J. RS. GEOINF. RES. 1(2): 205-216, Summer & Autumn 2023

Journal of Remote Sensing and Geoinformation Research
(JRSGR)
Homepage: jrsgr.sru.ac.ir

Review Paper

Sentinel Satellites: Revolutionizing Earth Observation for Science and Sustainability

M. Abolghasemi

Department of Electrical and Computer Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

Received: 09 July 2023
Reviewed: 11 August 2023
Revised: 06 September 2023
Accepted: 01 October 2023

KEYWORDS:
Sentinel Satellites
Earth Observation
Copernicus Program
Environmental Monitoring
Remote Sensing
Aeroscope Sensors

* Corresponding author
mo_abolghasemi@mut.ac.ir
(+98913) 3319628

ABSTRACT

Background and Objectives: Earth has a complex ecosystem that is affected by natural processes and human activities, and understanding these processes is a real necessity. Environmental changes, from climate change to the reduction of natural resources, affect human life, economies, and the well-being of future generations. Therefore, the need for comprehensive Earth observation has never been more critical. To address this need, the Copernicus program was created by the European Space Agency in the early 2000s. The goal of this program was to create an operational system for earth monitoring with open access to high quality satellite data. The Sentinel satellites, as the core of the Copernicus program, is one of the symbols of humanity's progress in earth observation and environmental monitoring. This research examines the Sentinel satellites and shows the importance, basic principles and unique features of each of them. Sentinel satellites are unique operational platforms compared to the satellites of the previous generation.

Methods: In this paper, the main framework of the Copernicus program, such as open access to satellite data, global coverage, operational stability, diverse sensors, and the framework of global cooperation, which is of great help to researchers, policymakers, and other users of satellite data, has been evaluated. The Sentinel satellites includes several satellites that acquire images from the earth in different spectral ranges, with global coverage and different viewing times. These satellites have operational stability and new generations of satellites are developed and launched to replace older satellites. Each satellite is equipped with special sensors according to its mission goals and makes it possible to monitor the land, oceans and atmosphere with the best possible tools from space.

Findings: The Sentinel-1 satellite, which is equipped with a radar sensor, can image in the C frequency band and different spatial powers from 5 to 40 meters. Also, this satellite is able to take images in any weather conditions and at any hour of the day and night, which is valuable for many applications. The accuracy of Sentinel-1 data is very high in monitoring changes in the shape of the earth's surface, crisis management, polar ice observations and ocean monitoring. This vital role in detecting and monitoring land subsidence in urban areas makes it effective in urban planning and helping to prevent crises. On the other hand, the Sentinel-2 satellite with a multispectral sensor provides a powerful tool for Earth observation. By recording data in a wide spectral range in 13 spectral bands from visible to short-wave infrared, this satellite has been able to deepen our understanding of the features of the Earth's surface. The re-viewing time of this satellite has made it possible to monitor crops and evaluate the health of vegetation. Also, the spatial resolution of Sentinel-2 satellite images is an effective factor in urban planning, tree health monitoring, and natural disaster monitoring, such as fire and flood. In addition, the high bandwidth of this satellite helps to efficiently cover large areas and increases its efficiency in environmental monitoring.

Conclusion: The Copernicus program is known for several key principles that have underpinned their success. These principles include open access data, global coverage, operational interoperability, diverse sensors, and a global cooperation framework. The principle of open access has given the assurance to the general users, including researchers, policymakers and commercial companies, that a continuous flow of satellite images will support their activities. The Copernicus program with a system of satellites ensures global coverage with optimal revisit time. The operational continuity of the program has resulted in new generations of satellites being developed and launched to replace older generations, to ensure a continuous flow of data. Each Sentinel satellite is equipped with specific sensors designed for its mission objectives, enabling it to monitor the Earth, oceans, atmosphere, and more. According to the characteristics of the Copernicus program, Sentinel satellites have started a new era of Earth observation and have provided a powerful and versatile tool for monitoring and understanding the Earth's ecosystem.

NUMBER OF TABLES
2

NUMBER OF FIGURES
3

NUMBER OF REFERENCES
34

مقاله مروری

ماهواره‌های سنتینل: انقلاب در مشاهدات زمین برای دانش و توسعه پایدار

مجتبی ابوالقاسمی

گروه مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

چکیده

پیشینه و اهداف: زمین دارای یک اکوسیستم پیچیده است که تحت تأثیر فرآیندهای طبیعی و فعالیت‌های انسانی قرار دارد و درک این فرآیندها یک ضرورت واقعی است. تغییرات محیطی از تغییرات اقلیمی تا کاهش منابع طبیعی، بر زندگی بشر، اقتصادها و رفاه نسل‌های آینده تأثیر می‌گذارد. بنابراین، نیاز به رصد جامع زمین هرگز تا این اندازه حیاتی نبوده است. برای توجه به این ضرورت، برنامه کوپرنیکوس در اوایل دهه ۲۰۰۰ توسط سازمان فضایی اروپا ایجاد شد. هدف این برنامه، ایجاد یک سامانه عملیاتی برای نظارت بر زمین با دسترسی رایگان و آزاد به داده‌های ماهواره‌ای با کیفیت بالا بود. ماهواره‌ای سنتینل، بعنوان هسته اصلی برنامه کوپرنیکوس، یکی از نمادهای پیشرفت بشریت در رصد زمین و پایش محیط زیست است. این مقاله به بررسی ماهواره‌ای سنتینل می‌پردازد و اهمیت، اصول اولیه و ویژگی‌های منحصر به فرد هر یک از ماهواره‌های سنتینل را نشان می‌دهد. ماهواره‌های سنتینل نسبت به ماهواره‌های نسل قبل از خود، به عنوان پلتفرم‌های عملیاتی منحصر به فرد محسوب می‌شوند.

روش‌ها: در این مقاله چارچوب اصلی برنامه کوپرنیکوس، مانند دسترسی آزاد به داده‌های ماهواره‌ای، پوشش جهانی، پایداری عملیاتی، حسگرهای متنوع و چارچوب همکاری جهانی که کمک شایانی به پژوهشگران، سیاست گذاران و سایر بهره برداران داده‌های ماهواره‌ای کرده، مورد ارزیابی قرار گرفته است. مجموعه ماهواره‌ای سنتینل شامل ماهواره‌های متعددی است که تصاویری در محدوده‌های طیفی مختلف، با پوشش جهانی و زمان دید مجددهای مختلف از زمین اخذ می‌کنند. این ماهواره‌ها پایداری عملیاتی دارند و نسل‌های جدیدی از ماهواره‌ها برای جایگزینی ماهواره‌های قدیمی‌تر توسعه می‌یابند و به فضا پرتاب می‌شوند. هر ماهواره با حسگرهای خاص منطبق بر اهداف مأموریتی خود تجهیز شده است و این امکان را فراهم می‌کند که پایش خشکی‌ها، اقیانوس‌ها و جو کره زمین با بهترین ابزارهای ممکن از فضا صورت پذیرد.

یافته‌ها: ماهواره سنتینل-۱ که به حسگر راداری مجهز شده است می‌تواند در باند فرکانسی C و توان‌های مکانی مختلف از ۵ تا ۴۰ متر تصویربرداری کند. همچنین، این ماهواره قادر است در هر شرایط آب و هوایی و در هر ساعت از شبانه و روز تصویربرداری می‌کند که برای بسیاری از کاربردها ارزشمند است. دقت داده‌های سنتینل-۱ در پایش تغییرات شکل سطح زمین، مدیریت بحران، مشاهدات یخ‌های قطبی و پایش اقیانوس‌ها بسیار بالاست. این نقش حیاتی در آشکارسازی و پایش فرونشست زمین در مناطق شهری موجب می‌شود که در برنامه‌ریزی شهری و کمک به پیشگیری از بحران تاثیرگذار باشد. از سوی دیگر، ماهواره سنتینل-۲ با حسگر چندطیفی، ابزار قدرتمندی برای مشاهدات زمین ارائه می‌دهد. با ثبت داده‌ها در یک محدوده طیفی گسترده در ۱۳ باند طیفی از مرئی تا مادون قرمز موج کوتاه، این ماهواره توانسته است درک ما از ویژگی‌های سطح زمین را عمیق تر کند. زمان دید مجدد این ماهواره امکان پایش محصولات زراعی و ارزیابی سلامت پوشش‌های گیاهی را فراهم کرده است. همچنین، توان تفکیک مکانی تصاویر ماهواره سنتینل-۲ در برنامه‌ریزی شهری، پایش سلامت درختان و پایش سوانح طبیعی از جمله مانند آتش‌سوزی و سیل عامل مؤثری است. علاوه بر این، عرض گذر بالای این ماهواره به پوشش کارآمد مناطق وسیع کمک می‌کند و بهره‌وری آن در پایش محیط زیست را افزایش می‌دهد.

