقت آن در زمین‌های بزرگ بهتر نمایان می‌شود. همچنین تصاویری که توسط مولتی روتورها ثبت می‌شود به علت اینکه می‌توان چند تصویر را به‌صورت ساده‌تری در کنار هم قرارداد و الگوریتم‌هایی توسعه داد که این تصاویر در موقعیت‌های دقیق‌تری نسبت به تصویربرداری با هواپیما در فاصله نزدیک‌تری ثبت شوند برتری بیشتری به دیگر پرنده‌ها دارد. این تصاویر می‌توانند برای شناسایی علف‌های هرز، بیماری‌ها و حتی پاسخ محصول به آبیاری مورد استفاده قرار گیرند. در جدول ۲ می‌توانید جزئیات بیشتری از مقایسه پهپادها با سیستم‌های ماهواره‌ای و هواپیماهای کشاورزی ببینید.

در بحث کشاورزی دقیق کارهای تحقیقاتی مانند پژوهش [۴۲] در مورد پهپادهای مولتی روتور هوشمند و خودمختار در ایران صورت گرفته است.

جدول ۲- مقایسه پهپاد کشاورزی و ماهواره و هواپیما کشاورزی

Issues	UAVs	Manned Aircraft	Satellite System
Cost	low	high	Very high
Endurance	Short-time	Long-time	All the times
Availability	When needed	Some times	All the times
Deployment Time	easy	Need runway	Complex
Covergae Area	small	large	Very large
Weather and working conditions	sensitive	Low sensitivy	Require clear sky for imaging
Payload	low	large	Large
Operational complexity	simple	simple	Very compicated
Application and usage	Carry small digital, thermal cameras & sensors	Spraying UAV system pesticide spraying	High resolution imgaes for specific-area

۱.۴.۲ استقرار سیستم کشاورزی دقیق به صورت پهپادی
استقرار مولتی روتورهای کشاورزی دقیق دارای مراحل است که آن‌ها را در زیر شرح می‌دهیم.

و تأیید مقصد موردنظر این امر می‌تواند با اتصال پرنده به شبکه بی‌سیم محل دریافت تأیید شود یا ماژول‌هایی در نقاط دریافت قرار گیرند که پرنده بتواند با بررسی آن‌ها صحت مقصد و تحویل را تأیید نماید. سیستم‌های چندعاملی متشکل از تعدادی مولتی‌روتور نیز با همکاری هم در محیط‌های ناشناخته به تحویل مرسولات بپردازند [۵۱] و بر اساس میزان محموله کنترل خود را تنظیم نمایند [۶۰].

۲.۵.۱ چالش‌ها

(۱) **قوانین مربوط:** به‌عنوان مثال از سال ۲۰۱۵ پرواز مولتی‌روتورهای تجاری در آمریکا ممنوع است و پرواز این پرنده‌ها منوط به رعایت قوانینی مانند پرواز فقط در ساعات روز است، سبب مولتی‌روتور باید توسط FAA تأیید شده باشد و مولتی‌روتور نمی‌تواند به‌صورت خودمختار پرواز کند؛ بلکه باید در دید خلبان به‌صورت دستی کنترل گردد. در ایران هم با توجه به وجود چند ارگان متفاوت قانون‌گذار، بعد از دو سال از معرفی مولتی‌روتور حامل مرسوله اداره پست، این ارگان در سال ۱۴۰۰ توانست مجوز پرواز را تنها در جزیره کیش اخذ نماید. اداره پست هنوز نتوانسته سرویس ارسال و دریافت مرسوله خود با پهباد را در دیگر نقاط کشور راه‌اندازی نماید.

(۲) **بیمه مسئولیت:** پرواز یک مولتی‌روتور با ارتفاع پایین و سرعت بالا به‌علاوه زمانی که تا ۲۵ کیلو بار هم حمل می‌کند می‌تواند خطرات زیادی برای انسان‌ها، محموله، وسایل و خانه‌ها ایجاد کند. این امر خود امری پیچیده و یک چالش بزرگ می‌باشد.

(۳) **سرقت:** سرقت در این زمینه فقط محدود به محموله نمی‌باشد و بلکه می‌تواند شامل خود مولتی‌روتور و اطلاعات آن نیز باشد ممکن است هکرها سعی نمایند به اطلاعات پرنده دست یابند یا از آن برای کارهای غیرقانونی استفاده نمایند.

(۴) **آب‌وهوا:** همانند هواپیماها، مولتی‌روتورها نیز نمی‌توانند در آب‌وهوای بسیار شدید به پرواز بپردازند این امر برای مولتی‌روتورها سخت‌تر نیز می‌باشد؛ چون محدودی آب‌وهوایی که می‌توانند در آن پرواز کنند محدودتر است و نمی‌توان سلامت محموله‌های ارسالی را در این شرایط به مولتی‌روتورها سپرد.

(۵) **ترافیک هوایی:** مراجع بدون وجود سازوکاری برای کنترل ترافیک هوایی این نوع پرنده‌ها اجازه فعالیت به هیچ ناوگان حمل‌ونقلی را نمی‌دهند برای این منظور آمازون دست به طراحی و ارائه نمونه‌ای از یک محدوده برای ترافیک هوایی زده که در شکل ۴ قابل مشاهده است.

رشد محصول دچار مشکل گردند به‌عنوان مثال در زمانی که گیاهان هنوز به‌صورت کامل رشد نکرده‌اند بازتاب نور خورشید می‌تواند حسگرهای ارزیابی دمای هوا پایه را دچار مشکل نماید. مشکل دیگر را می‌توان در شرایط بد آب‌وهوایی مشاهده کرد که مولتی‌روتورها به علت کوچک بودن نمی‌توانند در بادهای شدید به عملیات بپردازند. مشکل آخر را هم می‌توان در توانایی حمل وزن مولتی‌روتورها جستجو کرد که یکی از عوامل عدم توانایی حمل حسگرهای بهتر و باتری بزرگ‌تر برای انجام مأموریت در زمان طولانی‌تر می‌باشند.

