



# Statistical Study of Satellite Constellations and the Cubesat Role

Ehsan Mousivand<sup>1</sup>, Sajjad Ghazanfarinia<sup>2</sup>, Yaser Saffar<sup>3</sup>, Masoud Khoshshima<sup>4\*</sup>

1. Satellite Research Institute, Tehran, Iran, ehsan.mousivand@gmail.com

2. Satellite Research Institute, Tehran, Iran, s.ghazanfarinia@isrc.ac.ir

3. Satellite Research Institute, Tehran, Iran, y.saffar@yahoo.com

4. Satellite Research Institute, Tehran, Iran, m.khoshshima@isrc.ac.ir, Corresponding author

Available in:  
Journal.isrc.ac.ir

Journal of  
Space Science, Technology  
& Applications (Persian)

Vol. 3, No. 1, pp.: 13-26  
2023

DOI:

10.22034/jssta.2022.332484.1085

## Article Info

Received: 2022-03-04  
Accepted: 2022-11-30

## Keywords

Satellite constellation,  
Distributed missions,  
Satellite configuration,  
Statistical analysis

## How to Cite this article

Ehsan Mousivand, Sajjad Ghazanfarinia, Yaser Saffar, Masoud Khoshshima, "Statistical Study of Satellite Constellations and the Cubesat Role", *Journal of Space Science, Technology and Applications*, vol 3 (1), p.:13-26, 2023.

## Abstract

Satellite Constellations are the new approach to achieve the capabilities that were previously expected from large and complex satellites. This paper reviews activities and related satellite constellation of about 130 companies and research institutes in the world, with the aim of reviewing the approach of missions carried out under the name of satellite constellation. Based on the investigations, the main missions performed by these constellations have been with the aim of providing communication services and include 27% of all missions ((Including internet of Things with a 16% and Machine to Machine Services with a 6%) Another important mission is Earth Observation (with 19%), which is carried out with the aim of continuous monitoring and better management of the earth planet. The most favorite configuration in constellations is based on microsatellites with 42% of all configurations. In this article, by presenting the analysis and results of this studied sample, the tendency towards satellite constellations and the role of Cubesats in this category of space missions have been investigated. The aim of this research is to highlight the impact of these space systems in the space industry and economy by providing Solutions based on constellations. Results discuss the Future of Constellations and Cubesats and their common effect on New Space both in Space Industry Level and Space Economy. This review may help researchers to work on similar studies with business approaches, too.



## بررسی آماری منظومه‌های ماهواره‌ای و جایگاه ماهواره‌های مکعبی در آنها

احسان موسیوند<sup>۱</sup>، سجاد غضنفری‌نیا<sup>۲</sup>، یاسر صفار<sup>۳</sup>، مسعود خوش‌سیما<sup>۴</sup>\*

۱. پژوهشکده سامانه‌های ماهواره، تهران، ایران، ehsan.mousivand@gmail.com

۲. پژوهشکده سامانه‌های ماهواره، تهران، ایران، s.ghazanfarinia@isrc.ac.ir

۳. پژوهشکده سامانه‌های ماهواره، تهران، ایران، y.saffar@yahoo.com

۴.\* پژوهشکده سامانه‌های ماهواره، تهران، ایران (نویسنده مسئول)، m.khoshsima@isrc.ac.ir

دسترس پذیر در نشانی:  
Journal.isrc.ac.ir

دو فصلنامه  
علوم، فناوری و  
کاربردهای فضایی

سال سوم، شماره ۱، صفحه ۲۶-۱۳  
بهار و تابستان ۱۴۰۲

DOI:  
10.22034/jssta.2022.332484.1085

تاریخچه داوری

دریافت: ۱۴۰۰/۱۲/۱۳

پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۰۹

واژه‌های کلیدی

منظومه‌های ماهواره‌ای، ماموریت‌های  
توزیع‌شده، پیکربندی ماهواره،  
بررسی آماری

نحوه استناد به این مقاله

احسان موسیوند، سجاد غضنفری‌نیا،  
یاسر صفار، مسعود خوش‌سیما.  
"بررسی آماری منظومه‌های ماهواره‌ای  
و جایگاه ماهواره‌های مکعبی در آنها"،  
دوفصلنامه علوم، فناوری و کاربردهای  
فضایی، جلد سوم، شماره اول، صفحات  
۲۶-۱۳، ۱۴۰۲.

### چکیده

منظومه‌های ماهواره‌ای رویکرد جدید دستیابی به قابلیت‌هایی است که پیش از این به کمک ماهواره‌های بزرگ و پیچیده به انجام می‌رسید. این مقاله، با هدف مرور رویکرد ماموریت‌های انجام گرفته با عنوان منظومه‌های ماهواره‌ای، فعالیت‌ها و خروجی‌های بیش از ۱۳۰ شرکت و مرکز تحقیقات فضایی در جهان را تحلیل کرده است. طبق بررسی‌های صورت گرفته، عمده ماموریت‌های انجام شده توسط این منظومه‌ها، با هدف ارائه خدمات مخابراتی و به میزان ۲۷٪ از کل ماموریت‌ها (شامل خدمات ماشین به ماشین با سهم ۱۶٪ و اینترنت اشیا با سهم ۹٪) بوده است. ماموریت مورد توجه دیگر، مشاهدات زمینی با سهم ۱۹٪ است که با هدف نظارت مستمر و مدیریت بهتر سیاره زمین صورت می‌گیرد. بیش‌ترین پیکربندی در منظومه‌های ماهواره‌ای، مربوط به میکروماهواره‌ها است که ۴۲٪ از کل پیکربندی‌ها را به خود اختصاص داده است. در این مقاله، با ارائه تحلیل‌ها و نتایجی از نمونه‌های مورد مطالعه، روند گرایش به سمت منظومه‌های ماهواره‌ای و جایگاه ماهواره‌های مکعبی را در این دسته از ماموریت‌های فضایی بررسی شده است. به طور کلی، هدف از این پژوهش بازسازی تاثیر این سیستم‌های فضایی در صنعت و اقتصاد فضایی با ارائه راهکارهایی بر پایه منظومه‌ها است. نتایج نشان می‌دهد، هم‌افزایی اثر منظومه‌ها و ماهواره‌های مکعبی در فضای نو باعث ارتقای صنعت و اقتصاد فضایی خواهد شد. این پژوهش، رهیافتی نوین و جدید برای علاقه‌مندان و محققان برای انجام کارهای مطالعاتی مشابه با رویکرد اقتصادمحور در حوزه فضا است.



ماموریت‌های فضایی مورد توجه قرار گرفته و بر خلاف گذشته، دیگر انجام این ماموریت‌ها نیازمند صرف هزینه‌های هنگفت و دانش گسترده‌ای که در دسترس نبوده، نیست. به عنوان نمونه، میگل<sup>۱</sup>، محقق صاب سبک در این زمینه، یک روش کلی را به منظور نمایش طرح‌های مختلف نقشه‌برداری از سطح زمین و بهینه‌سازی آنها به کار می‌برد تا بتواند ماموریت‌های فضایی جدیدی را که پیش از این هرگز امکان‌پذیر نبود، فراهم کند [۳].

