J. RS. GEOINF. RES. 1(1): 31-40, Winter & Spring 2023

Journal of Remote Sensing and Geoinformation Research
(JRSGR)

Homepage: jrsgr.sru.ac.ir

REVIEW PAPER

Performance Evaluation of CubeSats for Remote Sensing Missions: A Review

***M. Nasiri Sarvi*[*,1], *H. Mahdipour*[2]**

[1] *Department of Satellite Engineering, School of Advanced Technologies, Iran University of Science & Technology, Tehran, Iran*

[2] *Department of Electrical Engineering, University of Oviedo, Gijón, Spain*

Received: 09 February 2023
Reviewed: 17 April 2023
Revised: 08 May 2023
Accepted: 10 June 2023

KEYWORDS:
CubeSat
Earth Observation Missions
Remote Sensing
Space Technology
Satellite Engineering

* Corresponding author
mnasiri@iust.ac.ir
(+9821) 73225800

ABSTRACT

Background and Objectives: Remote sensing includes collecting information about the physical, chemical and biological characteristics of targets on the surface of the earth. In the last decade, Cube Satellites (CubeSats) have been transformed from pure educational tools to standard and inexpensive platforms for technology demonstration and placement of scientific-research payloads in Earth's orbit. Cubesat is a type of Nanosatellite consisting of cube-shaped units measuring 10×10×10 cm^3 and weighing around 1.300 kg. The use of Nanotechnology for miniaturization of space-quality electronic components, cost and time reduction for the development of technologies related to the construction of satellite bus, and the possibility of placing a constellation of Cubesats in orbit with only one launch are among the advantages that companies and It has encouraged space organizations to design and build such satellites.

Methods: In this study, the technical characteristics, capabilities, applications and limitations of Cubesats for earth observation missions are reviewed, so that by evaluating these missions, a clear perspective can be imagined for the future of remote sensing applications for our country. In the beginning, a report on the development and new missions of spacecrafts of space organizations, universities and private companies is presented. After a comprehensive review on the capabilities of the Cubesats base and its potential limitations and effects on earth observation missions, the applications of the Cubesats are discussed. Finally, the results are compared with the technical requirements of earth observation missions and the capability of Cubesats satellites to perform these missions is evaluated. Thus, the possibility of carrying out several earth observation missions by Cubesats satellites has been identified, which are potentially compatible with the capabilities of this type of satellites.

Findings: Cubesats constellation transfer a large volume of satellite images to the ground stations, which produce remote sensing big data and therefore requires the use of artificial intelligence to calculate, process and store them. Low price, small dimensions, manufacturing and development cycle in a short time and reducing the revisit time are one of the most important advantages of Cubesats, which have enabled the monitoring of natural hazards and continuous monitoring of the environment. In addition to the simple architecture and the reduction of the development and launch costs of spacecraft, the need for less investment has made it possible for private companies and universities to participate in space missions. Unlike to the strengths of the Earth observation satellite constellations, we can mention the low radiometric resolution, the reduction of the signal-to-noise ratio and, as a result, the reduction of image quality in non-solar orbits, low spectral resolution and dependence on satellite and UVA images pointed out as their current weaknesses.

Conclusion: Real-time monitoring of natural disasters, forest fires, and flood mapping is one of the main applications of Cubesats images, which is possible due to high temporal resolution of Cubesats constellations. Also, desertification monitoring, drought monitoring, climate change monitoring and investigating its effects on the reduction of natural glaciers, tracking human activities and their environmental and economic effects, investigating light pollution in cities, expanding cities, estimating housing prices and monitoring marginalization in cities are other applications of Cubesats constellations. Currently, Cubesates images are used as a complement to the satellite images to improve the temporal resolution and to monitor specific areas in a specific time of the day and night.

NUMBER OF REFERENCES	NUMBER OF FIGURES	NUMBER OF TABLES
46	0	1

مقاله مروری

مروری بر ارزیابی عملکرد تاسواره‌ها در مأموریت‌های سنجش از دور

مهدی نصیری سروی*[۱]، هادی مهدی‌پور[۲]

[۱] گروه مهندسی ماهواره، دانشکده فناوری‌های نوین، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران

[۲] گروه مهندسی برق، دانشگاه ابیه‌دو، خیخن، اسپانیا

چکیده

پیشینه و اهداف: سنجش از دور شامل جمع‌آوری اطلاعات در مورد ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی اهداف روی سطح زمین است. در دهه اخیر، تاسواره‌ها (CubeSats) از ابزارهای آموزشی محض به سکوهای استاندارد و ارزان‌قیمت برای نمایش فناوری و قرارگیری محموله‌های علمی- تحقیقاتی در مدار زمین تبدیل شده‌اند. تاسواره، به نوعی از ماهواره‌های کوچک متشکل از واحدهای مکعب شکل در ابعاد ۱۰×۱۰×۱۰ سانتیمتر مکعب و وزنی در حدود ۱/۳ کیلوگرم گفته می‌شود. استفاده از فناوری نانو برای کوچک‌سازی قطعات الکترونیکی با کیفیت فضایی، کاهش هزینه و زمان برای توسعه فناوری‌های مرتبط با ساخت محموله و باس ماهواره و امکان قرارگیری منظومه‌ای از ماهواره‌های تاسواره در مدار تنها با یک پرتاب، ازجمله مزایایی است که شرکت‌ها و سازمان‌های فضایی را نسبت به طراحی و ساخت این‌گونه ماهواره ترغیب نموده است.

روش‌ها: در این مطالعه، به مرور مشخصات فنی، توانایی‌ها، کاربردها و محدودیت‌های تاسواره برای مأموریت‌های مشاهدات زمین پرداخته می‌شود تا با ارزیابی این مأموریت‌ها بتوان چشم‌انداز روشنی برای آینده کاربری‌های سنجش از دوردر کشور، متصور شد. در ابتدا، گزارشی از توسعه و مأموریت‌های جدید تاسواره‌های سازمان‌های فضایی، دانشگاه‌ها و شرکت‌های خصوصی ارائه می‌گردد. پس از مروری جامع با دید سامانه بر توانمندی باس تاسواره و محدودیت‌های بالقوه و اثرات آن بر روی مأموریت‌های مشاهدات زمین، به کاربردهای تاسواره پرداخته می‌شود. درنهایت، این نتایج با الزامات فنی مأموریت‌های مشاهدات زمین مقایسه شده و توانمندی ماهواره‌های تاسواره برای انجام این مأموریت‌ها ارزیابی می‌شود. بر این اساس، امکان انجام چندین مأموریت مشاهدات زمین توسط ماهواره‌های تاسواره شناسایی شده که به‌صورت بالقوه با توانمندی‌های این نوع ماهواره سازگار می‌باشند.

یافته‌ها: منظومه‌های تاسواره، حجم زیادی از تصاویر ماهواره‌ای را به زمین ارسال می‌کنند که خود موجب شکل‌گیری کلان داده سنجش از دوری شده و بنابراین نیازمند به‌کارگیری هوش مصنوعی برای محاسبه، پردازش و ذخیره کلان داده‌ها است. قیمت پایین، ابعاد کوچک، چرخه تولید و توسعه در زمان کوتاه و کاهش زمان دید مجدد، یکی از مهم‌ترین مزایای تاسواره‌ها است که پایش مخاطرات طبیعی و نظارت مستمر بر محیط زیست را میسر کرده است. علاوه بر معماری ساده و کاهش هزینه‌های توسعه و پرتاب تاسواره‌ها، نیاز به سرمایه‌گذاری کمتر نیز، امکان مشارکت شرکت‌های خصوصی و دانشگاه‌ها در مأموریت‌های فضایی را فراهم نموده است. در کنار نقاط قوت منظومه تاسواره‌های مشاهدات زمین، می‌توان به توان تفکیک رادیومتریک پایین، کاهش نسبت سیگنال به نویز و درنتیجه کاهش کیفیت تصویر در مدارات غیرخورشید آهنگ، تفکیک‌پذیری طیفی پایین و وابستگی به تصاویر ماهواره‌های بزرگ و تصاویر پهپادی، به عنوان نقاط ضعف کنونی آن‌ها اشاره کرد.

