



Available in:
Journal.isrc.ac.ir

Journal of Space Science,
Technology & Applications
(Persian)

Vol. 5, No. 2, pp.: 103-122
2026

DOI:
[10.22034/jssta.2026.500931.1224](https://doi.org/10.22034/jssta.2026.500931.1224)

Article Info

Received: 2025-01-13
Accepted: 2025-08-28

Keywords

Cube Set, Scientific Status,
Impactful Technology,
Recent Advances, Synonym
Analysis, Scientific Mapping

How to Cite this article

F. Kiani Falavarjani,
“Scientific Status and a
Review of Recent
Achievements in CubeSat
Technology”, *Journal of
Space Science, Technology &
Applications*, Vol. 5, No. 2,
pp. 103-122, 2026.

Scientific Status and a Review of Recent Achievements in CubeSat Technology

Farhad Kiani Falavarjani^{1*}

¹ *Malek Ashtar university of Technology, Faculty of mechanic Engineering, Shahin Shahr,
Iran
aerospace1362@gmail.com

Abstract

CubeSats are small, low-cost, and highly scalable satellites that have recently become essential tools in space research, education, and commercial activities. These satellites, due to their small size and the use of miniaturized technologies, have lower costs and enable the execution of space projects with limited resources. Despite their numerous advantages, challenges such as power limitations, thermal management, and space debris remain. However, the development of innovative technologies and international collaboration has paved the way for a bright future in this field. CubeSats are a symbol of the transformation in space access and an important step toward expanding the boundaries of human knowledge. This applied, data mining, and scientometric study utilized techniques for analyzing scientific database repositories. Data and keywords related to the research were searched and evaluated from 2010 to 2024 using the Web of Science database. For data analysis and visualization of the obtained information, the Vosviewer software was used. The statistical population of the study included 1,499 papers related to CubeSat technology. The results indicate that the development trends of related technologies include miniaturization and optimization of equipment, advancements in energy sources, development of microelectromechanical propulsion systems, and the use of advanced communication technologies such as laser communication.

بررسی وضعیت علمی و مروری بر آخرین دستاوردهای علمی در حوزه کیوبست

فرهاد کیانی فلاورجانی *

۱- دانشگاه صنعتی مالک اشتر مجتمع دانشگاهی مکانیک - Aerospace1362@gmail.com



دسترس پذیر در نشانی:

Journal.isrc.ac.ir

دوفصلنامه علوم، فناوری و کاربردهای فضایی

سال پنجم، شماره ۲، صفحه ۱۲۲-۱۰۳
پاییز و زمستان ۱۴۰۴

DOI:

10.22034/jssta.2026.500931.1224

چکیده

کیوبست‌ها ماهواره‌های کوچک با هزینه کم و مقیاس‌پذیری بالا هستند که در سال‌های اخیر به ابزاری حیاتی در تحقیقات فضایی، آموزشی و تجاری تبدیل شده‌اند. این ماهواره‌ها به دلیل اندازه کوچک و استفاده از فناوری‌های کوچک‌شده، هزینه‌های پایین‌تری دارند و امکان اجرای پروژه‌های فضایی را با منابع محدود فراهم می‌کنند. با وجود مزایای فراوان، چالش‌هایی نظیر محدودیت توان، مدیریت حرارتی، و زباله‌های فضایی همچنان پابرجا هستند. پژوهش حاضر از نوع کاربردی، داده‌کاوی و علم‌سنجی است و در انجام آن از تکنیک‌های تحلیل پایگاه‌های داده علمی و تحلیل هم‌اژگانی استفاده شده است. داده‌ها و کلیدواژه‌های مرتبط با پژوهش در فاصله بین سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۴ با استفاده از پایگاه اطلاعاتی وب آف‌ساینس جستجو و ارزیابی شدند. برای تحلیل داده‌ها و مصورسازی اطلاعات به دست آمده، از نرم‌افزار Vosviewer استفاده شده است. جامعه آماری پژوهش ۱۴۹۹ مقاله در زمینه فناوری مرتبط و درگیر با کیوبست بوده است. نتایج بررسی نشان می‌دهد، روند توسعه فناوری‌های مرتبط شامل کوچک‌سازی و بهینه‌سازی تجهیزات، پیشرفت در منابع انرژی، توسعه سامانه‌های پیشرفته میکروالکترونیک، و استفاده از فناوری‌های پیشرفته مخابراتی مانند ارتباطات لیزری است. مطالعات نشان می‌دهد که حوزه کیوبست‌ها از تحقیقات پایه به سمت فناوری‌های نوین و کاربردی‌تر پیش رفته و اخیراً توجه بیشتری به آموزش و ظرفیت‌سازی جهانی شده است. همچنین، فناوری‌های پیشرفته مانند پالس پلاسما به‌عنوان روند آینده این حوزه مطرح شده‌اند.

تاریخچه داوری

دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۳۰

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۰۶

واژه‌های کلیدی

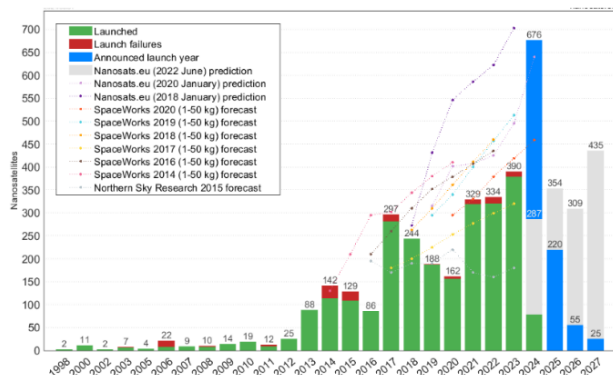
کیوبست، وضعیت علمی، فناوری
تأثیرگذار، پیشرفت‌های اخیر، تحلیل
هم‌اژگانی، نقشه علمی

نحوه استناد به این مقاله

فرهاد کیانی فلاورجانی، "بررسی وضعیت علمی و مروری بر آخرین دستاوردهای علمی در حوزه کیوبست"، دوفصلنامه علوم، فناوری و کاربردهای فضایی، جلد پنجم، شماره دوم، صفحات ۱۰۳-۱۲۲، ۱۴۰۴.

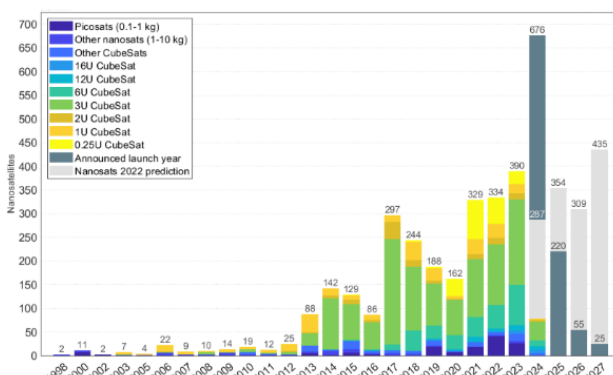
۱- مقدمه

مأموریت‌ها با شکست مواجه شده‌اند. با این حال، هنگامی که مأموریت‌ها توسط تیم‌هایی با پیشینه و تجربه مناسب برنامه‌ریزی و اجرا می‌شوند، این نرخ به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد.



شکل (۱): تعداد پرتاب موفق کیوبست بر حسب سال [۶]

دلیل اصلی شکست مأموریت‌ها، عدم انجام تست‌های عملکردی مناسب در مرحله یکپارچه‌سازی سیستم در زمین بوده است [۷]. بر اساس تحلیل‌های ارائه شده بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۵، اکثر کیوبست‌های پرتاب شده متعلق به ایالات متحده آمریکا یا اروپا بوده‌اند و عمدتاً با اندازه U۳ طراحی شده‌اند [۷].



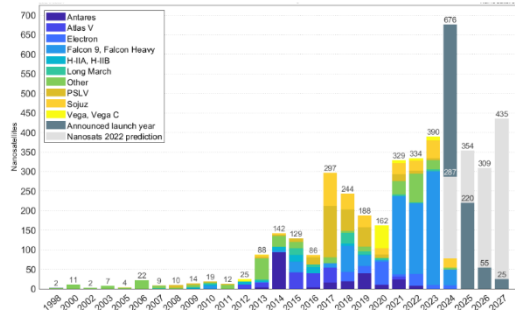
شکل (۲): تعداد کیوبست پرتاب شده بر حسب نوع دسته‌بندی واحد U [۶]

همچنین مشخص شده است که تنها ۲۰.۴ درصد مأموریت‌های انجام شده در این بازه زمانی که به مدار رسیده‌اند، موفق بوده‌اند [۷].

اولین بار مفهوم کیوبست در سال ۱۹۹۹ توسط اساتید دانشگاه پلی‌تکنیک کالیفرنیا و دانشگاه استنفورد برای فراهم کردن یک تجربه عملی از اکتشافات فضایی برای دانشجویان ایجاد شد [۱]. اولین کیوبست در سال ۲۰۰۳ پرتاب شد [۲]. با توجه به روند رو به رشد استفاده از کیوبست‌ها در مأموریت‌های فضایی و افزایش تعداد پرتاب‌ها در سال‌های اخیر، تخمین زده می‌شود که تا پایان سال ۲۰۲۴، تعداد کیوبست‌های پرتاب‌شده به بیش از ۲۶۰۴ واحد رسیده باشد [۳]. از این تعداد حدود ۲۳۹۶ کیوبست با موفقیت پرتاب شده است [۴]. این افزایش نشان‌دهنده اهمیت فزاینده کیوبست‌ها در تحقیقات علمی، مأموریت‌های تجاری و برنامه‌های آموزشی در حوزه فضا است. تاکنون ۸۶ کشور و ۷۵۱ شرکت و یا دانشگاه در این حوزه فعالیت داشته‌اند [۲].

کیوبست‌ها دسته‌ای از ماهواره‌های مینیاتوری هستند که به دلیل زمان توسعه کوتاه و هزینه ساخت پایین، در بین دانشجویان و علاقه‌مندان به طور فزاینده‌ای محبوب شده‌اند. اندازه کوچک، ویژگی‌های سبک وزن و توانایی تشکیل یک گروه، آنها را قادر می‌سازد تا مستقیماً با یکدیگر ارتباط برقرار کنند و ایده‌های جدیدی را در مورد اکتشاف فضایی، اندازه‌گیری‌های مبتنی بر فضا و پیاده‌سازی آخرین فناوری الهام بخشند. اصطلاح کیوبست برای توصیف یک ماهواره کوچک استفاده می‌شود که واحد اصلی آن یک مکعب با ضلع ۱۰ سانتی‌متر، یعنی U۱ است [۱]. واحدهای کیوبست می‌توانند برای تشکیل واحدهای بزرگتر، مانند U۲، U۳، U۶ و غیره، در کنار هم قرار گیرند. کیوبست‌ها باید از استانداردهای تعریف شده توسط مشخصات طراحی کیوبست، که شامل رعایت دستورالعمل‌های ایمنی است، پیروی کنند [۲]. انگیزه توسعه اولیه کیوبست‌ها آموزشی بوده است ایده این بوده که تجربه عملی را در فعالیتهای فضایی به دانشجویان ارائه دهند و به آنها تجربه عملی فعالیت از طراحی مفهومی تا ساخت نمونه روی یک پروژه فضایی داده شود [۳].

این مفهوم به عنوان پروژه‌ای دانشجویی در دانشگاه ایالتی پلی‌تکنیک کالیفرنیا و دانشگاه استنفورد توسعه یافت [۴]. امروزه کیوبست‌ها نه تنها برای اهداف آموزشی، بلکه برای نقش‌های علمی، فناوری و تجاری نیز استفاده می‌شوند. از آنجا که کیوبست‌ها عمدتاً پروژه‌های دانشجویی هستند، و طبق گزارش [۵] حدود ۴۰ درصد



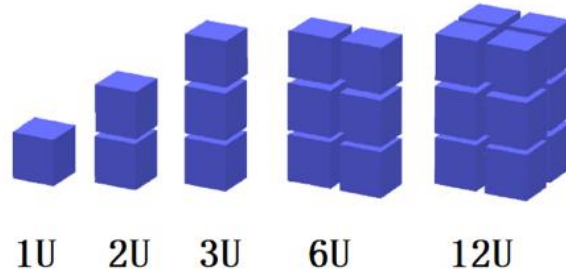
شکل (۴): توزیع و پراگندگی کیوبست‌ها بر حسب پرتاب‌گرها [۶]

۲- طبقه‌بندی مأموریت‌های ماهواره‌های کوچک

معمولاً مأموریت‌های ماهواره‌های کوچک بر اساس هدف اصلی‌شان دسته‌بندی می‌شوند. برای مثال، اگر هدف اندازه‌گیری فرآیندهای پلاسمایی در سیستم مگنتوسفر-یونسفر باشد، مأموریت در دسته «فیزیک خورشیدی و فضایی» قرار می‌گیرد. از سوی دیگر، اگر هدف انجام تحقیقات محلی در سطح سیارات یا جو آن‌ها باشد، مأموریت تحت عنوان «علم سیاره‌ای» طبقه‌بندی می‌شود [۹]. بررسی‌هایی در مورد این نوع مأموریت‌ها انجام شده است. به عنوان مثال، در [۱۰]، ۳۹ خدمات ماهواره کوچک در پنج نوع مأموریت دسته‌بندی شده‌اند: نجوم و اخترفیزیک، علم زمین، فیزیک خورشیدی، علم سیاره‌ای، و نمایش فناوری. نمونه دیگری در [۱۱] ارائه شده است که در آن ۱۳۰ خدمات کیوبست بر اساس هدف اصلی‌شان گروه‌بندی شده‌اند.

