



Investigating the technological trends in the space industry: Thematic Analysis of Strategic Policy Plans of Different Countries

Majid Haghgoo¹, Saeed Shakheshi², Arash Hashemi³, Taleb Abdollahi⁴, Maryam Abedi⁵, Fatemeh Hesabi⁶, Ismail Jafarpanah^{7*}

1-* Assistant Prof., Iran Space Institute, Tehran, Iran, m.haghgoo@isrc.ac.ir

2- Associate Prof., Iran Space Institute, Tehran, Iran, s.shakheshi@isrc.ac.ir

3- Iran Space Institute, Tehran, Iran, ahashemih@gmail.com

4- Assistant Prof., Iran Space Institute, Tehran, Iran, t.abdollahi@isrc.ac.ir

5- Iran Space Institute, Tehran, Iran, ma.abedi@isrc.ac.ir

6- Faculty of Management and Economics, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, fatemehhesabi@modares.ac.ir

7- Assistant Prof., Faculty of Industrial and Technology Management, College of Management, University of Tehran, Tehran, Iran, jafarpanah@ut.ac.ir

*Corresponding Author

Available in:
Journal.isrc.ac.ir

Journal of
Space Science, Technology
& Applications (Persian)

Vol. 4, No. 2, pp.: 63-80
2025

DOI:
10.22034/jस्ता.2024.460913.1169

Article Info

Received: 2024-06-03
Accepted: 2024-12-30

Keywords

technological trends,
theme analysis, space
industry, strategic policy
plans

How to Cite this article

Majid Haghgoo,
"Investigating the
technological trends in
the space industry:
Thematic Analysis of
Strategic Policy Plans of
Different Countries",
*Journal of Space Science,
Technology and
Applications*, vol 4 (2), p.:
63-80, 2025.

Abstract

With the emergence of knowledge-based economy and digital economy, the traditional concept of economic growth has become a concept centered on economic development through innovative processes. Technological progress, changing geopolitical perspectives and market dynamics have made the space industry face huge changes. According to the research conducted by the research team, the statistical developments and technological trends of the space industry in internal studies are faced with a research gap and despite its high importance, very few researches have been conducted in this field. Therefore, the identification of technological trends to guide innovation, maintain competition, strategic planning and policy making in this industry is very important. Accordingly, the aim of this study is to estimate the technological trends in the space industry. In order to take advantage of the potential of the space industry, thematic analysis and coding of the strategic documents of different countries in the aerospace industry have been done. The studied society is the policy documents related to the aerospace field by the policy-making organizations of different countries in all parts of the world. In total, 21 documents from 13 countries have been reviewed in order to deduce the trends and core issues of the space industry. By analyzing the full text of the documents, which was more than 1200 pages, 229 codes were extracted by separating each unit of analysis and were used as input data sets in thematic analysis. The scope of the research is England, China, the United States of America, India, France, Sweden, South Africa, the Netherlands, Brazil, the European Union, the United Arab Emirates, the Philippines, and Australia. Descriptive analysis method and MAXQDA software were used to interpret and analyze the data. Researches show that different countries have written strategic documents in order to draw the vision, goals and technology roadmap in order to stay behind the drivers of space industry development. These documents provide valuable insight into the priorities, investments, and collaborative efforts that are shaping the future direction of the space industry. The analysis of these strategic documents can lead to the understanding of scientific and technological trends in the space industry. The content analysis of the documents has led to the identification of 20 technological areas in 5 core areas, autonomous space, advanced space systems, complex space operations, space sustainability and space digitization. The identification of 20 key technology areas in five general axes shows the multifaceted nature of the space industry and emphasizes the strategic priorities of different countries around the world. The analysis of the strategic documents of different countries shows that there are many opportunities and challenges for both newcomers and veteran players with the expansion of the space market in the coming years. The performed analyzes are an important decision-making tool in technology planning and technology strategy formulation, it is highly important in terms of determining the direction and priorities in the development of the space industry and can help to formulate effective strategies and plans in the future.

احصا روندهای فناوریانه در صنعت فضایی:

تحلیل مضمون اسناد راهبردی کشورهای مختلف

مجید حقگو^۱، سعید شاخصی^۲، آرش هاشمی^۳، طالب عبدالهی^۴، مریم عابدی^۵، فاطمه حسابی^۶، اسماعیل جعفرپناه^{۷*}

۱-استادیار، پژوهشگاه فضایی ایران، تهران، ایران m.haghgoo@isrc.ac.ir

۲-دانشیار، پژوهشگاه فضایی ایران، تهران، ایران s.shakhesi@isrc.ac.ir

۳- پژوهشگاه فضایی ایران، تهران، ایران ahashemih@gmail.com

۴-استادیار، پژوهشگاه فضایی ایران، تهران، ایران t.abdollahi@isrc.ac.ir

۵- پژوهشگاه فضایی ایران، تهران، ایران ma.abedi@isrc.ac.ir

۶- گروه سیاستگذاری علم و فناوری، دانشکده مدیریت و اقتصاد، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

fatemehhesabi@modares.ac.ir

۷- *استادیار، گروه مدیریت فناوری و نوآوری، دانشکده مدیریت صنعتی و فناوری، دانشگاه تهران، تهران، ایران

jafarpanah@ut.ac.ir

*نویسنده مسئول



دسترس پذیر در نشانی:

Journal.isrc.ac.ir

دو فصلنامه علوم، فناوری و کاربردهای فضایی

سال چهارم، شماره ۲، صفحه ۸۰-۶۳
پاییز و زمستان ۱۴۰۳

DOI:

10.22034/jस्ता.2024.460913.1169

چکیده

با ظهور اقتصاد دانش‌بنیان و اقتصاد دیجیتال، مفهوم سنتی رشد اقتصادی به مفهومی با محوریت توسعه اقتصادی از طریق فرآیندهای نوآورانه تبدیل شده است. پیشرفت فناوری، تغییر چشم اندازهای ژئوپلیتیکی و پویایی بازار، صنعت فضایی را با تحولات عظیمی روبرو کرده است. بر اساس بررسی‌های انجام شده توسط تیم تحقیق، احصا تحولات و روندهای فناوریانه‌ی صنعت فضایی در مطالعات داخلی با خلأ تحقیقاتی روبرو بوده و به رغم اهمیت بالا، پژوهش‌های بسیار اندکی در این حیطه انجام شده است. از این رو شناسایی روندهای فناوریانه برای هدایت نوآوری، حفظ رقابت، تخصیص کارآمد منابع، برنامه‌ریزی راهبردی و سیاست‌گذاری در این صنعت از اهمیت بسزایی برخوردار است. بر همین اساس، هدف این مطالعه احصاء روندهای فناوریانه در صنعت فضایی است. به منظور بهره‌گیری از پتانسیل صنعت فضایی، تحلیل مضمون و کدگذاری اسناد راهبردی کشورهای مختلف در صنعت هوافضا انجام شده است. جامعه مورد مطالعه، اسناد سیاستی مرتبط با حوزه هوافضا که توسط سازمان‌های سیاست‌گذار کشورهای مختلف در اقصی نقاط جهان می‌باشد. در مجموع ۲۱ سند از ۱۳ کشور به منظور استنتاج روندها و موضوعات محوری صنعت فضایی بررسی شده است. با تحلیل متن کامل اسناد که بالغ بر ۱۲۰۰ صفحه بوده است، تعداد ۲۲۹ کد به تفکیک هر واحد تحلیل استخراج شد و به عنوان مجموعه داده ورودی در تحلیل مضمون مورد استفاده قرار گرفتند. قلمرو پژوهش، کشورهای انگلستان، چین، ایالات متحده آمریکا، هند، فرانسه، سوئد، آفریقای جنوبی، هلند، برزیل، منطقه اتحادیه اروپا، امارات متحده عربی، فیلیپین و استرالیا است. برای تفسیر و تحلیل داده‌ها از روش تحلیل توصیفی و از نرم‌افزار MAXQDA استفاده شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد کشورهای مختلف برای جا نماندن از پیشران‌های توسعه صنعت فضایی، اسناد راهبردی را به منظور ترسیم چشم‌انداز، اهداف و نقشه راه فناوری نگارش کرده‌اند. این اسناد بینش ارزشمندی را در مورد اولویت‌ها، سرمایه‌گذاری‌ها و تلاش‌های مشترکی که برای شکل دادن به مسیر آینده صنعت فضایی است، ارائه می‌کند. تجزیه و تحلیل این اسناد راهبردی می‌تواند منجر به درک روندهای علمی و فناوریانه در صنعت فضایی شود. تحلیل مضمون اسناد موجب شناسایی ۲۰ حوزه فناوریانه در ۵ حوزه محوری، فضای به هم پیوسته خودکار، سیستم‌های پیشرفته فضایی، عملیات پیچیده فضایی، پایداری فضایی و دیجیتالی‌سازی فضا شده است. شناسایی ۲۰ حوزه فناوری کلیدی در پنج محور کلی نشان‌دهنده ماهیت چندوجهی صنعت فضایی و تاکید بر اولویت‌های راهبردی کشورهای مختلف در سراسر جهان است. تحلیل اسناد راهبردی کشورهای مختلف نشان می‌دهد فرصت‌ها و چالش‌ها هم برای تازه‌واردها و هم برای بازیگران سابقه با گسترش بازار فضا در سال‌های آینده فراوان است. تحلیل‌های انجام شده ابزار تصمیم‌گیری مهمی در برنامه‌ریزی فناوری و تدوین استراتژی فناوری است که اهمیت بالایی از نظر تعیین جهت و اولویت‌ها در توسعه صنعت فضایی دارد و می‌تواند به تدوین راهبردها و برنامه‌های مؤثر در آینده کمک کند.

تاریخچه داوری

دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۱۴

پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۱۰

واژه‌های کلیدی

روندهای فناوریانه، تحلیل مضمون، صنعت فضایی، اسناد راهبردی

نحوه استناد به این مقاله

مجید حقگو و همکاران، " احصا روندهای فناوریانه در صنعت فضایی: تحلیل مضمون اسناد راهبردی کشورهای مختلف "، دو فصلنامه علوم، فناوری و کاربردهای فضایی، جلد چهارم، شماره دوم، صفحات ۸۰-۶۳، ۱۴۰۳.

۱- مقدمه

داده‌های ماهواره‌ای هستند؛ مانند کشاورزی دقیق، پایش آب و هوا، واکنش به بلایا و مخبرات. ترکیب این عوامل و تکامل صنعت فضایی، محیط اقتصادی مطلوب‌تری را برای فعالیت‌های مرتبط با فضا، جذب سرمایه‌گذاری و پرورش نوآوری در صنعت فضایی ایجاد می‌کند (بارتزاک^۴، ۲۰۲۲). علاوه بر این، پویایی رقابتی صنعت فضایی با ظهور بازیگران جدید، از جمله شرکت‌های خصوصی و کنسرسیوم‌های بین‌المللی، به چالش کشیدن پارادایم‌های سنتی و پرورش روحیه نوآوری و کارآفرینی، تشدید می‌شود. با افزایش دموکراتیزه شدن دسترسی به فضا و تکثیر فناوری‌های برافکن، صنعت فضایی در اوج یک عصر تحول‌آفرین قرار گرفته است (سالی‌کوف و همکاران، ۲۰۲۴).

بررسی‌ها نشان می‌دهد کشورهای مختلف برای جا نماندن از پیشران‌های توسعه صنعت فضایی، اسناد راهبردی را به منظور ترسیم چشم‌انداز، اهداف و نقشه راه فناوری نگارش کرده‌اند. این اسناد بینش ارزشمندی را در مورد اولویت‌ها، سرمایه‌گذاری‌ها و تلاش‌های مشترکی که برای شکل دادن به مسیر آینده صنعت فضایی است، ارائه می‌کند. تجزیه و تحلیل این اسناد راهبردی می‌تواند منجر به درک روندهای علمی و فناوریانه در صنعت فضایی شود. بر اساس بررسی‌های انجام شده توسط تیم تحقیق، احصا تحولات و روندهای فناوریانه‌ی صنعت فضایی در مطالعات داخلی با خلأ تحقیقاتی روبرو بوده و به رغم اهمیت بالا، پژوهش‌های بسیار اندکی در این حیطه انجام شده است. در همین راستا و با توجه به آن چه پیشتر ذکر شد، پژوهش حاضر به دنبال شناسایی روندهای فناوریانه‌ی در حال تحول در صنعت فضایی با تجزیه و تحلیل تطبیقی اسناد راهبردی کشورهای مختلف است. بنابراین با توجه به توضیحات فوق، سوالات اصلی این پژوهش عبارتند از: «مهم‌ترین روندهای فناوریانه در صنعت فضایی کدامند؟» انتظار می‌رود روندهای شناسایی شده و جهت‌گیری‌های تحقیقات آتی، بینش‌های ارزشمندی را برای دینفعان در صنعت فضایی فراهم کرده و آنها را در تصمیم‌گیری، سرمایه‌گذاری و نوآوری راهنمایی کند.