توسعه و ارائه الگوریتم‌های یادگیری ماشین مانند مولتی‌روتورهایی که بتوانند به‌صورت لحظه‌ای اطلاعات را دریافت نمایند و اطلاعاتی مانند میزان رشد محصول و سلامتی آن به کشاورزان بدهند. الگوریتم‌های پردازش تصویری که بتوانند اطلاعات شاخص توده گیاهی vi را شناسایی و به اطلاع کشاورزان برسانند.

۲.۵.۲ ارسال و دریافت مرسولات

مولتی‌روتورها می‌توانند در نقش ارسال و دریافت بسیاری از مرسولات مورد استفاده قرار گیرند. نوع مرسوله فقط به مرسولات پستی محدود نمی‌باشد همان‌طور که در بخش جستجو و نجات هم بیان شد. مولتی‌روتورها می‌توانند خون، دارو و وسایل پزشکی را نیز به بیماران در نقاط دشوارگذار یا شهری برسانند [۴۸] و [۶۳] حتی مولتی‌روتورهای مجهز به دوربین و بلندگو می‌توانند با اتصال به یک پزشک به مردم عادی در کمک به حادثه‌دیده‌ها کمک نمایند. استفاده از پهبادها در کنترل بیماری‌های اپیدمیک مانند کووید-۱۹ در پژوهش [۶۱] بررسی شده است. هرچند با بروز شدن شیوه‌های ارسال و دریافت مرسولات تعداد بیشتری از شرکت‌ها به فکر استفاده از مولتی‌روتور برای ارسال و دریافت مرسولات رسیده‌اند حتی سوپرمارکت‌های کوچک [۴۹] و در سرتاسر دنیا سرویس‌های پستی سنتی دارند بیزینس مدل‌هایی بر اساس استفاده از این پرنده‌گان به‌عنوان بخشی از سیستم دریافت و توزیع خود می‌افتند [۵۰].

به‌عنوان مثال اداره پست ایران در سال ۱۳۹۸ از مولتی‌روتوری برای حمل مرسولات پستی معرفی نمود و این مولتی‌روتور هم‌اکنون تنها در جزیره کیش فعال می‌باشد و این پهباد قابلیت حمل باری با ابعاد ۴۰ در ۳۰ در ۲۰ سانتی‌متر و وزن ۴ کیلوگرم تا شعاع ۲ کیلومتر را دارد.

مولتی‌روتور مناسب برای این مأموریت حمل مرسولات نیاز به چند عنصر کلیدی دارد. یک سیستم موقعیت‌یابی GPS، یک پایه اتصال مرسوله و یک دریافت‌کننده و ماژول پردازش برای دریافت

علت تغییر پس‌زمینه تصویر به صورت سریع و عدم توان سیستم برای تطبیق با این سرعت می‌باشد [۵۴]. یک راه‌حل ساده برای این موضوع استفاده از رهگیری لیزری می‌باشد.

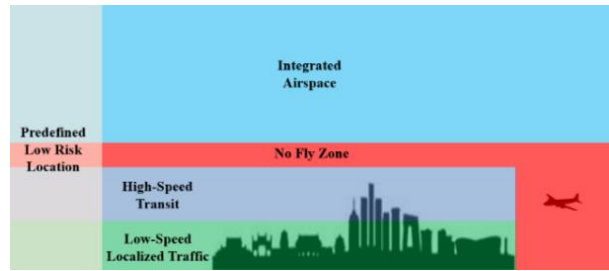
موارد اصلی استفاده از مولتی روتورها در این زمینه عبارت است از: ۱) نظارت امنیتی (۲) نظارت بر ترافیک (۳) بازرسی جاده‌ها (۴) خطوط ساحلی (۵) مرزها. این مولتی روتورها می‌توانند برای بررسی اولیه تصادفات و امداد رسانی سریع به مصدومان تصادفات مورد استفاده قرار گیرند. گشت‌های پلیس می‌توانند از مولتی روتور به‌عنوان چشم خود در آسمان استفاده کنند یا حتی مولتی روتورها جایگزین بخشی از مأموریت گشتی پلیس در ساعاتی مشخص باشند. در بخشی دیگر مولتی روتورها می‌توانند به‌عنوان گشت نامحسوس جاده‌ای برای تعقیب مظنونین و افرادی که رفتار پرخطر در جاده از خود نشان می‌دهند مورد استفاده قرار گیرند [۶۴]. از این مولتی روتورها می‌توان برای یک روش کم‌هزینه برای نقشه‌برداری سه‌بعدی نویز ترافیک شهری نیز استفاده نمود این امر با نصب میکروفون بر روی تعدادی مولتی روتور نظارتی ترافیک امکان‌پذیر است؛ مانند پژوهش انجام‌شده در این رابطه [۵۵].

۲.۶.۱ چالش‌ها و اقدامات قابل اجرا در آینده

یکی از چالش‌های بزرگ این نوع سیستم‌ها به‌خصوص مولتی روتورها به علت پاکت پروازی و گذر از روی امکان خصوصی و ارتفاع VFR مسائل نقض حریم شخصی و اطلاعات شهروندان است. همچنین به علت عدم وجود رمزنگاری بر روی تراشه‌های مورد استفاده در این پرنده‌ها هکرها و افراد سودجو می‌توانند به اطلاعات این پرنده‌ها از فاصله ۲ کیلومتری دسترسی داشته باشند [۵۳]. یکی دیگر از موارد اساسی توسعه الگوریتم‌های هماهنگی دقیق این نوع پهپادها برای موارد مورد استفاده است. ادغام داده‌های دریافتی از حسگرهای متفاوت و فشرده‌سازی خودکار تصاویر نیز از نیازهای این بخش می‌باشد.