نتیجه‌گیری: برنامه کوپرنیکوس به چندین اصل کلیدی مشخص شناخته می‌شود که موفقیت آن‌ها را تضمین کرده است. این اصول شامل دسترسی آزاد به داده‌ها، پوشش جهانی، پیوستگی عملیاتی، حسگرهای متنوع و چارچوب همکاری جهانی است. اصل دسترسی آزاد این اطمینان را به عموم کاربران اعم از پژوهشگران، سیاست‌گذاران و شرکت‌های تجاری داده است که یک جریان پیوسته از تصاویر ماهواره‌ای پشتیبان فعالیت‌های آنها خواهد بود. برنامه کوپرنیکوس با منظومه‌ای از ماهواره‌ها پوشش جهانی با زمان دید مجدد مطلوب را تضمین می‌کند. پیوستگی عملیاتی این برنامه موجب شده است تا نسل‌های جدید از ماهواره‌ها برای جایگزینی نسل‌های قدیمی توسعه داده و پرتاب شوند، تا جریان مستمر داده‌ها به طور

تاریخ دریافت: ۱۸ تیر ۱۴۰۲
تاریخ داوری: ۲۰ مرداد ۱۴۰۲
تاریخ اصلاح: ۱۵ شهریور ۱۴۰۲
تاریخ پذیرش: ۰۹ مهر ۱۴۰۲

واژگان کلیدی:
ماهواره‌های سنتینل
مشاهدات زمین
برنامه کوپرنیکوس
نظارت محیطی
سنجش از راه دور
حسگرهای هوا و فضا

* نویسنده مسئول
mo_abolghasemi@mut.ac.ir
۰۹۱۳- ۳۳۱۹۶۲۸

مداوم تضمین شود. هر ماهواره سنتینل با حسگرهای خاصی که به منظور اهداف مأموریتی خود طراحی شده، تجهیز شده است و این امکان را فراهم می‌کند که زمین، اقیانوس‌ها، جو و موارد دیگر را نظارت کند. باتوجه به ویژگی‌های برنامه کوپرنیکوس، ماهواره‌های سنتینل دوره‌ای جدید از مشاهدات زمین را آغاز کرده‌اند و یک ابزار قدرتمند و چندمنظوره برای پایش و درک اکوسیستم کره‌زمین فراهم آورده‌اند.

مقدّمه

زمین، یک سیستم پیچیده می‌باشد. دینامیک محیطی آن توسط فرآیندهای طبیعی و فعالیت‌های انسانی کنترل نشده و پیچیدگی‌های ساده‌ای را نمی‌پذیرد. درک این دینامیک‌ها یک ضرورت عملی می‌باشد. تغییرات محیطی، از تغییرات آب و هوایی تا استفاده از منابع، بر زندگی ما، اقتصادها و رفاه نسل‌های آینده تأثیر می‌گذارد. بنابراین، نیاز به مشاهده جامع زمین هرگز اهمیت بیشتری نداشته است در پاسخ به این نیاز، سازمان‌های فضایی در سراسر جهان تعداد زیادی ماهواره‌ای برای مشاهده زمین راه‌اندازی کرده‌اند[۱]. این ناقل‌های مداری، با مجموعه‌ای از حسگرها و ابزارها تجهیز شده‌اند و بی‌وقفه داده‌ها را به دست می‌آورند که تصویری زنده از وضعیت سلامت سیاره ما را نشان می‌دهند[۲]. در میان این تشکیل‌های ماهواره‌ای، ماهواره‌های سنتینل که یکی از پایه‌های برنامه کوپرنیکوس هستند، به عنوان نمونه‌هایی از توانایی فناوری و نوآوری علمی برجسته وارد می‌شوند قبل از ورود به جزئیات برنامه ماهواره‌ای سنتینل، ضروری است که مسیر تکاملی ماهواره‌های مشاهده زمین را پیگیری کنیم. این ابزارهای بی‌نظیر علم و دیپلماسی یک تاریخچه غنی دارند که با جهش‌های فناورانه و تغییرات پارادایمی مشخص می‌شود.[۳]

شروع عصر مشاهدات فضایی، با پرتاب موفقیت‌آمیز اسپوتنیک ۱ اتحاد جماهیر شوروی در سال ۱۹۵۷، عرصه جدیدی را برای اکتشافات علمی باز کرد. ایده پرتاب ماهواره‌ها به مدار زمین برای مطالعه سطح، جو و اقیانوس‌های سیاره ما به سرعت شناخته شد. ماهواره‌های اولیه مشاهده زمین، مانند سری ماهواره‌های NASA's Landsat، نخستین دیدگاه‌هایمان از دنیایمان از فضا را ارائه دادند و زمینه‌هایی چون نقشه‌برداری، کشاورزی و جنگل‌داری را انقلابی کردند .[۴] همراه با پیشرفت فناوری، قابلیت‌های ماهواره‌های مشاهده زمین نیز بهبود یافت. معرفی تصویربرداری چندطیفی، رادار بازتفسیری دهانه‌ای (SAR) و حسگرهای هایپرطیفی بازده داده‌ها را گسترش داد[۵]. این انقلاب در حوزه حسگری از دور امکان مشاهده و پایش از تغییرات پوشش اراضی و جریان‌های اقیانوسی تا کیفیت هوا و الگوهای اقلیمی را فراهم کرد. با این وجود، علیرغم این پیشرفت‌ها، دسترسی به داده‌های مشاهده زمین و هزینه‌های مرتبط با آن همچنان یک چالش بود. پرتاب و نگهداری ماهواره‌ها برای بسیاری از کشورها و سازمان‌ها به دلیل هزینه‌های بسیار بالا دسترسی‌پذیر نبود. علاوه بر این، به اشتراک‌گذاری داده و همکاری‌ها به دلیل ملاحظات جغرافیایی اغلب دچار مشکلاتی می‌شد.[۵,۶]

نقطه عطف در تاریخ مشاهدات زمین با پرتاب برنامه کوپرنیکوس اروپا رخ داد. این برنامه که در اوایل دهه ۲۰۰۰ میلادی طراحی شد، هدف ایجاد یک سیستم عملی برای نظارت بر زمین بود و داده‌های محیطی با کیفیت بالا را به صورت رایگان و با دسترسی باز برای مزایای همگان فراهم می‌کرد .[۷] در مرکز برنامه کوپرنیکوس، تشکیل ماهواره‌ای سنتینل قرار دارد. با تعهد به دسترسی به داده و همکاری جهانی، ماهواره‌های سنتینل نمایانگر عصر جدیدی در مشاهدات زمین می‌باشند. به عکس از ماهواره‌های قبلی که عمدتاً تمرکز بر تحقیقات داشتند، سنتینل‌ها ماهواره‌های عملی هستند که به طور مداوم داده‌ها را مشاهده و ارسال می‌کنند تا از تعداد گسترده‌ای از کاربردها پشتیبانی کنند. برنامه کوپرنیکوس و ماهواره‌های سنتینل به چند اصل کلیدی مشخص شناخته می‌شوند:[۸,۹]

دسترسی به داده، برنامه کوپرنیکوس بر اصل دسترسی رایگان و باز به داده‌ها تأسیس شده است. داده‌های حاصل از ماهواره‌های سنتینل برای عموم مردم، پژوهشگران، سیاست‌گذاران و شرکت‌های تجاری در دسترس قرار می‌گیرند، که نوآوری و همکاری را تشویق می‌کند. پوشش جهانی، تشکیل ماهواره‌ای سنتینل شامل چندین ماهواره است که پوشش جهانی با بازدیدهای متفاوت ارائه می‌دهند. این امر اطمینان می‌دهد که هیچ ناحیه‌ای از سیاره بدون نظارت نمی‌ماند[۱۰]. پیوستگی عملیاتی، ماهواره‌های سنتینل با در نظر گرفتن پیوستگی عملیاتی طراحی شده‌اند. نسل‌های جدیدی از ماهواره‌ها توسعه داده شده و پرتاب می‌شوند تا مطمئن شود که یک جریان مداوم از داده فراهم می‌شود. حسگرهای متنوع، هر ماهواره سنتینل با حسگرهای خاصی که به اهداف ماموریتی خود منطبق هستند تجهیز شده اس [۵] ت. این تنوع امکان مانیتورینگ اراضی، اقیانوس‌ها، جو و موارد دیگر را برای این تشکیل فراهم می‌کند. برنامه کوپرنیکوس همکاری بین‌المللی را تشویق می‌کند و اجازه می‌دهد که داده‌های حاصل از ماهواره‌های سنتینل با سیستم‌های مشاهدات زمین دیگر یکپارچه شود، که مفهوم جهانی از سیستم‌های زمین را تقویت می‌کند .[۱۱] برنامه کوپرنیکوس با ماهواره‌های سنتینل در پیش‌زمینه، نمایانگر یک تغییر پارادایم در مشاهدات زمین می‌باشد؛ تغییری از ماموریت‌های تحقیقی گذرا و محدود داده به یک سیستم نظارت جهانی عملی و جامع. شروع به کار ماهواره سنتینل-۱ A در سال ۲۰۱۴ نمایانگر آغاز این سیر تحولی بود و پرتاب ماهواره‌های دیگر سنتینل توانمندی‌های ان را گسترش داد . [۱۰]