۲- روش‌شناسی پژوهش

این پژوهش از نظر ماهیت، توصیفی-تحلیلی است و از روش تحلیل مضمون برای بررسی اسناد استفاده شده است. جامعه مورد مطالعه، اسناد سیاستی مرتبط با حوزه هوافضا که توسط

با ظهور اقتصاد دانش‌بنیان و اقتصاد دیجیتال، مفهوم سنتی رشد اقتصادی به مفهومی با محوریت توسعه اقتصادی از طریق فرآیندهای نوآورانه تبدیل شده است (سالی‌کوف، آیمب‌توف، یسماغولوا، و جسی‌بالی‌وا^۱، ۲۰۲۴). در این میان، صنعت فضایی به عنوان لوکوموتیو بالقوه برای توسعه نوآورانه کشورهای محسوب می‌شود. این صنعت یکی از صنایع پیشروی مدرن است که به توسعه اقتصاد ملی کمک شایان توجهی می‌کند. امروزه فضا با محصولات نوآورانه در حال ورود به حوزه‌های دیگر نظیر کشاورزی، امنیت و دفاعی و مدیریت و توسعه شهری می‌باشد (سازمان پژوهش‌های فضایی هند، ۲۰۲۳). در نتیجه این پیشران‌ها، ارتقای صنعت فضایی به عنوان محرک کلیدی برای توسعه کشورها به روند جهانی تبدیل شده است. توسعه اقتصادی با معرفی نوآوری‌های دیجیتال در بخش‌های مختلف همراه بوده و همین امر موجب شکل‌گیری مفهوم اقتصاد فضاپایه شده است. با پیشرفت‌های بی‌سابقه در فناوری و اشتیاق دوباره برای اکتشاف فضا، چشم‌انداز جهانی صنعت فضایی دستخوش دگرگونی‌های عمیقی شده است. بیشتر اکتشافات فضایی به صراحت بر پیشرفت فناوری متکی هستند. مطالعات انجام شده بر اهمیت معرفی فناوری‌های پیشرفته‌ی اطلاعات و ارتباطات در زمینه علوم فضایی و هوانوردی تاکید می‌کند. یکپارچگی فناوری‌های اطلاعات و ارتباطات در صنعت فضایی به عنوان عامل کلیدی برای باز کردن ابعاد جدید پیشرفت علمی و اقتصادی برجسته شناخته می‌شود (عالم، تامبونان، و شیهاب^۲، ۲۰۲۰). بکارگیری فناوری‌های دیجیتال در این صنعت، دستیابی به رشد اقتصادی چند برابری را ممکن می‌سازد. آژانس‌های تخصصی حوزه فضایی در غرب از تأثیر دیجیتالی شدن اقتصاد در کشورهای توسعه‌یافته، دو برابر شدن نرخ رشد اقتصادی و افزایش بهره‌وری نیروی کار تا ۴۰ درصد یاد می‌کنند (فریش‌اوف^۳ و همکاران، ۲۰۱۸). بدین ترتیب، محبوبیت صنعت فضایی را می‌توان از طریق تحول دیجیتال افزایش داد. ترکیب هزینه‌های کمتر و فناوری‌های بهبود یافته، فرصت‌های تجاری جدیدی را در بخش فضایی باز می‌کند (سالی‌کوف و همکاران، ۲۰۲۴). شرکت‌های نوپای فناوری، در حال بررسی برنامه‌های کاربردی نوآورانه برای

¹ Salykov, Aimbetov, Yesmagulova, & Jussibaliyeva

² Alam, Tambunan, & Shihab

³ Frischauf

⁴ Bartczak

هلند، برزیل، اتحادیه اروپا، امارات متحده عربی، فیلیپین و استرالیا است.

جدول (۱): کشورهای انتخاب شده بر مبنای معیارهای غربال

قاره	توسعه یافته	در حال توسعه
آفریقا	-	آفریقای جنوبی (۲)
آسیا	<ul style="list-style-type: none"> ▪ چین (۱) ▪ هند (۱) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ فیلیپین (۱) ▪ امارات (۱)
آمریکا	<ul style="list-style-type: none"> ▪ آمریکا (۱) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ برزیل (۱)
استرالیا	<ul style="list-style-type: none"> ▪ استرالیا (۳) 	-
اروپا	<ul style="list-style-type: none"> ▪ فرانسه (۱) ▪ سوئد (۲) ▪ هلند (۴) ▪ انگلستان (۱) ▪ اتحادیه اروپا (۲) 	-
مجموع اسناد	۱۶	۵

برای تفسیر و تحلیل داده‌ها از روش تحلیل توصیفی و از نرم‌افزار MAXQDA استفاده شده است. در مرحله اول اسناد یاد شده مورد مطالعه دقیق قرار گرفت. تمام گزاره‌هایی که انتظار می‌رفت بتوان از آنها روندهای فناورانه را استخراج کرد، استخراج شدند. در مرحله دوم روش مقوله‌بندی مناسب انتخاب و سعی شد تا هر مقوله نماینده یک مفهوم مجزا باشد که به اهداف پژوهش مربوط باشد. در مرحله سوم هر یک از گزاره‌های جمع آوری شده برای قرار گرفتن در هر یک از مقوله‌ها نشانه‌گذاری شدند. به عبارت دیگر هر یک از گزاره‌های استخراج شده از اسناد، مورد بررسی قرار گرفتند تا مشخص شود پدیده توصیف شده در آن در یکی از مقوله‌های مورد نظر جای می‌گیرد یا خیر. در مرحله چهارم مقوله‌بندی با روش کدگذاری باز و کدگذاری محوری انجام شد. در کدگذاری باز تمام داده‌ها بدون اینکه هیچ اولویتی بین داده‌ها در نظر گرفته شود، تحلیل و در چندین مقوله دسته‌بندی شدند. در کدگذاری محوری، چندین مقوله اصلی که بتوان سایر مقوله‌ها را از درون آن استخراج کرد، انتخاب و گزاره‌های مورد نظر در قالب مقوله‌ها دسته‌بندی شده‌اند. سپس فراوانی مقوله‌ها با توجه به کدهای تشکیل دهنده آنها بررسی شد و در نهایت در مرحله آخر داده‌ها پردازش و نتایج تفسیر شدند. چارچوب مفهومی پژوهش در شکل ۱ نشان داده شده است.

سازمان‌های سیاست‌گذار کشورهای مختلف در اقصی نقاط جهان است. در فرآیند جست و جو، حوزه هوافضا به عنوان حوزه اصلی کاوش مدنظر بوده است. این مستندات از دو طریق مختلف گردآوری شده‌اند. در مسیر اول، وبسایت سازمان‌های نقش‌آفرین و نهادهای سیاستگذار در حوزه‌های مذکور، مرجع جست و جو قرار گرفتند و از این طریق اسناد و مدارکی مرتبط با موضوع پژوهش جمع‌آوری شده است. در مسیر دوم، با استفاده از ترکیب کلیدواژه‌های مرتبط با این مطالعه از جمله هوافضا، فضا، علم‌وفناوی، نوآوری، سیاست و راهبرد به جست‌وجوی آزاد در موتورکاوش گوگل پرداخته و از این طریق نیز تعدادی سند راهبردی قابل بررسی حاصل شده است. پس از جست‌وجوهای اولیه، تعداد زیادی سند به دست آمد. که بر اساس معیارهای ذیل مورد غربال قرار گرفتند:

(۱) تنوع در موقعیت جغرافیایی کشورها: معیار نخست بررسی لااقل یک کشور دارای صنعت رقابت‌پذیر هوافضا در سطح جهانی در هر قاره بوده است (لازم به ذکر است در نهلیت برای قاره آفریقا منطقه آفریقای جنوبی، قاره آسیا، چین، هند، فیلیپین و امارات متحده عربی، قاره آمریکا، آمریکا و برزیل، قاره استرالیا، استرالیا و از قاره اروپا، فرانسه، سوئد، هلند و انگلیس به عنوان نماینده انتخاب و مورد بررسی قرار گرفته است). (۲) تنوع در سطح توسعه‌یافتگی کشورها: معیار دوم انتخاب نمایندگانی از سطوح مختلف توسعه‌یافتگی اقتصادی بوده است. سعی شده است نمایندگان منتخب در نمونه نهایی تحقیق، کشورهایی باشند که در هر دو سطح توسعه‌یافته و در حال توسعه مطرح هستند. (۳) انتخاب اسناد راهبردی بر اساس جامعیت و گستردگی محتوا، جزئیات و شفافیت در برنامه‌ها، تحلیل‌های تخصصی و پیش‌بینی‌های آینده، و ارتباط قوی با سیاست‌های کلان ملی بوده است. این اسناد به منابع معتبر استناد کرده که دارای برنامه‌های دقیق و مشخص برای دستیابی به اهداف استراتژیک خود می‌باشند.

غربال فهرست اولیه کشورها با کسب نظر از تعدادی از سیاست‌گذاران و مدیران صنعت فضایی کشور و با در نظر گرفتن تمایل و نیاز آنان برای اطلاع از سیاست‌های کشورها صورت گرفت. فهرست نهایی نمونه پژوهش در جدول ۱ درج شده است. پس از تکمیل فرایند جست و جو، ۲۱ سند راهبردی از ۵ حوزه جغرافیایی مختلف گردآوری شده است که شامل انگلستان، چین، ایالات متحده آمریکا، هند، فرانسه، سوئد، آفریقای جنوبی،

منظومه‌ی ماهواره‌ها و هوش مصنوعی و محاسبات با عملکرد بالا حوزه‌های فناوری در اسناد منتخب می‌باشند.



شکل (۱): چارچوب مفهومی پژوهش

برای ارزیابی پایایی، برخی از پژوهشگران، راهکار کدگذاری بازنه را معرفی کرده‌اند. در این روش از افراد خواسته می‌شود که یکی از اسناد را مجدداً کدگذاری کنند. چنانچه نظرات دو نفر در خصوص کدهای احصا شده همگرا باشد، پایایی تأیید می‌شود (خواستار، ۱۳۸۸). در این پژوهش، برای ارزیابی همگرا بودن کدهای احصا شده از ضریب کاپا استفاده شده است. هنگامی که ضریب کاپا کمتر از ۰.۲ باشد، بیانگر توافق ضعیف، بین ۰.۲ تا ۰.۴ متوسط، ۰.۴ تا ۰.۶ نسبتاً زیاد، ۰.۶ تا ۰.۸ زیاد و بیشتر از ۰.۸ تقریباً کامل است. نتایج محاسبه آماره کاپا در جدول ۳، ارائه شده است. ضریب کاپا ۰.۶۵ بیانگر توافق نسبتاً مناسب است و علاوه بر این سطح معناداری کمتر از ۰.۰۲ نیز بیانگر ارتباط مناسب بین کدگذاری‌های صورت گرفته بر روی اسناد منتخب می‌باشد.