سفرهای فضایی آسیب‌های زیادی به سلامت فضاوردان وارد می‌کند و این امر نیاز به مطالعه بهتر محیط فضایی برای درک این خطرات و چگونگی کاهش آن‌ها را ایجاد کرده است [۷]. با پیشرفت مأموریت‌های کیوبست، این ماهواره‌ها برای مطالعات زیست‌پزشکی نیز مناسب شده‌اند و جایگزین پلتفرم‌های زیست‌پزشکی معمول شده‌اند. مزایای استفاده از مأموریت‌های کیوبست در این مطالعات در [۱۲] شرح داده شده است.

در [۱۳]، بررسی‌هایی در مورد مأموریت‌های مرتبط با ترموسفر/گروسفر و مگنتوسفر ارائه شده است. برای دسته اول، روش سنجش از دور، محدوده ارتفاع مأموریت و روش‌های محلی برای اندازه‌گیری ذرات خنثی سرد توضیح داده شده است. برای مأموریت‌های مگنتوسفر نیز مناطق کلیدی مطالعه‌شده، مدار مأموریت، و جرم یون‌ها شرح داده شده‌اند [۱۷].



شکل (۳): استانداردهای مختلف کیوبست

کیوبست‌ها به دو روش به مدار پرتاب می‌شوند [۸]:

• استفاده از خدمات پرتاب مرسوم به کمک ماهواره‌برها

• ارسال از طریق محموله‌های ارسال‌شده به ایستگاه فضایی

برای مأموریت‌های تأمین مجدد و سپس آزادسازی در فضا.

در هر دو حالت، کیوبست‌ها به سیستمی به نام دپلور متصل می‌شوند (دپلور در کیوبست‌ها به سیستمی اشاره دارد که وظیفه آزادسازی و استقرار کیوبست‌ها در مدار را بر عهده دارد. این سیستم معمولاً یک ساختار مکانیکی است که کیوبست‌ها را در طول پرتاب محافظت کرده و سپس در زمان مناسب، آن‌ها را در مدار مشخص‌شده آزاد می‌کند) [۹]. این سیستم وظیفه دارد کیوبست را در مدار مورد نظر مستقر نماید [۱۰]. موشک‌های حامل و ماهواره‌برهای مطرح در حوزه کیوبست در شکل ۴ نشان داده شده‌اند. در سال ۲۰۱۴ آنتارس در خدمات پرتاب کیوبست پیشرو بود. در سال ۲۰۱۷ وسیله پرتاب ماهواره قطبی و سایوز نیز وارد این حوزه شدند و در سال بعد فالکون به آن‌ها پیوست. ماهواره‌برها و موشک‌های حامل برتر در حوزه تزریق کیوبست در مدار شامل موارد زیر هستند [۸]:

o Atlas V با ۱۴۱ (٪۱۳.۶) پرتاب

o Antares با ۱۳۶ (٪۱۳.۱) پرتاب

o Soyuz با ۱۳۳ (٪۱۲.۹) پرتاب

o Falcon با ۱۱۸ (٪۱۱.۴) پرتاب هستند.

کیوبست‌ها معمولاً به صورت محموله‌های جانبی ماهواره‌برهای

بزرگ به محیط فضا پرتاب می‌شوند. آن‌ها همچنین می‌توانند به

همین طریق از ایستگاه فضایی به مدارهای هدف تزریق شوند.

توسعه کیوبست‌های پیشرفته برای اندازه‌گیری‌های علمی و مأموریت‌های فناوری و پیشرو در همکاری با آژانس فضایی اروپا و دیگر سازمان‌های فضایی برای مأموریت‌های نوآورانه.

■ انگلستان University of Surrey

تمرکز بر روی کاربردهای تجاری کیوبست‌ها، از جمله ارتباطات و سنجش از دور و دارای نقش کلیدی در ایجاد فناوری‌های پیشرفته و کاهش هزینه‌های پرتاب.

■ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)

برزیل-

فعالیت در زمینه ماهواره‌های کوچک برای تحقیقات جوی و سنجش از دور و پیشگام در توسعه مأموریت‌های کم‌هزینه برای پایش محیط زیست.

■ Swiss Federal Institute of Technology Zurich (ETH Zurich) سوئیس

پژوهش‌های گسترده در زمینه مأموریت‌های علمی و فناوری‌های نوین برای کیوبست‌ها پیشرو در طراحی سیستم‌های مبتنی بر هوش مصنوعی و تصویربرداری پیشرفته.

■ هند- Indian Space Research Organization (ISRO)

حمایت گسترده از دانشگاه‌ها و مؤسسات تحقیقاتی برای پرتاب کیوبست‌ها پیشرو در حوزه توسعه پرتابگرهای کوچک برای کاهش هزینه و تسهیل دسترسی به فضا.

■ اروپا European Space Agency (ESA)

برنامه‌های تحقیقاتی گسترده برای حمایت از توسعه کیوبست‌ها در دانشگاه‌ها.

۳-۲- سازمان‌های فضایی و همکاری‌های بین‌المللی

■ NASA CubeSat Launch Initiative (CSLI)

ارائه فرصت‌های پرتاب کم‌هزینه برای دانشگاه‌ها و مؤسسات تحقیقاتی.

■ ESA CubeSat Program

تأمین بودجه و پشتیبانی فنی برای دانشگاه‌ها در طراحی و اجرای مأموریت‌ها و همچنین همکاری‌های بین‌المللی برای ارتقای کاربردهای کیوبست در مأموریت‌های پیچیده.

■ UNISEC-Global (University Space Engineering Consortium)

توسعه قطعات با فناوری‌های کوچک و ساخته شده از مواد سبک و مقاوم که قابلیت بقاء در فضا را دارند، همراه با بهبود در کارایی سیستم‌های تولید و ذخیره انرژی، به ارتقای سیستم‌های حسگر ماهواره کمک کرده است [۱۴] این پیشرفت‌ها باعث کاهش منابع مورد نیاز و در نتیجه کاهش هزینه‌ها شده است و امکان استقرار تعداد بیشتری ماهواره در یک وسیله پرتاب را فراهم کرده است [۱۵].

۳- مراکز تحقیقاتی و یا صنعتی پیشرو در حوزه

کیوبست

در سطح جهانی، دانشگاه‌ها، مؤسسات تحقیقاتی، و سازمان‌های فضایی پیشرو نقش کلیدی در توسعه و پیشرفت کیوبست‌ها دارند. این نهادها از طریق تحقیقات بنیادی، توسعه فناوری‌های نوآورانه، و اجرای مأموریت‌های فضایی در ابعاد کوچک، راه را برای استفاده گسترده از کیوبست‌ها در زمینه‌های علمی، آموزشی، و تجاری باز کرده‌اند.

۳-۱- دانشگاه‌ها و مراکز تحقیقاتی پیشرو در جهان

■ California Polytechnic State University (Cal Poly)

آمریکا-

بنیان‌گذار استانداردهای کیوبست‌ها در همکاری با دانشگاه استنفورد. فعالیت‌های تحقیقاتی در حوزه طراحی پلتفرم‌های کیوبستی و آموزش دانشجویان.

■ Stanford University آمریکا

مشارکت در تعریف و توسعه مفهوم کیوبست و استانداردسازی آن.

■ Massachusetts Institute of Technology (MIT) آمریکا

پیشگام در مأموریت‌های علمی مبتنی بر کیوبست و پیشرو در توسعه فناوری‌های پیشرفته مانند سیستم‌های ارتباطی و تصویربرداری مینیاتوری.

■ University of Tokyo ژاپن

طراحی و توسعه اولین کیوبست ژاپن (XI-IV) که در سال ۲۰۰۳ پرتاب شد و پیشگام در همکاری‌های بین‌المللی برای پیشبرد فناوری‌های کوچک‌سازی ماهواره‌ها.

■ دانمارک Technical University of Denmark (DTU)

ماموریت (2022) Lunar IceCube نمونه دیگری از کاربرد موفق کیوبست‌ها در اهداف علمی است. این کیوبست U 6 با جرم ۱۴ کیلوگرم، به منظور شناسایی یخ آب در مناطق قطبی ماه طراحی و پرتاب شد. سیستم تامین توان این فضاپیما شامل پنل‌های خورشیدی GaAs با توان ۳۰ وات و باتری‌های لیتیوم-یونی با ظرفیت ۴۰ وات‌ساعت بود. ابزار علمی اصلی این ماموریت، اسپکترومتر مادون قرمز BIRCHES با محدوده طول موج ۱ تا ۴ میکرومتر و وضوح ۱۰ نانومتر، به منظور تحلیل طیفی یخ آب طراحی شده بود. سیستم پیش‌رانش یونی Busek BIT-3 با توان ۵۰ وات و رانش ۱.۴ میلی‌نیوتن، امکان تنظیم مدار در مدار بیضوی حول ماه (۵۰۰×۱۰۰ کیلومتر) را فراهم ساخت. ارتباط با زمین از طریق فرستنده X-band Iris V2 با توان ۴ وات و نرخ داده ۱۰۰ کیلوبیت بر ثانیه برقرار گردید. معماری سیستم Lunar IceCube مبتنی بر پردازنده LEON3-FT و سیستم‌عامل RTEMS بود. چالش‌های مربوط به توان محدود با استفاده از Supercapacitors و اثرات تشعشعات فضایی (تا ۵۰ کیلو راد) با استفاده از سپر تنگستنی مدیریت شدند. تحلیل نرخ موفقیت ماموریت‌های کیوبست نشان می‌دهد که این شاخص در طول زمان با پیشرفت فناوری و افزایش تجربه در طراحی و بهره‌برداری این پلتفرم‌ها بهبود یافته است. بر اساس مطالعه‌ای که بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۵ را در بر می‌گیرد، نرخ موفقیت ماموریت‌های کیوبست در حدود ۲۰.۴٪ (۱۰۱ ماموریت موفق از ۴۹۸ پرتاب) گزارش شده است. با این حال، این نرخ تا سال ۲۰۲۰ به ۴۰٪ افزایش یافته است که نشان‌دهنده یادگیری و بهبود مستمر در این حوزه است. دلایل اصلی شکست ماموریت‌های کیوبست در سال‌های اولیه شامل عدم انجام تست‌های کافی (۳۵٪ موارد)، مشکلات مربوط به استقرار (دپلوی) در مدار (۲۵٪ موارد)، خرابی سیستم قدرت (۲۰٪ موارد) و مشکلات مخابراتی (۱۵٪ موارد) بوده است. به عنوان مثال، ماموریت ESTCube-1 به دلیل عدم تست کافی آنتن، ارتباط خود را از دست داد. تجربه نشان داده است که انجام تست‌های محیطی جامع نظیر Thermal Vacuum و Vibration می‌تواند نرخ موفقیت ماموریت‌ها را تا ۲۵٪ افزایش دهد. مشکلات مربوط به دپلوی نیز با حوادثی نظیر از دست رفتن ۳ کیوبست در پرتاب (2013) Vega VV02 به دلیل نقص در سیستم استقرار مشهود بوده است. استفاده از سیستم‌های استقرار پیشرفته نظیر ISIPOD توانسته است نرخ خرابی‌های ناشی از دپلوی را به حدود ۵٪ کاهش دهد. خرابی‌های سیستم قدرت، همانند

شبکه جهانی از دانشگاه‌ها و مؤسسات برای همکاری در زمینه کیوبست‌ها و همچنین پیشرو در برگزاری مسابقات و رویدادهای بین‌المللی برای توسعه فناوری‌های نوین.

▪ JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency)
حمایت از ماموریت‌های کیوبستی برای مطالعات علمی و آزمایش فناوری‌های فضایی و پیشگام در ارائه پرتابگرهای اقتصادی برای ماموریت‌های کوچک.

▪ SpaceX
ارائه خدمات پرتاب کیوبست‌ها با استفاده از موشک‌های Falcon و پیشرو در کاهش هزینه‌های پرتاب و تسهیل دسترسی جهانی به فضا.