به منظور بررسی دقیق و درک بهتر روند توسعه منظومه‌های ماهواره‌ای منابع مختلفی مورد بررسی قرار گرفت که در این میان، فیلیپازو و دیاناند<sup>۲</sup> [۵] عملکرد ۱۵ نمونه منظومه ماهواره‌ای مورد ارزیابی شده است. نتایج اولیه حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد که منظومه‌های ماهواره‌ای کوچک در بسیاری از موارد راه‌حل‌های ارزشمندی را در مقایسه با سیستم سنتی فضایی ارائه می‌دهند. در تحقیقات کولو<sup>۳</sup> [۶] فهرستی از منظومه‌های ماهواره‌ای را ارائه شده که نشان از رویکرد مورد توجه سازمان‌ها و مراکز تحقیقاتی در استفاده از نانو و میکروماهواره‌ها دارد. در یک پژوهش که توسط باندیوپادیا و اتر<sup>۴</sup> [۷] انجام شده است تعداد ۲۵ منظومه ماهواره‌ای با ماموریت‌های زمین‌شناسی، علوم سیاره‌ای، فیزیک نجومی، فیزیک خورشید و اثبات فناوری مورد ارزیابی واقع شده که به صراحت می‌توان گفت، تمام این منظومه‌ها در دسته مینی ماهواره<sup>۵</sup> و کوچک‌تر از آن قرار دارند. و بیش‌ترین پیکرندی در این تعداد منظومه، مربوط به نانو ماهواره‌ها<sup>۶</sup> (دارای وزن بین ۱ کیلو تا ۱۰ کیلوگرم) با سهم ۴۸٪ است و ۴۸٪ از ۲۵ منظومه مورد بحث در این منبع، دارای ماموریت زمین‌شناسی است.

## ۲- ماموریت‌های توزیع شده

یک سیستم فضایی از مجموعه‌ای از المان‌های فضایی که برای رسیدن به یک هدف مشترک در تعامل هستند، تشکیل شده است. در ماموریت‌های توزیع شده، هر یک از ماهواره‌ها می‌توانند به عنوان یک المان در نظر گرفته شوند.

کاربردهای سیستم‌های ماهواره‌ای در بسیاری از فعالیت‌های زندگی روزمره کشورهای پیشرفته نقش ایفا می‌کند و به نوعی به عنوان بخش جدانشدنی زندگی آنهاست. در کشورهایی که قابلیت‌ها و کاربردهای فناوری فضایی به خوبی شناسایی و معرفی شده، استفاده عموم مردم از این فناوری و خدمات فضایی به صورت یک امر طبیعی درآمده است. به همین دلیل، در بسیاری از کشورهای پیشرفته، علاوه بر آن که برای بسیاری از مسائل، راه‌حلی بر مبنای خدمات فضایی ارائه می‌شوند، در برخی موارد نیز تلاش می‌شود تا مساله به کمک یک راهکار فضاپایه مرتفع شود. به همین منظور، ممکن است در برخی موارد، سیستم‌های فضایی که دیگر بر پایه یک ماهواره طراحی نشده و بر مبنای ماموریت توزیع شده چندین ماهواره است، در نظر باشد. این رویکرد، در سال‌های اخیر مورد توجه بسیاری از کشورها قرار گرفته و برای اهداف مختلفی از جمله پوشش بیشتر یا دسترسی سریع‌تر به نتایج، تا انجام ماموریت‌های خاص با عنوان منظومه‌های ماهواره‌ای دنبال می‌شود. در سال‌های ۱۹۷۰ تا ۱۹۹۰، روش‌های مختلف طراحی منظومه‌های ماهواره‌ای ارائه شد. با توسعه این منظومه‌ها و در سال‌های ۱۹۹۷ و ۱۹۹۸، محققان روش‌های جدیدی را برای طراحی منظومه‌های ماهواره‌ای در مدارهای دایره‌ای نزدیک قطب زمین ارائه دادند که این روش‌ها توانایی پوشش یکپارچه و دو بعدی از جهان را فراهم می‌ساخت [۱].

در مقایسه با یک ماهواره تنها، یک منظومه ماهواره‌ای ممکن است پوشش بهتر و قابلیت اطمینان بالاتری را در برابر شکست برخی از ماهواره‌ها فراهم کند، به این ترتیب می‌توان بیان کرد که نرخ بقا در این‌گونه ماهواره‌ها بالاتر و هم‌چنین میزان موفقیت در ماموریت افزایش می‌یابد [۲]. لازم به ذکر است که امروزه، منظومه‌ای از ماهواره‌های کوچک بیش از گذشته برای انجام

<sup>5</sup> miniaturized satellite

<sup>6</sup> Nanosatellite

1 Miguel A. Nunes

2 Filippazzo and Dinand

3 Kulu

4 Bandyopadhyay and etr

### ۳- منظومه‌های ماهواره‌ای

یکی از گام‌های مربوط به توسعه ماهواره، کاهش وزن و هزینه‌های مربوط به پرتاب آن (به ویژه هزینه) است. این اقدام منجر به توسعه زود هنگام منظومه‌های ماهواره‌ای با تعداد زیادی از ماهواره‌ها شده است [۸]. منظومه ماهواره‌ای اغلب با هدف ارتقای عملکرد یک ماهواره در مدار است و به صورت چند ماهواره مشابیه در نظر گرفته می‌شود. فرایند طراحی منظومه ماهواره‌ای تا حدودی به ساختار چند سلولی شباهت دارد که در آن، هر ماهواره به عنوان یک سلول در نظر گرفته می‌شود [۹]. توزیع ماهواره‌های مشابه در یک مدار یا مدارهای مشابه یا مکمل، به منظور انجام یک ماموریت خاص انجام می‌پذیرد که نیازمند کنترل مشترک و ابرسیستمی است.

انجام ماموریت با استفاده از چند ماهواره کوچک، در مقایسه با ماهواره‌های بزرگ، دارای قابلیت‌های ویژه‌ای است اما این کار دارای پیچیدگی است و باید انعطاف‌پذیری قابل ملاحظه‌ای ایجاد کرد. این موارد شامل هماهنگی، مقیاس‌پذیری، قابلیت تکامل و نگهداری است که همگی از ویژگی‌های یک منظومه ماهواره‌ای هستند. این در حالی است که بسیاری از قطعات و تجهیزات تجاری، از لحاظ کیفیت، برای استفاده‌های نه چندان طولانی مدت در فضا مناسب بوده و هزینه آنها نسبت به نمونه‌های فضایی بسیار پایین است. [۱۱].

تاریخچه تفکر استفاده از منظومه‌های ماهواره‌ای برای ارائه خدمات بی‌سیم به سال ۱۹۴۵ می‌رسد. کلارک - دانشمند بریتانیایی - اولین طرح منظومه‌ای را با سه ماهواره که در مدار ژئو قرار می‌گیرند، به منظور پوشش مداوم مناطق استوایی و طی انتشار مقاله‌ای ارائه داد [۱۰]. اولین شبکه منظومه ماهواره‌ای در سال ۱۹۶۰ طراحی شد. ساده‌ترین نوع مدار برای منظومه‌های ماهواره‌ای، مدار دایره‌ای با تعداد ماهواره برابر در هر صفحه است که برای ماموریت مسیره‌های پوششی استفاده می‌شود. پیشرفت قابل توجه در طراحی منظومه‌های ماهواره‌ای مربوط به "منظومه‌های ماهواره‌ای منظم سینماتیکی" است که توسط مؤزواه<sup>۲</sup> پیشنهاد شد. هم‌چنین، طرح‌های منظومه‌ای به طور

بین ماموریت‌ها را در بررسی اولیه می‌توان به دو دسته آرایش پروازی و ماموریت‌های منظومه‌ای تقسیم کرد. در سیستم‌هایی که در دسته آرایش پروازی قرار می‌گیرند، المان‌ها از طریق یک قانون کنترلی مشترک و نسبی، به انجام ماموریت پرداخته و ضمن انجام عملیات، با هم ارتباط برقرار می‌کنند. به عبارت دیگر، در این ماموریت‌ها، طبق قانون حاکم بر آرایش، حداقل یک ماهواره باید حالت دلخواه را نسبت به یک ماهواره دیگر تعیین و کنترل کند. ماموریت‌های آرایش پروازی خود نیز در دو حالت قابل بررسی هستند. دسته اول ماموریت‌های ملاقات و اتصال با یکدیگر و دسته دوم مربوط به ماموریت‌های بدون اتصال ماهواره‌ای است. به صورت مشابه، ماموریت‌هایی که توسط المان‌های مختلف به انجام می‌رسند، اما در آن کنترل المان‌ها به صورت مستقل انجام می‌شود، در دسته منظومه‌ها قرار می‌گیرند [۷].