جدول (۲): آزمون مقایسه کدگذاری‌های محقق و یک متخصص بر روی یکی از اسناد منتخب

مقدار	انحراف معیار برآوردی	تخمین t	سطح معناداری
۰/۶۷	۰/۱۲	۴/۲۹	۰
درجه توافق کاپا			

۳- یافته‌های پژوهش

در این پژوهش همانطور که پیشتر اشاره شد، ۲۱ سند از ۱۳ کشور به منظور استنتاج روندها و موضوعات محوری صنعت فضایی بررسی شد. با تحلیل متن کامل اسناد که بالغ بر ۱۲۰۰ صفحه بوده است، تعداد ۲۲۹ کد به تفکیک هر واحد تحلیل استخراج شد و به عنوان مجموعه داده ورودی در تحلیل مضمون مورد استفاده قرار گرفتند. ابرکدها در شکل ۲ نشان داده شده است. ابرکدها بر اساس فراوانی آن‌ها در متون مورد بررسی ایجاد و کلمات پرتکرار به اندازه‌ی بزرگی در این نمودارها نمایش داده می‌شوند. همان طور که مشخص است، ماهواره‌های کوچک،

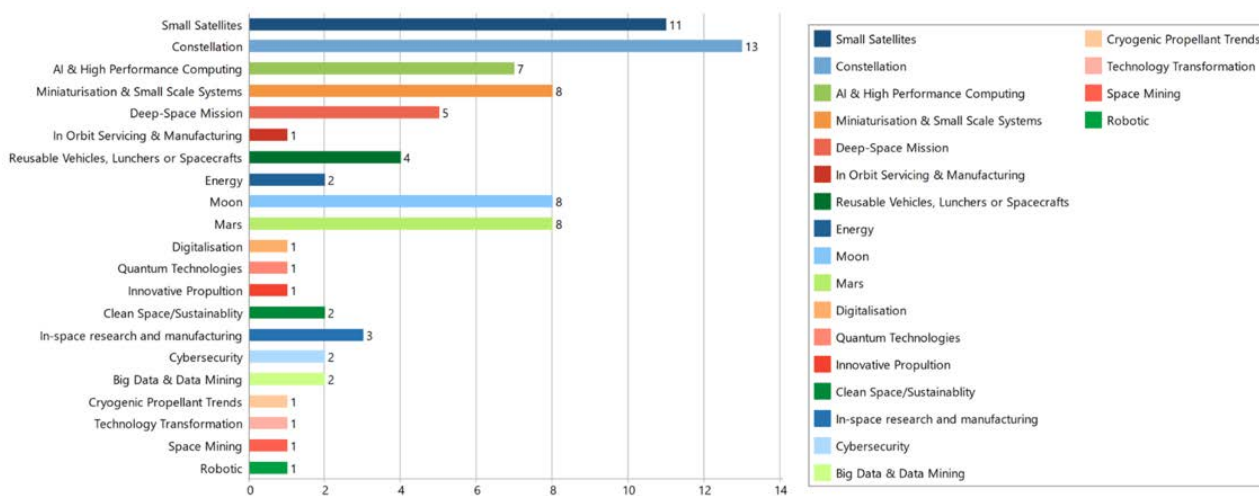


شکل (۲): ابر کدها

در شکل ۳ میزان تکرار روندها در اسناد ۲۱ گانه و در جدول ۳ فراوانی روندها در کل اسناد مشخص شده است. صنعت فضایی در حال حاضر در مسیری از رشد و توسعه قرار دارد که شامل اعتنای ویژه به منظومه ماهواره‌ها، توجه به روندهای نوظهوری مانند ماهواره‌های کوچک و هوش مصنوعی و استفاده از فناوری‌های نوین برای بهبود کارایی و کاهش هزینه‌ها می‌شود. همان طور که مشخص است، منظومه ماهواره‌ها با طرح شدن در ۱۳ سند از ۲۱ سند و همچنین تعداد ۳۳ تکرار در کلیه اسناد، مهم‌ترین روند فناوری در متون مورد بررسی می‌باشد که به استفاده از مجموعه‌ای از ماهواره‌ها و شبکه کردن آن‌ها برای پوشش جهانی ارتباطات و رصد زمین اشاره دارد.

ماهواره‌های کوچک نیز با تعداد ۴۹ تکرار در ۱۱ سند یکی از روندهای فناوری در صنعت فضایی می‌باشند که دارای انعطاف‌پذیری بیشتری در مأموریت‌های مختلف فضایی هستند. در ادامه، هوش مصنوعی و محاسبات با عملکرد بالا، با ۱۶ تکرار در ۷ سند نیز نشان از تمرکز بر روی بهبود کارایی مأموریت‌های فضایی و تحلیل داده‌های بزرگ دارد. توزیع کدها نشان‌دهنده همگرایی و عدم تناقض در اسناد راهبردی کشورهای مختلف است. به عبارتی، پس از تحلیل و بررسی اسناد نتایج واگرا مشاهده نشد و هر کشور بر اساس نیازها و سیاست‌های کلان خود، به توسعه تعدادی از کاربردها و فناوری‌های فضایی پرداخته است. این رویکرد نه تنها متناقض نیست، بلکه نشان‌دهنده تطابق و هم‌سویی اسناد راهبردی با سیاست‌های کلان کشورهای مختلف است. این روندها نشان‌دهنده تمایل صنعت فضایی به

بهره‌گیری از فناوری‌های نوین و بهبود عملکرد و کارایی مأموریت‌ها برای موفقیت بیشتر در آینده است.

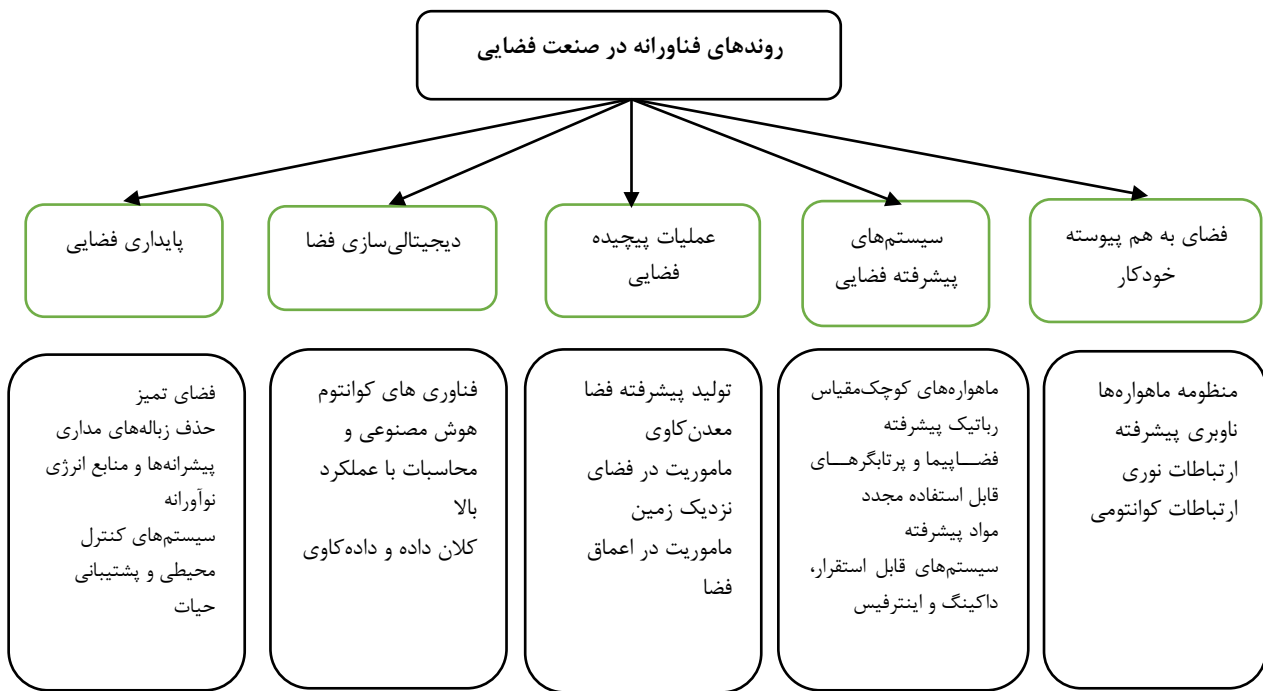


شکل (۳): میزان تکرار روندها در اسناد

نتایج تحلیل اسناد، منجر به شناسایی ۲۰ حوزه فناورانه و دسته‌بندی آن در ۵ محور موضوعی، فضای به هم پیوسته خودکار، سیستم‌های پیشرفته فضایی، عملیات پیچیده فضایی، پایداری فضایی و دیجیتالی‌سازی فضا شده است. طبقه‌بندی حوزه‌های فناورانه به پنج دسته از همسویی راهبردی آنها با اهداف مشخص شده در اسناد تحلیل شده از کشورهای مختلف حاصل می‌شود که اهداف و اولویت‌های مشترک را در هر حوزه موضوعی نشان می‌دهد. این روش طبقه‌بندی ماهیت بین‌رشته‌ای بسیاری از پیشرفت‌های فناورانه در صنعت فضایی را منعکس می‌کند. هر دسته نمایانگر جنبه‌ای متمایز از پیشرفت فناوری و نوآوری در صنعت فضایی است و درک جامع از پیوستگی و هم‌افزایی آنها را تسهیل می‌کند. بنابراین این پژوهش چارچوبی معنادار برای درک روندهای فناوری در صنعت فضایی به شرح زیر ارائه می‌دهد.

جدول (۳): تکرار/تناوب/افراوانی روندها در کلیه اسناد

Code	Cod. seg. (all documents)
Small Satellites	49
Constellation	33
AI & High Performance Computing	16
Miniaturisation & Small Scale Systems	14
Deep-Space Mission	13
In Orbit Servicing & Manufacturing	10
Reusable Vehicles, Lunchers or Spacecrafts	8
Energy	8
Moon	8
Mars	8
Digitalisation	6
Quantum Technologies	6
Innovative Propulsion	5
Clean Space/Sustainability	5
In-space research and manufacturing	4
Cybersecurity	4
Big Data & Data Mining	3
Cryogenic Propellant Trends	2
Technology Transformation	1
Space Mining	1
Robotic	1



شکل ۴. روندهای فناوری در صنعت فضایی

۱-۳ فضای به هم پیوسته خودکار

فضای به هم پیوسته خودکار، شبکه‌ای از فناوری‌های فضایی به هم پیوسته را نشان می‌دهد که به طور مستقل عمل، اما به طور یکپارچه ارتباط برقرار می‌کنند. این شبکه حاصل پیشرفت در مخابرات، ناوبری، ارتباطات نوری، ارتباطات کوانتومی و استقرار منظومه‌ی ماهواره‌ها است.

۱-۱-۳ منظومه ماهواره‌ها^۱

منظومه‌ی ماهواره‌ها، متشکل از بیش از یک ماهواره و بعضاً تا صدها یا حتی هزاران ماهواره کوچک در مدار پایین زمین، راه را برای خدمات نوآورانه، به ویژه در زمینه پر کردن شکاف دیجیتالی، پوشش پهنای باند جهانی و ارتباطات داده با تأخیر کم، هموار کرده است (شورای فیلیپین در صنعت، انرژی و توسعه فناوری‌های نوظهور، ۲۰۲۱). پیشرفت‌های قابل توجه در پرتابگرها از جمله قابلیت استفاده مجدد، کاهش در حجم و وزن، منجر به بهبود

عملکرد و کارایی هزینه در توسعه منظومه‌ی ماهواره‌ای شده است (شرکت فضایی سوئد، ۲۰۲۲). بر اساس گزارش اتحادیه اروپا این حوزه فناوری به پدیده‌ای غالب در بخش بالادستی تبدیل شده و بازار فضایی را در سال‌های آینده هدایت خواهد کرد (آژانس فضایی اروپا، ۲۰۲۱).

۲-۱-۳ ناوبری پیشرفته^۲

توانایی تعیین موقعیت دقیق و کنترل مسیر حرکت، برای موفقیت اکثر عملیات‌های فضایی از جمله پرتاب، مدارگردی، فرود و مانوردهی حیاتی است. ناوبری نادرست می‌تواند منجر به شکست کامل مأموریت گردد. طبق آمار ارائه شده توسط ناسا، حدود ۱۵ درصد از ماهواره‌های پرتاب شده به فضا، به دلیل خطاهای ناوبری و عدم توانایی قرارگیری صحیح در مدار از بین رفته‌اند (جکلین^۳، ۲۰۱۹؛ چالش‌های ناوبری، ۲۰۲۱). چندین روند مهم در توسعه سیستم‌های ناوبری فضایی پیشرفته در اسناد مشاهده می‌شود که عبارتند از: استفاده از سیستم‌های ماهواره‌های ناوبری جهانی مانند

² Advanced Navigation

³ Jacklin

¹ Constellations

یابد. تحقیقات زیادی در حال انجام است تا لیزرهای پرقدرت‌تر و کارآمدتر توسعه یابند.