ماهواره‌های سنتینل، هر یک با مجموعه منحصر به فردی از ابزار و اهداف ماموریتی، به عنوان نگهبانان زمین عمل می‌کنند و به صورت مداوم داده‌ها را مشاهده و ارائه می‌دهند که در مقابله با چالش‌های جهانی فوری حیاتی هستند. این ماهواره‌ها در دامنه‌های مختلف داده‌ها را دریافت می‌کنند و در محدوده‌های مختلف مدارها فعالیت می‌کنند، از مدار زمین پایین (LEO) تا مدار جیواستاری(GEO) ، و از انواع متنوعی

از حسگرها برای ثبت داده‌ها در حوزه‌های مختلف استفاده می‌کنند . [۱۲]

برنامه ماهواره‌ای سنتینل مجموعه‌ای از ماهواره‌های مشاهده زمین است که برای پوشش یک طیف گسترده از چالش‌های محیطی و اجتماعی طراحی شده‌اند. سنتینل-۱ که به سنسور رادار ترکیبی (SAR) مجهز شده است، در تصویربرداری در همه شرایط آب و هوا و تجزیه و تحلیل تغییرات ارضی برتری دارد[۱۳]. سنتینل-۲ با ابزار چندطیفی خود، تصاویر نوری با وضوح بالا برای طبقه‌بندی پوشش ارضی و نظارت محیطی ارائه می‌دهد. سنتینل-۳ بر روی پارامترهای اقیانوسی تمرکز دارد که شامل دمای سطح دریا و افزایش سطح دریا می‌شود، که برای تحقیقات اقلیمی و مدیریت دریایی بسیار حیاتی است. سنتینل-۴ و سنتینل-۵ P در مانیتورینگ ترکیب جوی تخصص دارند و به ردیابی آلاینده‌ها و گازهای گلخانه‌ای می‌پردازند. این ماهواره‌ها با عملیات در مدارهای متنوع، دقت و وضوح بی‌نظیری ارائه می‌دهند و به عنوان نگهبانان زمین برای نظارت جهانی جامع خدمت می‌کنند .[۱۴,۱۵]

دقت و وضوح ماهواره‌های سنتینل نیز بسیار قابل توجه است. داده‌های SARسنتینل-۱ توانایی دقت زیر سانتی‌متری را دارند که برای نظارت بر تغییرات سطح زمین و تغییرات سطحی بسیار حیاتی است. تصاویر چندطیفی سنتینل-۲ وضوح تا ۱۰ متر را ارائه می‌دهند که تسهیل‌کننده تجزیه و تحلیل جزئیات پوشش ارضی است[۱۶]. ابزارهای سنتینل-۳ اندازه‌گیری‌های سطح دریا را با دقت میلی‌متری ارائه می‌دهند که برای پیگیری دینامیک‌های اقیانوس و افزایش سطح دریا بسیار حیاتی است. داده‌های ترکیب جوی سنتینل-۵ P نیز دقت بسیار بالایی دارند که امکان مانیتورینگ دقیق کیفیت هوا و شناسایی منابع آلاینده را فراهم می‌کند در واقعیت، ماهواره‌های سنتینل نمایانگر تکامل مشاهدات زمین هستند و یک دید جامع، به‌صورت زمان‌واقعی و با دسترسی آزاد به سیستم‌های پیچیده سیاره‌مان ارائه می‌دهند. تفاوت‌های آن‌ها در مدارها، حسگرها، دقت، باندهای طیفی و وضوح، آن‌ها را به عنوان ابزارهای بی‌نیاز در تلاش جهانی برای بهتر درک، مدیریت و حفاظت از محیط و منابع زمین ترسیم می‌کند .[۱۳,۱۷]

هدف این مطالعه، انجام یک تجزیه و تحلیل جامع و مقایسه‌ای از ماهواره‌های مختلف سنتینل در ارتباط با پارامترهای متنوعی است که شامل دقت، قابلیت‌های حسگر، اهداف ماموریت، ویژگی‌های مداری و سطح وضوح می‌شود [۱۸]. با بررسی این جنبه‌ها، این تحقیق سعی دارد تا درکی مفهومی از نقاط قوت منحصر به فرد و انطباق هر ماهواره سنتینل برای نیازهای خاص مشاهدات زمین ارائه دهد. این مطالعه مقایسه‌ای به هدف کمک به پژوهشگران، سیاست‌گذاران و سازمان‌ها در انتخاب ماهواره‌های سنتینل برای نیازهای متنوع در زمینه‌های مشاهدات محیطی و اجتماعی ارائه دهد .[۱۹]

روش تحقیق

این روش‌شناسی رویکردی برای انجام تجزیه و تحلیل مقایسه‌ای از ماهواره‌های مختلف سنتینل در ارتباط با قابلیت‌های حسگری آن‌ها ارائه می‌دهد. هدف از این تجزیه و تحلیل ارزیابی و مقایسه حسگرهای موجود در ماهواره‌های مختلف سنتینل است تا قدرت‌ها و کاربردهای منحصر به فرد آن‌ها را درک کنیم. روش‌شناسی شامل جمع‌آوری داده‌ها، تجزیه و تحلیل داده‌ها و تفسیر آن‌ها می‌شود.

سنتینل-۱

سنتینل-۱، یکی از نقاط عطفی در برنامه ماهواره‌ای سنتینل، در عرصه‌ی مشاهده زمین به موقعتی کلیدی قرار دارد (شکل ۱) . این ماهواره با یک حسگر رادار آپرتور مصنوعی (SAR) تجهیز شده است، یک فناوری پیشرفته که از توان امواج مایکروویو در طیف elektromagnetic بهره می‌برد. حسگرهای SAR در سنتینل-۱ به طور اصولی در باند C حدود ۵.۴ گیگاهرتز عمل می‌کنند و اخیراً در باند L حدود ۱.۲ گیگاهرتز نیز امکاناتی ارائه داده‌اند که تنوع را در مقابله با چالش‌های مشاهده زمین ممکن می‌سازد. یکی از ویژگی‌های برجسته سنتینل-۱، انعطاف‌پذیری چشمگیر آن در زمینه وضوح مکانی است. این ماهواره حالت‌های مختلفی را ارائه می‌دهد که از ۵ متر تا ۴۰ متر می‌رسد، که امکان تنظیم تصاویر بر اساس نیازهای خاص برنامه‌های مختلف را فراهم می‌کند. آیا وظیفه نیاز به جزئیات با وضوح بالا دارد، سنتینل-۱ می‌تواند با ارائه داده‌های مورد نیاز به تنظیمات خاص پاسخ دهد .[۲۰]

شکل ۱: تصویر ماهواره از سنتینل ۱

Fig. 1: Satellite image of Sentinel 1

شاید مهم‌ترین ویژگی متمایز کننده سنتینل-۱ توانایی عکاسی در همه شرایط آب‌وهوایی و حالت شبانه‌روزی آن باشد. به عکس‌برداری بدون توقف این ماهواره حتی در شرایط آب‌وهوایی نیاز به ابرها، باران و حتی تاریکی اجازه می‌دهد. این توانایی باعث می‌شود سنتینل-۱ برای برنامه‌های زمین‌شناسی و مشاهده زمین که نیاز به تصاویر دقیق و بدون وقفه دارند، بسیار ارزشمند باشد. اهداف اصلی ماموریتی سنتینل-۱ برگرداندن تنوعی از وظایف مشاهده زمین است که نشان‌دهنده چندبعدی بودن آن و اهمیت آن است. این ماهواره در پایش تغییر سطح زمین عمده‌ترین داده‌ها را فراهم می‌کند که برای ارزیابی فرسایش زمین و پیگیری تغییرات سطحی در طول زمان ضروری هستند. این قابلیت تاثیرات عمیقی در برنامه‌ریزی شهری، مدیریت زیرساخت‌ها و کاهش خطرات زمین‌شناختی دارد. معادله رادار برای سیستم‌های رادار بسیار مهم است و می‌توان آن را به صورت زیر بیان کرد :[۲۱,۲۲]

$$P_r = \frac{\%}{7} KP_t\lambda^2 \sum A \left(\frac{4\pi}{r}\right)^2 \quad (1)$$

که در آن:

- P_r توان دریافتی است.
- P_t توان ارسالی است.t
- λ طول موج است.
- $\sum A$ مقطع Radar هدف است.
- r فاصله تا هدف است.