۴- ماموریت‌های موفق کیوبست‌ها و تحلیل نرخ

موفقیت

در طول تاریخچه توسعه کیوبست‌ها، چندین ماموریت پیشگامانه به اثبات قابلیت‌های این پلتفرم‌های کوچک فضایی در انجام اهداف علمی و فنی متنوع پرداخته‌اند. ماموریت-MarCO (2018) A/B به عنوان نخستین کیوبست‌های بین‌سیاره‌ای، نقش حیاتی در برقراری ارتباط با کاوشگر InSight ایفا نمودند. این فضاپیماهای U 6 با جرم ۱۳/۵ کیلوگرم، با بهره‌گیری از آرایه‌های خورشیدی گالیوم آرسناید با بازدهی ۲۸٪ و توان تولیدی ۳۵ وات، امکان تامین انرژی مورد نیاز سیستم‌های خود را فراهم ساختند. زیرسیستم مخابراتی آن‌ها شامل یک فرستنده X-band با توان خروجی ۸ وات بود که امکان ارسال داده با نرخ ۸ کیلوبیت بر ثانیه از فاصله ۱/۵ واحد نجومی را میسر می‌ساخت. یک آنتن تاشو با بهره ۱۰ دسی‌بل و دوربین‌های CMOS با رزولوشن ۴۸۰×۷۵۲ پیکسل نیز به منظور تصویربرداری و ناوبری در این ماموریت مورد استفاده قرار گرفتند. سیستم پیش‌رانش مبتنی بر گاز سرد (R-236fa) با قابلیت تولید رانش بین ۱۰ تا ۲۰ میلی‌نیوتن و ارائه رانش ویژه ۴۰ تا ۵۰ ثانیه، امکان انجام مانورهای مداری مورد نیاز را فراهم نمود. معماری سیستم MarCO-A/B بر پایه پردازنده ARM Cortex-M3 با فرکانس ۲۰۰ مگاهرتز و سیستم‌عامل مبتنی بر لینوکس استوار بود. چالش مصرف توان بالای فرستنده X-band (۱۲ وات) از طریق تکنیک Duty Cycling مدیریت گردید و دقت ناوبری با استفاده از Star Tracker با دقت ۰/۰۱ درجه بهبود یافت.

نقشه‌های شبکه‌ای از واژگان و روابط آن‌ها را دارد. تحلیل هم‌واژگانی در این مقاله شامل موارد زیر است:

جمع‌آوری داده‌ها: در این مرحله، باید مجموعه‌ای از مقالات علمی، کتاب‌ها، گزارش‌ها یا سایر منابع اطلاعاتی مرتبط با موضوع تحقیق جمع‌آوری شود. این داده‌ها معمولاً شامل عناوین، چکیده‌ها، و کلمات کلیدی مقالات هستند.

در این فعالیت علمی از پایگاه داده وب آف ساینس استفاده شده است. با جستجو کلید واژه CubeSat در این پایگاه داده در حدود ۳۹۱۴ سند علمی نمایه شده است.

به منظور بهبود نتایج از فیلتر فقط اسناد علمی مرتبط با رشته مهندسی هوافضا انتخاب شده است که در حدود ۱۴۹۹ مقاله را نشان می‌دهد. از این تعداد مقلله به عنوان پایگاه اصلی داده و تحلیل علمی استفاده شده است. شکل ۵ نتایج فرایند جمع‌آوری داده را نشان می‌دهد.



شکل (۵): نتایج جستجو کلیدواژه‌ها در پایگاه داده وب آف ساینس

انتخاب و استخراج واژگان: بعد از جمع‌آوری داده‌ها، باید واژگان یا اصطلاحات مهم از متن‌ها استخراج شوند. در این مرحله، برخی از واژگان باید از متون حذف شوند که به‌طور مکرر و بدون ارتباط معنایی ظاهر می‌شوند.

۶- یافته‌های پژوهش

شکل ۶ یک نمودار هم‌رخدادی کلمات است که با استفاده از نرم‌افزار VOSviewer ایجاد شده و موضوع آن کیوبست است. نمودار نشان‌دهنده ارتباط بین موضوعات و مفاهیم مرتبط با کیوبست در مقالات علمی یا داده‌های پژوهشی است. این نمودار روندهای پژوهشی و زمینه‌های مختلف مرتبط با کیوبست‌ها را برجسته می‌کند. می‌توان از این اطلاعات برای شناسایی موضوعات تحقیقاتی مهم، همکاری‌های پژوهشی، و برنامه‌ریزی برای پروژه‌های آینده استفاده کرد. همچنین خوشه‌بندی‌ها نشان می‌دهند که

غیرفعال شدن کیوبست QB50 به دلیل نقص باتری، نیز از چالش‌های مهم بوده است. استفاده از پوشش‌های محافظ Coverglass Coatings برای پنل‌های خورشیدی می‌تواند نرخ خرابی این اجزا را به حدود ۲٪ کاهش دهد. مشکلات مخابراتی، همانند تداخل UHF در ماموریت PhoneSat-1، نیز از عوامل شکست بوده‌اند. استفاده از رادیوهای نرم‌افزاری (SDR) نشان داده است که می‌تواند موفقیت در برقراری ارتباط را تا ۲۰٪ بهبود بخشد. راهکارهای اتخاذ شده در ماموریت‌های موفق اخیر نشان می‌دهد که با انجام تست‌های محیطی جامع، استفاده از سیستم‌های استقرار پیشرفته (مانند NLAS) و پیاده‌سازی استانداردهای کیفی نظیر ECSS-Q-ST-70، می‌توان نرخ موفقیت ماموریت‌های کیوبست، به ویژه در کلاس U6 (همانند ماموریت MarCO)، را به بیش از ۵۰٪ رساند. این پیشرفت‌ها حاکی از بلوغ تدریجی فناوری کیوبست و افزایش اطمینان به قابلیت‌های آن در انجام ماموریت‌های فضایی با اهداف گوناگون است [۳۴].

۵- روش تحقیق

تحقیق با استفاده از تحلیل هم‌واژگان یکی از روش‌های نوین در تحلیل داده‌های علمی است که معمولاً برای شناسایی روندهای علمی، کشف موضوعات نوظهور، و تحلیل ارتباطات میان مفاهیم و واژگان در مقالات علمی و پژوهشی استفاده می‌شود [۱۹]. تحلیل هم‌واژگانی یک روش تحلیل محتوایی است که به ارزیابی مقوله مورد نظر بر اساس دفعات تکرار واژگان کلیدی اسناد می‌پردازد. از آنجا که حجم تولید و نشر مقاله‌های علمی بسیار زیاد است دیگر نمی‌توان به تحلیل محتوای همه مقاله‌ها در زمینه پدیده مورد نظر پرداخت. دیدگاه زیربنایی این روش آن است که براساس واژگان کلیدی یک مقاله می‌توان به درک درستی از کل محتوای مقاله دست یافت. در این روش، به‌جای تحلیل تنها کلمات کلیدی یا عبارات به‌طور جداگانه، بر روابط معنایی و هم‌راستایی میان آن‌ها تمرکز می‌شود. تحلیل هم‌واژگان یک تکنیک تحلیل محتوا است که از الگوهای هم‌زمانی واژگان (به عنوان مثال، کلمات یا کلیدواژه‌ها) در مجموعه‌ای از متون برای شناسایی روابط بین ایده‌ها در حوزه‌های موضوعی ارائه شده استفاده می‌کند. یکی از ابزارهای معروف برای انجام تحلیل هم‌واژگان، نرم‌افزار ویوس وویور است که قابلیت ترسیم

مسیرهای توسعه فناوریانه کلیدی و فناوری‌های درگیر در خلق قابلیت‌های جدید و رفع محدودیت‌های موجود در این حوزه است.

۱. بررسی خوشه‌های مختلف فناوری در شکل (هاند) پیش‌رانش، کنترل وضعیت، ارتباطات)، چه حوزه‌هایی در حال حاضر بیشترین تمرکز را در توسعه فناوری کیوبست‌ها به خود اختصاص داده‌اند؟ آیا می‌توان روندهای غلب در این توسعه را شناسایی کرد؟

بررسی خوشه بندی در شکل نشان می‌دهد که توسعه فناوری کیوبست‌ها در حال حاضر تمرکز قابل توجهی بر حوزه‌های کلیدی نظیر پیش‌رانش (propulsion)، کنترل وضعیت (attitude control) و ارتباطات (satellite communication, telemetry, antenna) دارد. بزرگی گره‌های مرتبط و پیوندهای قوی آن‌ها با گره مرکزی cubesat مؤید این امر است. روند غالب در توسعه پیش‌رانش به سوی مینیاتوری‌سازی، افزایش راندمان و استفاده از پیش‌رانه‌های نوین مانند پیش‌رانه‌های پلاسما پالسی و سیستم‌های مبتنی بر نیروی خورشیدی متمایل است. در حوزه کنترل وضعیت، تمرکز بر دستیابی به دقت بالاتر با مصرف توان کمتر و استفاده از سنسورها و عملگرهای کوچک و سبک‌وزن است. توسعه فناوری‌های ارتباطی نیز بر افزایش نرخ داده، کاهش توان مصرفی و ایجاد شبکه‌های ارتباطی مقاوم و کارآمد برای صورتواره‌ها متمرکز است. علاوه بر این، خوشه مرتبط با remote sensing و earth observation نشان‌دهنده اهمیت توسعه حسگرهای کوچک، سبک و با توان تفکیک مکانی و طیفی بالا برای کاربردهای سنجش از دور با استفاده از پلتفرم‌های کیوبستی است.

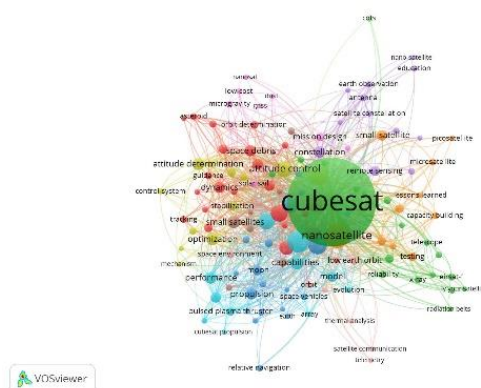
۲. ارتباط بین گره‌های COTS (قطعات تجاری آماده) و فناوری‌های کلیدی کیوبست (مانند attitude, propulsion, communication, control) چگونه است؟ آیا استفاده از COTS به عنوان یک عامل تسهیل‌کننده یا محدودکننده در توسعه این فناوری‌ها عمل کرده است؟ چه چالش‌های فناورانه‌ای در استفاده از COTS در این حوزه‌ها وجود دارد و چگونه می‌توان بر آن‌ها غلبه کرد؟

استفاده از قطعات تجاری آماده نقش دوگانه‌ای در توسعه فناوری‌های کلیدی کیوبست ایفاء می‌کند. از یک سو، قطعات تجاری آماده به عنوان یک عامل تسهیل‌کننده با کاهش چشمگیر هزینه‌ها و زمان توسعه، امکان ورود بازیگران جدید و تسریع نوآوری

کیوبست‌ها در بسیاری از زمینه‌های علمی و صنعتی کاربرد دارند، از جمله کنترل وضعیت، پیش‌رانش، و ارتباطات.

اندازه گره‌ها نمایانگر تعداد دفعاتی است که آن کلمه یا مفهوم در مقالات یا داده‌های پژوهشی ظاهر شده است. بزرگ‌ترین گره کیوبست نشان‌دهنده این است که این کلمه محور اصلی مقالات بوده است. سایر گره‌های بزرگ مانند small nanosatellite و low Earth orbit satellite نشان می‌دهند که این مفاهیم نیز در مطالعات مربوطه پرتکرار هستند.

رنگ گره‌ها، خوشه‌های مفهومی را نشان می‌دهد. گره‌های هم‌رنگ در یک خوشه مفهومی قرار دارند که نشان‌دهنده زمینه‌های تحقیقاتی مشابه است. خوشه‌بندی‌ها هر رنگ نمایانگر یک خوشه مفهومی است که موضوعات اصلی را دسته‌بندی می‌کند. به علت ارتباط بین گره و مفاهیم سوالات مطرح و پاسخ داده می‌شود.



شکل (۶): هم‌رخدادی کلمات کلیدی

طرح این سوالات با رویکرد توسعه فناوری و شناسایی فناوری‌های درگیر در نوآوری‌های حوزه کیوبست در بازه زمانی ۲۰۱۸-۲۰۲۲، بررسی چگونگی پیشرفت و همگرایی فناوری‌های مختلف در این عرصه است. از آنجا که شکل، ارتباطات پویا بین مفاهیم کلیدی را نشان می‌دهد، این سوالات به منظور شناسایی حوزه‌هایی که بیشترین پویایی و نوآوری فناورانه را تجربه می‌کنند (مانند پیش‌رانش‌های نوین، سیستم‌های کنترل وضعیت پیشرفته، و ارتباطات پرسرعت)، ارزیابی نقش فناوری‌های توانمندساز (مانند COTS و مواد پیشرفته) در این پیشرفت‌ها، و درک چگونگی ظهور فناوری‌های جدید (مانند هوش مصنوعی و ساخت افزودنی) و تاثیر آن‌ها بر کاربردهای آتی کیوبست‌ها طرح شده‌اند. هدف، شناسایی

قابلیت‌های پیشرفته‌تر در پلتفرم‌های کم‌هزینه کیوبستی را فراهم آورده است.