نتیجه‌گیری: پایش به‌هنگام سوانح طبیعی، آتش‌سوزی جنگل‌ها و طغیان رودخانه‌ها از جمله کاربردهای اصلی تاسواره‌ها می‌باشد که به دلیل توان تفکیک زمانی بالای منظومه‌های تاسواره، این امکان فراهم شده است. همچنین، پایش بیابان‌زایی، پایش خشکسالی، پایش تغییرات اقلیمی و بررسی اثرات آن بر کاهش یخچال‌های طبیعی، ردیابی فعالیت‌های بشر و تأثیرات زیست‌محیطی و اقتصادی آن، بررسی آلودگی نوری شهرها، گسترش شهرها، تخمین قیمت مسکن و پایش حاشیه‌نشینی در شهرهای بزرگ، از دیگر کاربردهای منظومه‌های تاسواره می‌باشد. در حال حاضر، از تصاویر این منظومه‌ها به‌عنوان مکمل تصاویر ماهواره‌های بزرگ برای بهبود توان تفکیک زمانی و رؤیت مناطق خاص در یک محدوده زمانی خاص از شبانه‌روز استفاده می‌شود.

تاریخ دریافت: ۲۰ بهمن ۱۴۰۱
تاریخ داوری: ۲۸ فروردین ۱۴۰۲
تاریخ اصلاح: ۱۸ اردیبهشت ۱۴۰۲
تاریخ پذیرش: ۲۰ خرداد ۱۴۰۲

واژگان کلیدی:
تاسواره
سنجش از دور
فناوری فضایی
مأموریت‌های مشاهدات زمین
مهندسی ماهواره

* نویسنده مسئول
mnasiri@iust.ac.ir
۰۲۱ -۷۳۲۲۵۸۰۰

مقدّمه

اولین ماهواره مشاهدات زمین، ماهواره هواشناسی TIROS-1 بود که در سال ۱۹۶۰ توسط ایالات متحده آمریکا در مدار قرار گرفت [۱]. از آن پس، صدها ماهواره مشاهدات زمین در مدار زمین قرارگرفته‌اند تا بتوانند اطلاعات گران‌بهایی جهت ارتقاء دانش در حوزه‌های مختلف علوم مانند آب‌شناسی، هواشناسی، اقلیم‌شناسی، شیمی جو، اقیانوس‌شناسی، زمین‌شناسی، نقشه‌برداری و غیره، جمع‌آوری کنند [۲]. برتری محسوس سنجنده‌های فضا برد در مقایسه با سنجنده‌های زمین برد یا هوابرد در پوشش جهانی و نیز رزولوشن زمانی بالای داده‌های ماهواره‌ای است. این دو ویژگی کاربردهای فراوانی در پیش‌بینی وضعیت آب و هوا، پایش سوانح طبیعی، مدیریت منابع آب، پایش محصولات کشاورزی و پایش آلودگی دارند. روند مأموریت‌های مشاهدات زمین در طول ۵۰ سال گذشته به مرور تغییر کرده که با توجه به مأموریت هر ماهواره، جرم آن نیز دستخوش تغییر قرار گرفته است. ناسا، در سال ۱۹۹۹ ماهواره TERRA را با جرم ۵۲۰۰ کیلوگرم و سازمان فضایی اروپا در سال ۲۰۰۲ ماهواره Envisat (شامل ۹ محموله) را با جرم ۷۹۰۰ کیلوگرم در مدار زمین قرار دادند. قابلیت اصلی این دو ماهواره، استفاده از تعداد زیادی سنجنده در طول موج‌های مختلف (شامل محدوده‌های طیفی مرئی، مادون قرمز و مایکروویو) بود که موجب می‌شد اغلب داده‌های مورد نیاز برای کاربردهای کشاورزی، سوانح طبیعی، جنگلداری، نقشه‌برداری، زمین‌شناسی و غیره از یک سکو و به صورت هم‌زمان از زمین، اخذ شوند. هدف اصلی این ماهواره‌های سنگین وزن، کاهش هزینه به ازای طراحی، ساخت و پرتاب هر کیلوگرم محموله بود، زیرا برای قرار دادن چندین محموله در فضا، تنها یک‌بار پرتاب ماهواره صورت می‌پذیرفت و همگی از یک باس مشترک استفاده می‌کردند؛ اما در عمل، این کاهش هزینه‌ها به‌طور کامل تحقق نیافت که علت اصلی آن پدیدار شدن مشکلاتی از قبیل ناسازگاری الکترومغناطیسی بین تجهیزات رادیویی و اثر منفی ارتعاشات سکو بر عملکرد سنجنده‌های حساس بود. از طرف دیگر، محموله‌هایی که ازنظر فناوری به بلوغ رسیده و آماده قرارگیری در مدار بودند، باید منتظر تکمیل محموله‌هایی می‌شدند که ازلحاظ فناوری به بلوغ نرسیده بودند [۳]. درنتیجه، برای حل مشکلات به وجود آمده در پروژه‌های میلیون دلاری فضایی، افزایش جرم ماهواره‌های سنجش از دور در دهه گذشته متوقف شد و سازمان‌های فضایی، جرم ماهواره‌های مشاهدات زمین خود را به کمتر ۱۰۰۰ کیلوگرم کاهش دادند. بدین ترتیب، از دیدگاه ساخت، زمان‌بندی، بودجه و کاهش ریسک پرتاب، ماهواره‌هایی با یک محموله بسیار ایده آل شدند.

هم‌زمان با کاهش جرم ماهواره‌های مشاهدات زمین، در دهه اخیر از میکروماهواره‌ها برای نمایش فناوری (مانند برنامه PROBA سازمان فضایی اروپا و برنامه‌های Franklin و Edison ناسا) و آموزش (مانند ماهواره ثقل‌سنج دانشگاه استنفورد) اشاره کرد. در دنیای آموزش، تاکنون چندین دانشگاه از نانو ماهواره‌ها برای آموزش عملی دانشجویان در حوزه مهندسی ماهواره استفاده کرده‌اند. این ماهواره‌ها از بعد جرم، اندازه و توانمندی بسیار متنوع بودند تا این‌که دو استاد از دانشگاه‌های استنفورد و کالپُلی به نام‌های جوردی پوگ- ساری و باب توئینگز در سال ۱۹۹۹ یک تاسواره (CubeSat) استاندارد را توسعه دادند [۴].

تاسواره استاندارد یک واحدی (1U) دارای ابعاد ۱۰×۱۰×۱۰ سانتیمتر مکعب، جرم کمتر از ۱۳۳۰ گرم، مصرف توان کمتر از ۱۰ وات و نرخ ارسال داده ۱۲۸ کیلوبایت بر ثانیه می‌باشد. هزینه طراحی، ساخت، تست و پرتاب این ماهواره‌ها بین ۵۰ هزار الی ۲۰۰ هزار دلار می‌باشد که نسبت به قیمت ماهواره‌های بزرگ، بسیار پایین است [۵]. این کاهش هزینه به دانشگاه‌ها و شرکت‌های خصوصی امکان سرمایه‌گذاری و اجرای مأموریت‌های فضایی را می‌دهد [۶]. تاسواره‌ها، دسترسی به فضا را آسان نموده و با درگیر کردن افراد و فرهنگ‌های مختلف، چرخه‌های جدیدی از توسعه فناوری فضایی را به ارمغان آورده است.

هدف این مقاله، بررسی مشخصات فنی، توانایی‌ها، کاربردها و محدودیت‌های تاسواره برای مأموریت‌های سنجش‌ازدور می‌باشد تا با ارزیابی این مأموریت‌ها بتوان چشم‌انداز روشنی برای آینده کاربری‌های سنجش از دور متصور شد. به همین منظور، در بخش دوم مروری اجمالی بر تاسواره‌های با مأموریت مشاهدات زمین خواهیم داشت. سپس، مشخصات باس این تاسواره‌ها، محدودیت‌ها و اثر آن‌ها بر مأموریت‌های مشاهدات زمین در بخش سوم بحث خواهد شد. در بخش چهارم، کاربردهای عمده این تصاویر در سنجش از دور و کمک آن‌ها به توسعه کاربری‌های علوم زمین شرح داده می‌شود. سرانجام، در بخش پنجم، موارد فوق‌الذکر نتیجه‌گیری خواهد شد.