۲.۷.۱ ارائه پوشش شبکه بی‌سیم

مولتی روتورها می‌توانند به‌عنوان یک کانون ارائه پوشش شبکه بی‌سیم در رمان‌هایی که شبکه تلفن همراه قطع شده است به کار آیند [۵۶] حتی در مناطقی نیز که این نوع پوشش ضعیف است می‌تواند در نقش بهبوددهنده پوشش عمل نمایند. یک راه دیگر استفاده از مولتی روتورهایی با تداوم پروازی بالا در حالت شناوری به‌عنوان دروازه ارتباطی شبکه با دیگر بخش‌های شبکه و ارتباط با زیرساخت است. در همین بخش می‌توان از مولتی روتورها به‌عنوان گره‌های ارتباطی یا نودهای ارتباطی در رمان‌هایی که ارتباط به شیوه دیگری قابل انجام نیست بهره برد.



شکل ۴- ترافیک هوایی مدنظر آمازون برای ارسال و دریافت مرسوله

۲.۵.۲ اقدامات قابل اجرا در آینده

با وجود یادگیری ماشین تعداد زیادی مولتی روتور می‌توانند بدون نگرانی از برخورد با یکدیگر و موانع موجود به پرواز درآیند این مسئله برای یک ناوگان بزرگ از این سیستم بسیار مؤثر و مهم است. کوالکام نشان داده است که در این زمینه قادر به انجام چه کارهایی است و توانایی ایجاد مسیرهای پرواز را به‌صورت پویا دارد. تمامی این پردازش‌ها در یک پردازنده ۱۲ گرمی این شرکت به‌صورت کامل انجام می‌گیرند. مورد بعدی توسعه سیستم‌های هدایت و ناوبری دقیق‌تر برای سیستم‌های خودمختار است تا بتوان اشتباهات را به حداقل ممکن رساند. در حال حاضر پژوهشگران انویدیا دارند بر روی سامانه هدایت ناوبری ترکیبی از یادگیری عمیق و شناسایی تصویر کار می‌کنند که به مولتی روتور کمک نماید مسیر خود را پیدا کند و گم نشود [۵۲].

چالش بعدی که نیاز به کار وسیع دارد ظرفیت باتری‌هاست. باتری‌های لیتیوم یونی موجود سالی ۵ تا ۱۰ درصد بهبود در عملکرد خود دارند و این میزان رشد برای مولتی روتورهایی که هر سال به حسگرها و پردازنده‌های جدیدتری مجهز می‌شوند کافی نیست. تکنولوژی‌های پیش‌بینی و عدم برخورد نیز یکی از موارد مورد نیاز برای تحقیق و توسعه هستند.

۲.۶.۲ نظارت لحظه‌ای ترافیک

اتوماسیون صنعت حمل‌ونقل نمی‌تواند به‌صورت خاص فقط از طریق خودمختار سازی ماشین‌ها صورت گیرد بلکه نیاز است تا تمامی اجزای این سیستم به‌صورت خودکار با هم به فعالیت بپردازند. این امر می‌تواند با خودکار سازی مراقبت جاده‌ای، کنترل ترافیک، امداد رسانی در حوادث و جریمه خودکار متخلفان صورت پذیرد [۵۳]. مولتی روتورها در این زمینه عضوی کم‌هزینه و کارا هستند. یک مولتی روتور برخلاف دوربین ثابت سرعت که ثابت است می‌تواند به هر نقطه‌ای در هر لحظه منتقل شود و در زمان آسیب یا نیاز به تعمیر می‌تواند به‌راحتی با یک مولتی روتور دیگر جایگزین گردد. هرچند هنوز هم تشخیص یک وسیله متحرک و تعقیب آن برای یک مولتی روتور چالشی بزرگ است اما با پیشرفت‌های این زمینه می‌توان این مورد را نیز حل کرد. این مورد به

باقی مانده پرنده‌هایی با استفاده دوگانه هستند. همچنین این بازار توانایی ایجاد ۱۰۰ هزار شغل جدید در این زمینه را دارد.

زیر بازارهای کوچک‌تر این صنعت نیز توانایی زیادی برای جذب سرمایه و درآمدزایی دارند. به عنوان مثال بخش ظرفیت بار^۱ پهپادها که شامل دوربین، حسگرها، بخش ارتباطی، رادار، تسلیحات، لیدارها می‌شود به یک بازار ۳ میلیارد دلاری تا ۲۰۲۷ تبدیل خواهد گشت. این بخش از بازار نیز خود به بخش‌های کوچک‌تری تقسیم‌بندی می‌شود. به عنوان مثال تجهیزات ارتباطی و راداری ۸۰ درصد درآمد بازار بخش ظرفیت بار پرنده‌های بدون سرنشین و بخش حسگر و تسلیحات به ترتیب ۱۱ و ۹ درصد از این بازار را به خود اختصاص داده‌اند.

هنگام مطالعه ساختار عرضه و تقاضای جهانی مولتی روتورها برای اهداف پژوهشی، محققان با چالش‌های روش‌شناختی مختلفی مواجه می‌شوند. دسترسی به آمارهای جامع به دلیل طبقه‌بندی اکثر پهپادها و مولتی روتورها به عنوان کالاهای نظامی یا دامن‌نظره محدود است و در نتیجه باعث دسترسی محدود به داده‌ها شده است. تنها درصد کمی، تقریباً ۲۳/۶٪ را می‌توان به عنوان محصولات غیرنظامی یا تجاری طبقه‌بندی نمود (بنا بر گزارش مؤسسه Cerna در سال ۲۰۱۶). این عدم دسترسی در درجه اول به دلیل پروتکل‌های محرمانه و مقررات سخت‌گیرانه حاکم بر واردات و صادرات پهپادهای نظامی است. در نتیجه، تمرکز این مقاله بر بخش تجاری خواهد بود، بخشی که می‌توان آمار نسبتاً در دسترس‌تری را به دست آورد.