در چارچوب مدیریت بحران، سنتینل-۱ نقش بسیار مهمی ایفا می‌کند. توانایی به دست آوردن به سرعت داده‌ها، حتی پس از وقوع فاجعه‌های طبیعی مانند زلزله یا سیل، ارتقاء متاثر با اطلاعات به موقع برای ارزیابی اندازه خسارت و برنامه‌ریزی تلاش‌های امداد و نجات را فراهم می‌سازد .علاوه بر این، سنتینل-۱ به طور معنی‌داری در پایش یخ در مناطق قطبی نقش مهمی ایفا می‌کند. این ماهواره دینامیک‌های لایه‌های یخی و یخچال‌ها را پایش می‌کند و به محققان کمک می‌کند تا واکنش این مؤلفه‌های حیاتی اکوسیستم کره‌ی زمین به تغییرات آب‌وهوایی را پیگیری کنند. قابلیت‌های سنتینل-۱ در زمینه پایش دریا نیز بسیار شگفت‌آور است. این ماهواره قادر به شناسایی و پیگیری کشتی‌ها در دریا است و توظیف وظایفی از قبیل امنیت دریایی، عملیات جستجو و نجات، و پایش محیط زیست را پشتیبانی می‌کند. قابلیت آن برای شناسایی نشت نفتی و فعالیت‌های صید غیرقانونی، به تلاش‌های جهانی برای حفاظت از اقیانوس‌ها و مناطق ساحلی کمک می‌کند .[۲۳] لیست برنامه‌های کاربردی برای سنتینل-۱ به مرور زمان افزایش پیدا می‌کند و محققان و نهادهای مرتبط را در جستجوی راهکارهای نوآورانه برای بهره‌برداری از قابلیت‌های منحصر به فرد آن ترغیب می‌کند. از کشاورزی و جنگل‌داری تا پایش محیط زیست و تحقیقات علمی، تصویربرداری به همه شرایط آب‌وهوایی و دقت آن سنتینل-۱ را به یک ابزار ارزشمند در زمینه مشاهده زمین تبدیل کرده‌است. به اختصار، سنتینل-۱ به عنوان نماینده‌ای از توانایی‌های فناوری و پیشرفت انسان در علم و فناوری، امکان مشاهده دقیق و مقاوم کره‌ی زمین را فراهم می‌کند. حسگر SAR آن با توانایی عمل در شرایط مختلف، داده‌های حیاتی از ارزش استثنایی به ما تحویل می‌دهد و امکان درک، مدیریت و حفاظت از محیط زیست و منابع کره‌ی زمین را بهبود می‌بخشد. سنتینل-۱ تنها یک ماهواره نیست؛ این یک نگهبان بیدار از سیستم‌های پیچیده‌ی زمین است . [۹,۲۰]

سنتینل-۲

سنتینل-۲، یکی دیگر از ستون‌های اصلی برنامه ماهواره‌ای سنتینل، در مشاهدات زمین است. در اساس آن، ابزار چندطیفی (MSI) قرار دارد که مجموعه‌ای از حسگرهای نوری را شامل می‌شود. این حسگرها داده‌ها را در یک دامنه گسترده از ۱۳ باند طیفی جمع‌آوری می‌کنند، از طیف قابل رؤیت تا طیف مادوام کوتاه موج. این ماهواره وضوح مکانی بالایی ارائه می‌دهد که به معنای توانایی عکاسی دقیق از سطح زمین است. سنتینل-۲ سه گزینه وضوح مکانی متمایز را ارائه می‌دهد: ۱۰ متر، ۲۰ متر و ۶۰ متر، که مشاهده‌های خود را به نیازهای مشاهده زمین خاص تطبیق می‌دهد. این انعطاف در وضوح مکانی بسیار ارزشمند است، زیرا به محققان و نهادهای مرتبط اجازه می‌دهد تا سطح دقت مورد نیاز برای برنامه‌های خود را انتخاب کنند .[۲۴,۲۵]

شکل ۲: تصویر ماهواره از سنتینل ۲

Fig. 2: Satellite image of Sentinel 2

زمان بازدید سریع سنتینل-۲، که تنها ۵ روز است، امکان مشاهده مکرر سطوح زمین را فراهم می‌آورد. این زمان بازدید سریع اطمینان می‌دهد که ماهواره به طور مکرر سطوح زمین را مشاهده کند و تغییرات پویا را در زمان وقوع آنها ثبت کند. این ویژگی به ویژه برای برنامه‌هایی که به داده‌های به‌روز نیاز دارند، مانند کشاورزی دقیق که نیاز به اطلاعات به موقع در مورد رشد و سلامت محصولات کشاورزی دارد، حیاتی است . [۲۶] اهداف ماموریتی سنتینل-۲ متنوع و گسترده هستند. این اهداف شامل طبقه‌بندی پوشش زمین، پایش گیاهان، کشاورزی، جنگل‌داری و ارزیابی فاجعه‌های طبیعی می‌شوند، که نمایانگر کاربردهای گسترده این ماهواره هستند. اطلاعات طیفی غنی و وضوح مکانی بالای سنتینل-۲ در وظایفی مانند کشاورزی دقیق، پایش سلامت جنگل و برنامه‌ریزی کاربری اراضی اثرگذار هستند .[۲۷,۲۸]

$$NDVI = (NIR - Red) / (NIR + Red) \quad (2)$$

$$EVI = G * (NIR - Red) / (NIR + C1 * Red - C2 * Blue + L) \quad (3)$$

که در آن:

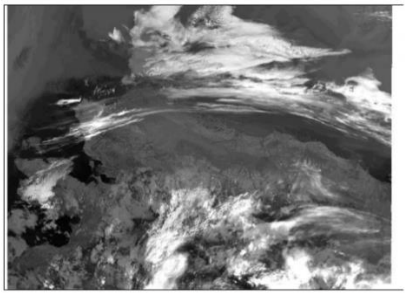
- NIR باند نزدیک به مادوام نور است.
- قرمز باند قرمز است.
- G، C1، C2، و L ثابت‌هایی هستند.

در زمینه طبقه‌بندی پوشش زمین، سنتینل-۲ توانایی برش بندی جزئیات مختلف پوشش زمینی را فراهم می‌کند که به ما اجازه می‌دهد بین انواع مختلف کاربری اراضی مانند مناطق شهری، جنگل‌ها و مناطق آب‌خیز تمییز بیافرینیم. این توانایی از مدیریت اراضی و برنامه‌ریزی شهری حمایت می‌کند. پایش گیاهان یکی از زمینه‌های بسیار مهمی است که سنتینل-۲ در آن برجسته عمل می‌کند. با جمع‌آوری داده‌ها در باندهای طیفی حساس به محتوای کلروفیل و سلامت گیاهان، این ماهواره به پایش رشد محصولات کشاورزی، شناسایی تنش در گیاهان و حمایت از عملیات کشاورزی دقیق کمک می‌کند. این ماهواره با ارائه اطلاعات به موقع به کشاورزان و تصمیم‌گیران سیاست‌گذاری در زمینه امنیت غذایی جهانی کمک می‌کند. در بخش جنگل‌داری، سنتینل-۲ نقش اساسی در ارزیابی سلامت جنگل‌ها، پایش از بین رفتن جنگل‌ها و نظارت بر تلاش‌های بازسازی دارد. تصاویر با وضوح مکانی بالای آن به تشخیص تغییرات در پوشش جنگلی کمک می‌کند که برای حفاظت از تنوع زیستی و کاهش تغییرات آب و هوا بسیار حیاتی است.[۱۱]

ارزیابی فاجعه‌های طبیعی از دیگر زمینه‌هایی است که از قابلیت‌های سنتینل-۲ بهره می‌برد. این ماهواره اطلاعات دقیقی را برای واکنش و ایجاد برنامه‌های بازسازی در مقابل حوادثی مانند آتش‌سوزی، سیلاب‌ها و پسامد زمین‌لرزه‌ها فراهم می‌کند. در برنامه‌ریزی کاربری اراضی، تصاویر با وضوح مکانی بالای سنتینل-۲ به تصمیم‌گیری در مورد توسعه شهری، برنامه‌ریزی زیرساخت‌ها و حفاظت از محیط زیست کمک می‌کند. این ماهواره با ارائه یک دید جامع در مورد تغییرات زمین در طول زمان، به توسعه‌های پایدار در مدیریت اراضی کمک می‌کند. به عبارت دیگر، سنتینل-۲ با حسگرهای نوری، وضوح مکانی بالا، زمان بازدید سریع و اهداف گسترده ماموریتی، به عنوان یک نماد از ظرفیت ما برای مشاهده و مدیریت فرآیندهای پویای سطح زمین ایستاده است [۲۹]. اطلاعات طیفی غنی آن کاربردهای گسترده‌ای را از کشاورزی و جنگل‌داری تا مدیریت بحران طبیعی و برنامه‌ریزی شهری پشتیبانی می‌کند و در نهایت به رویکردهای مدیریت اراضی و منابع در کره‌ی زمین تسهیل می‌دهد. سنتینل-۲ یک جزء اساسی از تلاش جهانی برای بهترین درک و حفاظت از محیط زیست ما است .[۲۸]