مروری بر تاسواره‌های با مأموریت مشاهدات زمین

در این بخش به بررسی مأموریت‌های مختلف تاسواره‌ها در سنجش از دور پرداخته می‌شود. مشاهدات زمین، به مأموریت‌های سنجش از دوری که محموله‌های تصویربرداری از سطح زمین را در مدار قرار می‌دهند، اطلاق می‌شود. در ابتدا، توسعه تاسواره‌ها در سازمان‌های فضایی مرور می‌گردد و سپس منظومه‌های تاسواره که اغلب توسط شرکت‌های خصوصی طراحی و ساخته شده‌اند، بررسی خواهند شد. در سال‌های اخیر سازمان‌های فضایی در دنیا، برای حمایت از دانشگاه‌ها، آزمایش فناوری‌های نوین و تکمیل نقایص داده‌های ماهواره‌ای موجود، بر روی تاسواره‌ها سرمایه‌گذاری زیادی کرده‌اند. اولین برنامه توسعه تاسواره‌ها در ناسا با برنامه آموزشی ElaNa در سال ۲۰۱۰ آغاز شد که هدف آن، جذب دانشجویان در فعالیت‌های فضایی بود [۷]. از ابتدای این برنامه تاکنون، ۸۵ تاسواره طراحی و ساخته شده است که بخشی از آن‌ها به مدار تزریق شده و بخشی از آن‌ها هنوز در نوبت پرتاب قرار دارند [۸]. با آزمایش فناوری‌های نوظهور در این پروژه‌ها، کمک شایانی به تعریف مأموریت‌های جدید برای تاسواره‌ها در آینده خواهد شد. در کنار این برنامه آموزشی، ناسا در حال توسعه تاسواره انحصاری خود در زمینه سنجش از دور با همکاری دانشگاه کالیفرنیا با نام IPEX است. یکی از

ویژگی‌های اصلی این پروژه، کاهش بیست برابری حجم تصاویر ماهواره‌ای با حفظ رادیانس بازتابی از سطح زمین است [۹].

در کنار ناسا، سازمان فضایی اروپا هم به‌طور فزاینده‌ای در حال توسعه تاسواره‌ها برای کاربردهای مختلف از جمله سنجش از دور است. پیرو و همکاران [۱۰]، یک تاسواره از نوع 3U با نام HYBRIS طراحی کردند و آن را به عنوان یکی از اجزای منظومه کوپرنیک پیشنهاد دادند. این تاسواره، حامل یک سنجنده فرا طیفی با توان تفکیک طیفی ۶ نانومتر (۲۷۰ باند در محدوده طیفی ۴۰۰ تا ۱۰۰۰ نانومتر) است. از مهم‌ترین کاربردهای این تاسواره، می توان به بررسی ذرات اتمسفر، پایش مناطق ساحلی، پایش تغییرات، طبقه‌بندی محصولات کشاورزی، مدیریت جنگل‌ها و زمین‌شناسی اشاره کرد. همچنین، سازمان فضایی اروپا در سال ۲۰۲۰ یک تاسواره از نوع 6U با نام FSSCat برای پایش مناطق قطبی در مدار قرار داده است. این تاسواره، حامل یک سنجنده مایکروویو و یک سنجنده چند طیفی نوری (Optical) با توان تفکیک مکانی ۴۰ متر برای اندازه‌گیری رطوبت خاک، میزان و ضخامت یخ و حوضچه‌های ذوب یخ است [۱۱].

سازمان‌های فضایی آلمان، ایتالیا، سوئد، آرژانتین، اسپانیا، تایلند، پاکستان، ترکیه، ژاپن، کره جنوبی، هند و چین همگی برنامه‌های خود را برای طراحی و ساخت منظومه‌ای از تاسواره‌های سنجش از دوری اعلام کرده‌اند که این امر موجب رشد قابل توجه فناوری فضایی در دنیا خواهد شد. هزینه کم و امکان طراحی آسان‌تر تاسواره‌ها موجب شده است تا سایر کشورهایی که به طور مرسوم در فناوری‌های فضایی فعال نبودند نیز در طراحی و ساخت تاسواره سرمایه‌گذاری کنند [۱۲]. به عنوان مثال در کشورهای در حال توسعه آفریقایی، تاسواره‌های سنجش از دوری مختلفی از جمله XinaBox ThinSat آفریقای جنوبی، ALSAT-1N الجزایر و NARSSCube-2 مصر تا سال ۲۰۲۰ به مدار تزریق شده‌اند. علاوه بر این، کشورهای غنا، کنیا، مراکش، روآندا، سودان و اتیوپی نیز همگی در حال سرمایه‌گذاری بر روی ساخت تاسواره‌های سنجش از دوری ارزان قیمت هستند [۱۳].

در کنار معماری ساده و کاهش هزینه‌های توسعه و پرتاب تاسواره‌ها، نیاز به سرمایه‌گذاری کمتر نیز امکان مشارکت شرکت‌های خصوصی و دانشگاه‌ها در مأموریت‌های فضایی را فراهم نموده است؛ امری که در آغاز عصر فضا، غیر قابل تصور بود. آمار مربوط به موفقیت پرتاب تاسواره‌ها، نشان می‌دهد که رشد سالانه ساخت تاسواره‌ها از سال ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۹ به طور متوسط، ۷۵ درصد بوده است [۶]. بخش خصوصی در صنایع فضایی، در حال توسعه تاسواره‌های جدید است و تلاش می‌کند منظومه‌هایی از صدها یا هزاران تاسواره جهت پایش به‌هنگام زمین (زیر یک دقیقه) در مدار تزریق کند؛ مزیتی که بزرگ‌ترین چالش ماهواره‌های بزرگ بوده است. تاسواره‌های این شرکت‌ها که عمدتاً به صورت پلتفرم‌های آماده هستند، زنجیره‌ای جهانی از خدمات و محصولات فضایی را ایجاد می‌کنند [۱۴]. به‌عنوان مثال، دانشگاه ساری انگلستان، یک پلتفرم تاسواره از نوع 12U به مشتریان ارائه می‌دهد که قادر است محموله‌های تصویربرداری را حمل کند[۱۵]. با این حال، سهم دانشگاه‌ها به‌نسبت شرکت‌های خصوصی در توسعه‌و راه‌اندازی منظومه‌های تاسواره، کمتر بوده است. دانشگاه آلتو در فنلاند تاسواره‌ای به نام Aalto-1، از نوع 3U برای کاربردهای سنجش از دوری طراحی نموده است [۱۶]. دانشگاه نایروبی در کنیا، یک تاسواره از نوع 1U با نام KUNS-PF1 و دانشگاه ووهان در چین، منظومه ای شامل ۸۰ تاسواره از نوع 6U با نام Luojia 1-01 برای تصویربرداری در طول شب طراحی و ساخته‌اند [۱۷].