۳-۱-۴ ارتباطات کوانتومی^۴

ارتباطات کوانتومی در حال ظهور به عنوان یک فناوری مهم برای ارتباطات فضایی شناخته می‌شود. ارتباطات کوانتومی از ویژگی‌های مکانیک کوانتوم برای رمزگذاری اطلاعات در فوتون‌ها یا ذرات دیگر استفاده می‌کند. این امر به ایجاد کانال‌های ارتباطی امن‌تری منجر می‌شود که در برابر شنود آسیب‌پذیر نیستند. مخابرات کوانتومی همچنین می‌تواند برای ایجاد کلیدهای رمزنگاری کوانتومی میان دو مکان فضایی دور از هم مورد استفاده قرار گیرد (طبقه‌بندی فناوری ناسا، ۲۰۲۱). این فناوری برای ارتباطات محرمانه و انتقال اطلاعات حساس در مأموریت‌های فضایی بسیار اهمیت دارد. علاوه بر امنیت، ارتباطات کوانتومی دارای سرعت بالا، دقت بیشتر و مقاومت بیشتر در برابر تداخلات الکترومغناطیسی می‌باشد که این ویژگی‌ها ضمن افزایش کارایی و قابلیت اطمینان ارتباطات، ارتقاء چشمگیری را در مأموریت‌های فضایی فراهم می‌آورند (سازمان تحقیقات فضایی هند، ۲۰۲۳). بر اساس یک گزارش تحقیقاتی، انتظار می‌رود بازار جهانی مخابرات کوانتومی از ۱۵۵ میلیون دلار در سال ۲۰۲۰ میلادی به ۳۸۵ میلیون دلار در سال ۲۰۲۶ برسد که نشان‌دهنده رشد قابل توجهی است. همچنین پیش‌بینی می‌شود ظرف ۱۰ سال آینده، شبکه‌های مخابرات فضایی مبتنی بر لیزر و مخابرات کوانتومی به طور گسترده‌ای جایگزین شبکه‌های رادیویی فعلی شوند (بازارها و تحقیقات بازار در بخش خصوصی، ۲۰۲۱).

۳-۲ سیستم‌های پیشرفته فضایی

نوآوری‌های فناوری‌های فضا، از کوچک‌سازی و رباتیک تا قابلیت استفاده مجدد، مواد پیشرفته و سیستم‌های قابل استقرار موجب تکامل اکتشافات فضایی می‌شود که قابلیت‌های جدید را امکان‌پذیر می‌کند، هزینه‌ها را کاهش می‌دهد و فرصت‌ها را برای تحقیقات علمی، سرمایه‌گذاری‌های تجاری و اکتشافات انسانی باز می‌کند. این دسته از روندهای فناوری‌ها بر بکارگیری سیستم‌های دارای فناوری سطح بالا در صنعت فضایی تأکید دارد.

GPS، Galileo، GLONASS با دقت و قابلیت اطمینان بالاتر؛ سنسورها و سیستم‌های ناوبری تلفیقی مانند IMU برای بهبود دقت و پایداری ناوبری؛ استفاده از فناوری‌های نوین ناوبری مانند LIDAR، دوربین‌های تصویربرداری پیشرفته و رادارهای پرتو X و بکارگیری الگوریتم‌ها و هوش مصنوعی برای بهینه‌سازی عملکرد ناوبری و تشخیص بهتر موانع و خطرات (آژانس فضایی ملی آفریقای جنوبی، ۲۰۲۲؛ آژانس فضایی ملی سوئد، ۲۰۲۱). آژانس فضایی اروپا در حال توسعه ماهواره‌هایی با سیستم ناوبری لیزری بسیار دقیق است که قادر به مکان‌یابی با دقت زیر یک سانتیمتر خواهند بود (آژانس فضایی اروپا، ۲۰۲۱). همچنین ناسا در حال آزمایش سیستم‌های ناوبری مبتنی بر هوش مصنوعی است که با تجزیه و تحلیل داده‌های حسگرهای مختلف، تصمیم‌گیری بهینه برای ناوبری را انجام می‌دهند (طبقه‌بندی فناوری ناسا، ۲۰۲۱). تداوم روند توسعه سیستم‌های ناوبری پیشرفته، نقش محوری در آینده اکتشافات و فعالیت‌های فضایی بشر خواهد داشت.

۳-۱-۳ ارتباطات نوری^۱

استفاده از لیزر برای ارتباطات فضایی، قابلیت‌های جدیدی را برای انتقال داده‌ها و اطلاعات در میان ماهواره‌ها، ایستگاه‌های فضایی و زمین فراهم می‌کند. یکی از کاربردهای کلیدی لیزر در ارتباطات فضایی، لینک‌های ارتباطی زمین-فضا و فضا-فضا است. لیزرها می‌توانند برای اتصال ماهواره‌ها به شبکه‌های مخابراتی زمین و همچنین اتصال ماهواره‌ها به یکدیگر (ارتباطات بین‌ماهواره‌ای) به کار روند. این فناوری بر پایه استفاده از نور و فیبرهای نوری برای انتقال داده بنا نهاده شده است و امکان انتقال داده با سرعت بالا و پهنای باند بالا در مأموریت‌های فضایی که نیاز به انتقال داده‌های بسیار زیاد با سرعت و دقت بالا را دارند، فراهم می‌کند (فیوچرز^۲، ۲۰۱۸). ارتباطات نوری ویژگی‌های امنیتی پیشرفته‌ای را فراهم می‌کند و آن را برای انتقال اطلاعات حساس در فضا ایده‌آل می‌سازد. علاوه بر این، ماهیت فشرده و وزن سبک آن امکان ادغام با ماهواره‌ها و فضایی‌های کوچک را فراهم می‌کند و استفاده از منابع را بهینه می‌سازد (براهمی^۳، ۲۰۲۳؛ دفتر فضایی هلند، ۲۰۲۰). انتظار می‌رود استفاده از لیزر و مخابرات کوانتومی در بخش فضایی در سال‌های آتی به طور قابل توجهی گسترش

¹ Optic Communication

² Futures

³ Brahimi

⁴ Quantum Communication

۱-۲-۳ ماهواره‌های کوچک مقیاس^۱

بالای سطح در ربات‌ها و رورها امکان شناسایی موانع، اندازه‌گیری فشار، کنترل دقیق حرکت و حتی تعامل با اجسام مختلف در فضا را فراهم کرده که به افزایش کارایی و پایداری در عملیات‌های فضایی کمک شایان توجهی می‌کند (طبقه‌بندی فناوری ناسا، ۲۰۲۱).

کوچک‌سازی ماهواره‌ها به یکی از برترین روندهای صنعت فضایی در آینده نزدیک تبدیل خواهد شد. پیشرفت در الکترونیک، نرم‌افزار، تجهیزات قابل خرید^۲، کاهش افزودنی سیستم و بکارگیری سیستم‌های الکترومکانیک مینیاتوری^۳ به عنوان عوامل کلیدی کاهش هزینه، زمان و وزن در عین حفظ عملکرد در توسعه ماهواره محسوب می‌شوند. این پیشرفت‌ها موجب ارزان شدن ماهواره‌های مینیاتوری تا ۷۰ درصد در مقایسه با ماهواره‌های سنتی شده است. این ماهواره‌ها با توجه به اندازه و مقرون به صرفه بودن برای استفاده در شبکه‌های ارتباطی بی‌سیم، مشاهدات علمی، جمع‌آوری داده‌ها و نظارت بر زمین مناسب هستند و پتانسیل این را دارند که اکتشافات فضایی را با امکان استقرار سریع، افزایش انعطاف‌پذیری و کاهش هزینه متحول سازند (مرکز اکتشاف منابع فضایی اروپا، ۲۰۱۷؛ دفتر فضای هلند، ۲۰۲۱، پلیسیون، ریبریو، دووژاس، بلدرین و ملو^۴، ۲۰۱۸).

۲-۲-۳ رباتیک پیشرفته^۵

۳-۲-۳ فضاپیماها و پرتابگرهای قابل استفاده مجدد^۹

موتورهای قابل استفاده مجدد و پرتابگرها به عنوان یکی از روندهای فناوری در صنعت فضایی احصا شده است. بررسی اسناد کشورهای منتخب نشان می‌دهد، قابلیت استفاده مجدد در فضاپیماها و پرتابگرها برای کاهش هزینه‌های مستقیم و کاهش قیمت راه‌اندازی بسیار مهم است (شورای فیلیپین در تحقیق و توسعه صنعت، انرژی و فناوری های نوظهور، ۲۰۲۱). اندازه کوچک و هزینه کم، آن‌ها را برای کاربردهای مختلف، از رصد زمین گرفته تا ارتباطات و تحقیقات علمی، جذاب می‌کند. نسل بعدی پرتابگرها، به‌طور کامل قابل استفاده مجدد خواهند بود. این امر بدین معناست که همه اجزا و سیستم‌های مرتبط با پرتاب، شامل ورود مجدد به زمین^{۱۰}، بلوک انتقال مداری^{۱۱}، برای استفاده مجدد طراحی و پیاده‌سازی می‌شوند. این طراحی باعث می‌شود که مراحل مختلف پرتاب فضایی با کمترین هزینه و بیشترین کارایی قابل استفاده باشند (شرکت فضایی سوئد، ۲۰۲۲).

رباتیک پیشرفته امکان عملیات و کنترل از راه دور فضاپیماها و مریخ‌نوردها را که برای اکتشاف و مطالعه اجرام آسمانی به کارگرفته می‌شوند، فراهم می‌کند. پیشرفت در فناوری رباتیک منجر به توسعه سیستم‌های توانمند نظیر بازوی رباتیک اِرا^۶ برای تعمیر و نگهداری سیستم‌های فضایی، انجام آزمایشات علمی و حمل و نقل بارها در فضا، رورها^۷ برای بررسی و اکتشاف سطح سیارات و اجرام فضایی و حمل نمونه‌های خاک یا سنگ برای تجزیه و تحلیل، ربات‌های دارای کارکرد کنترل از راه دور^۸ و سیستم‌های فضایی از راه دور برای انجام عملیات در شرایط پیش‌بینی نشده، ربات‌های دارای کارکرد اتصال خودکار به سایر ربات‌ها یا سیستم‌ها برای شرکت در ماموریت‌های فضایی شده است (پاپر و همکاران، ۲۰۲۰). همچنین به کارگیری سنسورهای نیرو و گشتاور با کیفیت فضایی، سنسورهای لمسی با کیفیت فضایی، سنسورهای تصویر سه بعدی برای حرکت سطحی و

۴-۲-۳ مواد پیشرفته^{۱۲}

مواد پیشرفته نقش محوری در توسعه مواد سازه‌ای سبک، پوشش‌ها، کامپوزیت‌ها برای شرایط سخت محیط فضایی ایفا می‌کنند. مواد سازه‌ای سبک برای کاهش وزن فضاپیماها و ماهواره‌ها بسیار حائز اهمیت است، که این امر موجب کارآمدی پرتاب‌ها و عملیات فضایی می‌شود. این مواد شامل پلیمرهای پیشرفته، کامپوزیت‌های فیبر کربن و فلزات سبک مانند آلومینیوم و آلیاژهای تیتانیوم است که نسبت استحکام به وزن بالایی را ارائه می‌کنند، یکپارچگی ساختاری را تضمین می‌کنند و در عین حال جرم پرتابگر را به حداقل می‌رسانند. مواد هوشمند نظیر آلیاژهای حافظه دار و مواد پیزوالکتریک برای محافظت از فضاپیما در برابر دماهای شدید، تشعشعات، اثرات خوردگی و ضربه‌های ریز

¹ Miniaturization & Small-scale Systems (Small Satellites)

² Commercial Off-The-Shelf (COTS)

³ MEMS

⁴ Pelicioni, Ribeiro, Devezas, Belderrain, & Melo

⁵ Advanced Robotics

⁶ ERA Robotic arm

⁷ Rover

⁸ Teleoperation

⁹ Reusable Vehicles, Launchers or Spacecrafts

¹⁰ Reentry

¹¹ Upper Stages

¹² Smart Materials

چاپ سه بعدی، رباتیک پیشرفته، فرآیندهای نوآورانه نظیر فرآیندهای حرارتی، ریخته‌گری سه بعدی، پردازش‌های نانو فناوری و مواد پیشرفته نظیر کامپوزیت‌های پیشرفته، آلیاژهای سبک و مقاوم برای تولید و ساخت قطعات با عملکرد بالا و هزینه‌های کمتر استفاده می‌کند و صنعت فضایی را با ایجاد محصولات و خدمات فضایی نوآورانه متحول می‌سازد (گو و وو^۳، ۲۰۱۰). چاپ سه بعدی فلزی، فناوری نسبتاً جدیدی است که امکان تولید اجزای پیچیده با جزئیات بالا را بدون نیاز به قالب فراهم می‌کند. بر اساس گزارش ESA در سال ۲۰۲۳، این فناوری منجر به کاهش ۹۰٪ هزینه و ۶۰٪ زمان تولید قطعات ماهواره‌ها و سفینه‌های فضایی شده است. رباتیک پیشرفته و اتوماسیون نیز به طور گسترده‌ای برای مونتاژ و تولید سیستم‌های پیچیده ماهواره‌ای و سفینه‌های فضایی بکار گرفته می‌شود. بر اساس گزارشی از Mordor Intelligence در سال ۲۰۲۱، بیش از ۸۰٪ از فرآیندهای تولیدی در این بخش به طور کامل یا نسبی اتوماتیک شده‌اند (هوشمندی مردور^۴، ۲۰۲۱). ساخت افزایشی نیز روش‌هایی مانند چاپ سه بعدی فلزی و تولید لایه‌ای را شامل می‌شود که بجای برش و ماشین‌کاری، قطعات را از طریق اضافه کردن لایه به لایه مواد اولیه می‌سازند. این روش باعث کاهش ضایعات و وزن محصولات می‌شود. این فناوری امکان ایجاد هندسه‌های پیچیده و اجزای سفارشی را فراهم می‌کند که ممکن است تولید آن‌ها با استفاده از روش‌های تولید سنتی دشوار یا غیرممکن باشد.