یک منظومه ماهواره‌ای سه ویژگی زیر را داراست:

- هم‌زمانی کارکرد المان‌ها
- مقاومت در برابر شکست سیستم‌های منفرد (یعنی با از بین رفتن یک المان، کل ماموریت دچار مشکل نشود)
- مقیاس‌پذیری و انعطاف در طراحی و توسعه سیستم (یعنی قابلیت افزایش یا کاهش المان‌ها در اندازه‌ها و ماموریت‌های مختلف را داشته باشد).

وقتی مروری بر روی تحقیقات انجام گرفته در زمینه ماموریت‌های توزیع شده انجام می‌شود، تعادلی نسبی بین این دو دسته دیده می‌شود. هرچند در حالت عملیاتی و بررسی تحقیقاتی که به سیستم‌های کارکردی منتج شده‌اند، نتیجه متفاوت و تعداد منظومه‌ها نه تنها بیش‌تر است، بلکه به صورتی چشم‌گیر در حال افزایش است و به نوعی به عنوان یک راهکار شناخته شده برای پاسخ به بسیاری از نیازهای رایج در نظر گرفته شده است. در این مقاله، فعالیت‌هایی که بر روی این نوع از سیستم‌های فضایی انجام گرفته مرور شده و ماموریت‌هایی که به کمک این رویکرد به انجام رسیده و نیازهایی که بر مبنای کاربردهای آنها پوشش داده شده، معرفی و از نظر آماری مطالعه می‌شوند.

اغلب ماموریت‌های منظومه‌ای مربوط به پوشش کل جهان و حتی گاهی پوشش جهان به صورت مداوم و با تصاویر در زمان واقعی است [۱۱]. بر این اساس، به طور خلاصه مشخصات اصلی طراحی منظومه ماهواره‌ای به صورتی که در جدول (۱) ارائه شده، قابل بررسی است. این مشخصات در طراحی منظومه با توجه به هدفی که برای آن و بر اساس ماموریت در نظر گرفته شده، نقش آفرینی کرده و به نوعی ارزیابی عملکرد منظومه را ممکن می‌سازند. بر این اساس، به طور عمده دو روش برای طراحی منظومه‌های ماهواره‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند که با توجه به اهداف ماموریتی قابل انتخاب هستند:

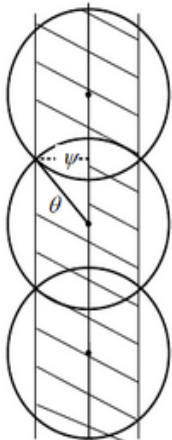
۱. مسیرهای پوششی
۲. دلتا واکر

#### ۴-۱- مسیرهای پوششی

یک روش در طراحی منظومه‌های ماهواره‌ای، روش مربوط به مسیرهای پوششی<sup>۴</sup> است. این روش، مساله پوشش پیوسته برای یک ناحیه یا منطقه یا کل جهان را با استفاده از مناطق تحت پوشش و هم‌پوشانی ماهواره‌های مجاور حل می‌کند، یا به عبارت دیگر، با استفاده از این روش، مناطق به طور مداوم مشاهده می‌شوند. در این روش سه شرط باید رعایت شود:

- تمام مدارها باید در ارتفاع یکسان و در یک زاویه شیب مداری باشند.
- منظومه ماهواره‌ای متشکل از  $n_1$  صفحه مداری و هر کدام شامل  $n_2$  ماهواره است.
- ماهواره‌ها در هر مدار باید به صورت مساوی توزیع شوند.

با توجه به شکل (۲)، وقتی که زاویه پوشش  $\theta$  شرط  $\theta > \pi/n_2$  را برآورده کند، نوارهای مشاهده شده به طور مداوم توسط



مستقل توسط واکر<sup>۱</sup> توسعه داده شده است. تفاوت بین این روش‌ها را به این صورت می‌توان بیان نمود که روش‌های موژواه بر مبنای نظریه گروهی استوار است در حالی که روش‌های واکر به نوعی رویکرد تجربی دارند [۱].

روش‌های سنتی منظومه‌های ماهواره‌ای مبتنی بر دو رویکرد یکی انتظار کاربران و دیگری سطح فعالیت آنهاست که بسیار نامطلوب است. با توجه به این رویکرد، اگر تقاضای واقعی کم‌تر از مقدار پیش‌بینی‌ها باشد، می‌تواند منجر به شکست اقتصادی شود. در روش واکر<sup>۲</sup> و همکاران، از ماهواره‌های کوچک‌تر و مقرون به‌صرفه‌تر در تعداد پایین استفاده شده و منظومه در ادامه با پرتاب‌های دیگر، به مرور تکمیل می‌شود تا نیازهای کامل‌تری از مشتریان برطرف شود. در این روش، چگونگی دستیابی به بهترین چیدمان منظومه ماهواره‌ای در فضای طراحی مشخص شده و مطالعه موردی مزایای اقتصادی مدارهای ارتفاع پایین زمین<sup>۳</sup> مورد بررسی قرار گرفته است [۱۱]. به منظور درک بهتر منظومه‌های ماهواره‌ای، در این پژوهش، چند روش طراحی منظومه‌ای از این دست، معرفی می‌شود.

#### ۴- مشخصات طراحی منظومه‌ها

طراحی منظومه‌ها مشخصات مختلفی را دربرمی‌گیرد و این مشخصات به صورت خاص به ماموریت آن منظومه وابسته است و ممکن است مشخصات مطلوب را تغییر دهد، اما آن چه مهم است، در طراحی منظومه باید به‌گونه‌ای عمل کرد که هزینه‌ها تا حد ممکن کاهش یابد، در حالی که برای ماموریت مشکلی ایجاد نشود. همچنین، به‌منظور دستیابی بهتر به اهداف ماموریت، باید حداقل تعداد ماهواره مورد استفاده قرار گیرد. یکی دیگر از عوامل موثر بر هزینه، تعداد و نوع مدار مورد استفاده است. قرار دادن ماهواره‌ها در مدارهای متفاوت، نیازمند پرتاب چندین پرتابگر است و این یعنی پیچیدگی طرح و در نهایت افزایش هزینه‌های طراحی و ساخت را در پی خواهد داشت. کلیدی‌ترین نکته در طراحی منظومه‌ها، مناطق جغرافیایی تحت پوشش است و اینکه چگونه باید آنها را پوشش دهیم. باید خاطر نشان ساخت که

3 LEO  
4 Streets- of- Coverage method

1 Walker  
2 Weack

است. روش واکر، از تطابق متقارن مدارهای دایره‌های شبیه به هم در یک ارتفاع مشترک استفاده می‌کند [۱].