در سال ۲۰۱۸، اولین تاسواره با محموله راداری جهت اندازه‌گیری پروفایل بارش باران در باند Ka (فرکانس ۳۵.۷۵ گیگاهرتز) به نام RainCube توسط ناسا در مداری با ارتفاع ۴۰۰ کیلومتر و میل ۵۲ درجه قرار گرفت. این تاسواره، با وزن ۱۶ کیلوگرم دارای باس 6U بوده و توان مصرفی محموله آن ۳۵ وات می‌باشد. موفقیت مأموریت RainCube، امکان طراحی و ساخت ماهواره‌های مقرون به صرفه راداری برای پایش اتمسفر را فراهم نمود. همچنین، استفاده از انواع دیگر سنجنده‌های راداری نیز با طراحی و ساخت دو تاسواره MASTR وCIRES فراهم شده است. تاسواره MASTR دارای محموله راداری در باندهای W، Ka و Ku است و مأموریت آن، اندازه‌گیری میزان بارش باران، ارتفاع یخ دریا، عمق برف و سرعت باد می‌باشد[۱۸]. محموله راداری تاسواره CIRESاز نوع SAR بوده و مأموریت اصلی آن، اندازه‌گیری فرونشست‌های سطح زمین با دقت میلی‌متر در باند S (فرکانس ۲/۹ گیگا هرتز) و با توان تفکیک مکانی ۲۵ متر است. این تاسواره، با وزن ۱۲/۹ کیلوگرم دارای باس 6U بوده و توان مصرفی محموله آن ۱۹۲ وات می‌باشد که توسط دو باتری با ظرفیت ۹۶ وات بر ساعت تأمین می‌شود. طول عمر اسمی CIRESدو سال، ارتفاع مداری ۵۰۰ کیلومتر، میل مداری ۵۵ درجه و زمان دید مجدد آن ۱۶ روز می‌باشد. آنتن SAR این تاسواره از نوع چتری با مساحت ۶/۵ مترمربع است که پس از تزریق در مدار، باز می‌شود. اگرچه توان تفکیک این تاسواره در مقایسه با ماهواره‌های بزرگ موجود، بسیار ضعیف است اما به عنوان اولین نمونه عملیاتی، نویدبخش دوره جدیدی از ماهواره‌های SAR خواهد بود. از دیگر نقاط ضعف این تاسواره، می‌توان به محدودیت توان اشاره کرد که تنها تصویربرداری در ۱۰٪ از یک مدار را پوشش می‌دهد. بنابراین، تاسواره CIRES در مدت ۹ دقیقه می‌تواند ۳۸ گیگابایت داده ذخیره‌سازی کند و برای تصویربرداری مجدد باید توان مورد نیاز، مجدد تأمین‌شده و داده‌ها نیز به ایستگاه زمینی، ارسال گردد. بدین ترتیب، برای اخذ تصاویر جدید، این داده‌ها به نزدیک‌ترین ایستگاه زمینی ارسال شود. البته، دقت کنترل وضعیت این تاسواره ۰/۰۵۶ درجه است که برای توان تفکیک فعلی مناسب می‌باشد [۱۹].

از میان شرکت‌های خصوصی فعال در زمینه تاسواره، شرکت آمریکایی Planet، توسعه تاسواره‌های سنجش از دور را در دنیا رهبری کرده است. این شرکت، از سال ۲۰۱۳ بیش از ۳۵۰ تاسواره در مدار زمین قرار داده است. این تاسواره‌ها از نوع 3U، با ارتفاع مداری ۴۷۵ کیلومتر، توان تفکیک مکانی ۳/۷ متر و ۴ باند طیفی مرئی و مادون قرمز نزدیک

هستند. همچنین، هر سین تصویر Planet، مساحتی معادل ۲۴/۶ × ۱۶/۴ کیلومترمربع را پوشش می‌دهد [۲۰]. شرکت پرتغالی TEKEVER اولین تاسواره (از نوع 16U) خود با نام INFANTE به فضا پرتاب کرده است [۲۱]. شرکت آمریکایی Astro Digital، ۶ تاسواره از نوع 6U را با پلتفرم Corvus در سال ۲۰۱۷ در مدار زمین قرار داده است. محموله این تاسواره قادر به تصویربرداری در محدوده مرئی با توان تفکیک مکانی ۲۲ متر است [۲۲]. شرکت اسپانیایی Karten Space در حال توسعه منظومه‌ای از تاسواره‌های 6U، با چهار باند مرئی و مادون قرمز نزدیک و توان تفکیک مکانی ۳ متر و زمان دید مجدد یک روز است. یک شرکت اسپانیایی دیگر با نام Aistech Space، در حال برنامه‌ریزی منظومه‌ای از ۱۵۰ تاسواره است که تا سال ۲۰۲۲ پرتاب خواهد شد [۲۳]. شرکت فنلاندی Reaktor Space، در سال ۲۰۱۸ کوچک‌ترین تصویربردار فراطیفی دنیا را با نام Reaktor Hello World به مدار تزریق کرد. این تاسواره که از نوع 2U، با ۱۰۰ باند طیفی در محدوده ۹۰۰ تا ۱۴۰۰ نانومتر با توان تفکیک مکانی ۲۲ متر می‌باشد، جهت توسعه کاربردهای سنجش از دور در کشاورزی طراحی شده است [۲۴].

جدول ۱: منظومه‌های تجاری تاسواره
Table1: Cubesat comeercial constellations

سازمان/ شرکت (Organization/Company)	تعداد تاسواره (No. of Cubsats)	ابعاد (Size)	اولین پرتاب (First launch)	کشور (Country)
Planet Labs	505	3U	2013	آمریکا America
Astro Digital	25	6U	2014	آمریکا America
Reaktor Space	36	2U	2018	فنلاند Finland
ADA Space	192	---	2018	چین china
Aistech Space	150	---	2018	اسپانیا Spain
Karten Space	14	6U	2019	اسپانیا Spain
SatRevolution	1024	6U	2019	آمریکا- لهستان America - Poland
ZeroG Lab	132	6U	2019	چین china
Hera Systems	50	12U	2019	آمریکا America
Tekever	12	16U	2020	پرتغال Portugal

شرکت آمریکایی- لهستانی SatRevolution قصد دارد با سرمایه‌گذاری اتحادیه اروپا، یک منظومه سنجش از دوری شامل ۱۰۲۴ تاسواره از نوع 6U را تا سال ۲۰۲۶ در مدار قرار دهد. با این تعداد تاسواره، زمان دید مجدد به کمتر از ۳۰ دقیقه، کاهش خواهد یافت. توان تفکیک مکانی تاسواره‌های این منظومه، نیم متر است و از لحاظ باندهای طیفی به دسته‌های ۴ باندی (مرئی و مادون‌قرمز نزدیک)، ۳۲ باندی و ۶۰۰ باندی تقسیم می‌شوند [۲۵]. با سرمایه‌گذاری عظیم کشور چین در صنعت فضایی، شرکت‌های خصوصی این کشور ازجمله ADA Space و ZeroG Lab در حال ساخت منظومه‌های تاسواره سنجش از دور با زمان دید مجدد کمتر از یک ساعت در سطح زمین هستند. پیش‌بینی شده است که توسعه سریع منظومه‌های سنجش از دور چینی با بیش از ۱۳۸۲ تاسواره، منجر به سرمایه‌گذاری ۵ میلیارد دلاری در این حوزه خواهد شد [۲۶]. جدول ۱، مهم‌ترین منظومه‌های تجاری تاسواره در دنیا را نشان می دهد.

الزامات طراحی تاسواره برای انجام مأموریت مشاهدات زمین

در این بخش، به بررسی سامانه تاسواره‌ها جهت انجام مأموریت‌های مشاهدات زمین پرداخته می‌شود. در ادامه، به بررسی زیرسامانه‌های مخابرات، پردازش داده و فرمان، تعیین و کنترل وضعیت، سازه و توان ماهواره در مأموریت‌های مشاهدات زمین پرداخته می‌شود که از جمله اجزای مهم ماهواره هستند. همچنین، محدودیت‌هایشان در زمینه مأموریت‌های مشاهدات زمین مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت.

مخابرات

با مرور تاسواره‌ها، مشخص شد که حدود ۷۵٪ آن‌ها از فرستنده باند UHF با نرخ ارسال داده ۹/۶ کیلو بیت بر ثانیه و ۱۵٪ دیگر از فرستنده باند S با نرخ ارسال داده ۲۵۶ کیلو بیت بر ثانیه استفاده می‌کنند. مابقی ماهواره‌ها نیز از باند VHF بهره می‌برند [۲۷]. همچنین، توان ارسال داده برای این نوع ماهواره‌ها بین ۰/۱ تا ۱ وات متغیر است. محدودیت جدی در تاسواره‌ها برای انجام مأموریت‌های مشاهدات زمین، هم از بعد توان ارسال و هم از بعد بودجه لینک قابل بررسی است.