چالش دوم را می‌توان در گستردگی طیف گونه‌ها و طرح‌های مولتی روتورها دانست، این موضوع باعث شده حتی در یک کلاس کاربری نیز مولتی روتورها محصولات استاندارد نباشند. تولید مولتی روتورها شامل یک زنجیره تأمین جهانی است که امکان پیکربندی اجزا و نرم‌افزارهای مختلف را فراهم می‌کند. این تنوع، تجزیه و تحلیل برخی از عوامل بازار، به‌ویژه قیمت‌ها را پیچیده می‌کند.

بسیار مهم است که بدانیم بازار مولتی روتورها به عنوان یک اکوسیستم عمل می‌کند که شامل توسعه‌دهندگان نرم‌افزار، تولیدکنندگان قطعات و سایر ذی‌نفعان است. ساختار کلی بازار هواپیماهای بدون سرنشین شامل تأمین‌کنندگان مواد خام، تولیدکنندگان قطعات، تولیدکنندگان مولتی روتور، شرکت‌های خدماتی، ارائه‌دهندگان خدمات پهپادها و کاربران نهایی است. مجموعه "تولیدکنندگان قطعات" را می‌توان بیشتر به عنوان یک اکوسیستم به خودی خود دید. در حال حاضر تنها چند شرکت پیشرو مانند DJI و MMC توانایی طراحی و تولید زنجیره‌های تأمین کامل از جمله کامپیوتر پرواز، منبع تغذیه، کنترلر، انتقال ویدئو و ایستگاه زمینی را دارند. در نتیجه، اکثر پهپادها شامل

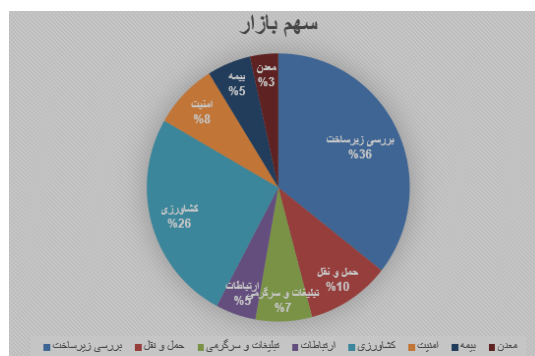
یکی از کاربردهای کمتر کار شده در این بخش نیز استفاده مولتی روتور به عنوان یک فرستنده سیگنال DGPS در داخل محیط‌های سرپوشیده یا در کنار ساختمان‌های بلند و آسمان خراش‌ها می‌باشد.

۲.۷.۱ چالش‌ها و اقدامات قابل اجرا در آینده

۹۰ درصد ترافیک موبایل استفاده شده توسط مشترکین در خانه و محیط‌های سر بسته اتفاق می‌افتد و همین امر می‌تواند عاملی برای سرمایه‌گذاری بر روی مولتی روتورهایی با این مأموریت باشد زیرا هزینه تولید و توسعه این پرنده‌گان و دینامیک بودن حضور آن‌ها نسبت به شبکه‌ها زمینی و ایجاد دکل‌های مخابراتی راحت‌تر و مقرون به صرفه‌تر است. همچنین در حال حاضر تحقیقات اندکی در مورد توپولوژی شبکه بی‌سیم مولتی روتورها انجام گرفته است و اینکه این توپولوژی با افزایش تعداد و مولتی روتورها و تعداد کانال‌ها چه تغییری می‌نماید [۲]. بخش دیگری که هنوز در خیلی از زمینه‌های ذکر شده در این گزارش هم تحقیقات وسیعی روی آن صورت نگرفته است بهترین شیوه تغییر یک مولتی روتور در زمان انجام مسئولیت با یک مولتی روتور دیگر است بدون اینکه در انجام خدمات و پوشش مورد ارائه خللی وارد گردد [۲].

۳ سرمایه‌گذاری و بازار پهپادها

پهپادها فرصت خوبی را برای تولیدکنندگان تجهیزات، سرمایه‌گذاران و ارائه‌دهندگان خدمات در این زمینه ارائه می‌دهند. طبق گزارش PWC، ارزش بازار قابل تخمین پهپادها، بیش از ۱۲۷ میلیارد دلار تخمین زده شده است که در شکل ۵ به تفکیک قابل مشاهده است.



شکل ۵ - سهم بازار هر یک از کاربردهای مولتی روتورها

بنا بر تخمین مؤسسه PWC ارزش بازار غیرنظامی این پرنده‌ها از بازار نظامی سبقت خواهد گرفت و از مرز ۴۵ میلیارد دلار گذر خواهد کرد این در حالی است که بنا بر گزارش [۵۷] تا سال ۲۰۲۱ تنها ۲۳/۶ بازار پرنده‌های بدون سرنشین غیرنظامی، ۳۵ درصد نظامی و ۲۹ درصد

۴ نتیجه‌گیری

با مطالب ذکر شده می‌توان مشاهده کرد که استفاده از مولتی روتورها هر لحظه در تمامی بخش‌های زندگی ما افزایش می‌یابد و این پرنده‌ها آمده‌اند تا بمانند و یک محصولی نیستند که تا چند سال دیگر محو شوند؛ بلکه هر روز وظایف و مسئولیت‌های بیشتری می‌توان به آن‌ها محول کرد و می‌توان انتظار داشت که این وظایف را بهتر از شیوه‌های موجود به سرانجام رسانند. در این گزارش سعی شد به اکثر کاربردهای این پرندگان در زمینه غیرنظامی پرداخته شود. بازار هواپیماهای بدون سرنشین تحت تأثیر عوامل مختلفی از جمله پیشرفت‌های علمی، مسائل امنیت ملی و مقررات دولتی است. پیشرفت‌های مداوم در فناوری‌های پهپاد به گسترش بازار و کاهش قیمت مولتی روتورها کمک می‌کند، به‌ویژه در زمینه‌هایی مانند بهبود باتری و سیستم ناوبری که پتانسیل کاربردهای جدید پهپادهای تجاری و تفریحی را دارد. مقررات مربوط به وسایل نقلیه هوایی بدون سرنشین، با گرایش عمومی به سمت استانداردسازی و آزادسازی برای سرمایه‌گذاری از مزایای اقتصادی آن‌ها، موضوع مهمی باقی‌مانده است.