شش پارامتر کلیدی در طراحی این منظومه تاثیرگذار است و انتخاب تعداد نامحدودی از این شش پارامتر مداری کپلری<sup>۱</sup>، منجر به ایجاد یک طراحی متناسب خواهد شد. به طور کلی، تمام ماهواره‌های یک منظومه دارای نمودار ارتفاع، گریز از مرکز و زاویه شیب مداری یکسان هستند. بنابراین، تاثیرات انحراف ماهواره در همان روش و هندسه، بدون ایستگاه‌های نگهداری زیادی قابل حفظ است.

پس از تعریف تعداد ماهواره، تعداد صفحات مداری، نیم محور اصلی و زاویه شیب مداری، ماموریت ویژه، مقدار آنومالی حقیقی و گره صعودی را می‌توان تعیین کرد. در این روش، با توجه به اینکه اکثر مدارهای منظومه‌ای واکر دایره‌ای هستند، تعیین گریز از مرکز و حضيض مدار قابل صرف نظر بوده و گام‌های مربوط به طراحی را می‌توان به صورت زیر بیان نمود:

- تعیین تعداد ماهواره برای اجزای ماموریت
- تعیین صفحات مداری به منظور فراهم‌سازی حداکثر پوشش و کم‌ترین هزینه
- توزیع یکسان گره صعودی صفحات مداری در اطراف استوا
- تعیین تعداد ماهواره در هر صفحه
- توزیع ماهواره‌ها با فاصله یکسان [۱۰].

## ۵- بررسی آماری منظومه‌های ماهواره‌ای

بررسی‌های انجام شده روی منظومه‌های ماهواره‌ای موجود در جهان، با توجه به پژوهش‌های انجام شده توسط فیلیپازو و دیباند [۵]، کولو [۶، ۴]، باندیوپادیا و اتر [۷] و اطلاعاتی که از ۱۳۲ شرکت هوافضایی و مراکز علمی و تحقیقاتی که در زمینه منظومه‌های ماهواره‌ای فعالیت می‌کنند، به این منظور گردآوری شده است، می‌باشد. البته باید خاطر نشان ساخت که برخی از شرکت‌ها با هم در پروژه مشترکی فعالیت می‌کنند و

مناطق هم‌پوشانی ماهواره‌های داخل مدار تشکیل می‌شود. با استفاده از مثلثات کروی، عرض نوار برابر است با:

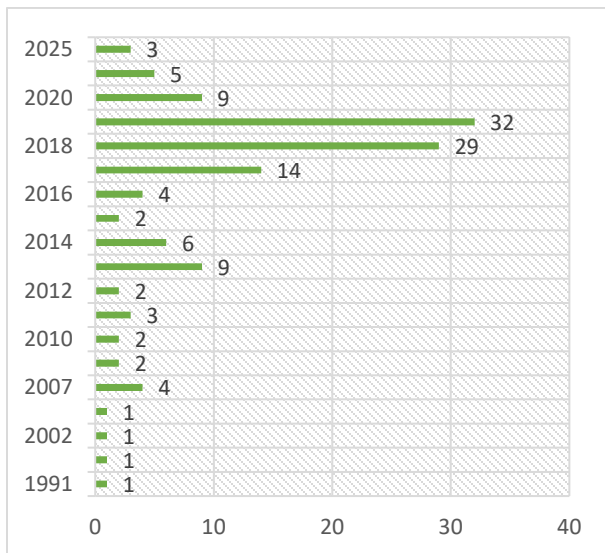
$$\cos \theta = \cos \varphi \cos \left( \frac{\pi}{n_2} \right)$$

در این روش، تنها نوارهایی که پوشش داده می‌شوند در نظر گرفته شده، در حالی که پوشش‌های غیر از نوارهای مورد نظر، نادیده گرفته می‌شود. در نتیجه، تفاوت بین فازهای ماهواره‌ای مجاور، قابل صرف نظر کردن است و مناطق پوشش دایره‌ای به عنوان نوار مربوط به هر صفحه، ساده‌سازی می‌شوند. هدف از این روش طراحی، محاسبه عرض نوار مورد نیاز متناسب با هر نوع پیکربندی منظومه‌ای است و در نتیجه مناطق مشخص شده می‌تواند به طور کامل تحت پوشش قرار گیرد [۸].

## ۴-۲- روش دلتا-واکر

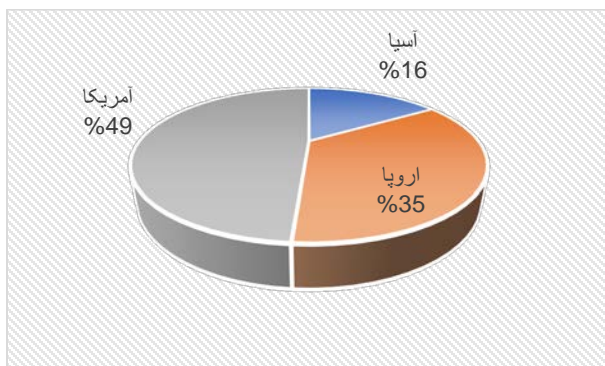
به طور کلی، مساله طراحی یک منظومه چند ماهواره‌ای، پارامترهای بسیاری را با تعدادی از مسائل ترکیبی دربر می‌گیرد. این پارامترها عبارتند از تعداد کل ماهواره‌ها، پارامترهای مداری هر ماهواره، تعداد صفحات مداری، تعداد ماهواره در هر صفحه، فاصله بین ماهواره‌ها در هر صفحه، فاصله بین صفحات مداری و مقادیر نسبی بین صفحات مداری پشت سر هم. باید توجه داشت که مشکل پوشش دائمی از کل سطح زمین توسط ماهواره‌های منفرد و ماهواره‌های چندگانه، به طور کامل از دیدگاه هندسی حل شده است. تمامی این راه‌حل‌ها دارای خواص تقارن قوی هستند [۱۱].

واضح است که فاصله زمانی چند دور مداری، یک مسدیر ماهواره‌ای در فضای دو بعدی، به صورت یک خط مستقیم موازی با محور  $\Delta$  نمایش داده می‌شود. در فضا، هر منظومه با تعدادی از صفحات مداری و تعدادی ماهواره با فاصله یکسان از هم در هر صفحه، به عنوان یک شبکه در نظر گرفته می‌شود. در این شبکه‌ها، ماهواره‌ها به عنوان رئوس در نظر گرفته می‌شوند. بیش‌تر بهینه‌سازهاها مربوط به منظومه‌های متقارن مانند واکر



شکل ۱. تعداد پرتاب منظومه ماهواره‌ای بر حسب سال پرتاب

با توجه به شکل (۲)، بررسی‌ها نشان می‌دهد که تمرکز جغرافیایی منظومه‌ها بیش‌تر مربوط به قاره آمریکا با سهم ۴۹٪ و پس از آن اروپا با ۳۵٪ و سپس قاره آسیا با ۱۶٪ است. هم‌چنین، بر اساس این مطالعات، کشور ایالت متحده آمریکا با سهم ۴۳٪ از کل منظومه‌ها، رتبه نخست را به خود اختصاص داده و پس از آن کشور انگلستان با سهم ۱۰٪ و سپس چین با سهم ۷٪ دارای بیش‌ترین تعداد ماهواره مدنظر برای عملیات در منظومه است که در شکل (۳) ارائه شده است.