پردازش داده و فرمان

باس استاندارد در این نوع ماهواره‌ها برای زیرسامانه پردازش داده و فرمان (C&DH) از USB، CAN و I2C و کنترلرهای PIC، MSP و ARM با فرکانس ۸ الی ۳۳ مگا هرتز استفاده می‌کند [۲۸]. همچنین، حجم حافظه استاندارد برای یک تاسواره، بین ۳۲ کیلوبایت تا ۸ مگابایت است که با استفاده از یک حافظه فلش، به ۸ گیگابایت نیز قابل ارتقاء است [۲۷]. با فرض اینکه یک دوربین VGA رنگی بتواند تصاویری با ابعاد ۶۴۰×۴۸۰ پیکسل با رزولوشن رادیومتریکی ۸ بیت اخذ کند، بدون فشرده‌سازی تنها ۱۱۰۰ تصویر در حافظه ۸ گیگابایت، قابل ذخیره‌سازی خواهد بود. با توجه به رابطه خطی میان حافظه ذخیره‌سازی و نرخ ارسال داده، طبق رابطه (۱) خواهیم داشت:

$$Storage(MB) = \frac{60}{8}\Delta T\left(\frac{min}{access}\right)R_b(Mbps) \qquad (۱)$$

که ΔT میانگین دسترسی ماهواره به ایستگاه زمینی برحسب دقیقه، R_b نرخ ارسال داده برحسب مگا بیت بر ثانیه، ضریب ۶۰ برای تبدیل دقیقه به ثانیه و ضریب ۱/۸ برای تبدیل بیت به بایت است.

با توجه به رابطه (۱) اگر ماهواره در مدت زمان ۶ دقیقه در دید ایستگاه زمینی باشد، برای ارسال داده در باند S با نرخ ۲۵۶ کیلو بیت بر ثانیه تنها ۱۱ مگابایت حافظه، مورد نیاز است. به عبارت دیگر، در هر گذر ماهواره تنها یک تصویر رنگی قابل ارسال خواهد بود؛ در حالی‌که حافظه ماهواره قابلیت ذخیره‌سازی بیش از ۱۰۰۰ تصویر را داراست. بنابراین، یکی از نقاط ضعف تاسواره، نرخ ارسال داده بسیار پایین آن است و نه حجم حافظه آن. این در حالی است که در مثال بالا، فقط یک دوربین تصویربرداری بسیار ساده با رزولوشن پایین مورد بررسی قرارگرفته و برای سنجنده‌های تصویربرداری چند طیفی، فرا طیفی و حتی محموله‌های پانکروماتیک با رزولوشن مکانی بالا نرخ ارسال داده باید بیش از ۱۰۰ مگا بیت بر ثانیه باشد که تاسواره‌ها در این زیرسامانه، نقطه ضعف بزرگی دارند.

تعیین و کنترل وضعیت

در این زیرسامانه، به دلیل عدم وجود حسگر ستاره‌ی دقیق با این کلاس وزنی، تنها از تلفیق حسگر خورشید و مغناطیس‌سنج برای تعیین وضعیت استفاده می‌شود که دقت آن به حدود ۲ درجه در تاسواره CanX-2 رسیده است [۲۸]. این در حالی است که دقت حسگر ستاره در راستای دو محور yaw و pitch حدود ۰/۰۱ درجه و در راستای محور roll، کمتر از ۰/۰۵ درجه است [۲۹]. دقت کنترل وضعیت نیز با استفاده از کنترل مغناطیسی فعال و غیرفعال به حدود ۵ درجه رسیده است. هرچند در ماهواره‌های CanX-2 و Beesat ادعا شده است که با استفاده از چرخ‌های عکس‌العملی (با طراحی مینیاتوری) توانسته‌اند دقت کنترل وضعیت را به ۲ درجه برسانند [۲۸]. با توجه به دقت‌های تعیین و کنترل وضعیت تاسواره‌ها، دقت موقعیت مکانی هر پیکسل بر روی زمین برای یک ماهواره در ارتفاع ۵۰۰ کیلومتری حدود ۱۷ کیلومتر در نادیر خواهد بود. این در حالی است که در مأموریت‌های تصویربرداری، این مقدار باید کمتر از ۵۰۰ متر باشد که در این زیرسامانه نیز، تاسواره‌ها محدودیت دارند.

سازه

همان‌طور که در قبل اشاره شد، جرم و ابعاد یک تاسواره در واحد U تعریف می‌شود که تاسواره 1U ماهواره‌ای به جرم ۱۳۳۰ گرم و ابعاد ۱۰×۱۰×۱۰ سانتیمترمکعب می‌باشد. البته پیکربندی‌های 2U و 3U نیز برای برخی از تاسواره‌ها استفاده می‌شود و اخیراً پیکربندی 6U نیز پیشنهاد شده است. از آن‌جا که قیود سازه، شامل محموله نیز خواهد شد، لذا نمی‌توان از محموله‌ای با قطر روزنه بزرگ که طبیعتا ابعاد بزرگ‌تری نیز دارد استفاده کرد. رابطه (۲) نشان‌دهنده رابطه رزولوشن مکانی با قطر روزنه دوربین است.

$$GSD = 2.44\frac{h\lambda}{D} \qquad (۲)$$

که GSD رزولوشن مکانی سنجنده، h ارتفاع ماهواره، λ طول‌موج و D قطر روزنه دوربین است.

ازآن‌جا که دوربین تصویربرداری با قطر روزنه بزرگ‌تر از ۱۰ سانتیمتر بر روی سازه تاسواره قابل نصب نیست، لذا اگر بخواهیم برای مثال در یک محدوده طیفی به مرکزیت طول موج ۰/۵ میکرومتر، تصویربرداری نماییم دستیابی به رزولوشن مکانی بیش از ۶ متر در نادیر امکان‌پذیر نیست. البته در این‌جا، فرض بر دقت بالای زیر سامانه کنترل وضعیت است.

توان

ازآن‌جا که سلول‌های خورشیدی در پربازده‌ترین شرایط به ازای هر مترمربع، ۱۰۰ وات انرژی تولید می‌کنند، بنابراین اگر چهار سطح یک تاسواره دارای پوشش سلول خورشیدی باشد، در حالت ایده‌آل توان تولیدی حداکثر ۴ وات خواهد بود؛ بنابراین با به‌کارگیری باتری‌های لیتیومی، این مقدار توان برای سنجنده‌های فعال از جمله رادارهای تصویربرداری کافی نخواهد بود. همچنین، پایین بودن میزان توان تولیدی، منجر به افت توان تفکیک مکانی در محموله‌های نوری خواهد شد.

کاربردهای تصاویر تاسواره در سنجش از دور

در این بخش، به بررسی مهم‌ترین کاربردهای تصاویر تاسواره در سنجش از دور پرداخته می‌شود. پایش بهنگام سوانح طبیعی، یکی از مهم‌ترین کاربردهای تاسواره در سنجش از دور است زیرا توان تفکیک زمانی منظومه‌های تاسواره بسیار بالاست. پایش سوانح طبیعی و ارائه اطلاعات کلیدی برای کاهش خسارت در مناطق آسیب‌پذیر و نیز ارزیابی خسارات برای شرکت‌های بیمه در کشور برزیل بسیار کارآمد بوده است [۳۰]. هرچند، به دلیل قرارگیری این تاسواره‌ها در میل‌های مداری مختلف، نیاز بوده است تا با یک روش پیش‌پردازشی کارآمد، کیفیت رادیومتریکی تصاویر یکسان گردد تا بتوان با استفاده از الگوریتم‌های آشکارسازی تغییرات و مقایسه تصاویر چند زمانه، میزان خسارت را به‌صورت دقیق محاسبه کرد [۳۱]. همچنین، پایش بیابان‌زایی، آتش‌سوزی جنگل‌ها، طغیان رودخانه‌ها و پایش خشکسالی از جمله کاربردهای تصاویر تاسواره در آفریقا بوده است [۳۲]. با هدف پایش منابع آب شیرین در آفریقا، منظومه‌ای شامل چهار تاسواره از نوع 2U که حامل سنجنده فراطیفی با توان تفکیک ۱۰ تا ۳۰ نانومتر در محدوده ۵۰۰ تا ۹۰۰ نانومتر می‌باشد، پیشنهاد شده است. توان تفکیک مکانی این تاسواره، ۲۵۰ متر و زمان دید مجدد آن کمتر از ۳ روز است [۳۳].