آژانس‌های مشاوره و سازمان‌های صنعتی، مانند J'Son، PwC & Partners، و DRONEII، ارزیابی‌های متنوعی از چشم‌انداز صنعت ارائه می‌دهند. پیش‌بینی‌های اندازه بازار برای سال ۲۰۲۵ از ۲۰ تا ۴۵ میلیارد دلار متغیر است که شرایط مطلوب بازار را برجسته می‌کند و بازار مولتی روتورها را به‌عنوان یکی از امیدوارکننده‌ترین بخش‌های علمی تحقیقاتی معرفی می‌نماید. حوزه جدید سرمایه‌گذاری کلیدی شامل شرکت‌های فعال در زمینه پهپادی است که بازیگران صنعتی مهم را به دنبال فرصت‌های متنوع از طریق سرمایه‌گذاری در این بخش می‌نماید.

پیش‌بینی رشد مداوم در تولید و تقاضا با افزایش دسترسی به مولتی روتورها مطابقت دارد. همکاری‌های استراتژیک بین تولیدکنندگان، تغییراتی را در این بخش نوپا ایجاد می‌کند و رقابت را به سمت نرم‌افزار و ارائه خدمات تغییر می‌دهد.

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده‌است.

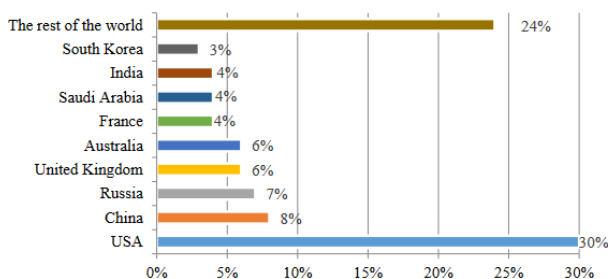
مراجع

[1] S. Hayat, E. Yanmaz, and R. Muzaffar, "Survey on unmanned aerial vehicle networks for civil applications: A communication viewpoint," *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 18, no. 4, pp. 2624-2661, 2016, <https://doi.org/10.1109/COMST.2016.2560343>.

قطعاتی هستند که از سازندگان مختلف تهیه می‌شوند، از جمله قطعات فلزی، فاصله‌یاب‌های لیزری، نرم‌افزار، باتری‌ها، دوربین‌ها، اتصال‌دهنده‌ها، موتورها و لوازم الکترونیکی این دو موضوع مقایسه آماری کارهای صورت پذیرفته در زمینه تحقیقات بازار را سخت می‌نماید و باید توجه داشت که اکثریت سازمان‌های فعال در این زمینه مانند PwC، J'Son & Partners، و DRONEII و غیره نتایج تحقیقات خود را به صورت رایگان عرضه نمی‌نمایند.

گسترش بازار پهپادها تنها به بخش‌های جدید و صنایع نوین خلاصه نمی‌شود. باتوجه به پیش‌بینی سازمان ملل تا سال ۲۰۵۰ جمعیت زمین به ۹/۷ میلیارد نفر خواهد رسید این افزایش جمعیت با افزایش ۶۹ درصدی مصرف مواد خام خوراکی خواهد بود. از این رو نیاز مبرمی به استفاده از پهپاد و مولتی روتورها برای شناسایی مناطق مناسب کشاورزی و تولید مواد اولیه خام خوراکی می‌باشد. زیرا برخلاف دسترسی محدود کشورها به ماهواره‌های زمین‌شناسی، کشورهای درحال توسعه می‌توانند از پتانسیل این تکنولوژی استفاده کنند بنا بر پژوهش [۵۸] استفاده از مولتی روتورها می‌تواند باعث کاهش هزینه‌ها و ساعت کاری نیروی متخصص برای تولید محصولات کشاورزی و دامی باشد.

رشد بازار پهپادها از سال ۲۰۱۶ که رقمی برابر با ۸/۵ میلیارد دلار بوده در سال ۲۰۲۱ به مبلغی حدود ۱۲ میلیارد دلار رسیده که برابر با رشدی ۷۶ درصدی سالانه است. شایان‌ذکر است که این بازار را می‌توان در بخش تولید و خدمات نیز به بخش‌هایی نظیر تولید قطعات و بخش‌های نرم‌افزاری تقسیم نمود که در آن چین و اروپا با به ترتیب ۳۱ و ۲۸ درصد و آمریکا با ۳۲ پیشتاز است. در مقابل توسعه نرم‌افزاری مولتی روتورها بیشتر در اروپا توسعه پیدا می‌کند. چهار شرکت بزرگ تولیدکننده نیز به ترتیب DJI از چین، SenseFLY/Parrot فرانسه، Yuneec چین و 3D Robotics از آمریکا می‌باشند [۵۶].



شکل ۶- میزان فروش مولتی روتورها به تفکیک کشور

در شکل ۶ می‌توان میزان سهم هر کشور از بازار جهانی مولتی روتورها را مشاهده نمود.