سنتینل-۳

سنتینل-۳ به عنوان یک پلتفرم جامع مشاهده زمین است که دارای مجموعه‌ای از حسگرها است. این حسگرها شامل دستگاه تصویرگر دما و سطح دریا و زمین(SLSTR) ، دستگاه رنگ دریا و زمین (OLCI) و دستگاه سنتزی آپرتور راداری التیمتر (SRAL) هستند OLCI .داده‌ها را در ۲۱ باند طیفی جمع‌آوری می‌کند، از جمله باندهای قابل رؤیت و مادوام مادوام، در حالی که SLSTR تابش مادوام مادوام را اندازه‌گیری می‌کند. سنتینل-۳ وضوح مکانی را از ۳۰۰ متر تا ۱۲۰۰ متر (OLCI) و ۵۰۰ متر (SLSTR) ارائه می‌دهد. این ماهواره وضوح زمانی بالا را برای مناطق اقیانوسی (۱ تا ۲ روز) و زمین (۲۷ روز) ارائه می‌دهد. اهداف اصلی ماموریت این ماهواره مرتبط با پایش پارامترهای اقیانوسی همچون دمای سطح دریا، افزایش سطح دریا و رنگ اقیانوس است. همچنین به طور قابل توجهی در برنامه‌های مرتبط با زمین، از جمله پایش حریق، ارزیابی دمای زمین و تجزیه و تحلیل سلامت گیاهی نقش می‌بازد.[۱۵,۳۰,۳۱]



شکل ۳: تصویر ماهواره از سنتینل ۳

Fig. 3: Satellite image of Sentinel 3

سنتینل-۴ و سنتینل-۵P

سنتینل-۴ و سنتینل-۵ P جزء ماموریت‌های سنتینل-۴ و سنتینل-۵ هستند که بر روی پایش ترکیب جوی تمرکز دارند. این ماهواره‌ها دستگاه‌های تخصصی را به منظور جمع‌آوری داده‌های مرتبط با ترکیب جوی حمل می‌کنند، از جمله اندازه‌گیری آلاینده‌ها و گازهای گلخانه‌ای. در حالی که آنها دارای وضوح طیفی بالا هستند، وضوح مکانی آنها به طور معمول در بازه ۷ کیلومتر تا ۵۰ کیلومت Figure 3: Satellite image of Sentinel 3 واقع می‌شود. چیزی که آنها را از یکدیگر متمایز می‌کند، وضوح زمانی بالا آنهاست که امکان پایش مکرر پارامترهای جوی حیاتی برای درک کیفیت هوا، تغییرات اقلیمی و حمایت از تلاش‌های مدیریت کیفیت هوا را فراهم می‌کند . [۳۲] هر ماهواره‌ی سنتینل نقش منحصر به فردی را در کنار دیگر ماهواره‌های سنتینل ایفا می‌کند و قابلیت‌های حسگری خود را به منظور پاسخ به نیازهای مشاهده زمین مشخص ساخته است، سواء برای پایش از دور زمین، اقیانوس‌ها یا جو. با هم، آنها دیدی جامع، به زمان واقعی و دسترسی آزاد به سیستم‌های پیچیده کره‌ی زمین ما را ارائه می‌دهند و متناسب با یک آرایه گسترده از برنامه‌های علمی و کاربردی عمل می‌کنند .[۲۰,۳۳]

نتایج و بحث

در این بخش، ما یک مرور جامع از حسگرهای نصب شده در هر یک از ماهواره‌های سنتینل در چارچوب برنامه کوپرنیکوس ارائه می‌دهیم و نقش اساسی آن‌ها در مشاهده زمین را بررسی می‌کنیم. سنتینل-۱ که به حسگرهای رادار تصویرسازی مصنوعی (SAR) در باندهای C و L مجهز است، امکان تصویربرداری در همه شرایط آب و هوایی و شبانه‌روزی را فراهم می‌کند. با داشتن گستره‌های دقت مکانی چندگانه از ۵ متر تا ۴۰ متر، در تحلیل تغییر شکل زمین، مدیریت بحران و نظارت دریایی به عنوان یک ابزار بی‌نظیر برجسته است. در همین حین، سنتینل-۲ که دارای دستگاه چند طیفی (MSI) است، با دارا بودن ۱۳ باند طیفی از نور مرئی تا مادوام نزدیک، گزینه‌های با وضوح مکانی بالا به ارتفاعات ۱۰ متر، ۲۰ متر و ۶۰ متر ارائه می‌دهد که برای دسته‌بندی پوشش زمین و نظارت مکرر بر سطوح زمینی مانند نظارت بر گیاهان و ارزیابی حوادث طبیعی بسیار مفید هستند. سنتینل-۳ که دارای دستگاه‌هایی نظیر دما و سطح دریا و زمین تصویرگر (SLSTR)، دستگاه رنگ دریا و زمین (OLCI) و سنتزی آپرتور راداری التیمتر (SRAL) است، به طور معتبر به برنامه‌های اقیانوس و زمینی می‌پردازد. با گستره‌های دقت مکانی از ۳۰۰ متر تا ۱۲۰۰ متر، این ماهواره نقش کلیدی در نظارت بر پارامترهای اقیانوسی مانند دمای سطح دریا، افزایش سطح دریا و رنگ دریا ایفا می‌کند. همچنین نقش مهمی را در برنامه‌های زمینی نظیر نظارت بر حریق و ارزیابی دمای سطح زمین ایفا می‌کند. سنتینل-۴ و سنتینل-۵ P که به مأموریت‌های ویژه برای نظارت بر ترکیب جوی اختصاص دارند، دارای دستگاه‌های بهینه شده برای وضوح طیفی بالا هستند که امکان نظارت مکرر بر پارامترهای جوی مانند آلاینده‌ها و گازهای گلخانه‌ای را فراهم می‌کنند. هر چند وضوح مکانی آن‌ها معمولاً از ۷ کیلومتر تا ۵۰ کیلومتر متغیر است، اما وضوح زمانی بالای آن‌ها پشتیبانی مهمی را برای مدیریت کیفیت هوا و تحقیقات در زمینه تغییرات اقلیمی فراهم می‌کند .[۱۷,۳۴]

جدول ۱: أنواع ماهواره و حسگرهای سنتینل
Table 1: Types of satellites and sentinel sensors

Satellite ماهواره	Sensors حسگرها
Sentinel-1 سنتینل -۱	Synthetic Aperture Radar (SAR) - C-band and L-band رادار تصویرسازی مصنوعی - (SAR) باند C و باند L
Sentinel-2 سنتینل-۲	MultiSpectral Instrument (MSI) - 13 spectral bands دستگاه چند طیفی 13 - (MSI) باند طیفی
Sentinel-3 سنتینل-۳	Sea and Land Surface Temperature Radiometer (SLSTR) دما و سطح دریا و زمین تصویرگر Ocean and Land Color Instrument (OLCI) دستگاه رنگ دریا و زمین (OLCI) Synthetic Aperture Radar Altimeter (SRAL) سنتزی آپرتور راداری التیمتر (SRAL)
Sentinel-4 سنتینل-۴	Specialized instruments for atmospheric composition دستگاه‌های تخصصی برای ترکیب جوی
Sentinel-5P سنتینل-۵P	Specialized instruments for atmospheric composition دستگاه‌های تخصصی برای ترکیب جوی

حسگرهای نصب شده در ماهواره‌های سنتینل به صورت جمعی، امکانات گسترده‌ای از مشاهده زمین را ارائه می‌دهند که به بررسی چالش‌های محیطی و اجتماعی پاسخ می‌دهند. گستره‌های مختلف باندهای طیفی، وضوح مکانی و زمانی ویژگی‌های منحصربه‌فرد آن‌ها را در فهم علمی بهتر و پشتیبانی از کاربردهای عملی در زمین مشخص می‌کند. تعهد برنامه سنتینل به دسترسی آزاد و رایگان به داده‌ها، اطمینان می‌دهد که این اطلاعات ارزشمند برای جوامع جهانی به آسانی در دسترس باشد. در این بخش، ما به تفصیل ویژگی‌های کلیدی دقت و وضوح هر ماهواره‌ی سنتینل در چارچوب برنامه کوپرنیکوس را مورد بررسی قرار می‌دهیم و نقش حیاتی آن‌ها در مشاهده زمین را مورد تاکید قرار می‌دهیم . ماهواره‌های سنتینل دقت قابل توجهی را برای وظایف خاص مأموریت‌های خود ارائه می‌دهند. سنتینل-۱ با دقت زیر سانتیمتری خود برجستگی دارد، که آن را به انتخاب استثنایی برای نظارت بر تغییر شکل زمین و تغییرات سطحی با جزئیات بی‌همتا تبدیل می‌کند. سنتینل-۲ دقت بالایی ارائه می‌دهد که تضمین می‌کند داده‌های قابل اعتمادی برای برنامه‌های گوناگون مشاهده زمین مانند دسته‌بندی پوشش زمین و نظارت بر محیط زیست فراهم کند. دقت میلی‌متری سنتینل-۳ به ویژه برای دینامیک‌های اقیانوس و نظارت بر افزایش سطح دریا حیاتی است که به دنبال کردن تغییرات حتی ظریف در این پارامترهای حیاتی می‌آید. سنتینل-۴ و سنتینل-۵ P نیز در ثبت دقیق داده‌های ترکیب جوی، که برای مدیریت کیفیت هوا و تحقیقات در زمینه تغییرات آب و هوا ضروری است، دقت بالایی ارائه می‌دهند .[۳۴]