شکل ۲. پراکندگی جغرافیایی منظومه‌های ماهواره‌ای

تعداد اندکی از منظومه‌ها نیز قبل از پرتاب و قرارگیری در مدار به دلایل مختلف که مهم‌ترین آنها عدم جذب سرمایه مناسب است، متوقف شده‌اند. هم‌چنین، از تعداد محدودی از پروژه‌ها اطلاعات کافی در اختیار نیست. داده‌کاوی انجام گرفته، ۳۴ سال فعالیت منظومه‌های ماهواره‌ای، مربوط به فعالیت‌های انجام شده از سال ۱۹۹۱ و فعالیت‌هایی است که تا سال ۲۰۲۵ در جهان انجام خواهد شد، را دربرمی‌گیرد.

هدف از این بررسی و پژوهش به صورت زیر قابل بیان است:

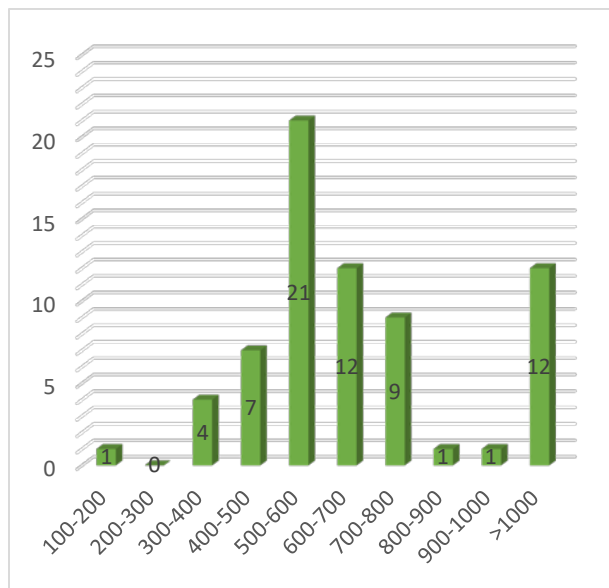
- شناسایی مأموریت
  - بررسی ساختار فنی و تجاری منظومه‌ها
  - استخراج مشخصات عملیاتی با استفاده از بانک اطلاعاتی ایجاد شده
  - استخراج ورودی‌های تصمیمات مدیریتی با استفاده از تحلیل آماری خواص فنی منظومه‌ها
- مطالعات بر روی منظومه‌هایی که در منابع مذکور معرفی شدند، با هدف دستیابی به اطلاعات فوق، انجام گرفته و نتایج با توجه به این منابع و اطلاعاتی که از منابع دیگر به دست آمده، در قالب جداول و نمودارهای مختلف ارائه شده است.

لازم به ذکر است که این بررسی نشان می‌دهد که گستره فعالیت‌های مرتبط با منظومه‌ها تا سال ۲۰۱۶ روند کندی داشته و از سال ۲۰۱۶ تا ۲۰۱۹ به صورت چشم‌گیری افزایش یافته و پس از آن مجدداً روند کاهش را دنبال کرده است. در قرن جدید، منظومه‌ها به عنوان اصلی‌ترین سیستم فضایی شناخته شده و تعدد پرتاب آن به شدت افزایش خواهد یافت. در شکل (۱)، تعداد پرتاب منظومه‌ها در سال نمایش داده شده است.

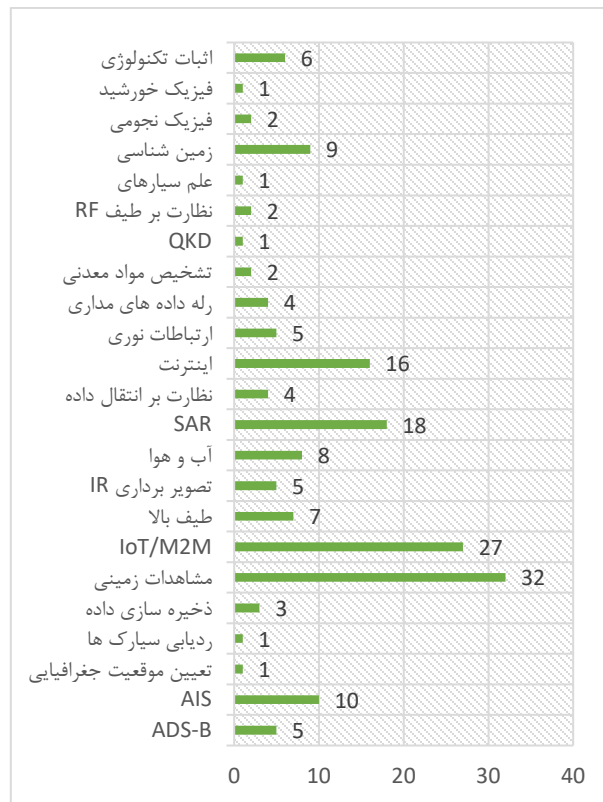




پیشین به انجام رسید، به صورت حداقلی، صفحات مداری مدنظر، تعدد ماهواره در منظومه و تعداد فازهای قرارگیری در مدار (که به نوعی با تعداد نسل‌های منظومه هم‌خوانی دارد) را شامل می‌شود. بر اساس بررسی انجام گرفته در این پژوهش، اغلب منظومه‌ها به صورت تک صفحه‌ای طراحی شده و مدار نزدیک زمین با ارتفاع ۵۰۰ تا ۶۰۰ کیلومتری بیش از باقی مدارها مطلوب بوده است. اطلاعات در مورد زاویه شیب مداری، نوع مدار و عمر مداری به ترتیب در شکل‌های (۶) تا (۹) قابل بررسی است.



شکل ۶. بررسی ارتفاع مداری ۵۷ منظومه ماهواره‌ای

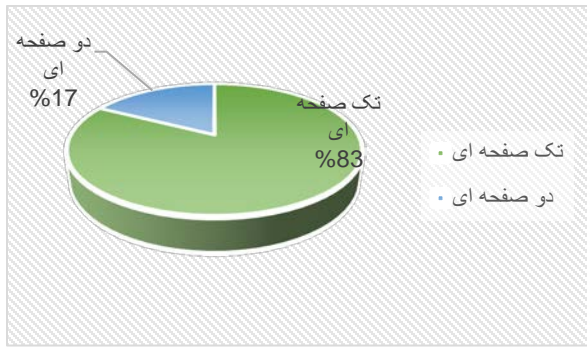


شکل ۵. بررسی جزئی ماموریت منظومه‌ها

سرویس‌هایی که در این منظومه‌ها ارائه می‌شوند بیش تر به منظور ایجاد کسب و کارهایی مانند پیام‌رسانی دیجیتالی و سفارش آنلاین است که از خدمات اینترنتی بهره می‌برند. پس از این ماموریت و بررسی در سطح خرد، ماموریت مشاهدات زمین با توجه به جذابیت ذاتی محصولات این منظومه‌ها، بیش‌ترین درصد ماموریت منظومه‌های ماهواره‌ای با سهم ۱۹٪ را به خود اختصاص داده است.