۴. نقش مفاهیم نوظهور مانند **pulsed plasma thruster** و **solar sail** در توسعه سیستم‌های پیش‌رانش کارآمدتر و با قابلیت مانور بالاتر برای کیوبست‌ها چیست؟ چه چالش‌های فناوری‌های در تجاری‌سازی و عملیاتی کردن این فناوری‌ها وجود دارد؟

مفاهیم نوظهور مانند پیش‌رانه‌های پلاسما پالسی و بادبان‌های خورشیدی نقش مهمی در توسعه سیستم‌های پیش‌رانش کارآمدتر و با قابلیت مانور بالاتر برای کیوبست‌ها ایفا می‌کنند. پیش‌رانه‌های پلاسما پالسی با ارائه تراست پالسی دقیق و مصرف سوخت پایین، امکان انجام مانورهای مداری ظریف و کنترل دقیق وضعیت را فراهم می‌کنند. بادبان‌های خورشیدی با بهره‌گیری از فشار تابش خورشید، امکان ایجاد تراست پیوسته بدون نیاز به مصرف پیش‌رانه را فراهم می‌کنند، که برای ماموریت‌های طولانی‌مدت و تغییرات مداری بزرگ بسیار جذاب است.

چالش‌های فناوری‌های نوظهور در تجاری‌سازی و عملیاتی کردن این فناوری‌ها شامل توسعه منابع تغذیه کوچک و کارآمد برای پیش‌رانه‌های پلاسما پالسی، اطمینان از عملکرد پایدار و طول عمر بالا در محیط فضایی، و توسعه مواد سبک‌وزن و مقاوم برای بادبان‌های خورشیدی با مساحت بزرگ و مکانیسم‌های بازشوندگی مطمئن است. همچنین، مدل‌سازی دقیق عملکرد و کنترل این سیستم‌های پیش‌رانش نوظهور و ادغام آن‌ها با سیستم‌های کلی کیوبست نیازمند تحقیقات و توسعه بیشتری است.

۵. با توجه به کاربردهای رو به رشد کیوبست‌ها در **earth observation**، **satellite constellation**، چه فناوری‌های کلیدی (مانند حسگرهای کوچک با وضوح بالا، سیستم‌های ارتباطی پرسرعت بین ماهواره‌ای، الگوریتم‌های پردازش داده‌های فضایی) برای بهبود عملکرد و کارایی این کاربردها در حال توسعه هستند؟ کاربردهای رو به رشد کیوبست‌ها در رصد زمین و منظومه‌های ماهواره‌ای نیازمند توسعه فناوری‌های کلیدی در چندین حوزه است. در زمینه رصد زمین، تمرکز بر توسعه حسگرهای تصویربرداری کوچک، سبک و با وضوح مکانی و طیفی بالا (مانند حسگرهای فراطیفی و چندطیفی کوچک‌شده) است. برای صورتواره‌های

در این حوزه را فراهم آورده است. دسترسی به طیف وسیعی از قطعات الکترونیکی، پردازنده‌ها، و سیستم‌های ارتباطی تجاری، توسعه سیستم‌های پایه کیوبست را تسریع کرده است. از سوی دیگر، استفاده از قطعات تجاری آماده محدودیت‌هایی را نیز به همراه دارد، به ویژه در فناوری‌های حساس مانند پیش‌رانش و کنترل وضعیت. چالش‌های فناوری‌های اصلی شامل عدم تطابق مشخصات عملکردی و قابلیت اطمینان قطعات تجاری با الزامات سختگیرانه محیط فضایی (مانند تحمل تشعشعات، دماهای شدید و خلاء) و همچنین محدودیت‌های اندازه، وزن و توان (SWaP) است. غلبه بر این چالش‌ها نیازمند رویکردهای نوینی در انتخاب دقیق قطعات، انجام تست‌های جامع و اصلاح و مقاوم‌سازی قطعات تجاری برای کاربردهای فضایی است. پژوهش‌های جاری بر توسعه روش‌های محافظت در برابر تشعشعات، مدیریت حرارتی کارآمد و طراحی سیستم‌های تحمل‌پذیر خطا با استفاده از قطعات تجاری آماده متمرکز است.

۳. با توجه به اهمیت **low cost** در توسعه کیوبست‌ها، چگونه پیشرفت‌های فناوری‌های نوظهور در حوزه‌های مختلف (مانند مواد سبک‌وزن، الکترونیک کوچک و کم‌مصرف، روش‌های تولید نوین) به کاهش هزینه‌ها و در عین حال افزایش **capabilities** آن‌ها کمک کرده است؟

اهمیت هزینه پایین به عنوان یک محرک کلیدی در توسعه کیوبست‌ها، موجب تمرکز پژوهش‌ها بر فناوری‌هایی شده است که به طور همزمان هزینه‌ها را کاهش داده و قابلیت‌های آن‌ها را ارتقا می‌بخشند. پیشرفت در مواد سبک‌وزن و با استحکام بالا (مانند آلایزهای آلومینیوم پیشرفته و مواد کامپوزیتی) منجر به کاهش جرم کلی سازه و در نتیجه کاهش هزینه پرتاب و افزایش نسبت توان به وزن سیستم‌ها شده است. توسعه الکترونیک کوچک و کم‌مصرف (مانند سیستم‌های روی تراشه SoC - و مدارهای مجتمع با چگالی بالا) امکان تجمیع عملکردهای پیچیده در حجم و وزن کمتر و با مصرف توان پایین‌تر را فراهم کرده است، که به نوبه خود هزینه و پیچیدگی سیستم را کاهش می‌دهد. همچنین، روش‌های تولید نوین مانند چاپ سه بعدی امکان تولید قطعات پیچیده با هزینه کمتر و زمان کوتاه‌تر را فراهم کرده و در عین حال انعطاف‌پذیری طراحی را افزایش داده است. این پیشرفت‌های فناوری‌های نوظهور امکان پیاده‌سازی

به طور کامل می‌سوزند، توسعه سیستم‌های غیرفعال‌سازی برای اطمینان از خروج ایمن ماهواره‌ها از مدار پس از پایان مأموریت، و انتخاب مدارهای با طول عمر محدود است. در زمینه حذف فعال زباله‌های فضایی، پژوهش‌ها بر توسعه سیستم‌های چنگ‌زننده کوچک مبتنی بر بازوهای رباتیک، تورهای فضایی، و روش‌های غیرتماسی مانند استفاده از لیزر یا بادبان‌های درگ برای کاهش سرعت و خروج زباله‌ها از مدار متمرکز است. با این حال، توسعه فناوری‌های حذف فعال زباله‌های فضایی کوچک مانند کیوب‌ست‌ها هنوز در مراحل اولیه است و چالش‌های فنی و اقتصادی قابل توجهی وجود دارد.

۸. چگونه توسعه فناوری در زمینه thermal analysis و radiation belts به بهبود طراحی و افزایش طول عمر کیوب‌ست‌ها در محیط سخت فضایی کمک می‌کند؟ چه مواد و روش‌های محافظتی نوینی در حال بررسی و استفاده هستند؟

توسعه فناوری در زمینه تحلیل حرارتی و درک اثرات کمربندهای تشعشعی نقش اساسی در بهبود طراحی و افزایش طول عمر کیوب‌ست‌ها در محیط سخت فضایی ایفا می‌کند. تحلیل حرارتی دقیق به مهندسان کمک می‌کند تا سیستم‌های مدیریت حرارتی کارآمد (مانند عایق‌های چندلایه، رادیاتورها و لوله‌های حرارتی کوچک) را طراحی کنند که دمای قطعات را در محدوده عملکردی ایمن حفظ کنند. درک اثرات تشعشعات فضایی منجر به توسعه مواد مقاوم در برابر تشعشع و روش‌های محافظتی نوین (مانند استفاده از پوشش‌های محافظ، انتخاب قطعات الکترونیکی مقاوم در برابر تشعشع و طراحی سیستم‌های تحمل‌پذیر خطا) شده است. پژوهش‌های جاری بر بررسی مواد نانوکامپوزیتی با خواص محافظتی بهبود یافته و روش‌های شبیه‌سازی دقیق‌تر اثرات تشعشعات بر قطعات کوچک الکترونیکی متمرکز است.

۹. با توجه به اهمیت testing و reliability، چه ابزارها، روش‌ها و استانداردهای نوینی برای ارزیابی عملکرد و اطمینان از قابلیت اطمینان فناوری‌های مورد استفاده در کیوب‌ست‌ها در حال توسعه هستند؟

با توجه به اهمیت آزمایش و قابلیت اطمینان، توسعه ابزارها، روش‌ها و استانداردهای نوینی برای ارزیابی عملکرد و اطمینان از

ماهواره‌ای، توسعه سیستم‌های ارتباطی پرسرعت بین ماهواره‌ای^۱ با استفاده از لینک‌های رادیویی یا لیزری برای تبادل داده و هماهنگی عملکرد ماهواره‌ها ضروری است. همچنین، الگوریتم‌های پردازش داده‌های فضایی کارآمد و توزیع‌شده برای مدیریت حجم عظیم داده‌های جمع‌آوری‌شده توسط صورتواره‌ها و استخراج اطلاعات مفید در زمان واقعی از اهمیت بالایی برخوردار است. توسعه سیستم‌های ناوبری و کنترل دقیق موقعیت نسبی برای حفظ پیکربندی صورتواره‌ها نیز یک حوزه فعال پژوهشی است.

۶. چگونه توسعه فناوری در زمینه attitude determination و guidance به افزایش دقت و قابلیت اطمینان مأموریت‌های کیوب‌ستی، به ویژه در کاربردهایی مانند orbit determination و relative navigation کمک می‌کند؟ چه نوآوری‌هایی در این زمینه‌ها قابل توجه است؟

توسعه فناوری در زمینه تعیین وضعیت و هدایت نقش حیاتی در افزایش دقت و قابلیت اطمینان مأموریت‌های کیوب‌ستی ایفا می‌کند، به ویژه در کاربردهایی که نیازمند تعیین دقیق مدار و ناوبری نسبی در صورتواره‌ها هستند. نوآوری‌های قابل توجه در این زمینه‌ها شامل توسعه سنسورهای کوچک و کم‌مصرف با دقت بالا (مانند واحدهای اندازه‌گیری اینرسی کوچک‌شده IMUs - و ردیاب‌های ستاره‌ای کوچک)، الگوریتم‌های فیلترینگ و تخمین وضعیت پیشرفته (مانند فیلترهای کالمن غیرخطی و روش‌های یادگیری ماشین برای تخمین وضعیت)، و سیستم‌های هدایت و کنترل مبتنی بر بازخورد دقیق است. در زمینه ناوبری نسبی، توسعه سنسورهای فاصله‌سنجی کوچک و کم‌توان (مانند سیستم‌های مبتنی بر امواج رادیویی یا نوری) و الگوریتم‌های ناوبری توزیع‌شده برای حفظ آرایش صورتواره‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است.

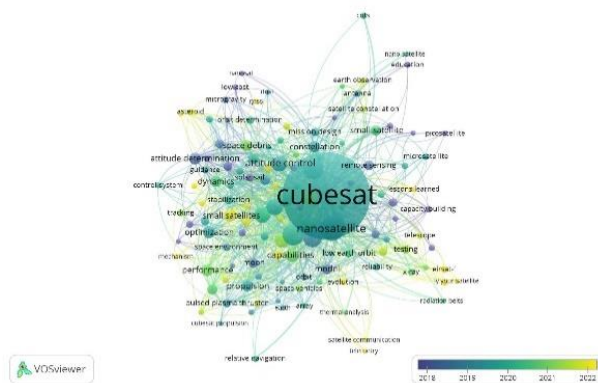
۷. با در نظر گرفتن چالش space debris، چه فناوری‌ها و رویکردهای نوینی برای کاهش تولید زباله‌های فضایی ناشی از کیوب‌ست‌ها و یا حذف فعال آن‌ها در حال توسعه هستند؟

چالش فزاینده زباله‌های فضایی ناشی از افزایش تعداد کیوب‌ست‌ها، موجب تمرکز بر توسعه فناوری‌ها و رویکردهای نوینی برای کاهش تولید و حذف آن‌ها شده است. رویکردهای کاهش تولید شامل طراحی برای از بین رفتن^۲ با استفاده از موادی که در جو زمین

² Design for Demise

¹ Inter-Satellite Links - ISL

کاربردهای در حال ظهور و چالش‌های پیش رو طرح شده‌اند. هدف، فراتر رفتن از توصیف وضعیت فعلی و استخراج بینش‌های عمیق در مورد چگونگی تکامل فناوری کیوبست و تعیین اولویت‌های پژوهشی آتی است که برای پیشبرد مرزهای دانش و کاربردهای عملی این پلتفرم فضایی حیاتی است.