جدول ۲: معیارهای اندازه گیری شده ماهواره سنتینل
Table 2: Sentinel satellite measured parameters

Satellite ماهواره	Accuracy دقت	Spatial Resolution وضوح مکانی	Temporal Resolution وضوح زمانی
Sentinel-1 سنتینل-۱	Sub-centimeter Precision زیر سانتیمتر دقت	5m to 40m	Varies متغیر
Sentinel-2 سنتینل-۲	High accuracy دقت بالا	10m to 60m	5 days ۵ روز
Sentinel-3 سنتینل-۳	Millimeter accuracy دقت میلی‌متری	300m to 1200m	1 to 2 days for ocean, 27 days for land ۱تا۲روز برای اقیانوس، ۲۷ روز برای زمین
Sentinel-4 سنتینل-۴	High accuracy دقت بالا	7km to 50km	High temporal resolution وضوح زمانی بالا
Sentinel-5P سنتینلP۵	High accuracy دقت بالا	7km to 50km	High temporal resolution وضوح زمانی بالا

وضوح مکانی ویژگی مشخصی از این ماهواره‌هاست که بر تفصیل داده‌های تصویری آن‌ها تأثیر می‌گذارد. سنتینل-۱ حالت‌های متعددی از وضوح مکانی ارائه می‌دهد که از ۵ متر تا ۴۰ متر متغیر است، این انعطاف‌پذیری امکان تصویربرداری سفارشی بر اساس برنامه‌های خاص را فراهم می‌کند، از تجزیه و تحلیل دقیق تغییر شکل زمین تا نظارت گسترده‌تر در زمینه پایش دریا دربر میگیرد. سنتینل-۲ گزینه‌های متعددی از وضوح مکانی ارائه می‌دهد، از جمله ۱۰ متر، ۲۰ متر و ۶۰ متر. این وضوح‌ها نیازهای مختلف مشاهده زمین را پشتیبانی می‌کنند و امکان تجزیه و تحلیل دقیق پوشش زمین و نظارت مکرر بر سطوح زمین را فراهم می‌کنند. حسگرهای سنتینل-۳ وضوح مکانی را ارائه می‌دهند که از ۳۰۰ متر تا ۱۲۰۰ متر متغیر است و برای برنامه‌های اقیانوسی و زمینی اساسی است. سنتینل-۴ و سنتینل-P۵ که به مشاهده ترکیب جوی اختصاص دارند، وضوح مکانی را معمولاً از ۷ کیلومتر تا ۵۰ کیلومتر ارائه می‌دهند که برای ثبت داده‌های ترکیب جوی در مناطق گسترده مناسب است.

وضوح زمانی، یا چقدر اغلب یک ماهواره به مناطق خاص بازمی‌گردد، ویژگی دیگر مهم مشاهده زمین است. وضوح زمانی سنتینل-۱ بر اساس اهداف مأموریت‌های خاص متغیر است و این امکان را فراهم می‌کند که داده‌ها به موقع و بر اساس نیاز برای برنامه‌های مختلف تجزیه و تحلیل شوند. سنتینل-۲ با زمان بازگشت کوتاه تنها ۵ روز تأمین می‌کند که امکان مشاهده مکرر سطوح زمین مانند کشاورزی دقیق و ارزیابی بلایا را فراهم می‌کند. سنتینل-۳ وضوح زمانی بالایی را برای مناطق اقیانوسی (۱ تا ۲ روز) و زمین (۲۷ روز) فراهم می‌کند که برای برنامه‌های هر دو اقیانوسی و زمینی حیاتی است. سنتینل-۴ و سنتینل-۵ P که به مشاهده ترکیب جوی اختصاص دارند، وضوح زمانی بالایی را فراهم می‌کنند که امکان ثبت داده‌های مکرر مهم برای مدیریت کیفیت هوا و تحقیقات در زمینه تغییرات آب و هوا را فراهم می‌آورد. به عبارت دیگر، ماهواره‌های سنتینل در چارچوب برنامه کوپرنیکوس مجموعه‌ای متنوع از ویژگی‌های دقت، وضوح مکانی و وضوح زمانی ارائه می‌دهند که آن‌ها را به عنوان ابزارهایی اساسی در مشاهده زمین تبدیل کرده است. این تنوع در قابلیت‌ها به دانشمندان، سیاست‌گذاران و پژوهشگران امکان انتخاب ماهواره مناسب برای نیازهای خاص مشاهده زمین را می‌دهد و به فهم جامع‌تری از سیستم‌های پیچیده کره‌ی زمین ما کمک می‌کند. این انعطاف و دقت، توانایی ما را در مقابله با چالش‌های محیطی و اجتماعی را گسترش می‌دهد.

ماهواره سنتینل-۱، که به حسگر راداری سنتتیک آپریچر (SAR) مجهز شده است و در C-band و L-band عمل می‌کند، چندانتخابی برای مشاهده زمین است. با حالت‌های وضوح مکانی متعدد از ۵ متر تا ۴۰ متر، این ماهواره در تصویربرداری در هر آب و هوا و هر ساعت از شب و روز بی‌نظیر عمل می‌کند و برای بسیاری از برنامه‌ها بسیار ارزشمند است. دقت سنتینل-۱ در نظارت بر تغییر شکل سطح زمین، مدیریت بحران، مشاهده یخ دریا و نظارت دریایی آشکار است. این نقش حیاتی در کشف و نظارت بر فروریزش زمین در مناطق شهری که به حرکت‌های زمین حساس هستند، باعث می‌شود که در برنامه‌ریزی شهری و تلاش‌های پیشگیری از بحران تاثیرگذار باشد. از سوی دیگر، سنتینل-۲ با حسگر اپتیکال موی‌اسپکترال (MSI) ابزار قدرتمندی برای مشاهده زمین ارائه می‌دهد. با ثبت داده‌ها در یک رده گسترده از ۱۳ باند طیفی از قابل‌مشاهده تا فروسرخ کوتاه، این ماهواره درک عمیقی از ویژگی‌های سطح زمین فراهم می‌کند. سنتینل-۲ گزینه‌های متعددی از وضوح مکانی از جمله ۱۰ متر، ۲۰ متر و ۶۰ متر ارائه می‌دهد و زمان بازدید کوتاه ۵ روزه اش امکان مشاهده مکرر سطوح زمین را فراهم می‌آورد. این امکان به ویژه برای کشاورزی دقیق مفید است زیرا اجازه می‌دهد که بهداشت محصولات کشاورزی را پایش کرده و نقص‌ها را به سرعت تشخیص دهد. به علاوه، وضوح مکانی بالای سنتینل-۲ در برنامه‌ریزی مصرف اراضی، ارزیابی سلامت جنگل و مشاهده بلایا مانند آتش‌سوزی و سیل عامل مؤثری است. علاوه بر این، عرض دیافراگم وسیع این

ماهواره به پوشش کارآمد مناطق بزرگ کمک می‌کند و بهره‌وری آن در مشاهده زمین و محیط زیستی را افزایش می‌دهد. این دو ماهواره سنتینل، همراه با دیگران در این برنامه، دیدگاهی جامع از سیستم‌های پویا و جذاب کره زمین ما فراهم می‌کنند. قابلیت‌های متنوع آن‌ها از نظر دقت، وضوح مکانی و زمان بازدید، محققان، سیاست‌گذاران و اجراکنندگان را قادر می‌سازد تا به مجموعه‌ای از چالش‌های محیطی و اجتماعی پاسخ دهند. علاوه بر این، سیاست داده‌های آزاد آن‌ها تعامل جهانی را ترویج کرده و این ماهواره‌ها را در تقدیر از فرآیندهای پویای کره زمین و تسهیل مدیریت منابع پایداری از اهمیت بالایی برخوردار می‌سازد. در این بخش، اهمیت دقت و وضوح در رابطه با هر ماهواره‌ی سنتینل برجسته شده است و نقش حیاتی آن‌ها در حل چالش‌های مشاهده زمین مورد تأکید قرار گرفته است. این ماهواره‌ها نقش مهمی در توسعه درک علمی و کاربردهای عملی در مشاهده زمین ایفا می‌کنند و در نهایت به مدیریت پایدار و حفاظت از محیط و منابع کره‌ی زمین کمک می‌کنند.