علاوه بر بکارگیری روش‌های پیشرفته تولیدی بر روی زمین در صنعت فضایی، تولید در محیط فضا هم به شدت رو به گسترش است. محیط فضا به دلیل ویژگی‌هایی مانند اثرات ریزگرانش و خلا، امکان تحقیق و تولید محصولاتی را فراهم می‌کند که دستیابی به آن روی زمین چالش‌برانگیز یا غیرممکن است. از محیط ریزگرانش می‌توان برای جداسازی بهتر مواد از ظروف استفاده کرد. بدین ترتیب، می‌تواند ما را قادر به مطالعه فرآیندها و ساخت محصولاتی کند که نمی‌توان روی زمین انجام داد. به عنوان مثال، در محیط ریزگرانشی فضا، فلزات را می‌توان به بلورهای بزرگ و تکی تبدیل کرد که قوی‌تر و بادوام‌تر از بلورهای تولید شده در زمین هستند. علاوه بر این، محیط خلاء فضا را می‌توان برای تولید موادی مانند نیمه‌هادی‌ها و حفره‌های نوری استفاده کرد که به درجه بالایی از خلوص نیاز دارند و دستیابی به

شهاب‌سنگ مورد استفاده قرار می‌گیرند. به علاوه، مواد مرکب که از چندین لایه با خواص مختلف تشکیل شده‌اند، استحکام، دوام و پایداری حرارتی بیشتری را ارائه می‌دهند که این امر آن‌ها را برای اقلام فضایی که در شرایط محیطی متفاوتی تحت فشار قرار می‌گیرند، مناسب می‌سازد (طبقه‌بندی فناوری ناسا، ۲۰۲۱).

۳-۲-۵ سیستم‌های قابل استقرار، داکینگ و اینترفیس^۱

سیستم‌های قابل استقرار، داکینگ و اینترفیس، مونتاژ فضایی‌ها، مانورهای اتصال و اتصال اجزای مختلف را در مأموریت‌های فضایی تسهیل می‌کنند. سیستم‌های قابل استقرار، ساختارها و مکانیزم‌هایی را در بر می‌گیرد که برای باز شدن پس از رسیدن به فضا طراحی شده‌اند؛ مانند پانل‌های خورشیدی، آنتن‌ها و بوم‌های قابل استقرار که عملکرد فضایی و قابلیت‌های مأموریت را افزایش می‌دهند. سیستم‌های داکینگ اتصال و قطع ایمن فضایی‌ها، ماهواره‌ها و ماژول‌ها را در مدار امکان‌پذیر می‌کند و از هم ترازوی دقیق و اتصال قابل اعتماد برای تبادل داده‌ها، انرژی و مواد اطمینان می‌دهد. سیستم‌های واسط، اتصالات و رابط‌های استاندارد شده را برای یکپارچه‌سازی و اتصال ماژول‌ها، سیستم‌ها و محموله‌ها در فضایی یا ایستگاه‌های فضایی فراهم می‌کنند و امکان ارتباط و همکاری یکپارچه بین اجزای مختلف را ایجاد می‌کنند. این سیستم‌ها با هم به کارایی، ایمنی و موفقیت مأموریت‌های فضایی با امکان استقرار فضایی، قرار ملاقات مداری و عملیات مشترک در محیط چالش‌برانگیز فضا کمک می‌کنند (فیوچرز، ۲۰۱۸؛ سازمان تحقیقات فضایی هند، ۲۰۲۳).

۳-۳ عملیات پیچیده فضایی

عملیات پیچیده فضایی رویکردی جامع برای استفاده از فناوری‌ها، منابع و محیط‌های مرتبط با فضا برای اهداف اقتصادی، علمی و اکتشافی است. هر کدام از حوزه‌های فناوری‌ها در این دسته فرصت‌های جدیدی را برای اکتشاف، تحقیق، ساخت و استقرار فراتر از زمین نشان می‌دهند.

۳-۳-۱ تولید پیشرفته در فضا^۲

تولید پیشرفته فضا از دو منظر قابل بررسی است: استفاده از روش‌های تولیدی پیشرفته در صنعت فضایی و تولید در محیط فضا. در صنعت فضایی از فناوری‌های تولیدی پیشرفته‌ای مانند

³ Guo & Wu

⁴ Mordor Intelligence

¹ Deployable, Docking and Interface

² Space Advanced Manufacturing

زمین برای پردازش یا انتقال به زمین منتقل شوند که تصور می‌شود از نظر اقتصادی دارای پتانسیل اقتصادی باشد. استفاده از منابع در محل در محیط‌های فضایی می‌تواند هزینه‌ها را کاهش دهد، وابستگی به زمین را کم کند و قابلیت پایداری مأموریت‌های فضایی را افزایش دهد (گو و وو، ۲۰۱۰؛ فیوچرز، ۲۰۱۰).

۳-۳-۳ مأموریت در فضای نزدیک به زمین^۴

مأموریت در فضای نزدیک به زمین، با استفاده از فناوری‌هایی نظیر موشک‌های اکتشافی^۵، کشتی‌های هوایی استراتوسفریک^۶ و بالن‌ها^۷ در فضای نزدیک به زمین انجام می‌شود. موشک‌های اکتشافی برای انجام آزمایشات و جمع‌آوری داده‌ها در لایه‌های پایینی از جو زمین به کار می‌روند، در حالی که کشتی‌های هوایی استراتوسفریک برای اهداف مختلفی از جمله ارتباطات، مشاهده و تصویربرداری زمین، بررسی هواشناسی یا ارسال ابزارهای علمی در ارتفاعات بالا استفاده می‌شود. همچنین، بالن‌ها به ارتفاعات بالا صعود کرده و برای انجام تحقیقات جوی، بررسی پدیده‌های جوی، ارسال دستگاه‌های جوی به ارتفاعات بالا یا بررسی فعالیت‌های فضایی به کار می‌روند. این مأموریت‌ها برای انجام تحقیقات علمی، جمع‌آوری داده‌ها، ارسال سنسورها به ارتفاعات بالا یا انجام آزمایشاتی که نیاز به دسترسی به مناطق بالا یا نزدیک به محیط فضایی دارند، استفاده می‌شوند (آژانس فضایی برزیل، ۲۰۲۲؛ گو و وو، ۲۰۱۰).

۴-۳-۳ مأموریت در اعماق فضا^۸

مأموریت در اعماق فضا شامل سفر فضاپیماها به فراسوی مدار زمین برای کاوش اجرام آسمانی مانند سیارات، قمرها، سیارک‌ها و دنباله‌دارها یا انجام تحقیقات علمی در فضای بین‌سیاره‌ای است. مشخصه این مأموریت‌ها مدت زمان طولانی و فاصله‌ی قابل توجه از زمین است. این مأموریت‌ها اغلب به سیستم‌های پیشرفته پیشرفته، شبکه‌های ارتباطی قوی، قابلیت‌های ناوبری دقیق و سنسورهای پیشرفته نیاز دارند. مهمترین اهداف این مأموریت‌ها شامل بررسی محیط و شرایط زندگی در اجرام فضایی، کشف منابع معدنی و انرژی، بررسی اکوسیستم فضایی و بررسی

آن در زمین دشوار است. تولید نیمه‌هادی‌ها در فضا موجب بهبود فرآیند و کاهش مصرف انرژی تا ۶۰ درصد می‌شود (هوشمندی مردور، ۲۰۲۱). ساخت افزایشی نیز به طور گسترده برای نمونه‌سازی، ساخت سریع قطعات و تولید مستقیم اجزا در فضا با استفاده از چاپگرهای سه بعدی تخصصی در فضاپیما یا ایستگاه‌های فضایی مورد استفاده قرار گرفته است. بر اساس پیش‌بینی‌های انجام شده توسط گزارش تحقیقات استراتویو در سال ۲۰۱۹ بازار جهانی تولید پیشرفته فضا از ۴/۸ میلیارد دلار در سال ۲۰۱۸ به ۱۵/۷ میلیارد دلار تا سال ۲۰۲۵ رشد خواهد کرد (تحقیقات استراتویو^۱، ۲۰۱۹).

۲-۳-۳ معدن‌کاوی^۲

معدن‌کاوی به عنوان یکی از روندهای فناوریانه به استخراج منابع موجود در فضا مانند مواد معدنی از جمله فلزات گرانبها مانند پلاتین و طلا و همچنین فلزات صنعتی مانند آهن و سایر موارد مانند آب، گازها و سایر منابع انرژی موجود در سیارات، قمرها و سایر اجرام فضایی می‌پردازد. فناوری‌های این دسته می‌توانند منابع معدنی فضایی را استخراج کرده و برای تأمین نیازهای صنعت فضایی مانند مواد اولیه برای ساخت قطعات و ایجاد زیرساخت‌های فضایی مورد استفاده قرار دهند. علاوه بر این، استفاده از منابع انرژی فضایی مانند هلیوم و آب به جای حمل و نقل منابع از زمین به فضا برای تأمین انرژی در مأموریت‌های فضایی، تولید سوخت برای موتورهای فضایی و حتی انجام فرآیندهای شیمیایی، به کاهش هزینه‌ها و افزایش اقتصادی مأموریت‌های فضایی کمک می‌کند (شورای فیلپین در تحقیق و توسعه صنعت، انرژی و فناوری های نوظهور، ۲۰۲۱؛ پاپر و همکاران ۲۰۲۰). استفاده از منابع در محل^۳ یکی از روش فناوریانه است که ذیل معدن‌کاوی قرار می‌گیرد و با استخراج و فرآوری مواد خام از سایر اجسام نجومی می‌تواند مأموریت‌های فضایی پایداری را با هزینه کم در مقایسه با ارسال تمام منابع موردنیاز از زمین امکان‌پذیر کند. با استفاده از این رویکرد، مواد خام را می‌توان به مدار پایین زمین منتقل کرد تا در آنجا به کالاهایی تبدیل شود که به زمین ارسال می‌شوند. مواد خام با ارزش بسیار بالا، به عنوان مثال طلا، نقره یا پلاتین می‌توانند به مدار پایین

⁴ Near Earth Missions

⁵ Sounding Rocket

⁶ Stratospheric Airship

⁷ Balloon

⁸ Deep-Space Mission

¹ Stratview Research

² Space Mining

³ In-Situ Resource Utilization (ISRU)

۳-۴-۲ هوش مصنوعی و محاسبات با عملکرد بالا^۳

با پیش‌بینی افزایش ۱۴ برابری در میزان داده‌های دریافت شده از فضا از سال ۲۰۲۰ تا ۲۰۳۰، هوش مصنوعی و محاسبات با عملکرد بالا به بخش جدایی‌ناپذیر از اکتشاف فضا تبدیل شده است. هوش مصنوعی با کنترل ترافیک فضا، جلوگیری از برخورد‌ها، ردیابی تجهیزات شناور در فضا، ناوبری فضایی‌ها، طراحی و توسعه ماهواره‌ها و کنترل و نظارت بر فناوری‌های فضایی موجب بهبود عملکرد، افزایش انعطاف‌پذیری و کارایی عملیات فضایی می‌شود. محاسبات لبه^۴ در فضا می‌تواند داده‌ها در سامانه‌های فضایی مثل ماهواره‌ها، پهپادها و سایر فناوری‌های فضایی را به جای ارسال تمام داده‌ها به مرکزیت، پردازش کند. این رویکرد افزایش سرعت پردازش، کاهش زمان پاسخ، کاهش بار شبکه و حفاظت بیشتر از حریم خصوصی را به همراه دارد و نتایج پردازش داده‌ها بر اساس عملکرد و وضعیت فعلی وسیله فضایی، در زمان واقعی و بدون تأخیر به دست می‌آیند. این امر به کاهش زمان تصمیم‌گیری، افزایش دقت در تشخیص و پیش‌بینی رخدادها و افزایش کارایی مأموریت‌های فضایی کمک می‌کند (آژانس فضایی اروپا، ۲۰۲۱؛ سازمان تحقیقات فضایی هند، ۲۰۲۳).