شکل (۷): تحلیل توسعه فناوری در بازه زمانی

۱. با بررسی تغییرات در اندازه و ارتباط خوشه‌های کلیدواژه‌ها در طول بازه زمانی ۲۰۱۸-۲۰۲۲، چه روندهای غالب در تکامل فناوری کیوبست و ظهور حوزه‌های جدید پژوهشی قابل شناسایی است؟ آیا می‌توان پیش‌بینی کرد که کدام حوزه‌ها در آینده نزدیک از رشد بیشتری برخوردار خواهند بود؟

تحلیل تغییرات در ابعاد و اتصالات خوشه‌های کلیدواژه‌ها در بازه زمانی مورد نظر، بیانگر چند روند غالب در تکامل فناوری کیوبست است. نخست، تقویت خوشه مرتبط با کاربردهای رصد زمین با افزایش اندازه گره‌ها و استحکام پیوندها، نشان‌دهنده بلوغ و گسترش استفاده از کیوبست‌ها در این حوزه است. دوم، رشد نسبی خوشه مرتبط با منظومه‌های ماهواره‌ای حاکی از توجه فزاینده به بهره‌گیری از مزایای استقرار گروهی کیوبست‌ها برای ارائه خدمات متنوع است. سوم، ظهور و تقویت خوشه‌های مرتبط با فناوری‌های پیشرفته‌تر نظیر پیشران‌های نوین (پیشران پلاسمای پالسی، بادبان خورشیدی) و ناوبری دقیق (ناوبری نسبی، تعیین مدار) اگرچه ممکن است هنوز از نظر اندازه به خوشه‌های کاربردی نرسیده باشند، اما افزایش ارتباط آن‌ها با گره مرکزی cubesat و ظهور گره‌های جدید در این نزدیکی، نشان‌دهنده تمرکز پژوهشی بر ارتقاء قابلیت‌های اساسی پلتفرم کیوبست است. پیش‌بینی حوزه‌های با رشد بیشتر در آینده نزدیک مستلزم توجه به خوشه‌هایی است که

قابلیت اطمینان فناوری‌های مورد استفاده در کیوبست‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است. این شامل توسعه تجهیزات تست محیطی کوچک‌شده و مقرون‌به‌صرفه برای شبیه‌سازی شرایط فضایی (مانند محفظه‌های خلاء حرارتی کوچک و منابع تشعشع)، روش‌های تست سریع و خودکار برای ارزیابی عملکرد سیستم‌های پیچیده، و استانداردهای خاص برای تست قطعات COTS برای کاربردهای فضایی است. همچنین، استفاده از روش‌های تحلیل قابلیت اطمینان مبتنی بر داده و مدل‌سازی خرابی برای پیش‌بینی عمر مفید و شناسایی نقاط ضعف سیستم‌ها در حال گسترش است.

۱۰. آینده توسعه فناوری کیوبست‌ها را چگونه ارزیابی می‌کنید؟ با توجه به روندهای فعلی و گره‌های موجود در شکل، چه فناوری‌های نوظهوری پتانسیل ایجاد تحول در این حوزه را دارند و چه کاربردهای جدیدی را ممکن خواهند ساخت؟

آینده توسعه فناوری کیوبست‌ها بسیار امیدوارکننده به نظر می‌رسد. با توجه به روندهای فعلی و گره‌های موجود در شکل، انتظار می‌رود فناوری‌های نوظهوری مانند هوش مصنوعی و یادگیری ماشین برای مدیریت و کنترل خودکار صورتواره‌ها و پردازش داده‌های فضایی در لبه، ارتباطات لیزری برای افزایش نرخ داده و امنیت ارتباطات، پیشران‌های الکتریکی با راندمان بالا برای مانورهای مداری دقیق و طولانی‌مدت، حسگرهای کوچک و با کارایی بالا برای سنجش از دور پیشرفته و تحقیقات علمی، و روش‌های ساخت و مونتاژ خودکار در فضا پتانسیل ایجاد تحول در این حوزه را داشته باشند. این پیشرفت‌های فناورانه کاربردهای جدیدی را در زمینه‌هایی مانند اینترنت اشیاء فضایی، ارتباطات نسل پنجم و ششم، پایش دقیق تغییرات آب و هوایی، اکتشافات فضایی کم‌هزینه و رباتیک فضایی ممکن خواهند ساخت و نقش کیوبست‌ها را به عنوان ابزاری قدرتمند و مقرون‌به‌صرفه در دسترسی به فضا و بهره‌برداری از آن بیش از پیش تقویت خواهند کرد.

شکل ۷ تحلیل زمان‌بندی کلمات کلیدی در بازه زمانی سال‌های (۲۰۱۸-۲۰۲۲) را نمایش می‌دهد. علت طرح این سوالات با رویکردی مرز دانشی و با تمرکز بر روند تحولات فناوری کیوبست در بازه زمانی ۲۰۱۸-۲۰۲۲، پاسخگویی به نیاز مبرم برای درک مسیر آینده این حوزه است. از آنجایی که شکل، پویایی ارتباطات کلیدواژه‌ها را در طول زمان نشان می‌دهد، این سوالات به منظور شناسایی روندهای غالب، فناوری‌های نوظهور با پتانسیل تحول‌زا،

چشمگیر عملکرد و کارایی این کاربردها را دارند؟ آیا تغییر در ارتباط بین این کاربردها و فناوری‌های مرتبط در طول زمان، نشان‌دهنده همگرایی یا واگرایی مسیرهای توسعه است؟

در راستای بهبود عملکرد و کارایی کیوب‌ست‌ها در کاربردهای رو به رشد "earth observation" و "satellite constellation"، چندین فناوری مرز دانشی در حال ظهور هستند. در حوزه رصد زمین، توسعه حسگرهای تصویربرداری کوچک با قدرت تفکیک مکانی و طیفی بسیار بالا، پردازش تصویر مبتنی بر هوش مصنوعی در لبه برای استخراج سریع اطلاعات، و استفاده از لینک‌های ارتباطی پرسرعت (از جمله لیزری) برای انتقال حجم بالای داده‌ها از جمله فناوری‌های کلیدی هستند. برای منظومه‌های ماهواره‌ای، توسعه سیستم‌های ارتباطی بین ماهواره‌ای با پهنای باند بالا و تأخیر کم، الگوریتم‌های کنترل و هماهنگی توزیع‌شده برای آرایش دقیق ماهواره‌ها، و قابلیت‌های پیکربندی مجدد مداری و عملکردی (reconfigurable payloads) از اهمیت بالایی برخوردارند. تغییر در ارتباط بین این کاربردها و فناوری‌های مرتبط در طول زمان می‌تواند نشان‌دهنده همگرایی مسیرهای توسعه باشد، به این معنا که پیشرفت در یک فناوری (مانند ارتباطات پرسرعت) به طور همزمان عملکرد چندین کاربرد را بهبود می‌بخشد. همچنین، ممکن است شاهد واگرایی نیز باشیم، به این صورت که فناوری‌های خاصی به طور ویژه برای یک کاربرد توسعه می‌یابند. تحلیل ساختار خوشه‌ها و تغییرات در پیوندها می‌تواند این الگوها را آشکار سازد.

۴. چگونه مفهوم COTS (قطعات تجاری آماده) در طول زمان با فناوری‌های کلیدی کیوب‌ست (مانند پیشران‌ش، کنترل وضعیت، ارتباطات) تعامل پیدا کرده است؟ آیا استفاده از COTS به عنوان یک عامل تسهیل‌کننده نوآوری در این حوزه‌ها تقویت شده یا با چالش‌های جدیدی مواجه شده است؟

تعامل مفهوم COTS با فناوری‌های کلیدی کیوب‌ست در طول زمان یک موضوع پیچیده است. در ابتدا، استفاده از COTS عامل اصلی تسهیل‌کننده در کاهش هزینه و زمان توسعه کیوب‌ست‌ها بود. با این حال، با پیشرفت ماموریت‌ها و افزایش نیاز به عملکرد و قابلیت اطمینان بالاتر در حوزه‌هایی مانند پیشران‌ش، کنترل وضعیت و ارتباطات، چالش‌های مربوط به محدودیت‌های عملکردی و مقاومت محیطی قطعات تجاری در محیط فضایی آشکارتر شده است. بررسی تغییرات در اندازه و ارتباط گره COTS با خوشه‌های فناوری‌های کلیدی

در سال‌های پایانی بازه زمانی مورد بررسی، رشد قابل توجهی را نشان می‌دهند و ارتباطات قوی‌تری با سایر حوزه‌ها برقرار می‌کنند. به نظر می‌رسد توسعه فناوری‌های پیشران‌ش کارآمد و دقیق برای مانورهای مداری پیچیده‌تر و حفظ آرایش منظومه‌ها، و همچنین فناوری‌های ارتباطی پرسرعت بین ماهواره‌ای برای بهره‌برداری مؤثر از منظومه‌ها بزرگ، از جمله حوزه‌هایی باشند که در آینده نزدیک شاهد رشد فزاینده‌ای خواهند بود. همچنین، با بلوغ بیشتر حسگرهای کوچک و کم‌مصرف، انتظار می‌رود کاربردهای نوظهور در زمینه‌های علمی خاص (مانند تحقیقات فضایی در مقیاس کوچک) و پایش محیطی دقیق‌تر نیز گسترش یابند.

۲. نقش و میزان توجه به فناوری‌های نوظهور مانند pulsed solar sail و plasma thruster در طول زمان چگونه تغییر کرده است؟ آیا افزایش یا کاهش ارتباط این فناوری‌ها با گره مرکزی cubesat نشان‌دهنده بلوغ یا افول آن‌ها در چشم‌انداز تحقیقاتی است؟ چه عوامل فناورانه یا کاربردی می‌توانند این تغییرات را تبیین کنند؟

بررسی تغییرات در اندازه و ارتباط گره‌های pulsed plasma thruster و solar sail با گره مرکزی cubesat در طول زمان می‌تواند شاخصی از میزان توجه و پیشرفت این فناوری‌های نوظهور در حوزه کیوب‌ست باشد. افزایش اندازه این گره‌ها و تقویت پیوندهای آن‌ها با cubesat می‌تواند نشان‌دهنده افزایش توجه پژوهشی و پیشرفت در بلوغ این فناوری‌ها باشد. این امر ممکن است ناشی از دستیابی به راندمان بالاتر، کاهش اندازه و وزن، یا یافتن کاربردهای عملیاتی مشخص برای این نوع پیشران‌ها در ماموریت‌های کیوب‌ستی باشد. در مقابل، کاهش اندازه یا ضعف ارتباط این گره‌ها می‌تواند نشان‌دهنده چالش‌های فناورانه پایدار در تجاری‌سازی و عملیاتی کردن آن‌ها، یا تغییر اولویت‌های پژوهشی به سمت سایر فناوری‌ها باشد. عواملی مانند پیچیدگی طراحی و ساخت، نیاز به منابع توان بالا، یا محدودیت‌های عملکردی در مقایسه با سایر گزینه‌ها می‌توانند در این امر مؤثر باشند. تحلیل دقیق روند تغییرات رنگ این گره‌ها (نشان‌دهنده زمان انتشار مقالات مرتبط) نیز می‌تواند اطلاعات بیشتری در مورد زمان اوج توجه به این فناوری‌ها ارائه دهد.

۳. با در نظر گرفتن کاربردهای رو به رشد کیوب‌ست‌ها در حوزه‌هایی مانند earth observation و satellite constellation، چه فناوری‌های مرز دانشی در حال ظهور هستند که پتانسیل بهبود

محدودیت در "قابلیت‌ها" وجود داشته باشد. با گذشت زمان و پیشرفت‌های فناوریانه، انتظار می‌رود که ارتباط بین این دو گره پیچیده‌تر شود. اگر شاهد تقویت ارتباط بین "low cost" و "capabilities" باشیم، این می‌تواند نشان‌دهنده موفقیت در توسعه فناوری‌هایی باشد که امکان ارائه قابلیت‌های بیشتر با حفظ یا حتی کاهش هزینه‌ها را فراهم کرده‌اند (به عنوان مثال، استفاده هوشمندانه از COTS، طراحی‌های بهینه، و روش‌های تولید نوین) در مقابل، تضعیف این ارتباط می‌تواند نشان‌دهنده این باشد که دستیابی به قابلیت‌های پیشرفته‌تر مستلزم افزایش هزینه‌ها شده است.