نتیجه‌گیری

با وجود این پیشرفت‌ها، دسترسی مناسب داده‌های مشاهده زمین چالش‌های قابل توجهی بود. برای بسیاری از کشورها و سازمان‌ها، پرتاب و نگهداری ماهواره‌ها هزینه زیادی داشت. عوامل جغرافیایی نیز اشتراک داده و همکاری را اغلب به دلیل ملاحظات جغرافیایی متوقف می‌کرد. این تغییر به شدت با ظهور برنامه کوپرنیکوس اروپا تغییر کرد که در اوایل دهه ۲۰۰۰ میلادی وارد مراحل اجرایی شد. کوپرنیکوس هدف ایجاد یک سیستم عملی برای نظارت بر زمین بود که داده‌های محیطی با کیفیت بالا و دسترسی آزاد به تمامی افراد را فراهم می‌کند. در اصل این برنامه در سنتینل متمایز است که قلب کوپرنیکوس است و نماینده دوران جدیدی در مشاهده زمین می‌باشد. بر خلاف سابقه ماهواره‌های پژوهشی که عمدتاً بر پایه تحقیقات بودند، سنتینل‌ها ماهواره‌های عملیاتی هستند که به صورت مداوم مشاهده و ارسال داده‌ها برای پشتیبانی از یک دسته گسترده از برنامه‌ها هستند. این گذار از مأموریت‌های تحقیقاتی به صورت نوبتی و محدود به یک سیستم نظارتی جهانی جدید را ایجاد کرده است. شروع سنتینل-۱ A در سال ۲۰۱۴ نشانه شروع این سفر تحولی بود و پرتاب‌های بعدی سنتینل‌ها قابلیت‌های این مجموعه را گسترش داد.

برنامه کوپرنیکوس و ماهواره‌های سنتینل به چندین اصل کلیدی مشخصی شناخته می‌شوند که پشتوانه موفقیت آن‌ها را تشکیل می‌دهند. این اصول شامل دسترسی به داده‌ها، پوشش جهانی، پیوستگی عملیاتی، حسگرهای متنوع و چارچوب همکاری است. اصل دسترسی آزاد به داده‌ها اطمینان می‌دهد که داده‌ها از ماهواره‌های سنتینل برای عموم، محققان، سیاست‌گذاران و شرکت‌های تجاری در دسترس باشند و نوآوری و همکاری را ترویج کنند. مجموعه سنتینل شامل چندین ماهواره است که پوشش جهانی با بازدیدهای متنوع را فراهم می‌کنند، تا اطمینان حاصل شود که هیچ منطقه‌ای از سیاره بدون نظارت نمی‌ماند. پیوستگی عملیاتی تضمین می‌کند که نسل‌های جدید از ماهواره‌ها برای جایگزینی نسل‌های قدیمی توسعه داده و پرتاب شوند، تا جریان داده‌ها به طور مداوم تضمین شود. هر ماهواره سنتینل با حسگرهای خاصی که به منظور اهداف مأموریتی خود طراحی شده است، تجهیز شده است که این تنوع به مجموعه این امکان را می‌دهد که زمین، اقیانوس‌ها، جو و موارد دیگر را نظارت کند. برنامه کوپرنیکوس همکاری بین‌المللی را تشویق می‌کند و اجازه می‌دهد که داده‌ها از ماهواره‌های سنتینل با سایر سیستم‌های مشاهده زمین ترکیب شوند و فهم جهانی از سیستم‌های زمین را افزایش دهند.

در نتیجه، برنامه ماهواره‌ای سنتینل دوره‌ای جدید از مشاهده زمین را آغاز کرده و یک ابزار قدرتمند و چندمنظوره برای نظارت و درک سیستم‌های پیچیده کره‌زمین ما فراهم آورده است. هر ماهواره سنتینل با قابلیت‌های حسگر منحصر به فرد، ویژگی‌های مداری و اهداف مأموریتی خود، به یک دیدگاه جامع و به زمان واقعی از محیط زمینی کمک می‌کند. این ماهواره‌ها نقش بحرانی خود را در مقابله با مجموعه‌ای گسترده از چالش‌های جهانی از رصد تغییرات اقلیمی و افزایش سطح دریا تا نظارت بر کاربری اراضی، سلامت گیاهان و ترکیب جوی نشان داده‌اند.تفاوت میان ماهواره‌های سنتینل از نظر حسگرها، دقت، باندهای طیفی و وضوح مکانی، راه‌حل‌های منطبق بر نیازهای مختلف مشاهده زمین را فراهم می‌کند. تصاویر در هر هوا و هر زمان از ماهواره سنتینل-۱، داده‌های بالای اپتیکی با وضوح بالای سنتینل-۲، مشاهدات اقیانوسی و زمینی سنتینل-۳ و نظارت بر ترکیب جوی با دقت سنتینل-۵/۴ P به تقویت توانایی ما برای مقابله با مسائل محیطی، اجتماعی و علمی کمک می‌کنند. سیاست داده‌های رایگان و آزاد برنامه کوپرنیکوس همراه با همکاری جهانی، تضمین می‌کند که این منابع ارزشمند برای محققان، سیاست‌گذاران و شرکت‌های تجاری در سراسر جهان دسترسی‌پذیر باشند. همانطور که به جلو حرکت می‌کنیم، برنامه ماهواره‌ای سنتینل به تکامل و گسترش خود ادامه خواهد داد، با نسل‌های جدیدی از ماهواره‌ها و قابلیت‌های بهبود یافته در آینده. این تکامل به جوامع جهانی اجازه می‌دهد تا محیط و منابع کره‌زمین خود را بهتر مدیریت و حفاظت کنند و تصمیم‌گیری‌های اطلاع‌رسانی را برای حفظ آینده ما انجام دهند. در دوره‌ای از چالش‌های محیطی در حال افزایش، ماهواره‌های سنتینل به عنوان نگهبانان بیدار زمین ایستاده‌اند و داده‌ها و دیدگاه‌های مورد نیاز برای مقابله با مسائل پیچیده مواجهه‌شده توسط جهان ما را ارائه می‌دهند.

مشارکت نویسندگان

در این مقاله، نویسندگان به نسبت برابر مشارکت داشته اند.

تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله از کلیه عزیزانی که در این تحقیق همکاری لازم را داشته‌اند، تشکر می‌کنند.

تعارض منافع

«هیچ گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.»

منابع و مآخذ

[1] Schulthess U, Rodrigues F, Taymans M, Bellemans N, Bontemps S, Ortiz-Monasterio I, et al. Optimal Sample Size and Composition for Crop Classification with Sen2-Agri's Random Forest Classifier. Remote Sens (Basel) 2023;15. https://doi.org/10.3390/RS15030608.

[2] Debella-Gilo M, Gjertsen AK. Mapping seasonal agricultural land use types using deep learning on sentinel-2 image time series. Remote Sens (Basel) 2021;13:1–17. https://doi.org/10.3390/RS13020289.

[3] Howe AA, Parks SA, Harvey BJ, Saberi SJ, Lutz JA, Yocom LL. Comparing Sentinel-2 and Landsat 8 for Burn Severity Mapping in Western North America. Remote Sens (Basel) 2022;14. https://doi.org/10.3390/RS14205249.

[4] Haack BN. Landsat: A tool for development. World Dev 1982;10:899–909. https://doi.org/10.1016/0305-750X(82)90064-X.

[5] Uribeetxebarria A, Castellón A, Aizpurua A. A First Approach to Determine if It Is Possible to Delineate In-Season N Fertilization Maps for Wheat Using NDVI Derived from Sentinel-2. Remote Sens (Basel) 2022;14. https://doi.org/10.3390/RS14122872.

[6] Azzari G, Jain S, Jeffries G, Kilic T, Murray S. Understanding the requirements for surveys to support satellite-based crop type mapping: Evidence from sub-saharan Africa. Remote Sens (Basel) 2021;13. https://doi.org/10.3390/RS13234749.

[7] Ibrahim ES, Rufin P, Nill L, Kamali B, Nendel C, Hostert P. Mapping crop types and cropping systems in nigeria with sentinel-2 imagery. Remote Sens (Basel) 2021;13. https://doi.org/10.3390/RS13173523.

[8] Kganyago M, Mhangara P, Adjorlolo C. Estimating crop biophysical parameters using machine learning algorithms and sentinel-2 imagery. Remote Sens (Basel) 2021;13. https://doi.org/10.3390/RS13214314.

[9] Reinermann S, Gessner U, Asam S, Ullmann T, Schucknecht A, Kuenzer C. Detection of Grassland Mowing Events for Germany by Combining Sentinel-1 and Sentinel-2 Time Series. Remote Sens (Basel) 2022;14. https://doi.org/10.3390/RS14071647.