برای پایش تغییرات اقلیمی و بررسی اثرات آن بر کاهش یخچال‌های طبیعی، چین یک تاسواره با نام STU-2A، از نوع 3U با توان تفکیک ۹۴ متر ساخته است. از تصاویر شب تاسواره Luojia 1-01 برای ردیابی فعالیت‌های بشر و تأثیرات زیست‌محیطی و اقتصادی آن، بررسی آلودگی نوری شهرها، گسترش شهرها، تخمین قیمت مسکن و پایش حاشیه‌نشینی در شهرهای بزرگ استفاده می‌شود [۳۴]. همچنین، تاسواره آلمانی TUBIN جهت آشکارسازی آتش‌سوزی جنگل‌ها طراحی و

ساخته شده است. این تاسواره حامل یک سنجنده مادون قرمز حرارتی و یک دوربین مرئی است. تاسواره nSight-1 با توان تفکیک مکانی ۳۰ متر و عرض‌گذر ۶۴ کیلومتر، توسط یک شرکت آفریقای جنوبی توسعه افته است و هدف آن، پایش منابع طبیعی آفریقا می‌باشد [۳۵].

با وجود تاسواره‌های متعدد در مدار زمین، اما بیشتر تحقیقات سنجش از دوری مربوط به تصاویر منظومه Planet هستند. تاکنون بیش از ۶۰ مقاله در مجلات معتبر بین‌المللی سنجش از دور در مورد توسعه کاربری‌های تصاویر این منظومه به چاپ رسیده است. بیش از یک سوم مقالات مربوط به پوشش‌های گیاهی، نیمی از مقالات مربوط به سوانح طبیعی (رانش زمین، زلزله، پایش آتش‌فشان، ارزیابی خسارات ناشی از طوفان و آتش‌سوزی)، اقیانوس‌شناسی و منابع آب و مابقی نیز مربوط به مدل‌سازی سه‌بعدی زمین، تولید نقشه‌های پوشش اراضی و زمین‌شناسی بوده است. به‌کارگیری تاسواره‌ها جهت پایش پوشش‌های گیاهی بسیار امیدوارکننده بوده است؛ به‌ویژه، در حوزه کشاورزی دقیق و پایش محیط‌زیست. ترکیب اطلاعات لندست و Planet یکی از بهترین روش‌های پیشنهادی برای تخمین میزان مصرف آب در بخش کشاورزی بوده که اطلاعات ارزشمندی برای مدیریت آب محسوب می‌گردد [۳۶]. همچنین، با ادغام تصاویر تاسواره و تصاویر پهپادی، دقت تمایز محصول برنج سالم از آفت‌زده نسبت به تصاویر لندست تا ۱۰ درصد افزایش یافته است که کارآیی بالای تصاویر Planet را نشان می‌دهد [۳۷]. مطالعه صورت گرفته در ایالت ریوگراند دوسول در کشور برزیل نشان داد که شاخص‌های پوشش گیاهی NDVI و EVI مهم‌ترین پیش‌بینی کننده‌های عملکرد محصول (با دقت بیش از ۷۰٪) با استفاده از تصاویر تاسواره هستند [۳۸].

نتایج تحقیقات، نشان داده است که تصاویر تاسواره برای مطالعه طغیان رودخانه‌ها نیز مفید هستند. کولی و همکاران [۳۹] با مقایسه شاخص NDWI مستخرج از تصاویر تاسواره و تصویرWorldview-2، الگوهای طغیان را در رودخانه یوکان در آلاسکا مطالعه کردند. نتایج نشان داد که علیرغم توان تفکیک مکانی و رادیومتریکی بالاتر تصویر Worldview-2 نسبت به تصویر Planet، نتایج بیش از ۹۹٪ همبستگی دارد که نشان از موفقیت تصاویر تاسواره در این زمینه است. یکی دیگر از کاربردهای جدید تصاویر تاسواره، تخمین سرعت آب رودخانه در مناطق سردسیر است. کاب و همکاران [۴۰] حرکت یخ را با استفاده از تصاویر سری زمانی Planet ردیابی کردند. همچنین، از این تصاویر برای پایش ذرات معلق آب در خلیج سانفرانسیسکو استفاده شده است [۴۱]. پورسانیدیس و همکاران [۴۲] از تصاویر Planet برای تهیه نقشه‌های عمق‌سنجی در سواحل جزیره کرت در یونان استفاده کردند. مقایسه نتایج با اطلاعات هیدروگرافی منطقه نشان داد که تا عمق ۱۰ متر (به دلیل زلال بودن آب)، خطای اطلاعات استخراج‌شده از تصاویر تاسواره کمتر از ۳۰ سانتیمتر بوده است. اما با افزایش عمق به ۲۵ متر، میزان خطا به ۱۵۸ سانتیمتر افزایشافته است. این تحقیق، کاربردی بودن تصاویر تاسواره در تهیه نقشه مناطق کم‌عمق را ثابت کرده است.

از تصاویر تاسواره برای آشکارسازی لکه نفتی در سواحل کویت استفاده شده که دقت بالای ۸۰٪ به همراه داشته است [۴۳]. همچنین، پایش فعالیت‌های آتش‌فشانی در آتش‌فشان فوئگو در گواتمالا (یکی از فعال‌ترین آتش‌فشان‌های جهان) با استفاده از تصاویر Planet انجام‌گرفته است، زیرا استفاده از منظومه تاسواره با توان تفکیک زمانی بالا، پایش ابرهای خاکستر و جریان گدازه‌ها را پیش، حین و پس از فوران میسر نموده است [۴۴]. اسنر و همکاران (۲۰۱۷) از تصاویر تاسواره برای پایش صخره‌های مرجانی در دریای چین جنوبی استفاده کردند. دلیل اصلی استفاده از تصاویر Planet، عدم دسترسی به تصاویر بدون پوشش ابر لندست در آن بازه زمانی بود، اما نتایج این تحقیق نشان داد که دقت تصاویر Planet برای طبقه‌بندی صخره‌های مرجانی بسیار مطلوب می‌باشد، زیرا این تصاویر علاوه بر توان تفکیک زمانی بالا، توان تفکیک مکانی مطلوبی نیز برای این کاربرد داشته‌اند [۴۵]. غفار [۴۶] از تصاویر Planet یک منطقه کوهستانی در پاکستان برای تولید مدل ارتفاعی رقومی استفاده کرد. نتایج نشان داد که امکان تولید نقشه توپوگرافی با دقت ارتفاعی ۴ متر از این تصاویر، میسر است که می‌توان از آن‌ها برای پایش بهمن و رانش زمین استفاده کرد.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق، ابتدا به مرور وضعیت گذشته و جاری تاسواره‌ها پرداخته شد و در ادامه، الزامات طراحی یک سامانه تاسواره در مأموریت‌های مشاهدات زمین، مورد ارزیابی قرار گرفت. سپس، کاربرد منظومه‌های تاسواره در سنجش از دور و مزایا و محدودیت‌های آن‌ها در سنجش از دور، مورد بحث قرار گرفت. قیمت پایین، ابعاد کوچک، چرخه تولید و توسعه در زمان کوتاه و کاهش زمان دید مجدد، یکی از مهم‌ترین مزایای تاسواره‌ها است که پایش مخاطرات طبیعی و نظارت مستمر بر محیط زیست را میسر کرده است. منظومه‌های تاسواره، حجم زیادی از تصاویر ماهواره‌ای را به زمین ارسال می‌کنند که خود موجب شکل‌گیری کلان داده سنجش از دوری شده و بنابراین، به روش‌های جدیدی برای محاسبه، پردازش و ذخیره داده‌ها نیاز است. علیرغم رشد روزافزون منظومه‌های تاسواره، هزینه‌های خرید این تصاویر، کاربرد آن‌ها را محدود کرده است. از این رو، به دلیل رایگان بودن و کیفیت بهتر، تصاویر ماهواره‌ای لندست و سنتینل همچنان در بین کاربران محبوب هستند. بدین ترتیب، در حال حاضر منظومه‌های تاسواره به‌عنوان مکمل ماهواره‌های بزرگ استفاده می‌شوند؛ به‌ویژه، برای کاهش توان تفکیک زمانی و رؤیت مناطق خاص در یک محدوده خاص از شبانه‌روز. هرچند توسعه این منظومه‌ها، احتمال برخورد بین ماهواره‌ها را افزایش داده است که خود سبب تولید مقادیر زیادی از زباله‌های فضایی می‌شود. در کنار ویژگی‌های ارزنده تصاویر تاسواره، می‌توان به نقاط ضعف آن‌ها نیز اشاره کرد، ازجمله: ۱) سنجنده‌های موجود در تاسواره‌ها دارای توان تفکیک رادیومتریک پایین (حساسیت کم نسبت به انرژی بازتابی از سطح زمین) هستند؛ بنابراین در مأموریت‌هایی که نیاز به حساسیت رادیومتریکی