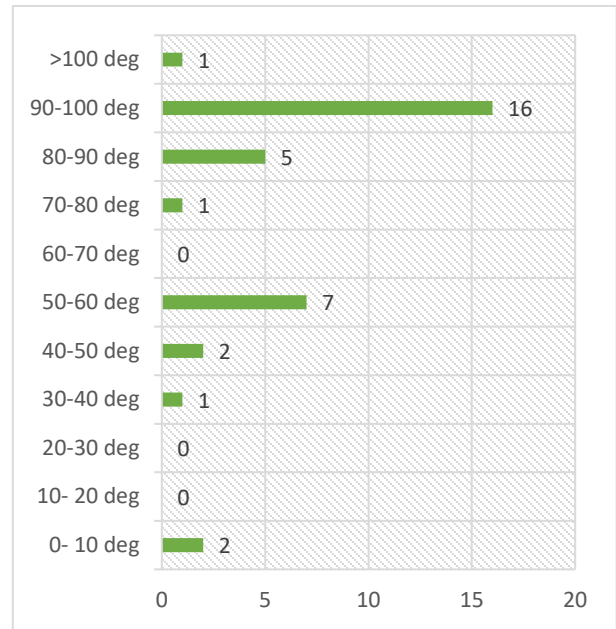
آنچه از تلفیق داده‌های بررسی ماموریت‌های منظومه‌ها و زمان مطلوب بهره‌برداری از آنها قابل استخراج است، آن است که آینده منظومه‌ها به نوعی به سمت این دو ماموریت (مشاهدات زمینی، مخابرات اینترنتی) خواهد رفت و می‌توان گفت که تمرکز سرمایه‌گذاران در حال حاضر بر روی این دو ماموریت بوده و ممکن است به زودی بازار مرتبط به این کاربردها در اختیار سرمایه‌گذاران فعلی در این منظومه‌ها قرار بگیرد.

نکته دیگر مشخصات منظومه‌ای است که در آن این ماموریت‌ها انجام می‌شود، که با توجه به معرفی اولیه‌ای که در بخش‌های

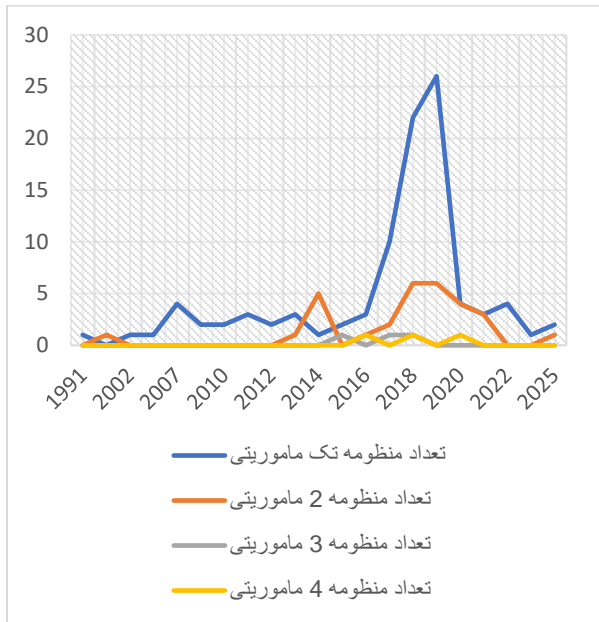


شکل ۹. بررسی سهم صفحات مداری ۲۹ منظومه ماهواره‌ای

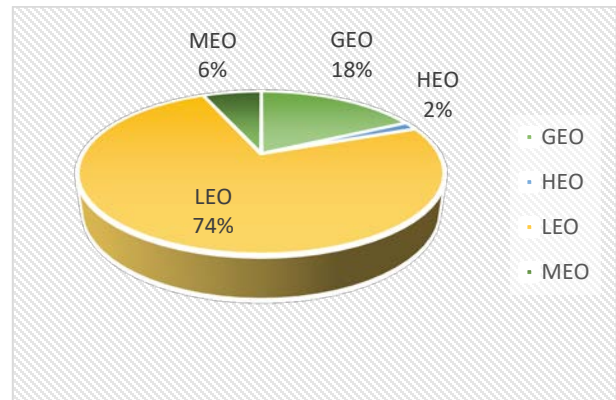
در مورد تعداد ماهواره‌ها با توجه به ظهور مگامنظومه‌ها، پراکندگی داده‌ها به مراتب بیش‌تر است. این مساله در مورد تعدد پرتاب نیز مطرح است که در این مورد می‌توان مسائل اقتصادی را عامل اصلی دانست، چراکه غالب سرمایه‌گذاران در منظومه‌ها به دنبال آن هستند که از درآمدهای حاصله برای تکمیل یا ایجاد نسل‌های جدید بهره‌برند. اطلاعات تکمیلی برای این دو مشخصه در شکل (۱۰) ارائه شده است.



شکل ۷. بررسی زاویه شیب مداری ۲۹ منظومه ماهواره‌ای



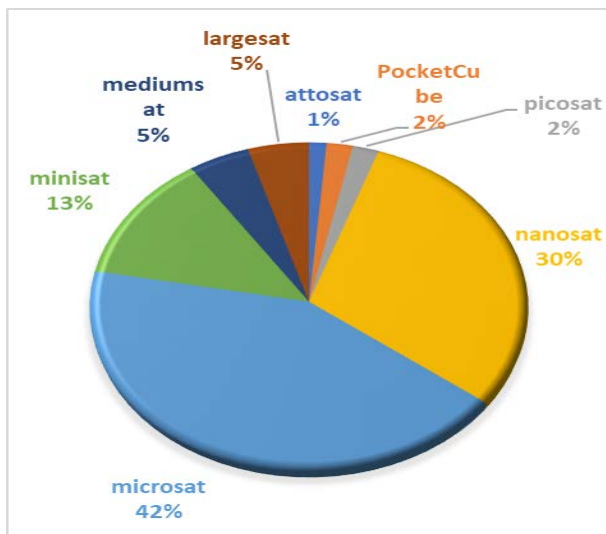
شکل ۱۰. تعداد ماموریت‌های منظومه‌های ماهواره‌ای بر حسب سال



شکل ۸. بررسی سهم نوع مدار ۶۲ منظومه ماهواره‌ای

طبق مطالعات آماری صورت گرفته، پیکربندی مطلوب را باید در میکروماهواره‌ها و پس از آن نانوماهواره‌ها جستجو کرد.

البته با توجه به پیشرفت فناوری در کوچک‌سازی ماهواره‌ها و هم‌چنین هزینه پایین این ماهواره در ساخت و پرتاب، این مساله دور از انتظار هم نیست. شکل (۱۱)، در میان تعدد ماهواره‌های مکعبی چشم‌گیر است که این مساله در ادامه به صورت جزئی بررسی خواهد شد.



شکل ۱۱. بررسی سهم پیکربندی منظومه‌های ماهواره‌ای

در مورد پلتفرم این ماهواره‌ها، شاید بیش‌ترین پارامتری که به صورت آماری قابل بررسی است، باند مخابراتی مدنظر برای کنترل ماهواره است، چراکه در بسیاری از ماموریت‌ها امکان استفاده از تجهیزات زمینی موجود مطلوب بوده است. جزئیات بیش‌تر در شکل (۱۲) قابل مشاهده و بررسی است.

## ۵-۲- تحلیل ساختار مطلوب ماهواره در منظومه‌ها

آنچه در بخش پیش‌مورد بررسی قرار گرفت، به سطح ابرسیستم منظومه باز می‌گشت، در جایی که ماموریت منظومه (و مشخصات طراحی آن) و محموله ماهواره‌ها به عنوان المان اصلی منظومه مورد بررسی قرار گرفت.

در این بخش، ضمن بررسی ساختار کلی ماهواره‌هایی که در منظومه‌ها مطلوبند، مشخصات کلی پلتفرم نیز بررسی می‌شود تا بتوان اطلاعات آماری مناسبی را در تناظر با ماموریت‌ها و کاربردهای این سیستم‌ها، در اختیار گذاشت.