۷. با بررسی خوشه‌هایی که در سال‌های اخیر برجسته‌تر شده‌اند (رنگ زرد روشن‌تر)، چه کاربردهای نوظهوری در حوزه کیوبست در حال ظهور هستند که پیش از این کمتر مورد توجه قرار گرفته بودند؟ چه فناوری‌های جدیدی محرک این کاربردها هستند؟

بررسی خوشه‌هایی که در سال‌های پایانی بازه زمانی (رنگ زرد روشن‌تر) از نظر اندازه و ارتباط برجسته‌تر شده‌اند، می‌تواند کاربردهای نوظهوری را در حوزه کیوبست آشکار سازد. به عنوان مثال، ظهور یا رشد خوشه‌های مرتبط با تحقیقات علمی خاص (مانند اختفیزیک در مقیاس کوچک - در صورت وجود گره‌های مرتبط مانند telescope یا x-ray)، مأموریت‌های فضایی بین‌سیاره‌ای کوچک (در صورت وجود گره‌های مرتبط مانند moon یا "asteroid)، یا کاربردهای آموزشی پیشرفته (education) می‌تواند نشان‌دهنده حوزه‌های جدیدی باشد که به دلیل پیشرفت در فناوری‌های کلیدی (مانند حسگرهای کوچک، پیشرفته‌های کارآمد، و سیستم‌های ارتباطی قوی) امکان‌پذیر شده‌اند. شناسایی فناوری‌های جدیدی که ارتباط قوی با این خوشه‌های نوظهور دارند، می‌تواند محرک‌های اصلی این تحولات را روشن سازد.

۸. آیا الگوهای خاصی در ظهور و افول ارتباط بین کلیدواژه‌ها در طول زمان قابل مشاهده است که نشان‌دهنده مراحل مختلف بلوغ فناوری یا تغییر در اولویت‌های پژوهشی در حوزه کیوبست باشد؟

بله، الگوهای خاصی در ظهور و افول ارتباط بین کلیدواژه‌ها در طول زمان می‌تواند نشان‌دهنده مراحل مختلف بلوغ فناوری یا تغییر در اولویت‌های پژوهشی در حوزه کیوبست باشد. برای مثال، ظهور

می‌تواند نشان دهد که آیا پژوهش‌ها به سمت یافتن راهکارهای نوآورانه برای استفاده مؤثرتر از COTS در این حوزه‌ها (مانند مقاوم‌سازی، انتخاب دقیق قطعات، و طراحی سیستم‌های تحمل‌پذیر خطا) پیش رفته‌اند یا اینکه گرایش به سمت استفاده از قطعات فضایی سفارشی در مأموریت‌های پیچیده‌تر افزایش یافته است. تقویت ارتباط بین "COTS" و گره‌های فناوریانه می‌تواند نشان‌دهنده موفقیت در غلبه بر چالش‌ها و تسهیل نوآوری با استفاده از قطعات تجاری باشد.

۵. با توجه به اهمیت فزاینده space debris در پایداری بلندمدت فعالیت‌های فضایی، آیا در طول زمان توجه بیشتری به فناوری‌ها و رویکردهای مرتبط با کاهش و مدیریت زباله‌های فضایی در حوزه کیوبست معطوف شده است؟

گره مستقیمی برای فناوری حذف زباله در شکل وجود ندارد، اما می‌توان از تغییرات در ارتباط گره space debris با سایر گره‌ها، به ویژه آن‌هایی که به طراحی مأموریت، تعیین مدار و خروج از مدار مرتبط هستند، استنباط کرد. افزایش ارتباط بین space debris و این گره‌ها در طول زمان می‌تواند نشان‌دهنده توجه فزاینده به جنبه‌های پایداری و مسئولیت‌پذیری در طراحی و بهره‌برداری از کیوبست‌ها باشد. همچنین، ظهور گره‌های جدید در نزدیکی space debris که به فناوری‌های کاهش یا حذف زباله اشاره دارند (حتی اگر اندازه کوچکی داشته باشند)، می‌تواند مؤید این روند باشد. با توجه به افزایش تعداد پرتاب‌های کیوبست، انتظار می‌رود که موضوع مدیریت زباله‌های فضایی در طول زمان اهمیت بیشتری پیدا کرده و به یک حوزه فعال پژوهشی و توسعه فناوری تبدیل شود.

۶. تحلیل تغییرات در ارتباط بین گره‌های low cost و capabilities در طول زمان چه بینشی در مورد روند توسعه کیوبست‌ها ارائه می‌دهد؟ آیا تلاش‌ها برای کاهش هزینه منجر به محدودیت در قابلیت‌ها شده است یا پیشرفت‌های فناوریانه امکان افزایش همزمان قابلیت‌ها و کاهش هزینه‌ها را فراهم آورده است؟ تحلیل تغییرات در ارتباط بین گره‌های low cost و capabilities می‌تواند نشان‌دهنده توازن بین ملاحظات اقتصادی و عملکردی در توسعه کیوبست‌ها باشد. در مراحل اولیه، "هزینه پایین" به عنوان یک مزیت کلیدی، محرک اصلی استفاده از کیوبست‌ها بود و ممکن است در آن زمان ارتباط قوی‌تری با

افزایش اندازه و ارتباط این گره‌ها می‌تواند نشان‌دهنده توجه بیشتر جامعه پژوهشی و صنعتی به اهمیت تضمین کیفیت و اشتراک‌گذاری تجربیات برای بهبود فرآیند توسعه و بهره‌برداری کیوبست‌ها باشد. همچنین، ظهور گره‌های جدید مرتبط با استانداردهای خاص یا روش‌های تست معتبر نیز می‌تواند مؤید این روند باشد. با بلوغ بیشتر حوزه کیوبست، انتظار می‌رود که تلاش‌ها برای تدوین و پذیرش استانداردهای صنعتی به منظور افزایش قابلیت اطمینان، کاهش ریسک و تسهیل همکاری بین نهادهای مختلف افزایش یابد.

شکل ۸ ارتباطات علمی کشورها در مقالات پژوهشی را نشان می‌دهد. از این تحلیل می‌توان برای درک ساختار همکاری‌های جهانی در تحقیقات استفاده کرد. اندازه هر دایره نشان‌دهنده تعداد مقالات منتشرشده یا میزان مشارکت علمی کشورهاست.

بزرگترین دایره‌ها: آمریکا: بزرگترین گره در شبکه که نشان از نقش کلیدی این کشور در تحقیقات بین‌المللی دارد. چین: دومین گره بزرگ، که به معنای همکاری‌های گسترده چین در تحقیقات جهانی است. ایتالیا: یکی دیگر از کشورهای پرتعامل که در تحقیقات مشارکت فعال دارد.

کشورها در خوشه‌های رنگی مختلف قرار گرفته‌اند که نشان‌دهنده میزان همکاری و روابط نزدیک علمی بین کشورهای داخل هر خوشه است. رنگ‌ها با استفاده از الگوریتم‌های خوشه‌بندی به‌دست می‌آیند که بر اساس میزان هم‌نویسندگی مشترک شکل گرفته‌اند.

خطوط ارتباطی بین کشورها نشان‌دهنده همکاری علمی و میزان هم‌نویسندگی بین کشورهاست. ضخامت خطوط: هرچه خطوط ضخیم‌تر باشد، همکاری بین آن دو کشور بیشتر است. خطوط متراکم در مرکز نقشه: نشان‌دهنده میزان زیاد همکاری‌های علمی بین کشورهای پیشرو مانند آمریکا، چین، انگلستان و ایتالیا است.

۷- بررسی خوشه‌های همکاری

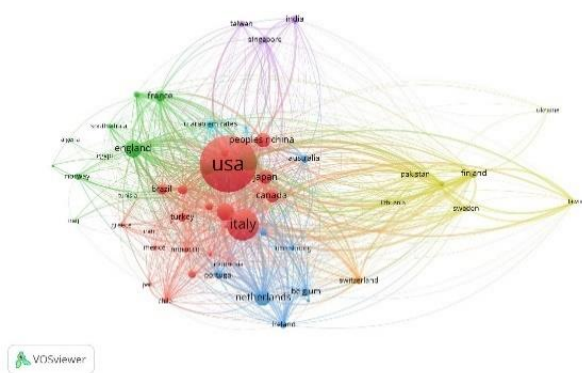
خوشه قرمز (مرکز شبکه): آمریکا: مرکز این خوشه و هاب جهانی همکاری‌های علمی. چین: همکاری نزدیک با آمریکا و دیگر کشورهای این خوشه مانند ژاپن و کانادا. ایتالیا: کشور اروپایی فعال در این خوشه. این خوشه بزرگترین و متراکم‌ترین خوشه است که نشان‌دهنده تسلط کشورهای آمریکا و چین بر تحقیقات جهانی است. همکاری‌های بین‌المللی در این گروه به‌صورت جهانی و چندجانبه گسترش یافته است.

قوی یک گره مرتبط با یک فناوری جدید و افزایش ارتباط آن با گره مرکزی cubesat و خوشه‌های کاربردی می‌تواند نشان‌دهنده مرحله اولیه توجه و توسعه باشد. سپس، تثبیت اندازه این گره و گسترش ارتباط آن با طیف وسیع‌تری از کاربردها می‌تواند نشان‌دهنده مرحله بلوغ و ادغام این فناوری در کاربردهای مختلف باشد. در مقابل، کاهش تدریجی اندازه و ارتباط یک گره می‌تواند نشان‌دهنده افول علاقه پژوهشی یا جایگزینی آن با فناوری‌های جدیدتر باشد. تحلیل روند تغییرات رنگ گره‌ها (زمان انتشار مقالات مرتبط) نیز می‌تواند در شناسایی این الگوهای زمانی مفید باشد.

۹. با توجه به روند تغییرات در شبکه، چه فناوری‌های مرزدانسی در سایر حوزه‌های مرتبط (مانند هوش مصنوعی، مواد پیشرفته، انرژی‌های نوین) پتانسیل ایجاد تحول اساسی در طراحی، عملکرد و کاربردهای آینده کیوبست‌ها را دارند؟

با توجه به روند تغییرات در شبکه و دانش گسترده‌تر در حوزه‌های مرتبط، چندین فناوری مرزدانسی پتانسیل ایجاد تحول اساسی در آینده کیوبست‌ها را دارند. هوش مصنوعی و یادگیری ماشین می‌توانند در زمینه‌هایی مانند کنترل وضعیت و مدار خودکار، برنامه‌ریزی ماموریت بهینه، پردازش داده‌های فضایی در لبه، و تشخیص و رفع عیب خودکار تحول ایجاد کنند. مواد پیشرفته (مانند نانومواد، مواد خودترمیم‌شونده، و مواد سبک‌وزن با خواص مکانیکی و حرارتی برتر) می‌توانند به کاهش جرم، افزایش دوام و بهبود عملکرد سیستم‌های کیوبستی کمک کنند. انرژی‌های نوین (مانند سلول‌های خورشیدی با راندمان بسیار بالا و باتری‌های با چگالی انرژی بالا) می‌توانند طول عمر ماموریت و توان عملیاتی پلتفرم را افزایش دهند. علاوه بر این، پیشرفت در چاپ سه بعدی و ساخت افزودنی می‌تواند منجر به طراحی‌های پیچیده‌تر و تولید مقرون‌به‌صرفه‌تر قطعات سفارشی برای کیوبست‌ها شود.

۱۰. با در نظر گرفتن بازه زمانی مورد بررسی، آیا می‌توان نشانه‌هایی از شکل‌گیری استانداردهای صنعتی یا بهترین شیوه‌ها در طراحی، ساخت و بهره‌برداری از کیوبست‌ها مشاهده کرد؟ نشانه‌های شکل‌گیری استانداردهای صنعتی یا بهترین شیوه‌ها در طراحی، ساخت و بهره‌برداری از کیوبست‌ها می‌تواند در ثبات و تقویت ارتباط بین گره‌های مرتبط با "testing" (آزمایش)، "reliability" (قابلیت اطمینان) و "lessons learned" (درس‌های آموخته شده) در طول بازه زمانی مورد بررسی قابل مشاهده باشد.



شکل (۸): تحلیل شبکه هم‌نویسندگی کشورها

شکل ۹ یک نقشه هم‌ارتباطی است که نشان‌دهنده همکاری‌ها و شبکه ارتباطی مراکز تحقیقاتی فعال در حوزه کیوبست است. در این نوع تحلیل‌ها، داده‌ها به صورت گراف نمایش داده می‌شوند، که در آن نقاط مراکز تحقیقاتی و خطوط روابط یا همکاری‌ها را نشان می‌دهند.

خوشه‌ها: در این تصویر، مراکز تحقیقاتی به چند خوشه اصلی تقسیم شده‌اند که با رنگ‌های مختلف نمایش داده می‌شوند. خوشه‌بندی به این معنی است که مراکزی که به یکدیگر نزدیک‌تر هستند (از نظر همکاری یا تعداد مقالات مشترک)، در یک گروه قرار گرفته‌اند.