- rescue efforts beneath," M.S. thesis, University of Denver, Denver, United States, 2015.
- [13] D. Jo and Y. Kwon, "Development of rescue material transport UAV (unmanned aerial vehicle)," *World Journal of Engineering and Technology*, vol. 5, no. 4, pp. 720-729, 2017, <https://doi.org/10.4236/wjet.2017.54060>.
- [14] M. L. Smith, "Regulating law enforcement's use of drones: The need for state legislation," *Harvard Journal on Legislation*, vol. 52, pp. 423-454, 2015, <https://doi.org/10.2139/ssrn.2492374>.
- [15] B. R. Jordan, "A birds-eye view of geology: The use of micro drones/UAVs in geologic fieldwork and education," *GSA Today*, vol. 25, no. 7, pp. 50-52, 2015, <https://doi.org/10.1130/GSATG232GW.1>.
- [16] S. Yazdannik, S. SaniSales, M. Tayefi, R. Esmaelzadeh Aval, and M. Khazaei, "Integrating second order sliding mode control and anomaly detection using auto- encoder for enhanced safety and reliability of quadrotor UAVs," *International Journal of Reliability Risk and Safety Theory and Application*, vol. 5, no. 2, pp. 107-116, 2023, <https://doi.org/10.30699/IJRRS.5.2.11>.
- [17] B. Vergouw, H. Nagel, G. Bondt, and B. Custers, "Drone technology: Types, payloads, applications, frequency spectrum issues and future developments," in *The Future of Drone Use: Opportunities and Threats from Ethical and Legal Perspectives*, B. Custers, Ed. The Hague: T.M.C. Asser Press, 2016, pp. 21-45, https://doi.org/10.1007/978-94-6265-132-6_2.
- [18] D. C. Macke Jr, "Systems and image database resources for UAV search and rescue applications," M.S. thesis, Missouri University of Science and Technology, 2013.
- [19] M. Bejiga, A. Zeggada, A. Nouffidj, and F. Melgani, "A convolutional neural network approach for assisting avalanche search and rescue operations with UAV imagery," *Remote Sensing*, vol. 9, no. 2, 2017, Art. no. 100, <https://doi.org/10.3390/rs9020100>.
- [20] P. Rudol and P. Doherty, "Human body detection and geolocalization for UAV search and rescue missions using color and thermal imagery," in *Aerospace Conference*, Big Sky, MT, USA, 2008, pp. 1-8, <https://doi.org/10.1109/AERO.2008.4526559>.
- [21] E. Tuyishimire, A. Bagula, S. Rekhis, and N. Boudriga, "Cooperative data muling from ground sensors to base stations using UAVs," in *Symposium on Computers and Communications (ISCC)*, Heraklion, Greece, 2017, pp. 35-41, <https://doi.org/10.1109/ISCC.2017.8024501>.
- [22] M. Quaritsch, K. Kruggl, D. Wischounig-Strucl, S. Bhattacharya, M. Shah, and B. Rinner "Networked UAVs as aerial sensor network for disaster management applications," *e+i Elektrotechnik und Informationstechnik*, vol. 127, pp. 56-63, 2010, <https://doi.org/10.1007/s00502-010-0717-2>.
- [23] D. Olson and J. Anderson, "Review on unmanned aerial vehicles, remote sensors, imagery processing,
- [2] L. Gupta, R. Jain, and G. Vaszkun, "Survey of important issues in uav communication networks," *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 18, no. 2, pp. 1123-1152, 2016, <https://doi.org/10.1109/COMST.2015.2495297>.
- [3] Y. Zeng, R. Zhang, and T. J. Lim, "Wireless communications with unmanned aerial vehicles: Opportunities and challenges," *IEEE Communications Magazine*, vol. 54, no. 5, pp. 34-42, 2016, <https://doi.org/10.1109/MCOM.2016.7470933>.
- [4] G. Chmaj and H. Selvaraj, "Distributed processing applications for UAV/drones: A survey," In *Progress in Systems Engineering: Proceedings of the Twenty-Third International Conference on Systems Engineering*, H. Selvaraj, D. Zydek, G. Chmaj, Eds. Cham: Springer, 2015, pp. 449-545, https://doi.org/10.1007/978-3-319-08422-0_66.
- [5] N. Hossein Motlagh, T. Taleb, and O. Arouk, "Low-altitude unmanned aerial vehicles-based internet of things services: Comprehensive survey and future perspectives," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 3, no. 6, pp. 899-922, 2016, <https://doi.org/10.1109/JIOT.2016.2612119>.
- [6] M. Mozaffari, W. Saad, M. Bennis, Y. H. Nam and M. Debbah, "A tutorial on UAVs for wireless networks: Applications, challenges, and open problems," *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 21, no. 3, pp. 2334-2360, 2018, <https://doi.org/10.1109/COMST.2019.2902862>.
- [7] P. Doherty and P. Rudol, "A UAV search and rescue scenario with human body detection and geolocalization," in *AI 2007: Advances in Artificial Intelligence*, M. A. Orgun and J. Thornton, Eds., Berlin, Heidelberg: Springer, 2007, pp. 1-13, https://doi.org/10.1007/978-3-540-76928-6_1.
- [8] Y. Wang, W. Liu, J. Liu, and C. Sun, "Cooperative USV-UAV marine search and rescue with visual navigation and reinforcement learning-based control," *ISA Transactions*, vol. 137, pp. 222-235, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2023.01.007>.
- [9] M. Ruiz Estrada and I. Ndoma, "How unmanned aerial vehicles UAVVS (or drones) can help in case of natural disasters response and humanitarian relief aid?," *SSRN Electronic Journal*, vol. 1, 2017, <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.2961576>.
- [10] M. Silvagni, A. Tonoli, M. Chinaberge, and E. Zenerino, "Multipurpose UAV for search and rescue operations in mountain avalanche events," *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, vol. 8, no. 1, pp. 18-33, 2017, <https://doi.org/10.1080/19475705.2016.1238852>.
- [11] P. Iob, L. Frau, P. Danieli, L. Olivieri, and C. Bettanini, "Avalanche rescue with autonomous drones," in *7th International Workshop on Metrology for AeroSpace (MetroAeroSpace)*, Pisa, Italy, 2020, pp. 319-324, <https://doi.org/10.1109/MetroAeroSpace48742.2020.9160116>.
- [12] J. Joern, "Examining the use of unmanned aerial systems and thermal infrared imaging for search and