به منظور ارزیابی دقیق‌تر این منظومه‌های ماهواره‌ای، ابتدا ضروری است که ماهواره‌ها از لحاظ وزنی مورد بررسی قرار گیرند. این بررسی بر اساس دسته‌های مختلفی که در جدول (۲) توسط ترانگ<sup>۱</sup> [۱۶] معرفی شده، صورت گرفته است.

جدول ۲. بررسی کلاس‌بندی ماهواره [16]

وزن	نوع ماهواره	
$> 1000 \text{ kg}$	ماهواره‌های بزرگ	
$500 - 1000 \text{ kg}$	ماهواره‌های متوسط	
$< 500 \text{ kg}$	ماهواره‌های کوچک	
$100 - 500 \text{ kg}$	مینی ماهواره	ماهواره‌های کوچک
$10 - 100 \text{ kg}$	میکروماهواره	
$1 - 10 \text{ kg}$	نانوماهواره	
$100 \text{ gr} - 1 \text{ kg}$	پیکوماهواره	
$10 \text{ gr} - 100 \text{ gr}$	فتموماهواره	
$0.2 \text{ kg} \sim 40 \text{ kg}$	$0.25 \text{ u} - 27 \text{ u}$	ماهواره‌های مکعبی <sup>۲</sup>

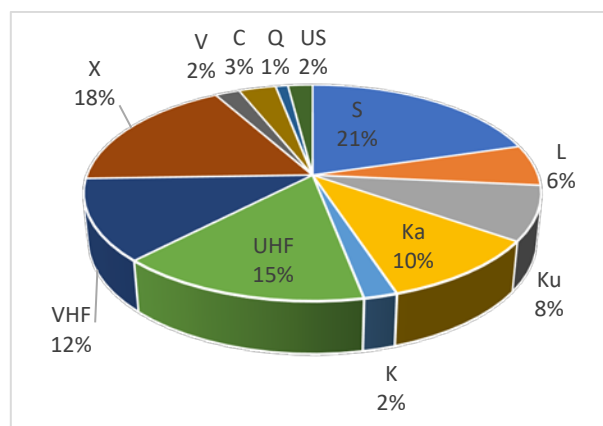
2 Cubsat

1 Trong

رادیوهای آماتوری است [۱۸]. منظومه ماهواره‌های اینترنتی، معمولاً مجموعه‌ای بزرگ از ماهواره ساخته شده در مدار ارتفاع پایین زمین است که به منظور ارائه ارتباطات ماهواره‌ای با پهنای باند بالا برای کسب و کارهای مختلف و انواع کاربران زمینی ایجاد می‌شود. بیش از ۱۸۰۰۰ ماهواره جدید برای پرتاب و قرارگیری در مدارهای ارتفاع پایین تا سال ۲۰۲۵ پیش‌بینی شده است. این مقدار بیش از ۱۰ برابر بیش‌تر از تعداد ماهواره‌هایی است که تا ماه مارس ۲۰۱۸ به عنوان ماهواره‌های فعال در فضا قرار دارند [۲۰].

ماهواره‌های کوچک، بستری برای توسعه فناوری‌های فضایی است، به این امید که کشورها، شرکت‌ها، دانشگاه‌ها، دانشمندان و مهندسان سراسر جهان توانایی دسترسی ارزان به فضا را داشته باشند. مجموع هزینه‌های مربوط به پرتاب یک ماهواره کوچک، کم‌تر از چند میلیون دلار است در حالی‌که این هزینه‌ها برای پرتاب یک ماهواره بزرگ، مقدار ۲۰۰ تا ۱۰۰۰ میلیون دلار است [۲۱]. این عدد در نانوماهواره به چند صد هزار دلار و کم‌تر محدود می‌شود [۲۲] که خود می‌تواند عامل انگیزشی بسیار خوبی برای ورود صاحبان ایده و راهکارهای مبتنی بر فضا، به حوزه ماهواره‌های مکعبی و با هدف ارائه خدمات در هزینه‌های معقول یا پایین‌تر است.

همان‌طور که در بخش پیش نیز اشاره شد، نانو و میکرو ماهواره‌ها مطلوب‌ترین ساختارهایی هستند که در منظومه‌های ماهواره‌ای مورد استفاده قرار گرفتند. در این میان، ماهواره‌های مکعبی دارای یک جایگاه ویژه هستند، به صورتی‌که اگر از کل منظومه‌ها، ۷۲٪ در میان میکرو و نانوماهواره‌ها جای بگیرند، از این میان، ۵۶٪ درصد در قالب ساختار ماهواره‌های مکعبی جای می‌گیرند. در میان ماهواره‌های مکعبی که در منظومه‌ها به کار برده شده، ساختار شش‌واحدی با ۳۵٪ از باقی موارد با استقبال بیش‌تری روبه‌رو شده است. این مساله به نوعی تاییدکننده کارایی یک ساختار شش‌واحدی از جنس ماهواره مکعبی برای استفاده در تشکیل یک منظومه ماهواره‌ای است. اطلاعات تکمیلی در مورد



شکل ۱۲. بررسی سهم باند فرکانسی ۶۴ منظومه

پارامترهای فنی دیگری که در سطح سیستم منظومه‌ها مورد توجه است، ابعاد سازه، توان تولیدی و مشخصات جرمی است که با توجه به تطابق این سامانه‌ها بر ماهواره‌های مکعبی به صورت متداول مقادیر برای این پارامترها مشخص و قابل ارائه است.

#### ۶- تعیین جایگاه ماهواره‌های مکعبی در منظومه‌ها

توسعه ماهواره‌های مکعبی به منظور کاهش هزینه‌ها در محیط فضا با کاهش اندازه ماهواره‌ها؛ جرم و هزینه ایجاد و توسعه، زمانی اتفاق افتاد که این تحقیقات به حوزه دانشگاه‌ها وارد شد. این ماهواره‌ها توانایی آزمون‌های پروازی با جدیدترین فناوری و سیستم‌ها را دارند که هم‌چنان در ابعاد و اندازه‌های کوچک در حال گسترش هستند [۱۷]. یک ماهواره مکعبی نوعی از ماهواره‌های مینیاتوری و کوچک است که برای تحقیقات فضایی استفاده می‌شود. ابعاد یک واحد از این ماهواره، ۱۰ در ۱۰ در ۱۰ سانتی‌متر مکعب بوده و جرم هر واحد کمتر از ۱/۳۳ کیلوگرم است. ماهواره‌های مکعبی توسط فضانوردان واقع در ایستگاه فضایی بین‌المللی یا به عنوان بارهای ثانویه، با یک حامل پرتاب و در مدار قرار می‌گیرند. اولین پرتاب این نوع ماهواره‌ها در سال ۱۹۹۹ صورت پذیرفت که بیش‌تر اهداف تحقیقاتی را دنبال می‌کرد و از سال ۲۰۱۴ به بعد، برای پروژه‌های تجاری نیز مورد استفاده قرار گرفت. متداول‌ترین ماموریت‌هایی که برای ماهواره‌های مکعبی تعریف می‌شود، ماموریت مشاهدات زمین یا

صنعت فضایی ارائه کنند که به آن بتوان به عنوان جایگزین ماهواره‌های بزرگ، پیچیده و پرهزینه نگریست.