۳-۴-۳ کلان داده و داده‌کاوی^۵

میلیون‌ها داده از سنسورها، ماهواره‌ها، رادارها و سامانه‌های ناوبری جمع‌آوری می‌شود. این داده‌ها شامل اطلاعاتی از جمله مکان، سرعت، دما، فشار، تصاویر، ویدیوها و دیگر ویژگی‌های مرتبط با محیط فضایی هستند. افزایش در دسترسی به داده‌ها، امکان استفاده مشترک از مجموعه داده‌های چندمنبعی را باز می‌کند. پردازش، تجزیه و تحلیل و مدیریت ایمن داده‌ها موجب استخراج الگوها، اطلاعات مفید، پیش‌بینی و تشخیص خطا و بهبود عملکرد مأموریت‌های فضایی می‌شود، بینش‌های ارزشمندی را برای طیف گسترده‌ای از کاربردها در صنعت فضایی و فراتر از آن باز می‌کند و امکان تصمیم‌گیری مبتنی بر داده را فراهم می‌سازد (آژانس فضایی اروپا، ۲۰۲۱؛ سازمان تحقیقات فضایی هند، ۲۰۲۳).

مسائل مرتبط با فیزیک و علم سیارات است. از مأموریت‌های فضایی عمیق می‌توان مأموریت‌های رباتیکی در سطح مریخ و ماه و مأموریت‌های وویجر^۱ و مأموریت‌های مطالعه سیارک‌ها و دنباله‌دارها نام برد (مرکز ملی مطالعات فضایی فرانسه، ۲۰۲۲؛ آژانس فضایی اروپا، ۲۰۲۱).

۴-۳ دیجیتال سازی فضا

دیجیتال سازی فضا شامل بکارگیری فناوری‌های دیجیتال مانند فناوری‌های کوانتومی، هوش مصنوعی و محاسبات با عملکرد بالا و تجزیه و تحلیل کلان داده می‌باشد. این فناوری‌ها پردازش داده‌ها را بهبود می‌بخشند، پیش‌بینی و تصمیم‌گیری‌های مبتنی بر داده را تسهیل می‌کنند و امکان توسعه سیستم‌های فضایی پیشرفته با کارایی و قابلیت‌های بیشتر را فراهم می‌سازند.

۳-۴-۱ فناوری‌های کوانتوم^۲

فناوری‌های کوانتومی شامل محاسبات کوانتومی، ارتباطات کوانتومی و سنجش کوانتومی می‌باشند که هر کدام قابلیت‌های منحصربه‌فردی را ارائه می‌کنند و می‌توانند مأموریت‌های فضایی را بهبود دهند. محاسبات کوانتومی قدرت محاسباتی را به طور قابل توجهی افزایش می‌دهند که این امر می‌تواند منجر به پردازش بهینه‌تر داده‌ها، بهینه‌سازی مسیرهای مأموریت و شبیه‌سازی‌های پیچیده در صنعت فضایی شود. فناوری‌های کوانتومی روش‌های فوق امنی را برای انتقال داده‌های حساس در فواصل طولانی ارائه می‌دهد که برای ارتباطات ماهواره‌ای ایمن و مأموریت‌های بین‌سیاره‌ای ضروری است (گو و وو، ۲۰۱۰؛ فیوچرز، ۲۰۱۸). سنجش کوانتومی اندازه‌گیری‌های با دقت بالا از میدان‌های گرانشی، مغناطیسی و سایر پارامترهای محیطی را فراهم می‌کند که به ناوبری، نقشه‌برداری و تحقیقات علمی در فضا کمک می‌نماید. در حالی که هنوز در مراحل اولیه توسعه و پیاده‌سازی قرار دارند، فناوری‌های کوانتومی این پتانسیل را دارند که به طور قابل توجهی اکتشاف فضا، ناوبری و قابلیت‌های ارتباطی را توسعه دهند و مرزها و فرصت‌های جدیدی را برای نوآوری در صنعت فضایی باز کنند (آژانس فضایی اروپا، ۲۰۲۱).

³ AI & High-Performance Computing

⁴ Edge Computing

⁵ Big Data & Data Mining

¹ Voyager

² Quantum Technologies

۵-۳ پایداری فضایی

افزایش فعالیت‌های فضایی و تعداد ماهواره‌ها در مدار، تهدیدی برای پایداری و ایمنی محیط فضایی است. پایداری فضایی بر افزایش طول عمر و بقای پرتابگرها در فضا با پرداختن به مسائلی مانند زباله‌های فضایی، پیشگیری از آلودگی، کارایی پیشرفته‌ها و سیستم‌های پشتیبانی از حیات بر دوام و موفقیت بلندمدت فعالیت‌های فضایی متمرکز است.

۱-۵-۳ فضای تمیز^۱

منظور از فضای تمیز، طراحی، ساخت و اجرای مأموریت‌های فضایی و ماهواره‌ها با هدف به حداقل رساندن تأثیر آن‌ها بر محیط فضا است. این امر شامل طراحی پرتابگرها با استفاده از مواد قابل بازیافت؛ داشتن روش‌های مدیریتی مناسب در پایان عمر، طوری که پس از پایان عمر مفید، کنترل شده از مدار خارج شده و به سمت زمین هدایت شوند؛ و اجرای مأموریت‌های فضایی با حداقل تأثیرات زیست‌محیطی بر فضا (کاهش انتشار گازهای مضر مانند رادیواکتیویته و آلاینده‌ها مانند دی‌اکسید کربن و آمونیاک در طول عملیات) است (مطالعات ارزش افزوده فناوری‌های فضایی در هلند، ۲۰۲۰)

۲-۵-۳ حذف زباله‌های مداری^۲

موضوع پایداری فضا به دلیل افزایش مقادیر زباله‌های فضایی و تراکم مداری اطراف زمین به طور فزاینده‌ای مورد توجه کشورها قرار گرفته است. عوامل مختلفی در ایجاد این مشکل نقش دارند، از جمله پرتاب ماهواره‌های جدید، برخورد ماهواره‌های موجود و رها شدن ماهواره‌های قدیمی. پیامد زباله‌های فضایی شامل برخورد احتمالی با زمین، مسدود شدن فضا، تهدیدهای بالقوه برای ماهواره‌های عملیاتی و خطر «سندرم کسلر^۳» است، که در آن چرخه‌ای از برخوردها باعث ایجاد زباله‌های بیشتری می‌شود و مدارهای خاصی را برای نسل‌ها غیرقابل استفاده می‌کند و در نتیجه موجب ناپایداری فضا می‌شود (فیوچرز، ۲۰۱۸). زباله‌های فضایی در حال رشد، چندین تهدید را ایجاد می‌کند، اما بزرگترین آن‌ها برای ماهواره‌های عملیاتی است. برخورد با زباله‌ها می‌تواند به فضایی‌های فعال در مدار آسیب برساند یا از بین ببرد و منجر به

اختلال در خدمات مخابراتی، ناوبری و سایر کاربردهای حیاتی شود. در نتیجه، مدیریت زباله‌های فضایی یک نگرانی مبرم برای صنعت فضایی است. زباله‌های فضایی شامل ماهواره‌های از کار افتاده، قطعات ناشی از برخورد و سایر زباله‌های باقی‌مانده از مأموریت‌های فضایی است. تکنیک‌های حذف زباله‌ها شامل جمع‌آوری زباله‌ها با بازوها یا شبکه‌های روباتیکی، استفاده از تتر^۴ برای خارج کردن زباله‌ها از مدار و استفاده از تکنیک‌هایی مانند لیزر برای تغییر مسیر زباله‌ها است که باعث می‌شود دوباره وارد جو زمین شوند تا از بین بروند. انتظار می‌رود نوآوری و سرمایه‌گذاری در زمینه حذف زباله در سال ۲۰۲۴ به رشد خود ادامه دهد (مرکز ملی مطالعات فضایی فرانسه، ۲۰۲۲؛ سازمان تحقیقات فضایی هند، ۲۰۲۳).

۳-۵-۳ پیشرفته‌ها و منابع انرژی نوآورانه^۵

پیشرفته‌های نوآورانه^۶ شامل استفاده از فناوری‌های پیشرفته برای ایجاد نیروی لازم جهت حرکت فضایی‌ها است. در حال حاضر فناوری‌هایی مانند پیشرفته‌های سبز آب اکسیژنه^۷، ژنراتورهای گازی (تولید گاز از سوخت و اکسیدکننده‌ها)، انرژی خورشیدی (بکارگیری پنل‌های خورشیدی در بدنه فضایی‌ها)، سوخت‌های هسته‌ای (انرژی حاصل از فرآیندهای هسته‌ای)، بادبان‌های خورشیدی (استفاده از فشار نوری خورشید بر روی بادبان‌ها)، پیشرفته‌های سرمازا^۸ (استفاده از هیدروژن مایع و اکسیژن یا متان مایع)، انرژی پرتویی (پرتوهای الکترومغناطیسی مانند نور لیزر یا پرتوهای خورشیدی) و پیشرفته‌های هم‌جوشی (انرژی حاصل از پیوند اتمی)، تراسترهای پلاسما خلاء کوانتومی، تراستر لیزری فوتونی و پیشرفته‌های برپایه خلاء، در فضایی‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. در حوزه توان و انرژی، فناوری‌های جدیدی مانند باتری‌های با چگالی توان بالا، انرژی تتر الکتروپدینامیکی، منابع حرارتی هم‌جوشی هسته‌ای، سلول‌های بزرگ ترمیونیک هسته‌ای، ولتائیک آلفا/بتا، و ترموفوتوولتائیک به عنوان رویکردهای نوآورانه در تأمین و استفاده از انرژی شناخته شده‌اند. این فناوری‌ها بر اساس اصول فیزیکی و مهندسی پیشرفته ساخته شده‌اند و قادر به تولید انرژی به صورتی کارآمد و پایدار هستند. به‌عنوان مثال،

⁴ Tethers

⁵ Innovative Energies

⁶ Innovative Propulsion

⁷ Hydrogen Peroxide-based Propellants

⁸ Cryogenic Propellants

¹ Clean Space

² Debris Removal

³ Kessler Syndrome

۴ - نتیجه‌گیری

در تحلیل مضمون اسناد راهبردی کشورهای مختلف، روندهای فناورانه را که موجب تکامل صنعت فضایی می‌شود، آشکار کرده است. شناسایی ۲۰ حوزه فناوری کلیدی در پنج محور کلی نشان‌دهنده ماهیت چندوجهی صنعت فضایی و تأکید بر اولویتهای راهبردی کشورهای مختلف در سراسر جهان است.

دسته‌ی اول، فضای به هم پیوسته خودکار، نشان‌دهنده تغییر پارادایم در زیرساخت فضایی است، پیشرفت در منظومه‌های ماهواره‌ای، مخابرات کوانتومی، لیزر و فناوری‌های نوابری، راه را برای افزایش قابلیت اتصال، انتقال داده‌ها و موقعیت‌یابی دقیق هموار می‌سازد. با پرتاب هزاران ماهواره جدید به مدار و در نتیجه اتصال ماهواره‌ای بیشتر، دهه پیش رو را می‌توان عصر برج‌های فلکی نامید. ارتباطات نوری جهشی را در نرخ انتقال داده ارائه می‌کند و نوید بخش پیوند پهنای باند بالا بین ماهواره‌ها و ایستگاه‌های زمینی است که برای نیاز رو به رشد مأموریت‌های سنگین فضایی ضروری است. از سوی دیگر، ارتباطات کوانتومی، ویژگی‌های امنیتی را از طریق رمزگذاری کوانتومی معرفی می‌کند و از یکپارچگی اطلاعات ارسال‌شده در برابر تهدیدات سایبری بالقوه محافظت می‌نماید. این فناوری‌ها با هم، صنعت فضایی را به جلو می‌برند، قابلیت‌های اکتشاف را افزایش می‌دهند، رصد زمین را بهبود می‌بخشند و ارتباط جهانی را در جهانی به هم پیوسته تقویت می‌کنند.