- no. 2, 2023, Art. no. 136, <https://doi.org/10.3390/drones7020136>.
- [36] Y. Huang, S. Thomson, W. Hoffmann, Y. Lan, and B. Fritz, "Development and prospect of unmanned aerial vehicle technologies for agricultural production management," *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, vol. 6, no. 3, pp. 1-10, 2013, <https://doi.org/10.3965/j.ijabe.20130603.001>.
- [37] W. Kazmi, M. Bisgaard, F. Garcia-Ruiz, K. D. Hansen, and A. la Cour-Harbo, "Adaptive surveying and early treatment of crops with a team of autonomous vehicles," in *5th European Conference on Mobile Robots ECMR*, Örebro, Sweden, 2011, pp. 253-258.
- [38] V. Gonzalez-Dugo *et al.*, "Using high resolution UAV thermal imagery to assess the variability in the water status of five fruit tree species within a commercial orchard," *Precision Agriculture*, vol. 14, no. 6, pp. 660-678, 2013, <https://doi.org/10.1007/s11119-013-9322-9>.
- [39] F. Garcia-Ruiz, S. Sankaran, J. Maja, W. Lee, J. Rasmussen, and R. Ehsani, "Comparison of two aerial imaging platforms for identification of Huanglongbing-infected citrus trees," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 1, no. 91, pp. 106-115, 2013, <https://doi.org/10.1016/j.compag.2012.12.002>.
- [40] P. Mathur, R. Nielsen, R. Prasad, and N. Prasad, "Data collection using miniature aerial vehicles in wireless sensor networks," *IET Wireless Sensor Systems*, vol. 6, no. 1, pp. 17-25, 2016, <https://doi.org/10.1049/iet-wss.2014.0120>.
- [41] A. Srivastava and J. Prakash, "Techniques, answers, and real-world UAV implementations for precision farming," *Wireless Personal Communications*, vol. 131, pp. 2715-2746, 2023, <https://doi.org/10.1007/s11277-023-10577-z>.
- [42] H. Mirsalari and E. Dodange, "Investigating the application of UAV in smart agriculture," in *4th National Congress of Development and Promotion of Agricultural Engineering and Soil Sciences of Iran*, Tehran, Iran, 2022, (in Persian).
- [43] J. E. Hook, S. Kincheloe, and W. I. Segar, "Irrigation Scheduling for Corn—Why and How National Corn Handbook," US Department of Agriculture (USDA), 2000.
- [44] D. Pimentel, R. Zuniga, and D. Morrison, "Update on the environmental and economic costs associated with alien-invasive species in the United States," *Ecological Economics*, vol. 52, no. 3, pp. 273-288, 2005, <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2004.10.002>.
- [45] R. Calderón, J. A. Navas-Cortés, C. Lucena, and P. J. Zarco-Tejada, "High-resolution airborne hyperspectral and thermal imagery for early detection of *Verticillium* wilt of olive using fluorescence, temperature and narrow-band spectral indices," *Remote Sensing of Environment*, vol. 139, pp. 231-245, 2013, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.07.031>.
- and their applications in agriculture," *Agronomy Journal*, vol. 113, no. 2, pp. 971-992, 2021, <https://doi.org/10.1002/agj2.20595>.
- [24] K. Whitehead, B. J. Moorman, and C. H. Hugenholtz, "Brief Communication: Low-cost, on-demand aerial photogrammetry for glaciological measurement," *The Cryosphere*, vol. 7, no. 6, pp. 1879-1884, 2013, <https://doi.org/10.5194/tc-7-1879-2013>.
- [25] K. Whitehead and C. H. Hugenholtz, "Remote sensing of the environment with small unmanned aircraft systems (UASs), part 1: A review of progress and challenges," *Journal of Unmanned Vehicle Systems*, vol. 2, no. 3, pp. 69-85, 2014, <https://doi.org/10.1139/juvs-2014-0006>.
- [26] R. Austin, *Unmanned Aircraft Systems: UAVS Design, Development And Deployment*, Wiley, 2011.
- [27] J. Curry, J. Maslanik, G. Holland and J. Pinto, "Applications of aerosondes in the arctic," *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 85, no. 12, pp. 1855-1861, 2004, <https://doi.org/10.1175/BAMS-85-12-1855>.
- [28] M. Madden, T. Jordan, D. Cotten, N. O'Hare, A. Pasqua, and S. Bernardes, "The future of unmanned aerial systems (UAS) for monitoring natural and cultural resources," *Photogrammetric Week*, pp.369-385, 2015.
- [29] W. Immerzeel *et al.*, "High-resolution monitoring of himalayan glacier dynamics using unmanned aerial vehicles," *Remote Sensing of Environment*, vol. 150, pp. 93-103, 2014, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.04.025>.
- [30] N. Marwah, V. Kumar Singh, G. Siddharth Kashyap, and S. Wazir, "An analysis of the robustness of UAV agriculture field coverage using multi-agent reinforcement learning," *International Journal of Information Technology*, vol. 15, p. 2317-2327, 2023, <https://doi.org/10.1007/s41870-023-01264-0>.
- [31] D. Jones, "Power line inspection-a UAV concept," *The IEE Forum on Autonomous Systems*, p. 8, 2005, <https://doi.org/10.1049/ic:20050472>.
- [32] Z. Li, Y. Liu, R. Walker, R. Hayward, and J. Zhang, "Towards automatic power line detection for a UAV surveillance system using pulse coupled neural filter and an improved Hough transform," *Machine Vision and Applications*, vol. 21, pp. 677-686, 2010, <https://doi.org/10.1007/s00138-009-0206-y>.
- [33] J. Larrauri, G. Sorrosal, and M. González, "Automatic system for overhead power line inspection using an unmanned aerial vehicle—relifo project," in *International Conference On Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, Atlanta, GA, USA, 2013, <https://doi.org/10.1109/ICUAS.2013.6564696>.
- [34] F. Mohamadi, "Vertical takeoff and landing (VTOL) small unmanned aerial system for monitoring oil and gas pipelines," United States patent, US8880241B2, 2014.
- [35] C. Dinelli *et al.*, "Configurations and applications of multi-agent hybrid drone/unmanned ground vehicle for underground environments: A review," *Drones*, vol. 7,