خوشه قرمز: این خوشه شامل مراکز اروپایی مانند Politecnico di Milano, Politecnico di Torino, University of Padua است. این گروه روی پروژه‌های مهندسی پیشرفته و فناوری‌های طراحی و ساخت کیوبست تمرکز دارد. خوشه سبز: این خوشه شامل مراکز آمریکایی مانند NASA, Caltech, University of Colorado و Georgia Tech است. این گروه روی تحقیقات فضایی عملیاتی و مأموریت‌های علمی کیوبست متمرکز است.

خوشه آبی: این خوشه شامل مراکزی از شمال اروپا مانند University of Helsinki, Aalto University و University of Tartu است. تمرکز این گروه می‌تواند بر توسعه سیستم‌های پیشرفته مخابراتی و پردازش داده باشد.

اندازه نقاط: اندازه هر نقطه در این شبکه نشان‌دهنده اهمیت و تأثیرگذاری آن مرکز تحقیقاتی است. این اهمیت معمولاً بر اساس

خوشه سبز (اروپا و آفریقا) انگلستان: هسته مرکزی این خوشه فرانسه: کشور مهم دیگر در همکاری‌های علمی اروپا. آفریقای جنوبی، مصر، برزیل: کشورهای در حال توسعه که با کشورهای اروپایی همکاری دارند. این خوشه نشان می‌دهد که کشورهای اروپایی مانند فرانسه و انگلستان با کشورهای آفریقایی و آمریکای جنوبی در قالب پروژه‌های مشترک همکاری دارند.

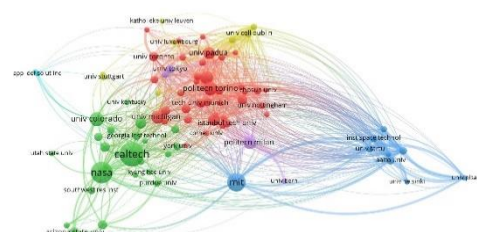
خوشه آبی (اروپای غربی) هلند: مرکز اصلی این گروه. کشورهای ایرلند، بلژیک، لوکزامبورگ کشورهای کوچک اما فعال در همکاری‌های علمی هستند. این خوشه نشان‌دهنده همکاری‌های منطقه‌ای اروپا است. کشورهای اروپای غربی در قالب اتحادیه اروپا و پروژه‌های چندملیتی علمی فعالیت می‌کنند.

خوشه زرد (شمال و شرق اروپا و جنوب آسیا) فنلاند: کشور پیشرو در این خوشه. همکاری‌های علمی میان کشورهای اسکاندیناوی، اروپای شرقی و جنوب آسیا (پاکستان، اوکراین، لیتوانی، سوئد در جریان است.

خوشه بنفش (آسیا و جنوب شرق آسیا) هند: مرکز همکاری این خوشه. این خوشه بیانگر رشد همکاری‌های علمی کشورهای آسیایی (سنگاپور، تایوان) است. هند به‌عنوان بازیگر کلیدی با کشورهای دیگر آسیا مشارکت نزدیکی دارد.

آمریکا و چین بیشترین نقش را در همکاری‌های علمی جهانی دارند و مرکز شبکه را تشکیل می‌دهند. کشورهای اروپایی مانند انگلستان، فرانسه، هلند به‌عنوان هاب‌های منطقه‌ای مهم عمل می‌کنند. همکاری‌های علمی به‌شدت خوشه‌بندی شده و مبتنی بر روابط منطقه‌ای و جهانی است. کشورهای در حال توسعه در حال پیوستن به شبکه جهانی علم هستند، اما همچنان در حاشیه قرار دارند. کشورهایی مانند پاکستان، برزیل، آفریقای جنوبی بیشتر به‌صورت حاشیه‌ای در شبکه حضور دارند اما همکاری‌های بین‌منطقه‌ای با کشورهای پیشرو دارند. این نقشه ابزاری مناسب برای تحلیل استراتژی‌های آینده در همکاری‌های علمی بین‌المللی است.

NASA: با همکاری‌های قوی در خوشه سبز، نمایانگر فعالیت‌های کلیدی آمریکا در مأموریت‌های عملیاتی است. این شبکه نشان می‌دهد که حوزه کیوبست یک حوزه تحقیقاتی بسیار بین‌المللی و پویا است که در آن همکاری‌های علمی گسترده‌ای وجود دارد. مراکز برجسته‌ای مانند NASA، MIT، و Politecnico di Torino نقش کلیدی در پیشبرد دانش و فناوری‌های مرتبط دارند. همچنین، تقسیم‌بندی خوشه‌ها نشان‌دهنده تمرکز مراکز مختلف بر جنبه‌های خاصی از این فناوری است، از جمله طراحی، ساخت، و بهره‌برداری از کیوبست‌ها.



شکل (۹): نقشه شبکه‌ای از ارتباطات بین مراکز تحقیقاتی فعال در حوزه کیوبست

شکل ۱۰ یک نقشه هم‌ارتباطی است و نشان‌دهنده ارتباطات میان مقالات، مجلات، و کنفرانس‌های مرتبط با حوزه فضایی و کیوبست است.

۱-۲-۷- خوشه قرمز (مرکز شبکه)

این خوشه شامل مجلاتی مانند Acta Astronautica و Journal of Spacecraft and Rockets و همچنین کنفرانس‌های IEEE است که از اصلی‌ترین منابع تحقیقات در حوزه کیوبست و مهندسی هوافضا محسوب می‌شوند. این منابع بیشتر روی طراحی و توسعه سیستم‌های فضایی (مانند کیوبست‌ها، ماهواره‌ها، و فضاپیماها) تمرکز دارند. کنفرانس‌های IEEE Aerospace (مانند ۲۰۲۰ و ۲۰۲۴) نشان‌دهنده پیشرفت فناوری‌ها و تبادل اطلاعات جدید در این حوزه هستند. ارتباطات قوی میان این منابع بیانگر این است که محققان این حوزه اغلب به این مجلات ارجاع داده یا مقالات خود را در این منابع منتشر می‌کنند.

تعداد مقالات منتشرشده یا میزان همکاری‌های مشترک اندازه‌گیری می‌شود.

نقاط بزرگ‌تر: مانند MIT، NASA، و Politecnico di Torino، مراکز تحقیقاتی کلیدی و برجسته‌ای هستند که تأثیر زیادی در توسعه دانش و فناوری‌های مرتبط با کیوبست دارند. نقاط کوچک‌تر: مراکز کمتر شناخته‌شده یا مراکزی که فقط در پروژه‌های محدود همکاری داشته‌اند.

خطوط ارتباطی بین نقاط نشان‌دهنده همکاری‌ها یا روابط علمی هستند، مانند انتشار مقالات مشترک یا شرکت در پروژه‌های تحقیقاتی بین‌المللی. خطوط متراکم و کوتاه نشان‌دهنده همکاری نزدیک بین دو یا چند مرکز است. برای مثال، ارتباط بین Politecnico di Milano و Politecnico di Torino بسیار قوی است. خطوط بلندتر و پراکنده نشان‌دهنده همکاری‌های کمتر یا ارتباطات بین‌المللی دورتر است.

۱-۷- تحلیل منطقه‌ای

اروپا: خوشه قرمز نشان‌دهنده نقش برجسته مراکز اروپایی در توسعه فناوری‌های نوآورانه است. کشورهای ایتالیا (با Politecnico di Torino و Politecnico di Milano) و آلمان (Technical University of Munich) به طور خاص در این حوزه فعال هستند. آمریکای شمالی: خوشه سبز نشان‌دهنده نقش برجسته ایالات متحده در مأموریت‌های فضایی عملیاتی است. مراکزی مانند NASA و Caltech از بازیگران اصلی این حوزه هستند. شمال اروپا: خوشه آبی نمایانگر مشارکت قوی کشورهای اسکاندیناوی در تحقیق و توسعه سیستم‌های مخابراتی و تحلیل داده است.

۲-۷- رهبری تحقیقاتی

MIT: این مرکز به نظر می‌رسد که نقش محوری در این شبکه دارد، زیرا در مرکز خوشه‌های مختلف قرار گرفته و به طیف گسترده‌ای از مراکز دیگر متصل است. این نشان‌دهنده رهبری جهانی MIT در حوزه کیوبست است. Politecnico di Torino: این مرکز به دلیل تعداد زیاد ارتباطات و جایگاه مهم خود در خوشه قرمز، یکی از مراکز اصلی اروپایی در این حوزه محسوب می‌شود.

۷-۴- روندهای زمانی

این خوشه شامل مجلاتی مانند Space Telescopes and Instruments و Journal of Astronomical Telescopes است. تمرکز این گروه بر فناوری‌های مرتبط با ابزارهای علمی فضایی است، از جمله تلسکوپ‌ها، حسگرها و ابزارهای مشاهده‌ای. این ابزارها اغلب برای مأموریت‌های علمی و داده‌برداری از فضا استفاده می‌شوند، که برای مأموریت‌های کیوب‌ست بسیار حیاتی هستند.

۷-۵- همکاری‌های بین‌المللی

منابعی مانند Aerospace Science and Technology و Fourth IAA Conference در این خوشه قرار دارند. این گروه به طور کلی به توسعه فناوری‌های فضایی و هوافضایی می‌پردازد. نقش این منابع در فراهم‌سازی بسترهای نظری برای توسعه سیستم‌های فضا، مشهود است.

۸- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

Acta Astronautica: این مجله در مرکز نقشه قرار گرفته و تأثیرگذارترین منبع در شبکه است. به‌طور گسترده در حوزه‌های مختلف تحقیقات فضایی (از مهندسی تا علوم پایه) استفاده می‌شود. مقالات منتشرشده در این مجله اغلب توسط منابع دیگر ارجاع داده می‌شوند. پوشش موضوعات چندرشته‌ای مانند مهندسی فضایی، فناوری کیوبست‌ها، و تحلیل مأموریت‌های فضایی.

کنفرانس‌های IEEE Aerospace: کنفرانس‌های سالانه IEEE Aerospace یکی از اصلی‌ترین رویدادهای جهانی در حوزه مهندسی هوافضا هستند. در این کنفرانس‌ها آخرین پیشرفت‌های فناوری فضایی، از طراحی تا پرتاب و عملیات ارایه می‌شود. همچنین فرصت تبادل ایده بین محققان دانشگاهی و صنعت وجود دارد. حضور موضوعات کیوبست در سال‌های اخیر در برنامه این کنفرانس‌ها، نشان‌دهنده رشد این حوزه است.

Journal of Spacecraft and Rockets: یکی دیگر از منابع کلیدی که تمرکز آن بر طراحی، تحلیل، و پرتاب فضاپیماها و ماهواره‌ها است. این مجله با تحقیقات عملیاتی و مهندسی پیشرفته در فناوری فضا، بسیار مرتبط است.

واقعی به رویدادهای غیرمنتظره باشند، می‌تواند کارایی و انعطاف‌پذیری مأموریت‌ها را به طور چشمگیری افزایش دهد.

تمرکز بر فناوری‌های ارتباطی پرسرعت و امن: با افزایش حجم داده‌های تولید شده توسط حسگرهای پیشرفته و نیاز به هماهنگی مؤثر در صورت‌واره‌های بزرگ، توسعه فناوری‌های ارتباطی پرسرعت بین ماهواره‌ای (از جمله لینک‌های لیزری) و ارتباطات امن با زمین ضروری است. پژوهش در زمینه پروتکل‌های ارتباطی کارآمد، روش‌های مدولاسیون پیشرفته و کاهش توان مصرفی سیستم‌های ارتباطی پیشنهاد می‌شود.

تحقیق در زمینه کاهش و مدیریت زباله‌های فضایی ناشی از کیوبست‌ها: با توجه به افزایش تعداد پرتاب‌های کیوبست، توسعه فناوری‌های طراحی برای از بین رفتن (Design for Demise)، سیستم‌های غیرفعال‌سازی مداری و روش‌های حذف فعال زباله‌های فضایی کوچک از اهمیت بالایی برخوردار است. بررسی اقتصادی و فنی این رویکردها و تدوین دستورالعمل‌های طراحی پایدار برای کیوبست‌ها پیشنهاد می‌شود.

کاوش کاربردهای نوظهور و مأموریت‌های علمی پیشرفته: با پیشرفت فناوری‌های کلیدی، پژوهش‌های آتی باید به بررسی امکان‌سنجی و توسعه مأموریت‌های علمی پیشرفته با استفاده از کیوبست‌ها، نظیر تحقیقات فضایی در مقیاس کوچک (اخترشناسی، علوم سیاره‌ای) و کاربردهای نوین در حوزه‌هایی مانند اینترنت اشیاء فضایی و رباتیک فضایی، بپردازند. توسعه ابزارها و حسگرهای کوچک‌شده با کارایی بالا برای این مأموریت‌ها ضروری است.