دسته دوم، سیستم‌های پیشرفته فضایی که یکی از مهم‌ترین روندهای ذیل آن ماهواره‌های کوچک مقیاس می‌باشد، گرایش به سمت طراحی چابک و همه‌کاره‌ی فضاپیما را منعکس می‌کند. گسترش ماهواره‌های کوچک و پرتابگرهای قابل استفاده مجدد نشان‌دهنده گذار از مأموریت‌های فضایی سنتی به راه‌حل‌های مقرون‌به‌صرفه برای طیف گسترده‌ای از کاربردها، از جمله تحقیقات علمی، مخابرات، و نظارت بر زمین است. فناوری دیگری که در این دسته قرار می‌گیرد، رباتیک پیشرفته است که کارکردهای متنوعی مانند مونتاژ، تعمیر و نگهداری سامانه‌های فضایی را ممکن می‌کند و به پایداری و طول عمر زیرساخت‌های فضایی کمک می‌نماید. مواد پیشرفته با ویژگی‌های تطبیقی خود، عملکرد و دوام فضاپیما را در محیط‌های فضایی افزایش می‌دهند. فناوری‌های استقرار، داکینگ و اینترفیس، امکان مونتاژ، قطع و اتصال فضاپیماها و امکان ارتباط بین اجزای مختلف را فراهم می‌کنند.

باتری‌های با چگالی توان بالا انرژی زیادی را در وزن کم فراهم می‌کنند، می‌تواند وزن و هزینه فضاپیماها را کاهش داده و کارایی آن‌ها را افزایش دهند. انرژی تتر الکترودینامیکی از جمله فناوری‌های پیشرفته در تولید توان به کمک اصول دینامیک الکتریکی است که می‌تواند به عنوان منبع پایدار و کارآمد در تأمین انرژی مورد استفاده قرار گیرد. همچنین، منابع حرارتی هم‌جوشی هسته‌ای و سلول‌های بزرگ ترمیونیک هسته‌ای از انرژی حاصل از فرآیند هسته‌ای بهره‌می‌برند و می‌توانند به عنوان منابع پر قدرت و پایدار در تولید برق استفاده شوند. ولتائیک آلفا/بتا و ترموفوتوولتائیک نیز از روش‌های نوینی برای تبدیل انرژی حرارتی و رادیواکتیو به انرژی الکتریکی استفاده می‌کنند که می‌توانند در برنامه‌های فضایی و دیگر برنامه‌های کاربردی انرژی مورد استفاده قرار گیرند. این فناوری‌ها نقش مهمی در توسعه منابع انرژی پایدار و کارآمد و همچنین بهبود عملکرد سیستم‌های انرژی دارند. این فناوری‌ها به منظور بهبود کارایی، کاهش وزن و حجم، کاهش هزینه‌ها و کاهش تأثیرات زیست‌محیطی مرتبط با فعالیت‌های فضایی در حال توسعه هستند (ادی، موناریس و جوکو، ۲۰۲۲؛ آژانس فضایی اروپا، ۲۰۲۱؛ سازمان تحقیقات فضایی هند، ۲۰۲۳).

۳-۵-۴ سیستم‌های کنترل محیطی و پشتیبانی حیات^۲

سیستم‌های کنترل محیطی و پشتیبانی حیات برای حفظ زندگی فضانوردان در طول مأموریت‌های فضایی حیاتی هستند. این سیستم‌ها محیط فضاپیما را تنظیم می‌کنند و از هوای قابل تنفس، آب تمیز و درجه حرارت و رطوبت مناسب اطمینان می‌دهند. این سیستم‌ها محصولات زائد را مدیریت می‌کنند، آب را بازیافت می‌نمایند و ثابت حرارتی را حفظ می‌کنند تا از سلامت و رفاه فضانوردان محافظت نمایند. فناوری‌های کنترل محیطی و پشتیبانی حیات از کنترل جو گرفته تا مدیریت زباله‌ها شرایط ایمن و قابل سکونت را در فضاپیما فراهم می‌سازند، از مأموریت‌های خدمه به ایستگاه‌های فضایی و مأموریت‌های اکتشافی طولانی مدت به مقاصدی مانند ماه و مریخ پشتیبانی می‌کنند. پیشرفت‌ها در فناوری‌های کنترل محیطی و پشتیبانی حیات برای افزایش قابلیت‌های مأموریت و فعال کردن تلاش‌های اکتشاف فضایی فضانوردان در آینده بسیار مهم است (گو و وو، ۲۰۱۰؛ طبقه‌بندی فناوری ناسا، ۲۰۲۱).

¹ Edi, Munaris, & Joko

² Environmental Control and Life Support Systems

دانش افزایی مطالعه حاضر در شناسایی، دسته بندی و تشریح روندهای فناوری در صنعت فضایی است. تحقیقات ما به روندهای نوظهوری مانند مواد پیشرفته (مواد سازه‌ای سبک- مواد برای شرایط محیط سخت فضایی- پوشش‌ها- مواد مرکب) برای افزایش طول عمر پرتابگرها، ماموریت در فضای نزدیک زمین با استفاده از فناوری‌هایی نظیر موشک‌های آزمایشی، کشتی‌های هوایی استراتوسفریک و بال‌ها با هدف جمع‌آوری داده و تحقیقات علمی می‌پردازد. علاوه بر این، مطالعه ما بر اهمیت پیش‌رانه‌ها و منابع انرژی نوآورانه و رباتیک پیشرفته در شکل‌دهی به آینده اکتشاف فضایی تأکید می‌کند. تجزیه و تحلیل ما همچنین به حوزه پیش‌رانه‌های سبز، انرژی خورشیدی و سوخت هسته‌ای می‌پردازد و پتانسیل آن‌ها را برای متحول کردن فناوری‌های پیش‌رانه و در عین حال کاهش اثرات زیست‌محیطی برجسته می‌سازد. یافته‌های ما در زمینه رباتیک پیشرفته نه تنها بر فناوری‌های موجود، بلکه بر برنامه‌های کاربردی جدیدی مانند ربات‌های دارای کارکرد کنترل از راه دور و ربات‌های دارای کارکرد اتصال خودکار، تأکید دارد. فناوری‌های کوانتومی، هوش مصنوعی و کلان داده، روند رو به رشد فناوری‌های دیجیتال در اکتشاف فضا را نشان می‌دهد. تمرکز بر دیجیتالی شدن، پتانسیل تحول‌آفرین رویکردهای داده‌محور در بهینه‌سازی ماموریت‌ها و عملیات فضایی را برجسته می‌کند.

تحلیل اسناد راهبردی کشورهای مختلف نشان می‌دهد فرصت‌ها و چالش‌ها هم برای تازه‌واردان و هم برای بازیگران با سابقه با گسترش بازار فضا در سال‌های آینده فراوان است. انتظار می‌رود نوآوری‌های فناورانه همچنان کاهش هزینه‌ها و گسترش دسترسی به فضا را تسهیل نمایند. در پیمایش تغییرات پیش رو، برای سازمان‌ها بسیار مهم است که چشم‌انداز آینده‌نگر اتخاذ کنند و فناوری‌های مخرب، همکاری‌های نوآورانه و مدل‌های عملیاتی متحول‌کننده را بپذیرند. تکامل مداوم فناوری‌های فضایی نوید قفل‌گشایی مرزهای جدید، تقویت رشد اقتصادی و تغییر نحوه تعامل بشر با محیط فضایی و بهره‌مندی از آن را می‌دهد. در نتیجه، تحلیل روندهای فناورانه در صنعت فضایی، تصویری جامع از چالش‌ها و فرصت‌های ذاتی در اکتشاف فضا را ترسیم می‌کند.

بررسی اسناد راهبردی کشورهای مختلف موید وجود یکسری روندهای غیرفناورانه در صنعت فضایی نیز هست. ما تأکید می‌کنیم که مطالعات آتی می‌توانند به واکاوی و بررسی این

دسته سوم، عملیات پیچیده فضایی می‌باشد که شامل روندهای تولید پیشرفته و استخراج از معادن فضایی است و نشان دهنده تغییر راهبردی به سمت استفاده از منابع فضایی برای سودآوری اقتصادی پایدار است. همانطور که کشورها پتانسیل ماموریت‌های فضایی نزدیک به زمین و اعماق زمین را کشف می‌کنند، روش‌های استفاده از منابع در محل، فضانوردان را قادر می‌سازد تا با استخراج منابع از محیط اطراف خود، نیاز به ماموریت‌های پرهزینه و تامین مجدد منابع را کاهش داده و ماموریت‌های فضایی طولانی مدت را ممکن می‌سازند.

دسته چهارم، با بکارگیری فناوری‌هایی مانند کوانتوم، هوش مصنوعی و داده‌کاوی به عنوان یک پارادایم نوین در صنعت فضایی، دیجیتالی کردن عملیات فضایی را پیش می‌برد و عصر جدیدی از اتوماسیون و تصمیم‌گیری مبتنی بر داده را نوید می‌دهد. این ترکیب از فناوری‌ها با استفاده از اصول مکانیک کوانتومی، سرعت و دقت بالا در پردازش داده‌ها را فراهم می‌کند. امکان استفاده از توانایی‌های هوش مصنوعی در تحلیل دقیق داده‌ها، شناسایی الگوها و پیش‌بینی‌های دقیق، بهبود عملکرد فرآیندهای دیجیتالی‌سازی را فراهم می‌کند. از طرف دیگر، ترکیب این فناوری‌ها از طریق استفاده از رمزنگاری کوانتومی قادر است امنیت بیشتری در ارتباطات دیجیتالی ایجاد کند. محاسبات لبه و هوش مصنوعی به دلیل یکپارچه‌سازی فناوری‌های پیشرفته برای پردازش و تجزیه و تحلیل داده‌های مربوط به فضا حوزه‌های اصلی سرمایه‌گذاری در آینده نزدیک هستند. با استفاده از کلان‌داده و روش‌های داده‌کاوی، آژانس‌های فضایی و بازیگران صنعت می‌توانند بینش‌ها و کارایی‌های جدیدی را در حوزه‌های مختلف، از برنامه‌ریزی مأموریت و ناوبری گرفته تا تحقیقات و اکتشافات علمی، باز کنند.

دسته آخر، پایداری فضایی بر حفظ محیط فضایی، کاهش زباله‌های مداری و توسعه سیستم‌های پیش‌رانه نوآورانه سازگار با محیط زیست متمرکز است. از آنجایی که حجم زباله‌های فضایی همچنان در حال افزایش است و نگرانی‌ها در مورد پایداری فضا افزایش می‌یابد، نیاز مبرمی به تلاش‌های مشترک برای اطمینان از دوام طولانی مدت فعالیت‌های فضایی وجود دارد. سیستم‌های کنترل محیطی و پشتیبانی حیات نیز نقش مهمی در فعال‌سازی مأموریت‌های اکتشافی طولانی مدت فضایی به مقاصد مانند ماه و مریخ دارند.

همکاری‌های بین‌المللی در حوزه حکمرانی در فضا یکی دیگر از روندهای غیرفناورانه مهم محسوب می‌شود. در بیشتر اسناد بررسی شده، حاکمیت فضایی به عنوان زیربنای توسعه پلدار و عادلانه فعالیت‌های فضایی یاد شده که اولتروگ و کریستسن (۲۰۲۰) نیز در مطالعه شان به آن پرداخته‌اند. با افزایش تعداد کشورها و نهادهای تجاری در اکتشاف و استفاده از فضا، نیاز مبرم به چارچوب‌ها و توافق‌نامه‌های قوی برای اطمینان از رفتار مسئولانه، کاهش درگیری‌های احتمالی و ارتقای همکاری وجود دارد. موضوعاتی مانند کاهش زباله‌های فضایی، تخصیص طیف برای ماهواره‌های ارتباطی و حفاظت از محیط زیست در فضا به حوزه‌های کلیدی مورد توجه سیاست‌گذاران و ذینفعان تبدیل می‌شوند. علاوه بر این، همان‌طور که صنعت فضایی بیشتر با امور زمینی مرتبط می‌شود، پتانسیل درگیری‌ها و آسیب‌پذیری‌ها در فعالیت‌های فضایی افزایش می‌یابد. نگرانی‌ها در مورد نظامی‌سازی فضا و تهدیدات سایبری نیز به افزایش همکاری بین‌المللی، شفافیت و اقدامات اعتمادساز را برجسته می‌کند (براهمی، ۲۰۲۳؛ اولتروگ و کریستسن، ۲۰۲۰).