- [56] P. Bupe, R. Haddad and F. Rios-Gutierrez, "Relief and emergency communication network based on an autonomous decentralized UAV clustering network," *SoutheastCon 2015*, Fort Lauderdale, FL, USA, 2015, pp. 1-8, <https://doi.org/10.1109/SECON.2015.7133027>.
- [57] L. Kapustina, N. Izakova, E. Makovkina, and M. Khmelkov, "The global drone market: Main development trends," in *SHS Web of Conferences*, Vol.129, *The 21st International Scientific Conference Globalization and its Socio-Economic Consequences*, Zilina, Slovak Republic, 2021, Paper. 11004, <https://doi.org/10.1051/shsconf/202112911004>.
- [58] D. A. Dianti, F. Gruben, and S. Mutmainah, "market development of agriculture drones in new zealand and singapore," *Diponegoro Journal of Accounting*, vol. 12, no. 2, 2023.
- [59] M. Bevilacqua, D. Morelli and P. S. R. Uzan, "Striking the implied volatility of US drone companies," *International Review of Financial Analysis*, vol. 77, 2021, Art. no. 101832, <https://doi.org/10.1016/j.irfa.2021.101832>.
- [60] M. Ghanifar, M. Kamzan, and M. Tayefi, "Intelligent tuning PID controller, simulation and comparison for a quadrotor," *Journal of Technology in Aerospace Engineering*, vol. 7, no. 4, pp. 23-33, 2024, (in Persian), <https://doi.org/10.30699/jtae.2023.7.4.3>.
- [61] M. Safaei and M. Sepehri, "A review study on the application of drones in the health sector," in *First International Conference on Management, Industrial Engineering, and Accounting*, 1399, (in Persian).
- [62] M. Mohammadian Semnani, Sh. Ataei, and M. Molajafary, "Application of drones in bridge inspection," in *The 2nd International Conference on the Application of Materials and Advanced Manufacturing in Industries*, Tehran, Iran, 2022, (in Persian).
- [63] F. Majidi, M. Sepehri, and H. Saeedi, "Review of articles and proposed framework for drone delivery of drugs and vaccines to rural and remote areas," in *Second International Conference on Optimization of Production and Service Systems*, Rudsar, Gilan, Iran, 2022, (in Persian).
- [64] M. Saber, A. Abedini, and M. Saadat Seresht, "Traffic management system based on photogrammetry of drones," in *First National Conference on Urban Planning, Urban Management and Sustainable Development paper*, Tehran, Iran, 2015, (in Persian).
- [65] H. Mirsalar and M. Mirsalar, "Investigation of drone application in smart agriculture," in *The 8th International Congress of Agricultural and Environmental Development with an emphasis on the United Nations Development Program*, Tehran, Iran, 2023, (in Persian).
- [46] D. C. Wang, G. L. Zhang, X. Z. Pan, Y. G. Zhao, M. S. Zhao, and G. F. Wang, "Mapping soil texture of a plain area using fuzzy-c-means clustering method based on land surface diurnal temperature difference," *Pedosphere*, vol. 22, no. 3, pp. 394-403, 2012, [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(12\)60025-3](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(12)60025-3).
- [47] D. Sullivan *et al.*, "Evaluation of multispectral data for rapid assessment of wheat straw residue cover," *Soil Science Society of America Journal*, vol. 68, no. 6, pp. 2007-2013, 2004, <https://doi.org/10.2136/sssaj2004.2007>.
- [48] F. Niglio, P. Comite, A. Cannas, A. Pirri, and G. Tortora, "Preliminary clinical validation of a drone-based delivery system in urban scenarios using a smart capsule for blood," *Drones*, vol. 6, no. 8, 2022, Art. no. 195, 2022, <https://doi.org/10.3390/drones6080195>.
- [49] M. Pachayappan and B. Sundarakani, "Drone delivery logistics model for on-demand hyperlocal market," *International Journal of Logistics Research and Applications*, vol. 26, no. 12, pp. 1728-1760, 2022, <https://doi.org/10.1080/13675567.2022.2107189>.
- [50] A. Kosovac, M. Šabić, E. Muharemović, and E. Šimić, "Shipment delivery challenges using unmanned aerial vehicles," in *First International Conference on Advances in Traffic and Communication Technology*, Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, 2022, pp. 161-166, <https://doi.org/10.59478/ATCT.2022.22>.
- [51] Z. Jiang, Y. Chen, G. Song, B. Yang, and X. Jiang, "Cooperative planning of multi-UAV logistics delivery by multi-graph reinforcement learning," in *International Conference on Computer Application and Information Security*, 2023, vol. 12609, pp. 129-137, <https://doi.org/10.1117/12.2671868>.
- [52] A. Carrio, C. Sampedro, A. Rodriguez-Ramos and P. Campoy, "A review of deep learning methods and applications for unmanned aerial vehicles," *Journal of Sensors*, vol. 2017, no. 1, pp. 1-13, 2017, Art. no. 3296874, <https://doi.org/10.1155/2017/3296874>.
- [53] H. Menouar, I. Guvenc, K. Akkaya, A. S. Uluagac, A. Kadri, and A. Tuncer, "UAV-enabled intelligent transportation systems for the smart city: applications and challenges," *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, no. 3, pp. 22-28, 2017, <https://doi.org/10.1109/MCOM.2017.1600238CM>.
- [54] G. Guido, V. Gallelli, D. Rogano, and A. Vitale, "Evaluating the accuracy of vehicle tracking data obtained from unmanned aerial vehicles," *International Journal of Transportation Science and Technology*, vol. 5, no. 3, pp. 136-151, 2016, <https://doi.org/10.1016/j.ijtst.2016.12.001>.
- [55] M. Minea and C. Dumitrescu, "Urban traffic noise analysis using uav-based array of microphones," *Sensors*, vol. 23, no. 4, 2023, Art. no. 1912, <https://doi.org/10.3390/s23041912>.