بالایی هست (مانند پایش حرارت سطح اقیانوس‌ها و پایش کیفیت آب)، استفاده از تاسواره، یک چالش عمده می‌باشد. ۲) تزریق منظومه‌های تاسواره به مدارهای غیر خورشید آهنگ، سبب کاهش نسبت سیگنال به نویز و در نتیجه کاهش کیفیت تصاویر می‌گردد. همچنین، به دلیل یکسان نبودن شرایط نوردهی، تحلیل سری زمانی تصاویر یک منطقه و نیز آشکارسازی تغییرات دشوار است. ۳) تفکیک‌پذیری طیفی پایین (محدود بودن باندهای طیفی به مرئی و مادون‌قرمز نزدیک)، امکان تمایز بین ابر، برف، یخ و آب را محدود می‌کند. ۴) هرچند استفاده از روش‌های ادغام برای افزایش کیفیت مکانی، رادیومتریکی و طیفی تصاویر تاسواره استفاده شده است اما وابستگی آن‌ها به سایر تصاویر ماهواره‌ای و پهپادی جهت توسعه کاربری‌ها، موجب می‌گردد تا در مناطقی که با فقدان داده سنجش از دور مواجه هستیم، همچنان این نقص یک چالش بزرگ باشد.

مشارکت نویسندگان

در این مقاله، نویسندگان به نسبت سهم برابر مشارکت داشته‌اند.

تشکر و قدردانی

به‌دینوسیله از ریاست محترم سازمان فضایی که ما را در انجام این تحقیق یاری کردند، صمیمانه تشکر می‌کنیم.

تعارض منافع

هیچگونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

منابع و مآخذ

[1] Lynch P, Reid JS, Westphal DL, Zhang J, Hogan TF, Hyer EJ, et al. An 11-year global gridded aerosol optical thickness reanalysis (v1.0) for atmospheric and climate sciences. *Geosci Model Dev*. 2016; 9(4): 1489–522.

[2] kramer HJ. Observation of the Earth and its Environment. Berlin: Springer; 2002.

[3] Lowe CJ, MacDonald M. Rapid model-based inter-disciplinary design of a CubeSat mission. *Acta Astronaut*. 2014; 105(1): 321–32.

[4] Tsitas SR, Kingston J. 6U CubeSat commercial applications. *Aeronaut J*. 2012; 116(1176): 189–98.

[5] Bouwmeester J, Guo J. Survey of worldwide pico- and nanosatellite missions, distributions and subsystem technology. *Acta Astronaut*. 2010; 67(7–8): 854–62.

[6] Villela T, Costa CA, Brandão AM, Bueno FT, Leonardi R. Towards the thousandth CubeSat: A statistical overview. Vol. *International Journal of Aerospace Engineering*. 2019; 5063145.

[7] Crusan J, Galica C. NASA's CubeSat Launch Initiative: Enabling broad access to space. Acta Astronaut. 2019; 157: 51–60.

[8] Camps A. Nanosatellites and Applications to Commercial and Scientific Missions. Satellites Missions and Technologies for Geosciences. IntechOpen; 2020.

[9] Doubleday J, Chien S, Norton C, Wagstaff K, Thompson DR, Bellardo J, et al. Autonomy for remote sensing - Experiences from the IPEX CubeSat. International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS): 2015 July 26-31: Milan, Italy.

[10] Morcillo-Pallarés P, Rivera-Caicedo JP, Belda S, De Grave C, Burriel H, Moreno J, et al. Quantifying the robustness of vegetation indices through global sensitivity analysis of homogeneous and forest leaf-canopy radiative transfer models. Remote Sens. 2019; 11(20): 2418.

[11] Camps A, Golkar A, Gutierrez A, Ruiz De Azua JA, Munoz-Martin JF, Fernandez L, et al. FSSCAT, the 2017 copernicus masters' "ESA sentinel small satellite challenge" winner: A federated polar and soil moisture tandem mission based on 6U Cubesats. International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS): 2018 July 22-27: Valencia, Spain.

[12] Yaglioglu B, Kose S, Atas O, Tekinalp O, Kahraman D, Suer M. A multi-national multi-institutional educaiton framework: APSCO SSS-2B CubeSat project. 9th International Conference on Recent Advances in Space Technologies (RAST): 2019 June 11-14: Istanbul, Turkey.

[13] Woldai T. The status of Earth Observation (EO) & Geo-Information Sciences in Africa–trends and challenges. *Geo-Spatial Inf Sci*. 2020; 23(1): 107–23.

[14] Denis G, Claverie A, Pasco X, Darnis JP, de Maupeou B, Lafaye M, et al. Towards disruptions in Earth observation? New Earth Observation systems and markets evolution: Possible scenarios and impacts. *Acta Astronaut*. 2017; 137: 415–33.

[15] Da Silva Curiel A, Cawthorne A, Sweeting M. A low cost video and still imaging constellation for high temporal coverage. 36th Asian Conference on Remote Sensing: 2015 October 19-23: Quezon City, Philippines.

[16] Niemela P, Praks J, Riwanto B, Kestila A, Näsila A, Jovanovic N, et al. Aalto-1 satellite first months in orbit. 4th IAA Conference on University Satellite Missions and CubeSat Workshop: 2017 December 04-07: Rome, Italy.

[17] Liu L, Zhou H, Lan M, Wang Z. Linking Luojia 1-01 nightlight imagery to urban crime. *Appl Geogr*. 2020; 125: 102267.

[18] Peral E, Tanelli S, Haddad Z, Sy O, Stephens G, Im E. Raincube: A proposed constellation of precipitation profiling radars in CubeSat. International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS): 2015 July 26-31: Milan, Italy.

[32] Kameche M, Benzeniar H, Benbouzid AB, Amri R, Bouanani N. Disaster monitoring constellation using nanosatellites. *J Aerosp Technol Manag*. 2014; 6(1): 93–100.

[33] Antonini K, Langer M, Farid A, Walter U. SWEET CubeSat – Water detection and water quality monitoring for the 21st century. *Acta Astronaut*. 2017; 140: 10–17.

[34] Wang X, Zhou T, Tao F, Zang F. Correlation analysis between UBD and LST in Hefei, China, using Luojia1-01 night-time light imagery. *Appl Sci*. 2019; 9(23): 5224.

[35] Mhangara P, Mapurisa W, Mudau N. Image interpretability of nSight-1 nanosatellite imagery for remote sensing applications. *Aerospace*. 2020; 7(2): 19.

[36] Aragon B, Houborg R, Tu K, Fisher JB, McCabe M. Cubesats enable high spatiotemporal retrievals of crop-water use for precision agriculture. *Remote Sens*. 2018; 10(12): 1867.

[37] Shi Y, Huang W, Ye H, Ruan C, Xing N, Geng Y, et al. Partial least square discriminant analysis based on normalized two-stage vegetation indices for mapping damage from rice diseases using planetscope datasets. *Sensors*. 2018; 18(6): 1901.

[38] Breunig FM, Galvão LS, Dalagnol R, Dauve CE, Parraga A, Santi AL, et al. Delineation of management zones in agricultural fields using cover–crop biomass estimates from PlanetScope data. *Int J Appl Earth Obs Geoinf*. 2020; 85: 102004.