با پیگیری این پیشنهادات علمی و تمرکز بر فناوری‌های روز، می‌توان انتظار داشت که کیوبست‌ها نقش فزاینده‌ای در اکتشافات فضایی، ارائه خدمات فناورانه و پیشبرد مرزهای دانش ایفا نمایند. کیوبست‌ها به‌عنوان ابزاری انعطاف‌پذیر و کم‌هزینه، نقشی کلیدی در آینده فضاپیماها و مأموریت‌های فضایی ایفا می‌کنند. توسعه فناوری‌های نوین در زمینه کوچک‌سازی تجهیزات، هوش مصنوعی، و سیستم‌های پیشرفته پیشنهاد می‌شود. امکان‌پذیری مأموریت‌های پیچیده‌تر را فراهم کرده و زمینه‌ساز تحول در اکتشافات فضایی و ارائه خدمات زمینی شده است.

تعارض منافع

"هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است."

سیستم‌های نوین و کارآمد، کنترل وضعیت (با هدف دستیابی به دقت بالاتر و مصرف توان کمتر) و ارتباطات (با تاکید بر نرخ داده بالاتر و پایداری در منظومه‌ها) وجود دارد. کاربردهای رصد زمین و صورت‌واره‌های ماهواره‌ای همچنان حوزه‌های غالب استفاده از کیوبست‌ها هستند، اما ظهور و تقویت خوشه‌های مرتبط با فناوری‌های پیشرفته‌تر و کاربردهای علمی نوظهور، حاکی از پتانسیل بالای این پلتفرم برای انجام مأموریت‌های پیچیده‌تر و متنوع‌تر در آینده است. تعامل مفهوم COTS با فناوری‌های کلیدی نشان می‌دهد که در عین تسهیل‌کننده بودن در کاهش هزینه و زمان توسعه، چالش‌های مربوط به عملکرد و قابلیت اطمینان در محیط فضایی همچنان نیازمند رویکردهای نوآورانه در انتخاب، تست و مقاوم‌سازی قطعات تجاری هستند.

۸-۱- پیشنهادات

تحقیق و توسعه متمرکز بر فناوری‌های پیشران‌نویین: با توجه به اهمیت مانور مداری دقیق و حفظ آرایش صورت‌واره‌ها، سرمایه‌گذاری بیشتر در تحقیق و توسعه پیشران‌های کوچک، کارآمد و با عمر طولانی، نظیر پیشران‌های پلاسما پالسی و سیستم‌های مبتنی بر نیروی خورشیدی، ضروری به نظر می‌رسد. بررسی دقیق‌تر عملکرد و قابلیت اطمینان این فناوری‌ها در شرایط عملیاتی فضا و توسعه روش‌های مدل‌سازی و کنترل آن‌ها پیشنهاد می‌شود.

بهینه‌سازی استفاده از قطعات COTS برای مأموریت‌های فضایی پیشرفته: پژوهش‌های آتی باید بر یافتن راهکارهای نوآورانه برای غلبه بر محدودیت‌های قطعات تجاری در محیط فضایی متمرکز شوند. این شامل توسعه روش‌های استاندارد تست و ارزیابی، تکنیک‌های مقاوم‌سازی مؤثر در برابر تشعشعات و دما، و طراحی سیستم‌های تحمل‌پذیر خطا با استفاده از این قطعات است. ایجاد یک پایگاه داده جامع از عملکرد قطعات COTS در مأموریت‌های فضایی می‌تواند به انتخاب آگاهانه‌تر قطعات در پروژه‌های آتی کمک کند.

توسعه الگوریتم‌های هوشمند و سیستم‌های خودمختار:

با افزایش پیچیدگی مأموریت‌های کیوبستی و صورت‌واره‌ها، توسعه الگوریتم‌های هوش مصنوعی و یادگیری ماشین برای مدیریت منابع، کنترل وضعیت، برنامه‌ریزی مأموریت و پردازش داده‌های فضایی در لبه، از اهمیت فزاینده‌ای برخوردار خواهد بود. تحقیق در زمینه سیستم‌های خودمختار که قادر به تصمیم‌گیری و واکنش در زمان

مراجع

- [19] S. Alnaqbi, D. Darfilal, and S. S. M. Swei, "Propulsion technologies for CubeSats: Review," *Aerospace*, vol. 11, no. 7, pp. 52–64, 2024.
- [20] T.-C. Lin and Y.-H. Lee, "Review of electric propulsion in CubeSat," in *Proc. Int. Conf. Astronautics Space Explor. (iCASE)*, Hsinchu, Taiwan, 2022.
- [21] R. Rüdtenklau and G. Schitter, "Optimization of acquisition patterns for establishing inter-CubeSat optical communications," *J. Opt. Commun. Netw.*, vol. 16, pp. 814–821, 2024.
- [22] S. Abulgasem, F. E. M. M. Tubbal, R. Raad, and P. I. Theoharis, "Antenna designs for CubeSats: A review," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 1–25, 2021.
- [23] Y. Wong, O. Kegege, S. Schaire, G. Bussey, S. Altunc, Y. Zhang, C. Patel, "An Optimum Space-to-Ground Communication Concept for CubeSat Platform Utilizing NASA Space Network and Near Earth Network," 30th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites, Logan, UT, August 2016.
- [24] N. Chahat, *CubeSat Antenna Design*. Hoboken, NJ, USA: Wiley-IEEE Press, 2020.
- [25] I. F. Akyildiz, J. M. Jornet, and S. Nie, "A new CubeSat design with reconfigurable multi-band radios for dynamic spectrum satellite communication networks," *Ad Hoc Netw.*, vol. 86, pp. 166–178, 2019.
- [26] I. Levchenko, O. Baranov, M. Keidar, C. Riccardi, H. E. Roman, S. Xu, *et al.*, "Additive technologies and materials for the next-generation CubeSats and small satellites," *Adv. Funct. Mater.*, vol. 34, no. 45, 2024.
- [27] L. Xiao, W. Shi, X. Li, C. Shen, and Y. Wang, "A novel design of a deployable CubeSat for material exposure missions in low Earth orbit," *CEAS Space J.*, vol. 15, pp. 641–653, 2023.
- [28] F. J. T. Coaquira, X. Wang, and K. W. V. Torrez, "Model-based design and testbed for CubeSat attitude determination and control system with magnetic actuation," *Appl. Sci.*, vol. 14, no. 14, pp. 12–34, 2024.
- [29] Fuschino, F.; Campana, R.; Labanti, C. HERMES: An ultra-wide band X and gamma-ray transient monitor on board a nano-satellite constellation. *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. Accel. Spectrometers Detect. Assoc. Equip.* 2019, 936, 199–203
- [30] J. Gieseler and P. Oleynik, "Radiation monitor RADMON aboard Aalto-1 CubeSat: First results," *Adv. Space Res.*, vol. 66, pp. 52–65, 2020.
- [31] A. J. Jara Cespedes, B. H. B. Pangestu, and A. Hanazawa, "Performance evaluation of machine learning methods for anomaly detection in CubeSat solar panels," *Appl. Sci.*, vol. 12, no. 7, 2022.
- [32] D. A. Zeleke and H.-D. Kim, "A new strategy of satellite autonomy with machine learning for efficient resource utilization of a standard-performance CubeSat," *Aerospace*, vol. 10, no. 1, 2023.
- [33] O. Liubimov, I. Turkin, V. Pavlikov, and L. Volobuyeva, "Agile software development lifecycle and containerization technology for CubeSat command and data handling module implementation," *Computation*, vol. 11, no. 9, 2023.
- [34] Nieto-Peroy, C.; Emami, M.R. CubeSat Mission: From Design to Operation. *Appl. Sci.* 2019, **9**, 3110.
- [35] A. Cratere, L. Gagliardi, G. A. Sanca, F. Golmar, and F. Dell'Olio, "On-board computer for CubeSats: State-of-the-art
- [1] R. P. Welle, "Overview of CubeSat technology," in *Handbook of Small Satellites*, Cham, Switzerland: Springer, 2020, pp. 1–17.
- [2] A. Johnstone, *CubeSat Design Specification REV 14.1*. San Luis Obispo, CA, USA: California Polytechnic State University, 2022.
- [3] D.-H. Cho, W.-S. Choi, M.-K. Kim, J.-H. Kim, and E. Sim, "High-resolution image and video CubeSat (HiREV): Development of space technology test platform using a low-cost CubeSat platform," *Int. J. Aerosp. Eng.*, pp. 1–17, 2019.
- [4] C. Francisco, R. Henriques, and S. Barbosa, "A review on CubeSat missions for ionospheric science," *Aerospace*, vol. 10, no. 7, pp. 1–23, 2023.
- [5] J. Lukkari, "Automated functional system integration testing of Suomi 100 satellite," M.S. thesis, Aalto Univ., Espoo, Finland, 2023.
- [6] Nanosats Database, "Nanosats.eu." Accessed: 2024. [Online]. Available: <https://www.nanosats.eu/>
- [7] M. Swartwout, "CubeSats and mission success: 2017 update," in *Proc. Electron. Technol. Workshop, NASA Electron. Parts Packag. Program (NEPP)*, Greenbelt, MD, USA, 2017.
- [8] G. Moretini, G. Zucca, C. Braccisi, F. Cianetti, and M. Dionigi, "CubeSat spatial expedition: An overview from design to experimental verification," in *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, vol. 1038, Genova, Italy, 2021.
- [9] B. M. M. Bomani, *CubeSat Technology Past and Present: Current State-of-the-Art Survey*. Cleveland, OH, USA: NASA Glenn Research Center, NASA/TP-20210000201, 2021.
- [10] C. Nieto-Peroy and M. R. Emami, "CubeSat mission: From design to operation," *Appl. Sci.*, vol. 9, no. 15, Art. no. 3110, 2019.
- [11] N. M. Suhadis, "Statistical overview of CubeSat mission," in *Proc. Int. Conf. Aerosp. Mech. Eng. (ICAME 2019)*, Singapore, 2020.
- [12] C. Girardello, M. Tajmar, and C. Scharlemann, "GREATCUBE+: Conceptual design tool for CubeSat design," *CEAS Space J.*, vol. 16, pp. 375–392, 2024.
- [13] L. Alkalai, C. Norton, and A. Freeman, "CubeSats and small satellites as a vehicle for space innovation and exploration of space beyond Earth orbit," in *Proc. 4th IAA Conf. Univ. Satellite Missions CubeSat Workshop*, Rome, Italy, 2023.
- [14] A. Poghosyan and A. Golkar, "CubeSat evolution: Analyzing CubeSat capabilities for conducting science missions," *Acta Astronaut.*, vol. 88, pp. 59–83, 2017.
- [15] A. Kanapskyte, E. M. Hawkins, L. C. Liddell, S. R. Bhardwaj, and D. Gentry, "Space biology research and biosensor technologies: Past, present, and future," *Biosensors*, vol. 11, no. 31, pp. 23–45, 2021.
- [16] M. R. Padgen, L. C. Liddell, S. R. Bhardwaj, D. Gentry, D. Marina, M. Parra, *et al.*, "BioSentinel: A biofluidic nanosatellite monitoring microbial growth and activity in deep space," *Astrobiology*, vol. 21, pp. 23–52, 2021.
- [17] F. Arneodo and A. Di Giovanni, "A review of requirements for gamma radiation detection in space using CubeSats," *Appl. Sci.*, vol. 11, no. 2659, pp. 34–59, 2021.
- [18] A. A. Chernyshov, D. V. Chugunin, M. Mogilevsky, and A. Petrukovich, "Studies of the ionosphere using radiophysical methods on ultra-small spacecraft," *Acta Astronaut.*, vol. 167, pp. 455–459, 2020.

- CubeSat mission,” *Aerotecnica Missili Spazio*, vol. 103, pp. 377–389, 2024.
- [38] S. M. Tieze, L. C. Liddell, S. R. Santa Maria, and S. Bhattacharya, “BioSentinel: A biological CubeSat for deep space exploration,” *Astrobiology*, vol. 23, no. 6, pp. 18–34, 2023.
- [39] E. Koksalmis and G. H. Koksalmis, “Artificial intelligence in air and space technologies: A scientometric analysis,” in *Proc. Int. Conf. Recent Adv. Space Technol. (RAST)*, 2023.
- and future trends,” *IEEE Access*, vol. 12, pp. 99537–99569, 2024.
- [36] G. Luccisano, S. Salas Cordero, and T. Gateau, “Open-source data formalization through model-based systems engineering for concurrent preliminary design of CubeSats,” *Aerospace*, vol. 11, no. 9, 2024.
- [37] M. Mozzato, G. Bemporad, S. Enzo, F. Filippini, R. Lazzaro, M. Minato, *et al.*, “Concept and feasibility analysis of the Alba