#### ۷- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

منظومه‌های ماهواره‌ای در مقایسه با یک ماهواره، دارای قابلیت گسترده‌تر و توانایی انجام ماموریت‌های مختلف است. ایجاد این منظومه‌ها منجر به کاهش ابعاد و در نتیجه کاهش وزن شد و این عوامل پرتاب تعداد بیش‌تری ماهواره با استفاده از یک پرتابگر را در پی داشت. با کوچک شدن هزینه‌های طراحی، ساخت و پرتاب ماهواره‌ها، مراکز تحقیقاتی دولتی و خصوصی مختلفی به این عرصه وارد شده‌اند. شرکت‌های مختلفی به منظور ارائه خدمات نرم‌افزاری، سخت‌افزاری و رفع نیازهای مشتریان که هر لحظه در حال افزایش است، توسعه صنعت هوافضایی را در پی داشته است. ابزارهای صنعتی مختلفی در ماهواره‌های ارزان مورد آزمایش و اثبات فناوری قرار گرفته است.

طبق ارزیابی‌های انجام شده بر روی بیش از ۱۳۰ شرکت و مرکز تحقیقاتی در عرصه جهانی که در بخش‌های قبلی ارائه شده است، از بین انواع پیکربندی رایج؛ میکروماهواره‌ها بیش‌تر مورد توجه بوده و تقریباً ۴۲٪ پیکربندی ماهواره‌های منظومه‌ای، مربوط به این کلاس از ماهواره‌ها است. علاقه‌مندی به پوشش چندین ماموریت در منظومه‌ها، آن‌ها را به سمت بهره‌برداری از چند پیکربندی در یک منظومه نیز برده است. بیش‌ترین ماموریتی که در قالب منظومه‌های ماهواره‌ای پوشش داده شده، ماموریت مشاهدات زمینی با سهم ۱۹٪ بوده و با اختلافی کم توسط ماموریت‌های اینترنت اشیا/ ماشین به ماشین و رادار دهانه مصنوعی دنبال می‌شود، هرچند این پراکندگی با شروع عملیات ابرمنظومه‌هایی که توسط شرکت‌های بزرگ فضایی پیشنهاد شده و در حال تکمیل است، تغییر کرده و ماموریت‌های ارتباطاتی جایگاه اول را به خود اختصاص خواهند داد.

#### تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

توزیع ساختاری در منظومه‌ها در جدول (۳) قابل مشاهده بوده و گویای همه چیز است.

جدول ۳. تقسیم‌بندی پیکربندی ماهواره در منظومه‌های بررسی شده

نوع پیکربندی	درصد	تقسیم‌بندی	درصد	واحد مکعبی	درصد
نانوماهواره	42%	ماهواره‌های دیگر	**	**	**
میکروماهواره ه	30%	ماهواره‌های مکعبی	55.96%	0.25 U	1%
				1 U	5%
				1.5 U	5%
				2 U	11%
				3 U	28%
				5 U	4%
				6 U	35%
				8 U	1%
				12 U	4%
				16 U	6%

ترکیب داده‌های فوق با اطلاعاتی که در مورد ماموریت منظومه‌ها در اختیار است، نشان‌گر آن است که در این ساختار نیز ماموریت‌های مخابراتی، ماموریت برتر بوده و پس از آن، ماموریت مشاهده زمین رتبه دوم را به خود اختصاص داده است. با توجه به مرور کلی که بر روی ماموریت‌های آتی منظومه‌ها در بخش دوم به انجام رسید، به نوعی می‌توان گفت که بسیاری از سرمایه‌گذاران، آینده منظومه‌ها را در ماهواره‌های مکعبی جستجو می‌کنند. این مساله با توجه به هزینه پایین طراحی و توسعه و همچنین پرتاب این ماهواره‌ها یک موضوع قابل پیش‌بینی بود، که داده‌های آماری نیز آن را تایید می‌کنند.

به نوعی می‌توان گفت، پیشرفت فناوری که منجر به کوچک‌سازی ماهواره‌ها شد، ماهواره‌های مکعبی را به جایگاهی رسانده که امروزه می‌توانند به عنوان یک سیستم نقش‌آفرین، مفهوم جدیدی را در

## مراجع

- aerospace computing, and communication* Vol. 1, P 1. March 2004.
- [12] E. Lansard, E. Frayssinhes, J. L. Palmade, "Global design of satellite constellations: a multi-criteria performance comparison of classical walker patterns and new design patterns", *Acta Astronautica*, Vol. 42, №9, pp 555-564. 1998.
- [13] J. Lee, S. Kang "Satellite over satellite (SOS) network: a novel architecture for satellite network". In: *Proceedings of IEEE INFOCOM'2000*, Tel-Aviv Israel, vol 3, issue 1, pp 315–321.2000.
- [14] <http://scienceofstocks.com/astranis-satellite-constellation-to-provide-worldwide-internet-access/>
- [16] .T. V. Trong & etc, Constellation of small quick-launched and self –deorbiting nano-satellite with AIS receivers for global ship traffic monitoring, p 1.
- [17] ا. موسیوند، "طراحی و شبیه سازی زیر سیستم کنترل دمای یک نانوماهواره"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، دانشکده مهندسی هوافضا، گرایش مهندسی فضایی، بهمن ماه ۱۳۹۶.ص ۲.
- [19] <http://www.albaorbital.com/new-blog/>
- [21] R. Radhakrishnan. & etc, Survey of Inter-satellite Communication for Small Satellite Systems, arXiv: 1609.08583v2 [cs.NI] PP 1-3, 28 Sep 2016.
- [22] <http://spaceflight.com/schedule-pricing/>
- [1] Y. Ulybyshev, "Satellite constellation design for continuous coverage: short historical survey, current status and new solutions", *5<sup>th</sup> international workshop on constellations and formation flying.*, p 2, 2008.
- [2] T. Savitri, Y. Kim, S. Jo & H. Bang, "Satellite Orbit Design Optimization with Combined Genetic Algorithm and Semianalytical Approach", *international Journal of Aerospace Engineering*, 31 May.p1. 2017.
- [3] Miguel A, satellite constellation optoization method for future earth observation missions using small satellite, AAS 12-527, 2015.
- [4] E. Kulu Satellite Constellations Industry Survey and Trends, NewSpace Index, Nanosats Database, Kepler Communications, [SSC21-XII-10], 35th Annual Small Satellite Conference, 2021
- [5] G. Filippazzo, S. Dinand, "the Potential impact of small satellite Rada constellation on traditional space system", *5th Federated and Fractionated Satellite System Workshop*, ISAE SUPAERO- Toulouse, France.p1, November 2-3, 2017.
- [6] E. Kulu, *NewSpace Index (Concise original overview of commercial satellite constellations, small satellite rocket launchers and NewSpace funding options)*, 2021.
- [7] S. Bandyopadhyay, & etr, "Review of formation flying and constellation mission using nanosatellite", *journal of spacecraft and rockets*, P 1, march 2016
- [8] Q. Chen, Y. Bai, L. Chen, Z. Pang, Designe of LEO Constellation Providing Internet Services Based on SOC Method", *MATEC Web of Conference*, no. 114, pp 1-5, 2017.
- [9] ASTROME, Gigamesh, A Ground- Breaking Wireless Solution to Network Decongedtion and 5G Backhaul, 2021.
- [10] A.C. Clarke, Extra terrestrial relays: can rocket station give world-wide radio coverage. *Wirel World Radio Coverage*.pp.:208–305, 1966.
- [11] O. Weck, R. Neufville & M. Chaize, "Staged Deployment of communications satellite constellation in low earth orbit", *journal of*



### COPYRIGHTS

© 2023 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/>)