[39] Cooley SW, Smith LC, Stepan L, Mascaro J. Tracking dynamic northern surface water changes with high-frequency planet CubeSat imagery. *Remote Sens*. 2017; 9(12): 1306.

[40] Kääb A, Altena B, Mascaro J. River-ice and water velocities using the Planet optical cubesat constellation. *Hydrol Earth Syst Sci*. 2019; 23(10): 4233–4247.

[41] Vanhellemont Q. Daily metre-scale mapping of water turbidity using CubeSat imagery. *Opt Express*. 2019; 27(20): A1372–A1399.

[42] Poursanidis D, Traganos D, Chrysoulakis N, Reinartz P. Cubesats allow high spatiotemporal estimates of satellite-derived bathymetry. *Remote Sens*. 2019; 11(11): 1299.

[43] Park SH, Jung HS, Lee MJ, Lee WJ, Choi MJ. Oil spill detection from planetscope satellite image: Application to oil spill accident near ras Al Zour Area, Kuwait in August 2017. *J Coast Res*. 2019; 90(sp1): 251–260.

[44] Aldeghi A, Carn S, Escobar-Wolf R, Groppelli G. Volcano monitoring from space using high-cadence planet CubeSat images applied to Fuego volcano, Guatemala. *Remote Sens*. 2019; 11(18): 2151.

[45] Asner GP, Martin RE, Mascaro J. Coral reef atoll assessment in the South China Sea using Planet Dove satellites. *Remote Sens Ecol Conserv*. 2017; 3(2): 57–65.

[46] Ghuffar S. DEM generation from multi satellite Planetscope imagery. *Remote Sens*. 2018; 10(9): 1462.

[19] Peral E, Im E, Wye L, Lee S, Tanelli S, Rahmat-Samii Y, et al. Radar Technologies for Earth Remote Sensing from CubeSat Platforms. *Proc IEEE*. 2018; 106(3): 404–418.

[20] Li J, Knapp DE, Schill SR, Roelfsema C, Phinn S, Silman M, et al. Adaptive bathymetry estimation for shallow coastal waters using Planet Dove satellites. *Remote Sens Environ*. 2019; 232: 111302.

[21] Castelão I, Andrade JM, Ferreira JP, Campana M, Rodrigues P, Cunha F V. New small SAR-enabled satellite concept to support early warning for fast-developing events. International Astronautical Congress (IAC): 2019 October 21-25: Washington, D.C., USA.

[22] Chris M, Sundkvist DJ, Abiad R, Badman ST, Bale SD, Maruca B, et al. CURIE: Low Frequency Radio Interferometry from Space. AGU Fall Meeting: 2022 December 12-16: Chicago, USA.

[23] Laskar MR, Bhattacharjee R, Giri MS, Bhattacharya P. Weather Forecasting Using Arduino Based Cube-Sat. *Procedia Computer Science*. 2016; 89: 320–323.

[24] Björklund TA, Mikkonen M, Mattila P, van der Marel F. Expanding entrepreneurial solution spaces in times of crisis: Business model experimentation amongst packaged food and beverage ventures. J Bus Ventur Insights. 2020; 14: e00197.

[25] Bush A, Sollmann R, Wilting A, Bohmann K, Cole B, Balzter H, et al. Connecting Earth observation to high-throughput biodiversity data. *Nature Ecology and Evolution*. 2017; 1: 0176.

[26] Wang B, Liu Y, Zhou Y, Wen Z. Emerging nanogenerator technology in China: A review and forecast using integrating bibliometrics, patent analysis and technology roadmapping methods. *Nano Energy*. 2018; 46: 322–330.

[27] Toorian A, Diaz K, Lee S. The CubeSat approach to space access. IEEE Aerospace Conference: 2008 March 01-08: Big Sky, MT, USA.

[28] Shah A, Sarda K, Grant C, Eagleson S, Kekez D, Zee RE. Canadian advanced nanospace experiment 2 orbit operations: One year of pushing the nanosatellite performance envelope. 60th International Astronautical Congress: 2009 October 12-16, Daejeon, Republic of Korea.

[29] Yin H, Yan Y, Song X, Yang Y. Compressive measurement and feature reconstruction method for autonomous star trackers. *Opt Laser Technol*. 2016; 86: 103-114.

[30] Santilli G, Vendittozzi C, Cappelletti C, Battistini S, Gessini P. CubeSat constellations for disaster management in remote areas. *Acta Astronaut*. 2018; 145: 11–17.

[31] Shendryk Y, Rist Y, Ticehurst C, Thorburn P. Deep learning for multi-modal classification of cloud, shadow and land cover scenes in PlanetScope and Sentinel-2 imagery. *ISPRS J Photogramm Remote Sens*. 2019; 157: 124–136.

معرفی نویسندگان

AUTHOR(S) BIOSKETCHES

مهدی نصیری سروی استادیار دانشکده فناوری‌های نوین دانشگاه علم و صنعت می‌باشند. ایشان مدرک کارشناسی مهندسی برق- کنترل را در سال ۱۳۷۶ از دانشگاه صنعتی اصفهان و مدرک کارشناسی ارشد مهندسی برق- کنترل را در سال ۱۳۸۰ از دانشگاه علم و صنعت دریافت نمودند. در سال ۱۳۹۲ موفق به اخذ مدرک دکتری تخصصی در رشته مهندسی برق- الکترونیک گردیدند. ایشان به عنوان مدیر صنعت سامانه‌های فضایی در طراحی، ساخت و تست ماهواره ملی امید همکاری داشته‌اند. دبیری همایش "سنجش از دور و توسعه پایدار" با محوریت ماهواره سینا-۱ اولین ماهواره ایرانی پرتاب شده به فضا در سال ۱۳۸۴، کسب رتبه دوم جشنواره خوارزمی در سال ۱۳۹۴ و چاپ چندین عنوان مقاله علمی در حوزه ماهواره‌های سنجش از دور از جمله فعالیت‌های پژوهشی ایشان می‌باشد. زمینه‌های تخصصی ایشان عبارتند از: مهندسی سیستم ماهواره، تعیین و کنترل وضعیت ماهواره و مدیریت پروژه ماهواره.

Nasiri Sarvi, M. Assistant Professor at the Department of Satellite Engineering, School of Advanced Technologies, Iran University of Science & Technology, Tehran, Iran

mnasiri@iust.ac.ir

هادی مهدی‌پور دارای مدرک دکتری تخصصی مهندسی برق (گرایش مخابرات- سیستم) از دانشگاه فردوسی مشهد می‌باشد. پس از ۷ سال فعالیت در صنعت، به مدت ۲ سال از سال ۱۳۹۴ تا ۱۳۹۶ به عنوان استادیار در گروه مهندسی الکترونیک و مخابرات دریایی دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر و سپس تا سال ۱۳۹۹ با همین عنوان در دانشگاه صنعتی اسفراین مشغول به فعالیت بودند. ایشان از سال ۱۴۰۰ تاکنون به عنوان پژوهشگر پسادکترا در دانشگاه کارلوس سوم مادرید و سپس دانشگاه ابیه‌دو خیخون در کشور اسپانیا مشغول به کار هستند. ایشان تا کنون موفق به چاپ بیش از ۳۰ مقاله در مجلات و کنفرانس‌های معتبر بین المللی شده‌اند. زمینه‌های تخصصی ایشان عبارتند از: هوش مصنوعی، پردازش سیگنال، پردازش تصویر، مخابرات بی‌سیم، کاربرد یادگیری ماشین و هوش مصنوعی در بیوانفورماتیک، کشاورزی و سنجش از دور.

Mahdipour, H. Postdoctoral researcher at the Department of Electrical Engineering, University of Oviedo, Gijón, Spain

mahdipourhadi@uniovi.es

Citation (Vancouver): Nasiri Sarvi M, Mahdipour H. [Performance Evaluation of CubeSats for Remote Sensing Missions: A Review]. *J. RS. GEOINF. RES. 2023; 1(1): 31-40*

https://doi.org/10.22061/jrsgr.2022.1947

COPYRIGHTS

© 2023 The Author(s). This is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)