[10] Gašparović M, Jogun T. The effect of fusing Sentinel-2 bands on land-cover classification. Int J Remote Sens 2018;39:822–41. https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1392640.

[11] Lu D, Weng Q. A survey of image classification methods and techniques for improving classification performance. Int J Remote Sens 2007;28:823–70. https://doi.org/10.1080/01431160600746456.

[12] Dronova I. Object-based image analysis in wetland research: A review. Remote Sens (Basel) 2015;7:6380–413. https://doi.org/10.3390/RS70506380.

[13] Nomura K, Mitchard ETA. More than meets the eye: Using Sentinel-2 to map small plantations in complex forest landscapes. Remote Sens (Basel) 2018;10. https://doi.org/10.3390/RS10111693.

[14] Verrelst J, Muñoz J, Alonso L, Delegido J, Rivera JP, Camps-Valls G, et al. Machine learning regression algorithms for biophysical parameter retrieval: Opportunities for Sentinel-2 and -3. Remote Sens Environ 2012;118:127–39. https://doi.org/10.1016/J.RSE.2011.11.002.

[15] Clevers JGPW, Gitelson AA. Remote estimation of crop and grass chlorophyll and nitrogen content using red-edge bands on sentinel-2 and-3. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 2013;23:344–51. https://doi.org/10.1016/J.JAG.2012.10.008.

[16] Claverie M, Ju J, Masek JG, Dungan JL, Vermote EF, Roger JC, et al. The Harmonized Landsat and Sentinel-2 surface reflectance data set. Remote Sens Environ 2018;219:145–61. https://doi.org/10.1016/J.RSE.2018.09.002.

[17] Chastain R, Housman I, Goldstein J, Finco M. Empirical cross sensor comparison of Sentinel-2A and 2B MSI, Landsat-8 OLI, and Landsat-7 ETM+ top of atmosphere spectral characteristics over the conterminous United States. Remote Sens Environ 2019;221:274–85. https://doi.org/10.1016/J.RSE.2018.11.012.

[18] Sloan S, Sayer JA. Forest Resources Assessment of 2015 shows positive global trends but forest loss and degradation persist in poor tropical countries. For Ecol Manage 2015;352:134–45. https://doi.org/10.1016/J.FORECO.2015.06.013

[19] Sitokonstantinou V, Papoutsis I, Kontoes C, Arnal AL, Andrés APA, Zurbano JAG. Scalable parcel-based crop identification scheme using Sentinel-2 data time-series for the monitoring of the common agricultural policy. Remote Sens (Basel) 2018;10. https://doi.org/10.3390/RS10060911.

[20] Malenovský Z, Rott H, Cihlar J, Schaepman ME, García-Santos G, Fernandes R, et al. Sentinels for science: Potential of Sentinel-1, -2, and -3 missions for scientific observations of ocean, cryosphere, and land. Remote Sens Environ 2012;120:91–101. https://doi.org/10.1016/J.RSE.2011.09.026.

[21] Jucker T, Caspersen J, Chave J, Antin C, Barbier N, Bongers F, et al. Allometric equations for integrating remote sensing imagery into forest monitoring programmes. Glob Chang Biol 2017;23:177–90. https://doi.org/10.1111/GCB.13388.

[22] Hansen MC, Sohlberg R, Defries RS, Townshend JRG. Global land cover classification at 1 km spatial resolution using a classification tree approach. Int J Remote Sens 2000;21:1331–64. https://doi.org/10.1080/014311600210209.

[23] Chowdhury M, Hasan ME, Abdullah-Al-Mamun MM. Land use/land cover change assessment of Halda watershed using remote sensing and GIS. The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science 2020;23:63–75. https://doi.org/10.1016/J.EJRS.2018.11.003.

[24] Baetens L, Desjardins C, Hagolle O. Validation of copernicus Sentinel-2 cloud masks obtained from MAJA, Sen2Cor, and FMask processors using reference cloud masks generated with a supervised active learning procedure. Remote Sens (Basel) 2019;11. https://doi.org/10.3390/RS11040433.

[25] Phiri D, Simwanda M, Salekin S, Nyirenda VR, Murayama Y, Ranagalage M. Sentinel-2 Data for Land Cover/Use Mapping: A Review. Remote Sensing 2020, Vol 12, Page 2291 2020;12:2291. https://doi.org/10.3390/RS12142291.

[26] Turner W, Rondinini C, Pettorelli N, Mora B, Leidner AK, Szantoi Z, et al. Free and open-access satellite data are key to biodiversity conservation. Biol Conserv 2015;182:173–6. https://doi.org/10.1016/J.BIOCON.2014.11.048

[27] Konda VGRK, Chejarla VR, Mandla VR, Voleti V, Chokkavarapu N. Vegetation damage assessment due to Hudhud cyclone based on NDVI using Landsat-8 satellite imagery. Arabian Journal of Geosciences 2018;11:35. https://doi.org/10.1007/s12517-017-3371-8.

[28] Wu M, Yang C, Song X, Hoffmann WC, Huang W, Niu Z, et al. Monitoring cotton root rot by synthetic Sentinel-2 NDVI time series using improved spatial and temporal data fusion. Sci Rep 2018;8. https://doi.org/10.1038/S41598-018-20156-Z.

[29] Goor E, Dries J, Daems D, Paepen M, Niro F, Goryl P, et al. PROBA-V mission exploitation platform. Remote Sens (Basel) 2016;8. https://doi.org/10.3390/RS8070564.

[30] Hansen MC, Potapov P V., Moore R, Hancher M, Turubanova SA, Tyukavina A, et al. High-resolution global maps of 21st-century forest cover change. Science (1979) 2013;342:850–3. https://doi.org/10.1126/SCIENCE.1244693.

[31] Xu Y, Yu L, Feng D, Peng D, Li C, Huang X, et al. Comparisons of three recent moderate resolution African land cover datasets: CGLS-LC100, ESA-S2-LC20, and FROM-GLC-Africa30. Int J Remote Sens 2019;40:6185–202. https://doi.org/10.1080/01431161.2019.1587207.

[32] Lark TJ, Mueller RM, Johnson DM, Gibbs HK. Measuring land-use and land-cover change using the U.S. department of agriculture's cropland data layer: Cautions and recommendations. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 2017;62:224–35. https://doi.org/10.1016/j.jag.2017.06.007.

[33] Otunga C, Odindi J, Mutanga O, Adjorlolo C. Evaluating the potential of the red edge channel for C3 (Festuca spp.) grass discrimination using Sentinel-2 and Rapid Eye satellite image data. Geocarto Int 2019;34:1123–43. https://doi.org/10.1080/10106049.2018.1474274.

[34] Padró JC, Pons X, Aragonés D, Díaz-Delgado R, García D, Bustamante J, et al. Radiometric Correction of Simultaneously Acquired Landsat-7/Landsat-8 and Sentinel-2A Imagery Using Pseudoinvariant Areas (PIA): Contributing to the Landsat Time Series Legacy. Remote Sensing 2017;9:1319. https://doi.org/10.3390/RS9121319.

معرفی نویسندگان

AUTHOR(S) BIOSKETCHES

مجتبی ابوالقاسمی نجف‌آبادی استادیار دانشکده برق دانشگاه صنعتی مالک اشتر می‌باشند. ایشان مدرک کارشناسی مهندسی برق- مخابرات را در سال ۱۳۷۶ از دانشگاه تبریز و مدرک کارشناسی ارشد مهندسی برق- مخابرات سیستم را در سال ۱۳۷۸از دانشگاه صنعتی امیرکبیر دریافت نمودند. در سال ۱۳۸۹ موفق به اخذ مدرک دکتری تخصصی در رشته مهندسی برق- مخابرات سیستم از دانشگاه صنعتی امیرکبیر گردیدند. ایشان به عنوان مدیر دفتر طراحی سامانه‌های فضایی در طراحی، ساخت و تست ماهواره طلوع همکاری داشته‌اند. کسب رتبه دوم پژوهشگر برتر در جشنواره تحقیقاتی دفاعی در سال ۱۳۹۲ و چاپ چندین عنوان مقاله علمی در حوزه ماهواره‌های سنجش از دور و نهان‌نگاری از جمله فعالیت‌های پژوهشی ایشان می‌باشد. زمینه‌های تخصصی ایشان عبارتند از: سنجش از دور ماهواره‌ای، مهندسی سیستم ماهواره، نهان‌نگاری و نهان‌کاوی تصویر و طراحی محموله‌های اپتیکی فضایی.

Abolghasemi Najafabadi, M. Assistant Professor at the Department of Electrical Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

mo_abolghasemi@mut.ac.ir

Citation (Vancouver): Abolghasemi M. [Sentinel Satellites: Revolutionizing Earth Observation for Science and Sustainability]. *J. RS. GEOINF. RES. 2023; 1(2): 205-216*

https://doi.org/10.22061/jrsgr.2023.2011

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/)