با افزایش فعالیت‌های انسانی در فضا، مسائل مربوط به مدیریت منابع، کاهش زباله‌های مدار و همکاری بین‌المللی مطرح می‌شود. ایجاد چارچوب‌های نظارتی قوی و تقویت ساختارهای حکمرانی شفاف برای تضمین اکتشاف و استفاده سالم‌آمیز و مسئولانه از فضا به نفع نسل‌های آینده ضروری است. با نگاهی به آینده، تلاش‌های تحقیقاتی آینده باید بر روی رویکردهای بین‌رشته‌ای متمرکز شوند که نوآوری‌های فناورانه را با ملاحظات اجتماعی-اقتصادی و محیطی ادغام می‌کند. این امر شامل کاوش راه‌حل‌های جدید برای کاهش اثرات تغییرات آب و هوایی از طریق مداخلات مبتنی بر فضا، تقویت مدل‌های تجاری پلدار برای سرمایه‌گذاری‌های فضایی و پیشبرد چارچوب‌های حاکمیت فضایی برای اطمینان از استفاده عادلانه و مسئولانه از منابع فضایی است.

تعارض منافع

این پژوهش تحت هدایت معنوی و حمایت مالی پژوهشگاه فضایی ایران در همکاری و تعامل با دانشگاه تهران صورت پذیرفته است.

روندها بپردازند. به عنوان مثال، پویایی‌های صنعت فضایی موجب افزایش سرمایه‌گذاری بخش خصوصی و افزایش تقاضا برای داده‌ها، محصولات و خدمات در این صنعت شده است (مرکز ملی مطالعات فضایی فرانسه، ۲۰۲۲). با ورود شرکت‌های خصوصی به عرصه فضایی، تغییر به سمت مدل‌های کسب‌وکار نوآورانه و سرمایه‌گذاری‌های کارآفرینانه نظیر منظومه‌ی ماهواره‌ها برای ارائه پوشش اینترنت با پهنای باند بالا و خدمات مبتنی بر ماهواره ایجاد می‌شود. این روند نه تنها رقابت و نوآوری را تقویت می‌کند، بلکه هزینه‌ها را کاهش می‌دهد، فضا را برای طیف وسیعی از ذینفعان در دسترس می‌کند و پیشرفت‌های فناوری را سرعت می‌بخشد. با ظهور روندهای جدید در صنعت نظیر توسعه خدمات داده و تولید در فضا، نقش شرکت‌های خصوصی فضایی در ذخیره داده‌ها در مدار از طریق توسعه مراکز داده و خدمات ارزش افزوده مانند پایش و پردازش داده‌ها شدت یافته است.

یکی دیگر از روندهای غیرفناورانه که بسیار مورد توجه قرار گرفته است، همکاری‌های بخش دولتی و خصوصی در صنعت فضایی است. بر اساس سالیکو و همکاران (۲۰۲۴)، برخلاف صنایع سنتی که در آن ارزش اقتصادی در داخل شرکت ایجاد می‌شود، در اقتصاد دیجیتال، ارزش در خارج از شرکت در تعامل با شرکا، تامین‌کنندگان و مشتریان ایجاد می‌شود. آژانس‌های فضایی می‌توانند با سازمان‌های بین‌بخشی مشارکت داشته باشند تا توانایی خود را برای رویکرد نوآورانه افزایش دهند. به عنوان مثال با همکاری بخش خصوصی می‌توان ماهواره‌های کوچکی را توسعه داد تا مأموریت‌هایی را انجام دهند که ماهواره‌های بزرگ معمولاً قادر به انجام آن نیستند. علاوه بر این، بخش خصوصی می‌تواند راه‌حل‌های نوآورانه برای پردازش، تجزیه و تحلیل و مدیریت ایمن داده‌های دریافتی از فضا به سایر حوزه‌ها ارائه دهد (سالیکو و همکاران ۲۰۲۴). به عنوان مثال، گردشگری فضایی به عنوان یکی دیگر از خدمات صنعت فضایی است که اغلب توسط بخش خصوصی ارائه می‌شود و نشان دهنده علاقه روزافزون به تجاری‌سازی سفرهای فضایی و ارائه تجربیات منحصر به فرد است. از آنجایی که شرکت‌های خصوصی، به توسعه قابلیت‌های خود ادامه می‌دهند، گردشگری فضایی آماده تبدیل شدن به بخش پایدار در صنعت فضایی است و به طور بالقوه نحوه درک و تعامل ما با فضا را تغییر می‌دهد. با اشتیاق بیشتر فضانوردان برای مأموریت به ماه، مریخ و فراتر از آن، تمرکز به سمت سفرهای فضایی طولانی مدت و سکونت تغییر می‌کند (مرکز ملی مطالعات فضایی فرانسه، ۲۰۲۲).

تشکر و قدردانی

از کلیه مدیران و کارکنان پژوهشگاه فضایی ایران که در جلسات خبرگی پروژه «درخت فناوری پژوهشگاه فضایی ایران» حضور و مشارکت موثر داشته‌اند، تشکر و قدردانی به عمل می‌آید.

مراجع

content/uploads/2021/07/ESA_Technology_Strategy_Version_1_0.pdf. [Accessed: Jun. 3, 2024].

[۹] European Space Resources Exploration Centre, "ESRE Whitepaper," 2017. [Online]. Available: https://esre-space.org/wp-content/uploads/2018/01/ESRE_Whitepaper_-2017.pdf. [Accessed: Jun. 3, 2024].

[۱۰] N. Frischauf, R. Horn, T. Kauerhoff, M. Wittig, I. Baumann, E. Pellander, and O. Koudelka, "NewSpace: new business models at the interface of space and digital economy: chances in an interconnected world," *New Space*, vol. 6, no. 2, pp. 135-146, 2018.

[۱۱] C. Futures, "Space: a roadmap for unlocking future growth opportunities for Australia," 2018.

[۱۲] H. Guo and J. Wu, *Space science & technology in China: a roadmap to 2050*. Springer, 2010.

[۱۳] Indian Space Research Organisation, "ISRO Coffee Table Book," 2023. [Online]. Available: https://www.isro.gov.in/media_isro/pdf/coffee_table.pdf. [Accessed: Jun. 3, 2024].

[۱۴] H. Kastar, "Providing a method to calculate the reliability of the coding stage in research interviews," *Methodological Journal of Human Sciences*, vol. 15, pp. 161-174, 2008. (in Persian)

[۱۵] Jacklin, "Small-satellite mission failure rates," 2019. [Online]. Available: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20190002705/download/20190002705.pdf>. [Accessed: Jun. 3, 2024].

[۱۶] Markets and Markets Research Private, "Quantum Cryptography Report," 2021. [Online]. Available: <https://www.researchandmarkets.com/report/quantum-cryptography>. [Accessed: Jun. 3, 2024].

[۱۷] Mordor Intelligence, "Space Robots Market Report," 2021. [Online]. Available: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/space-robots-market>. [Accessed: Jun. 3, 2024].

[۱۸] NASA, "NASA technology taxonomy," 2021. [Online]. Available: https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/2021/10/2020_nasa_technology_taxonomy.pdf. [Accessed: Jun. 3, 2024].

[۱۹] NASA, "Navigation Challenges," 2021. [Online]. Available: <https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/2023/02/navigation-artifacts-may-19-2021-reva.pdf>. [Accessed: Jun. 3, 2024].

[۲۰] Netherlands Space Office, "NSO Annual Report 2020," 2020. [Online]. Available:

[۱] S. Alam, O. Tambunan, and M. R. Shihab, "The role of information technology leadership in information technology role transition from support to strategic: Case study of the national institute of aeronautics and space," presented at the 2020 International Conference on Information Technology Systems and Innovation (ICITSI), 2020.

[۲] K. Bartczak, "Changes in business models implied by the use of digital technology platforms," *Entrepreneurship and Sustainability Issues*, vol. 9, no. 4, 2022.

[۳] T. Brahimi, "Data mining and visualization of space technology research trends in the Arab world," presented at the 2023 20th Learning and Technology Conference (L&T), 2023.

[۴] Brazilian Space Agency, "Brazilian Space Agency," 2022. [Online]. Available: <https://www.gov.br/aeb/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/LivretoBrazilianSpaceAgency.pdf>. [Accessed: Jun. 3, 2024].

[۵] Dialogic, "Broad exploration of space technology's added value in the Netherlands," 2020. [Online]. Available: https://dialogic.nl/wp-content/uploads/2021/05/Management-Summary_Broad-exploration-of-space-technology%E2%80%99s-added-value-in-the-Netherlands-Oct-2020.pdf. [Accessed: Jun. 3, 2024].

[۶] Centre National d'Études Spatiales, "CNES 2022," 2022. [Online]. Available: https://cnes-carte-de-visite-2022.fr/assets/media/pdf/cnes2022-plaquette_en.pdf. [Accessed: Jun. 3, 2024].

[۷] S. Edi, M. Munaris, and J. S. N. Joko, "Women existency in the Drupadi novel by Seno Gumira Ajidarma (an existentialist feminism study of Simone De Beauvoir)," *IOSR Journal Of Humanities And Social Science (IOSR-JHSS)*, vol. 10, no. X, pp. 27-33, 2022.

[۸] European Space Agency, "ESA Technology Strategy Version 1.0," 2021. [Online]. Available: <https://a3space.org/wp->

<https://sscspace.com/uploads/SSC-in-Summary-2022.pdf>.
[Accessed: Jun. 3, 2024].



COPYRIGHTS

© 2025 by the authors. Licensee Iranian Space Research Center of Iran. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

<https://www.spaceoffice.nl/files/documenten/jaarverslag/ENG%20Jaaroverzicht%20NSO%202020%20onlineversie.pdf>. [Accessed: Jun. 3, 2024].

[۲۱] Netherlands Space Office, "NSO Annual Report 2021," 2021. [Online]. Available: <https://www.spaceoffice.nl/files/documenten/jaarverslag/Jaaroverzicht%20NSO%20ENG%20LR.pdf>. [Accessed: Jun. 3, 2024].

[۲۲] D. L. Oltrogge and I. A. Christensen, "Space governance in the new space era," *Journal of Space Safety Engineering*, vol. 7, no. 3, pp. 432-438, 2020.

[۲۳] L. C. Pelicioni, J. R. Ribeiro, T. Devezas, M. C. N. Belderrain, and F. C. L. Melo, "Application of a bibliometric tool for studying space technology trends," *Journal of Aerospace Technology and Management*, vol. 10, p. e318, 2018.

[۲۴] Philippine Council for Industry, Energy and Emerging Technology Research and Development, "Final STA Roadmap," 2021. [Online]. Available: https://pcieerd.dost.gov.ph/images/pdf/2021/roadmaps/sectoral_roadmaps_division/etdd/Final_STA-Roadmap-os-16.3.2021-1.pdf. [Accessed: Jun. 3, 2024].

[۲۵] R. Popper et al., "Towards a Roadmap for Future UAE Deep Space Missions and the Sustainable Settlement of Humans on Mars: White Paper," 2020.

[۲۶] A. Salykov, A. Aimbetov, N. Yesmagulova, and A. Jussibaliyeva, "Factors and trends in the development of the space industry in the context of the digitalization of the economy of the Republic of Kazakhstan," *Environment, Development and Sustainability*, vol. 26, no. 3, pp. 6703-6718, 2024.

[۲۷] South African National Space Agency, "SANSa Strategic Plan 2020-2025," 2022. [Online]. Available: <https://www.sansa.org.za/wp-content/uploads/2022/04/SANSa-Strategic-Plan-2020-2025-Revised.pdf>. [Accessed: Jun. 3, 2024].

[۲۸] Stratview Research, "Space Electronics Market Report," 2019. [Online]. Available: <https://www.stratviewresearch.com/309/Space-Electronics-Market.html>. [Accessed: Jun. 3, 2024].

[۲۹] Swedish National Space Agency, "Swedish Space Strategy," 2021. [Online]. Available: https://www.rymdstyrelsen.se/contentassets/3d8de30dbeb406c8f375c267ed04fe8/rymdstrategi-eng_web.pdf. [Accessed: Jun. 3, 2024].

[۳۰] Swedish Space Corporation, "SSC in Summary 2022," 2022. [Online]. Available: