



Available in:
Journal.isrc.ac.ir

Journal of Space Science,
Technology & Applications
(Persian)

Vol. 5, No. 2, pp.: 156-168
2026

DOI:
[10.22034/jsssta.2025.516460.1243](https://doi.org/10.22034/jsssta.2025.516460.1243)

Article Info

Received: 2025-04-17
Accepted: 2025-08-13

Keywords

Platform requirements,
Greenhouse gas monitoring,
Climate change, Carbon
dioxide, Satellite payload,
Thermal modeling

How to Cite this article

E. Kishani Farahani, A. Anvari, "Analysis of Satellite Payloads for Greenhouse Gas Monitoring: Proposal of a Payload and Analysis of Its Platform Requirements", *Journal of Space Science, Technology & Applications*, Vol. 5, No. 2, pp. 156-168, 2026.

Analysis of Satellite Payloads for Greenhouse Gas Monitoring: Proposal of a Payload and Analysis of Its Platform Requirements

Esmat Kishani Farahani^{1*}, Azar Anvari²

¹ *Department of Electrical Engineering and Information Technology, Iranian Research Organization for Science and Technology (IROST), Tehran, Iran
e.kishani@irost.ir

² Department of Mechanical Engineering, Iranian Research Organization for Science and Technology (IROST), Tehran, Iran
a.anvari@irost.ir

Abstract

Reducing greenhouse gas emissions is a critical strategy for combating climate change and requires precise, continuous monitoring. Space-based monitoring systems are uniquely capable of collecting comprehensive data on key climate variables, enabling the identification of climate change patterns. This paper aims to propose a payload for a domestic satellite dedicated to greenhouse gas monitoring and to analyze its corresponding platform requirements. The study investigates space-based monitoring of greenhouse gases as one of the most significant atmospheric variables related to climate change, analyzing existing satellites and payloads in terms of measurement methods, mass, and power budgets. Considering constraints such as mass, power, complexity, and development cost, a suitable payload for monitoring carbon dioxide is proposed. This payload employs diffraction grating-based spectroscopy in the near-infrared and short-wave infrared bands to measure CO₂ concentration. The payload's optical requirements—including spectral resolution, number of samples, and field of view needed to achieve spatial resolutions of 1, 10, and 30 km—are calculated and detailed. A preliminary thermal analysis was conducted to determine the optimal placement for the platform's radiators, outlining the thermal management challenges involved in meeting the payload's temperature requirements, which necessitate a cryogenic cooling system. Finally, the minimum platform requirements for supporting this payload are presented. The findings of this research represent a significant step towards enabling the nation's space sector to develop satellites for climate change monitoring and building capacity in this vital field.

بررسی محموله‌های ماهواره‌های پایش گازهای گلخانه‌ای: پیشنهاد یک محموله و تحلیل الزامات پلتفرمی آن

عصمت کیشانی فراهانی^{۱*}، آذر انوری^۲

۱- پژوهشکده مهندسی برق و فناوری اطلاعات، سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران، تهران، ایران-

e.kishani@irost.ir

۲- پژوهشکده مهندسی مکانیک، سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران، تهران،

a.anvari@irost.ir - ایران

* نویسنده مسئول

دسترس پذیر در نشانی:

Journal.isrc.ac.ir

دوفصلنامه علوم، فناوری و
کاربردهای فضایی

سال پنجم، شماره ۲، صفحه ۱۶۸-۱۵۶

پاییز و زمستان ۱۴۰۴

DOI:

10.22034/jsssta.2025.516460.1243

چکیده

کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، یکی از راهکارهای مهم برای مقابله با تغییرات آب و هوایی است که مستلزم پایش دقیق و مستمر است. پایش فضاپایه، با توانایی جمع‌آوری اطلاعات جامع از متغیرهای اساسی تغییر اقلیم، امکان شناسایی الگوهای تغییرات آب‌وهوایی را فراهم می‌سازد. هدف این مقاله، پیشنهاد یک محموله برای یک ماهواره‌ی بومی با مأموریت پایش گازهای گلخانه‌ای و نیز بررسی و تحلیل الزامات پلتفرمی آن است. در این پژوهش، پایش فضایی گازهای گلخانه‌ای به عنوان یکی از مهم‌ترین متغیرهای اتمسفری مرتبط با تغییر اقلیم موردبررسی قرار گرفته و ماهواره‌ها و محموله‌های مربوطه از جنبه‌های مختلف نظیر روش‌های سنجش و بودجه‌ی جرم و توان، تحلیل‌شده‌اند. سپس، با توجه به محدودیت‌های جرم، توان، پیچیدگی و هزینه‌ی ساخت، یک محموله‌ی مناسب برای پایش گاز دی‌اکسید کربن پیشنهاد گردیده است. این محموله از فناوری طیف‌سنجی مبتنی بر توری پراش، در باندهای مادون‌قرمز نزدیک و موج-کوتاه برای سنجش غلظت دی‌اکسید کربن بهره می‌برد. همچنین، الزامات اپتیکی محموله از جمله: وضوح طیفی، تعداد نمونه‌ها و میدان دید برای دستیابی به وضوح مکانی ۱، ۱۰ و ۳۰ کیلومتر محاسبه و ارائه شده است. یک مدل‌سازی حرارتی ساده برای تعیین موقعیت بهینه‌ی رادیاتورهای پلتفرم انجام شده و چالش‌های حرارتی جهت تأمین الزامات دمایی محموله و نیاز به یک سیستم خنک‌ساز کرایونیک بیان شده است. در پایان، حداقل الزامات پلتفرمی برای پشتیبانی از این محموله ارائه شده است. نتایج این پژوهش، گامی مؤثر در جهت ورود بخش فضایی کشور به عرصه‌ی توسعه‌ی ماهواره‌های پایش تغییرات اقلیمی و ظرفیت‌سازی در این حوزه به شمار می‌رود.

تاریخچه داوری

دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۲۸

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۲۲

واژه‌های کلیدی

الزامات پلتفرم، پایش گازهای
گلخانه‌ای، تغییرات اقلیمی،
دی‌اکسید کربن، محموله‌ی ماهواره،
مدل‌سازی حرارتی

نحوه استناد به این مقاله

عصمت کیشانی فراهانی، آذر انوری،
"بررسی محموله‌های ماهواره‌های پایش
گازهای گلخانه‌ای: پیشنهاد یک محموله و
تحلیل الزامات پلتفرمی آن"، دوفصلنامه
علوم، فناوری و کاربردهای فضایی، جلد
پنجم، شماره دوم، صفحات ۱۶۸-۱۵۶،
۱۴۰۴.

مقدمه

گازهای گلخانه‌ای، گازهایی هستند که انرژی تابشی در محدوده مادون قرمز حرارتی را جذب و سپس منتشر می‌کنند و سبب ایجاد اثر گلخانه‌ای می‌شوند. اگرچه اثر گلخانه‌ای برای حفظ حیات روی زمین ضروری است، با این حال افزایش اثر گلخانه‌ای که به طور عمده ناشی از سوزاندن سوخت‌های فسیلی است، به گرمایش ناخواسته و عواقب جدی منجر شده است و لذا تشخیص ترکیبات گازهای گلخانه‌ای در جو و بررسی روند تغییرات آن‌ها بسیار مهم است [۸]. دی‌اکسید کربن (CO_2^1) و متان (CH_4^2) از مهم‌ترین گازهای گلخانه‌ای هستند که بیش از ۸۰ درصد از کل گازهای گلخانه‌ای جهان را تشکیل می‌دهند [۱].

هدف این مقاله، پیشنهاد یک محموله برای پایش گازهای گلخانه‌ای و بررسی و تحلیل الزامات پلتفرمی مرتبط با آن است. نتایج این پژوهش دیدگاه جامعی را ارائه می‌کند که نشان می‌دهد برای طراحی و ساخت یک ماهواره داخلی با مأموریت پایش گازهای گلخانه‌ای، کدام الزامات فناوری مورد نیاز است و در چه بخش‌هایی، تجربه‌ی فناوری فضایی لازم وجود ندارد. همچنین، چالش‌های پیش رو را در راستای بومی‌سازی و توسعه‌ی فناوری فضایی پایش اقلیم مشخص خواهد کرد.

ادامه مقاله به صورت زیر سازمان‌دهی شده است: در بخش ۲ به مرور ماهواره‌های پایش گازهای گلخانه‌ای خواهیم پرداخت. در بخش ۳، انواع سنجنده‌های این ماهواره‌ها و روش پایش و مزایا و معایب هر یک بررسی می‌شود. در بخش ۴، با مقایسه سنجنده‌های مختلف و با توجه به محدودیت‌های جرمی و توانی، محموله‌ی مناسب برای پایش گاز دی‌اکسید کربن پیشنهاد می‌شود. سپس به بیان ویژگی‌ها و اجزای محموله و الزامات اپتیکی و حرارتی آن پرداخته می‌شود. در ادامه، مدل‌سازی حرارتی ساده برای تعیین موقعیت بهینه‌ی رادیاتورهای پلتفرم آن انجام شده است و الزامات پلتفرمی بیان می‌شود. در نهایت مقاله با بخش بحث و نتیجه‌گیری به پایان می‌رسد.

مروری بر ماهواره‌های پایش گازهای گلخانه‌ای

در آغاز، برای شناسایی گازهای گلخانه‌ای از داده‌های طیف‌سنج‌های پهن باند موجود در ماهواره‌های انویست، آکوا، آیورا و متوپ استفاده می‌شد. این ماهواره‌ها در سال‌های ۲۰۰۲ تا ۲۰۰۷

تغییر اقلیم به تغییرات بلندمدت در الگوهای آب و هوایی اطلاق می‌شود. فعالیت‌های انسانی، به‌ویژه سوزاندن سوخت‌های فسیلی از اواسط دهه ۱۸۰۰ میلادی منجر به تسریع روند افزایش در گرمایش جهانی شده است [۱]. پیامدهای این گرمایش جهانی شامل: خشک‌سالی‌ها، آتش‌سوزی‌های شدید، ذوب شدن یخ‌ها، بالا آمدن سطح دریاهای سیل و کاهش تنوع زیستی است که اثرات منفی بسیاری بر جامعه بشری و توسعه پایدار جهانی دارد [۲]. کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و سازگاری با اثرات تغییرات آب‌وهوایی، از راهکارهای اصلی پیشنهادی برای مقابله با این چالش‌ها هستند [۳]. هر دو راهکار نیازمند پایش و رصد تغییرات بنیادی است که در زمین و فضای اطراف آن رخ می‌دهد [۴].

برای پایش و رصد تغییرات آب و هوایی، اندازه‌گیری‌های معمول محلی ناکارآمد هستند زیرا مشاهدات محلی تنها به ارائه اطلاعات در مورد یک منطقه خاص محدود می‌شوند و نمی‌توانند تصویر دقیقی از توزیع فضایی متغیرها ارائه دهند [۵]. فناوری سنجش‌ازدور ماهواره‌ای، یک روش رصدی شناخته شده است که با استفاده از حسگرهای غیر تماسی، اطلاعات پیوسته و به موقع از زمین و جو جمع‌آوری می‌کند. این فناوری به ما این امکان را می‌دهد که اطلاعات متنوعی در مورد متغیرهای مرتبط با تغییرات آب و هوایی از جمله: ابرها، ذرات معلق در هوا، گازهای گلخانه‌ای، تغییرات کاربری و پوشش زمین، فرسایش یخچال‌های طبیعی، جریان آب و انرژی و تغییر سطح دریا به دست آوریم [۶]. این اطلاعات به شناسایی الگوهای تغییرات آب و هوایی و بهبود درک جهانی از تغییرات زمین کمک می‌کند [۴].

پیش‌بینی تغییرات اقلیم، بر مبنای مشاهده طولانی‌مدت متغیرهای اساسی اقلیم کره زمین در اتمسفر، اقیانوس و اکوسیستم‌های زمینی و کمی‌سازی آن‌ها صورت می‌گیرد. این متغیرها شامل: متغیرهای فیزیکی، شیمیایی، بیولوژیکی و گروهی از متغیرهای مرتبط هستند [۷]. در حال حاضر، ۵۵ متغیر به عنوان متغیرهای اساسی سنجش اقلیم توسط سیستم جهانی مشاهده اقلیم تعیین شده‌اند که آن‌ها را می‌توان در سه گروه اتمسفر، اقیانوس و زمین دسته‌بندی کرد [۷]. از این ۵۵ متغیر، ۱۶ مورد مربوط به اتمسفر هستند که یکی از مهم‌ترین آن‌ها گازهای گلخانه‌ای است.

² Methane

¹ Carbon Dioxide

ایالات متحده آمریکا نیز ماهواره‌های اوکو ۱، ۲ و ۳ را به ترتیب در سال‌های ۲۰۰۹، ۲۰۱۴ و ۲۰۱۹ به فضا پرتاب کرد؛ اما پرتاب اوکو ۱ با شکست مواجه شد. محموله‌ی این ماهواره‌ها شامل سه طیف‌سنج مبتنی بر توری پراش با وضوح بالا است که به اندازه‌گیری کسر مولی CO_2 می‌پردازد. ارتفاع مداری اوکو ۲ و اوکو ۳ به ترتیب برابر ۷۵۰ کیلومتر و ۴۰۰ کیلومتر است. میدان دید نیز از ۰/۸ درجه در ماهواره‌ی اوکو ۲ به ۱/۸ درجه در ماهواره‌ی اوکو ۳ افزایش یافته است. جرم اوکو ۲ برابر ۴۶۰ کیلوگرم، مصرف توان آن ۵۲۱ وات، جرم محموله‌ی آن ۱۳۱ کیلوگرم و وضوح طیفی آن ۰/۰۴ نانومتر با محدوده طیفی ۷۵۸ تا ۷۷۲ نانومتر است [۱۵-۱۶]. اوکو ۳ نیز از همان سنجنده‌ی ماهواره‌ی اوکو ۲ استفاده می‌کند [۱۷].

آژانس فضایی اروپا در سال ۲۰۱۷ ماهواره سنتینل-۵پ را به فضا پرتاب کرد. محموله‌ی این ماهواره که تروپومی نام دارد یک سنجنده‌ی اتمسفری فرا طیفی گسترده است که می‌تواند به‌طور هم‌زمان اجزای جو مانند ازن، دی‌اکسید نیتروژن، دی‌اکسید سولفور و متان را با وضوح فضایی ۷ کیلومتر در ۷ کیلومتر و عرض نوار ۲۶۰۰ کیلومتر شناسایی کند و آن را به یکی از مهم‌ترین ماهواره‌ها برای مشاهده‌ی متان در مدار تبدیل کرده است. این آژانس همچنین قصد دارد سه ماهواره‌ی پایش دی‌اکسید کربن را نیز پرتاب کند که اولین پرتاب آن برای سال ۲۰۲۶ برنامه‌ریزی شده است و مأموریت آن ۷/۵ ساله خواهد بود. هدف این ماهواره‌ها اندازه‌گیری دی‌اکسید کربن اتمسفر با وضوح مکانی بالا است. وضوح فضایی آن‌ها نیز برابر با ۲ کیلومتر در ۲ کیلومتر در عرض نوار ۲۵۰ کیلومتر است و دقت تشخیص CO_2 برابر با ۰/۷ بخش در میلیون و دقت تشخیص CH_4 برابر با ۹ بخش در میلیارد است [۱۸].

چندین برنامه‌ی تجاری برای پایش گازهای گلخانه‌ای نیز پیشنهاد شده است که هدف آن‌ها نظارت منطقه‌ای بر انتشار کربن، از منابع نقطه‌ای است. معروف‌ترین ماهواره‌ی تجاری نظارت بر کربن، سرویس پایش تشعشعات گاز دی‌اکسید کربن است که توسط یک شرکت تجاری کانادایی و با ۱۲ ماهواره در مدار ساخته شده است. این ماهواره‌ها قابلیت تشخیص گازهای گلخانه‌ای، به‌ویژه متان را دارند. سنجنده‌ی این ماهواره‌ها، یک طیف‌سنج تصویربرداری فابری-پرو با زاویه‌ی دید گسترده است که

توسط سازمان ملی هوانوردی و فضایی (ناسا) و آژانس فضایی اروپا برای مطالعه‌ی پارامترهای جوی و محیطی مانند دمای جو، بخار آب و غلظت گازهای جوی به فضا پرتاب شدند. با به‌روزرسانی الگوریتم‌های بازیابی، این داده‌ها برای شناسایی گازهای گلخانه‌ای نیز به کار رفتند. با این حال، داده‌های حاصل به لحاظ وضوح طیفی و دقت، کافی نبودند [۹-۱۳]. به همین دلیل، ماهواره‌های جدیدی برای تشخیص گازهای گلخانه‌ای توسط ژاپن و ایالات متحده توسعه داده شد.

در سال ۲۰۰۹ کشور ژاپن، ماهواره‌ی مشاهده گازهای گلخانه‌ای (گوست ۱) را به فضا پرتاب کرد. مأموریت این ماهواره، رصد منابع و جاذب‌های گازهای گلخانه‌ای در مقیاس شبه‌قاره بود. این ماهواره در مدار خورشید آهنگ با شیب مداری ۹۸/۰۶ درجه و ارتفاع ۶۶۶ کیلومتر قرار دارد [۱۴]. جرم این ماهواره ۱۷۵۰ کیلوگرم، توان مصرفی آن ۳۸۰۰ وات و ابعاد آن $۳/۷ \times ۱/۸ \times ۲$ متر است. محموله‌های آن شامل یک طیف‌سنج تبدیل فوریه (FTS^3) برای اندازه‌گیری غلظت گازهای گلخانه‌ای در جو و یک تصویرساز چند طیفی (CAI^4) برای اندازه‌گیری ابرها و ذرات معلق در هوا است. سنجنده با استفاده از روش طیف‌سنجی مادون قرمز، تشعشعات خورشیدی منعکس شده از سطح زمین را در چهار باند طیفی اندازه‌گیری می‌کند و داده‌های دقیقی برای ارزیابی گازهای گلخانه‌ای ارائه می‌دهد. همچنین، سنجنده‌ی CAI برای آشکارسازی ابرها و ذرات معلق در هوا به کار می‌رود و تصویرسازی را در چهار باند طیفی در ناحیه‌ی مرئی و مادون قرمز نزدیک انجام می‌دهد [۱۴]. این ماهواره به اندازه‌گیری کسر مولی CO_2 ، کسر مولی CH_4 ، پوشش ابر، عمق نوری ذرات معلق در هوا، شاخص نرمال شده تفاوت پوشش گیاهی و فلورسانس کلروفیل از پوشش گیاهی در خشکی می‌پردازد. در ادامه، ژاپن در سال ۲۰۱۸، ماهواره‌ی گوست ۲ را به فضا پرتاب کرد. این ماهواره همان سنجنده‌های گوست ۱ را دارا بود اما محدوده‌ی طیفی FTS آن افزایش یافته و وضوح فضایی و طیفی سنجنده نیز بهبود یافته است. ژاپن همچنین قصد دارد ماهواره‌ی گوست ۳ را در سال ۲۰۲۵ به فضا پرتاب کند و به جای طیف‌سنج تبدیل فوریه از طیف‌سنج مبتنی بر توری پراش استفاده کند تا پوشش گسترده و پیوسته‌ای از مشاهدات گازهای گلخانه‌ای را فراهم آورد [۱۴].

⁴ Cloud and Aerosol Imager

³ Fourier Transform Spectrometer

دقت تشخیص آن بهتر از ۱ ppm و وضوح فضایی آن ۳ کیلومتر در ۳ کیلومتر خواهد بود [۲۴-۲۵].

در حال حاضر، ماهواره‌ی سنجنش از دور متان با لیدار که مرلین نام دارد، به‌طور مشترک توسط فرانسه و آلمان در حال توسعه است. این ماهواره بر اندازه‌گیری گرادیان‌های مکانی و زمانی گاز متان در جو تمرکز دارد. طراحی و ساخت سنجنده‌ی لیدار بر عهده‌ی آلمان و تهیه‌ی پلتفرم و کنترل ماهواره بر عهده‌ی فرانسه است. این ماهواره از دو پالس لیزری با طول موج‌های متفاوت (۱۶۴۵/۵۵۲ و ۱۶۴۵/۸۴۶ نانومتر) برای اندازه‌گیری گاز متان استفاده می‌کند. سنجنده‌ی لیدار به دلیل عدم وابستگی به نور خورشید می‌تواند به‌طور مداوم در مدار عمل کند [۲۶-۲۸]. مشخصات این ماهواره‌ها در جدول (۱) به‌طور خلاصه آمده است.

جدول (۱): مشخصات کلی ماهواره‌های پایش گازهای گلخانه‌ای

نام ماهواره	سال ساخت	ارتفاع مدار (کیلومتر)	شیب مدار (درجه)	میان فاصله (کیلومتر)	دوره (روز)	نوع سنجنده	وضوح مکانی (کیلومتر)	عرض نوار (کیلومتر)
GOSAT-1	۲۰۰۹	۶۶۶	۹۸/۰۶	۱۷۵۰	۳۸۰۰	خورشید آهنگ	۱۰	۷۹۰
OCO-2	۲۰۱۴	۷۰۵	۹۸/۲	۴۵۰	۵۲۱	خورشید آهنگ	۲	۱۰/۶
Tansat	۲۰۱۶	۷۰۰	۹۸/۲	۶۲۰	۶۰۰	خورشید آهنگ	۲	۲۰
Sentinel-5P	۲۰۱۷	۸۲۴	۹۸/۷۴	۹۸۰	۱۵۰۰	خورشید آهنگ	۷	۲۶۰۰
GOSAT-2	۲۰۱۸	۶۱۳	۹۷/۸۴	۱۷۰۰	۵۰۰۰	خورشید آهنگ	۱۰	۷۹۰
Gaofen-5 A	۲۰۱۸	۷۰۸	۹۸/۲	۲۱۰۰	-	خورشید آهنگ	۱۰	۸۰۰
OCO-3	۲۰۱۹	۴۰۰	۵۱/۶	۴۵۰	۶۰۰	ایستگاه فضایی بین‌المللی	۲	۱۰/۶
Gaofen-5 B	۲۰۲۱	۷۰۵	-	-	-	خورشید آهنگ	۱۰	۸۰۰
Daqi-1	۲۰۲۲	۷۰۵	۹۸/۲	-	-	خورشید آهنگ	۵۰	-
GOSAT-3	۲۰۲۴	۶۶۶	۹۸/۰۶	۲۹۰۰	۵۲۰۰	خورشید آهنگ	۱۰ و ۳	۹۰ و ۱۰۰۰
Daqi-2	۲۰۲۵	۷۰۵	-	-	-	-	-	-
CO2M	۲۰۲۶	۷۳۵	۹۷/۷	-	-	خورشید آهنگ	۲	۲۵۰
Merlin	۲۰۲۵	۵۰۶	۹۷/۴	۴۲۰	۵۰۰	خورشید آهنگ	-	-

سنجنده‌های نظارت بر کربن

سنجنده‌هایی که برای اندازه‌گیری منابع کربن به کار می‌روند به دودسته کلی فعال و غیرفعال تقسیم می‌شوند. سنجنده‌های غیرفعال به‌طور عمده از طیف‌سنج‌های مادون قرمز حرارتی برای آشکارسازی

تصویربرداری را در محدوده‌ی طول موج مادون قرمز موج کوتاه از ۱۶۰۰ تا ۱۷۰۰ نانومتر انجام می‌دهد. وضوح مکانی آن ۲۵ متر و میدان دید آن ۱۲ کیلومتر در ۱۲ کیلومتر است. این ماهواره‌ها قادر به شناسایی نشتی متان از نیروگاه‌ها و مراکز صنعتی هستند [۱۹].

چین نیز به‌طور فعال در حال توسعه‌ی ماهواره‌های نظارت بر منابع کربن است. ماهواره‌ی تنست که در دسامبر ۲۰۱۶ پرتاب شد و به‌عنوان ماهواره‌ی کربن شناخته می‌شود، اولین ماهواره‌ی کوچک چینی است که به تشخیص و نظارت بر دی‌اکسید کربن اختصاص دارد. مدار این ماهواره، خورشید آهنگ با شیب ۹۸/۲ درجه و ارتفاع آن ۷۰۰ کیلومتر است. این ماهواره دو سنجنده دارد که شامل: یک طیف‌سنج مبتنی بر توری پراش با وضوح طیفی بالا برای تشخیص دی‌اکسید کربن و یک تصویرساز قطب‌سنجی برای اندازه‌گیری پوشش ابری، عمق نوری ذرات معلق و کسر مولی CO₂ است [۲۰]. تنست در تشخیص CO₂ به دقتی بهتر از ۲ ppm در مدار دست‌یافته است. هدف این ماهواره، تشخیص منابع کربن جهانی در تمام مدت روز و با دقت بالا است. همچنین، چین در حال توسعه یک منظومه‌ی ماهواره‌ای کوچک برای نظارت بر منابع کربن با وضوح بالا و کارآمد است. هر ماهواره‌ی کوچک دارای قدرت تفکیک مکانی ۳۰۰ متر و عرض نوار ۳۰ کیلومتری است. این ۱۲ ماهواره‌ی کوچک در صبح و بعدازظهر در مدار خورشید آهنگ حرکت می‌کنند که می‌توانند ۳ تا ۴ درصد متوالی از مناطق کلیدی را در طول روز انجام دهند [۲۱].

در سال ۲۰۱۸، چین ماهواره گائوفن ۵ را به فضا پرتاب کرد. این ماهواره دارای چندین سنجنده است که به‌طور خاص برای نظارت بر محیط‌زیست و شناسایی آلودگی طراحی شده‌اند. سنجنده‌ی مربوط به پایش گازهای گلخانه‌ای آن یک طیف‌سنج هتروداين مکانی است که از تداخل فضایی و توری پراش برای رسیدن به وضوح طیفی بالا استفاده می‌کند [۲۲-۲۳].

چین همچنین ماهواره‌ی پایش محیط اتمسفر دی‌کیو ۱ را در آوریل ۲۰۲۲، به فضا پرتاب کرد. این ماهواره به‌عنوان اولین ماهواره‌ی جهان است که از سنجنده‌ی فعال لیداری برای تشخیص دقیق غلظت CO₂ با دقت بهتر از ۱ ppm استفاده می‌کند. علاوه بر این، ماهواره دی‌کیو ۲ که در سال ۲۰۲۵ پرتاب خواهد شد اولین ماهواره‌ی جهان است که با استفاده‌ی مشترک از سنجنده‌ی فعال و غیرفعال به شناسایی دی‌اکسید کربن با دقت و وضوح بالا می‌پردازد.

می‌کند و طول عمر آن حداقل ۲ سال است. مدار ماهواره، خورشید آهنگ، با ارتفاع ۷۰۰ کیلومتر و شیب مداری ۹۸ درجه است.

در انتخاب محموله‌ی پایش گازهای گلخانه‌ای، معیارهای متعددی باید در نظر گرفته شود. محموله‌ی انتخابی علاوه بر داشتن دقت طیفی و مکانی مناسب، بایستی جرم و توان مصرفی کمی داشته باشد و پیچیدگی‌های ساخت و هزینه‌ی آن نیز معقول باشد. جرم و توان مصرفی کمتر محموله، ابعاد کوچک‌تری را برای سازه و پانل‌های خورشیدی ماهواره ایجاد می‌کند و از پیچیدگی‌های ساخت، پرتاب و کنترل ماهواره می‌کاهد. روش به‌کاررفته برای پیشنهاد محموله، بررسی محموله‌های ماهواره‌های پایش گازهای گلخانه‌ای و سپس سفارشی‌سازی آن، با توجه به موقعیت جغرافیایی کشور و پلتفرم‌های موجود است. در جدول (۳)، جرم و توان سنجنده‌های پایش گازهای گلخانه‌ای در ماهواره‌های مختلف ارائه شده است. مطابق این جدول، سنجنده‌ی ماهواره‌های اوکو ۲ و ۳، کمترین مصرف توان و جرم را در میان سایر سنجنده‌ها دارد. سنجنده‌ی ماهواره‌ی مرلین نیز در رتبه بعدی قرار دارد، البته این سنجنده به پایش متان اختصاص دارد. سایر سنجنده‌ها نیز جرم و توان مصرفی بسیار بالاتری دارند.

جدول (۲): جزئیات محدوده طول موج کانال‌های مختلف در سنجنده‌های

غیرفعال پایش گازهای گلخانه‌ای

نام ماهواره	روش پایش	محدوده کانال‌ها (میکرومتر)	گاز موردسنجش
GOSAT-1	طیف‌سنجی تبدیل فوری	۰/۷۵۸ تا ۰/۷۷۵	اکسیژن
		۱/۵۶ تا ۱/۷۲	دی‌اکسید کربن و متان
		۱/۹۲ تا ۲/۰۸	دی‌اکسید کربن
		۵/۵ تا ۱۴/۳	دی‌اکسید کربن، ازن، متان
OCO-2	سه طیف‌سنج مبتنی بر توری پراش	۰/۷۶۵	اکسیژن
		۱/۶۱	دی‌اکسید کربن
		۲/۰۶	دی‌اکسید کربن
Tansat	طیف‌سنجی مبتنی بر توری پراش	۰/۷۵۸ تا ۰/۷۷۸	اکسیژن
		۱/۵۹۴ تا ۱/۶۲۴	دی‌اکسید کربن (ضعیف)
		۲/۰۴۲ تا ۲/۰۸۲	دی‌اکسید کربن (قوی)
Sentinel-5P	طیف‌سنجی مبتنی بر توری پراش	۰/۲۷ تا ۰/۳	
		۰/۳ تا ۰/۳۲	
		۰/۳۱ تا ۰/۴۰۵	
		۰/۴۰۵ تا ۰/۵	
		۰/۶۷۵ تا ۰/۷۲۵	
		۰/۷۲۵ تا ۰/۷۷۵	

دی‌اکسید کربن در تروپوسفر میانی جو و از طیف‌سنج‌های مادون قرمز موج کوتاه برای بازیابی ستون کل CO₂ استفاده می‌کنند. این سنجنده‌ها از نور خورشید منعکس شده از سطح زمین و اتمسفر بهره می‌برند تا اندازه‌گیری‌های خود را انجام دهند.

در مقابل، سنجنده‌های فعال به‌طورمعمول از لیدار برای بازیابی اطلاعات مربوط به غلظت ستون گازهای گلخانه‌ای مانند دی‌اکسید کربن و متان استفاده می‌کنند. سنجنده‌ی لیداری دو پالس لیزری با طول‌موج‌های روشن و خاموش را ارسال می‌کند. طول موج روشن به طول موج جذب CO₂ نزدیک است و طول موج خاموش از طول موج جذب CO₂ دور است و به‌عنوان مرجع استفاده می‌شود. سپس دامنه و فاز سیگنال‌های برگشتی تحلیل می‌شود تا غلظت ستون CO₂ با دقت بالا محاسبه شود. از آنجایی که لیدار به نور خورشید وابسته نیست، می‌تواند در هر ساعت از شبانه‌روز برای اندازه‌گیری استفاده شود [۲۹، ۳۱-۳۱].

یکی از مشکلات اصلی سنجنده‌های غیرفعال، تأثیر ابرهای نازک یخ یا لایه‌های ذرات معلق است که می‌توانند موجب ایجاد خطاهای سیستماتیک با دامنه‌ی نامشخص شوند. همچنین داده‌های حاصل از این سنجنده‌ها نیاز به مدل‌سازی و اصلاح تأثیرات جو، زاویه‌ی خورشید و غیره دارند که عدم قطعیت را افزایش می‌دهد. باین حال سنجنده‌های غیرفعال، پوشش گسترده‌ای را فراهم می‌کنند و امکان پایش پیوسته گازهای گلخانه‌ای را دارند و توان مصرفی موردنیاز آن‌ها نیز کمتر است. سنجنده‌های فعال در مقابل، دارای دقت بیشتر، پوشش محدود و توان مصرفی بیشتری هستند. در جدول (۲)، روش‌های مختلف به‌کاررفته در ماهواره‌های پایش گازهای گلخانه‌ای و محدوده‌ی طول موج کانال‌های مختلف آن‌ها آمده است.

پیشنهاد یک محموله‌ی مناسب برای پایش گازهای گلخانه‌ای

در این پژوهش، هدف مأموریت، پایش غلظت دی‌اکسید کربن در جو ایران با وضوح مکانی و طیفی مناسب به‌منظور شناسایی منابع تولید CO₂ و پشتیبانی از سیاست‌گذاری زیست‌محیطی است. این ماهواره از سنجنده‌ی غیرفعال در باندهای نزدیک مادون قرمز (NIR^۵) و مادون قرمز موج-کوتاه (SWIR^۶) برای جمع‌آوری داده استفاده

^۶ Short Wave Infrared

^۵ Near Infrared

جدول (۳): جرم و توان سنجنده‌های برخی از ماهواره‌های پایش گازهای گلخانه‌ای

نام ماهواره	GOSAT-1	GOSAT-2	OCO-2,3	MERLIN	Sentinel-5P
جرم سنجنده (کیلوگرم)	۲۵۰	۲۲۵	۱۳۱	۱۴۰	۲۰۶
توان سنجنده (وات)	۳۱۰	۲۷۰	۱۰۵	۱۵۰	۱۷۰

	۲/۳۸۵ تا ۲/۳۰۵		
اکسیژن	۰/۷۶۹ تا ۰/۷۵۹		
دی‌اکسید کربن (ضعیف)	۱/۵۸۳ تا ۱/۵۶۸	طیف‌سنجی هتروداين مکانی ۷	Gaofen-5 A
متان	۱/۶۵۸ تا ۱/۶۴۲		
دی‌اکسید کربن (قوی)	۲/۰۵۸ تا ۲/۰۴۳		
		طیف‌سنج تصویری فابری-پرو با زاویه دید گسترده	GHGsat

بررسی ویژگی‌های محموله‌ی پیشنهادی

محموله‌ی پیشنهادی، یک سنجنده‌ی اپتیکی است که برای اندازه‌گیری ستون کل دی‌اکسید کربن اتمسفر به کار می‌رود و قادر به پایش منابع و جاذب‌های دی‌اکسید کربن است. این محموله دارای دو باند برای اندازه‌گیری دی‌اکسید کربن (۱/۶۱ و ۲/۰۶ میکرومتر) و یک باند برای اندازه‌گیری اکسیژن (۰/۷۶ میکرومتر) است. باند ۱/۶۱ میکرومتر ماکزیمم حساسیت را در لایه‌های نزدیک به سطح زمین نشان می‌دهد درحالی‌که باندهای ۰/۷۶ و ۲/۰۶ میکرومتر، اطلاعات موردنیاز برای تعیین فشار سطح، آلبيدو، دمای اتمسفر، بخارآب، ابرها و ذرات غبار را فراهم می‌کنند. وضوح طیفی باند اکسیژن ۱۷۰۰۰ و وضوح طیفی باندهای دی‌اکسید کربن ۲۰۰۰۰ است [۳۲].

اجزای سنجنده‌ی پیشنهادی

اولین جزء این سنجنده، تلسکوپ است که به‌عنوان ورودی اولیه‌ی نور عمل می‌کند و نور جمع‌آوری‌شده را به‌صورت متمرکز به بخش‌های دیگر سیستم اپتیکی هدایت می‌کند. در سنجنده‌ی اوکو، این تلسکوپ از نوع کاسگرین و با نسبت کانونی (نسبت فاصله کانونی به قطر دهانه) ۱/۹ است که یک نسبت کانونی باز است و برای جمع‌آوری مؤثر نور و افزایش دقت داده‌ها طراحی شده است. پس از تلسکوپ، نور وارد کولیماتور می‌شود. هدف کولیماتور هم‌راستا کردن پرتوهای نور و کاهش قطر آن‌ها است تا سیستم اپتیکی در محدودیت‌های حجمی و طراحی دستگاه قابل قرارگیری باشد. کولیماتور مورد استفاده نیز از نوع کاسگرین و فاصله کانونی آن کوچک‌تر از تلسکوپ است. طراحی کاسگرین، شامل دو آینه (یک آینه‌ی اولیه مقعر و یک آینه‌ی ثانویه) است که مسیر نور را کنترل می‌کند و به نقطه‌ی کانونی هدایت می‌شود. پس از کولیماتور، نور از

بررسی جدول (۱) نیز نشان می‌دهد ماهواره‌ی اوکو ۲ نسبت به دیگر ماهواره‌هایی که دی‌اکسید کربن را پایش می‌کنند کمترین جرم و مصرف توان را دارد. از سوی دیگر، روش‌های مختلف طیف‌سنجی مورد استفاده در ماهواره‌های پایش گازهای گلخانه‌ای بررسی و تحلیل گردید. طیف‌سنجی تبدیل فوری از تداخل‌سنج برای ثبت الگوی تداخل نور استفاده کرده و سپس اطلاعات طیفی را با تبدیل فوری به دست می‌آورد. وضوح طیفی بالا، سیگنال به نویز بالا و محدوده‌ی طیفی وسیع، از مزایای این روش طیف‌سنجی است اما گران‌قیمت بوده و از نظر مکانیکی نیز پیچیده است. در طیف‌سنجی مبتنی بر توری پراش، نور از یک توری پراش عبور می‌کند و به اجزای طیفی تجزیه‌شده و سپس توسط آشکارساز ثبت می‌شود. این روش، ضمن داشتن وضوح طیفی مناسب از طیف‌سنجی تبدیل فوری ساده‌تر و ارزان‌تر است. طیف‌سنجی فابری-پرو از تداخل نور بین دو آینه نیمه شفاف برای ایجاد الگوهای تداخلی استفاده می‌کند و خطوط طیفی خاصی را جدا می‌کند. وضوح طیفی این روش، بالا است اما محدوده‌ی طیفی آن باریک است و برای پایش چندگانه و جامع گازهای جوی محدودیت دارد. از نظر پیچیدگی هم در وضعیت متوسط تا بالا قرار دارد. در طیف‌سنجی هتروداين-مکانی، نور ورودی با یک نور مرجع با فرکانس متفاوت ترکیب می‌شود و سپس با استفاده از یک آینه‌ی نیمه شفاف و یکتوری پراش، طیف آن اندازه‌گیری می‌شود. این روش نیز پیچیده است. لذا روش طیف‌سنجی مبتنی بر توری پراش به دلیل دارا بودن دقت و سرعت مناسب و نیز هزینه و پیچیدگی مکانیکی کمتر، مناسب تشخیص داده شد. در نهایت سنجنده‌ی ماهواره اوکو ۲، که از روش طیف‌سنجی مبتنی بر توری پراش بهره می‌برد و دارای کمترین جرم و توان مصرفی در بین محموله‌های ماهواره‌های با مأموریت مشابه است به‌عنوان سنجنده‌ی پیشنهادی انتخاب گردید.

شناسایی نوسانات کوچک بهینه می‌سازد. میدان دید باریک‌تر، باوجود ایجاد وضوح مکانی بهتر اما سبب افزایش زمان پایش کل جغرافیای کشور می‌شود لذا الزام میدان دید برای سه وضوح مکانی مختلف محاسبه شده و در جدول (۵) مقایسه گردید. تعداد گذرهای ماهواره از ایران، با فرض ارتفاع مداری ۷۰۰ کیلومتر و شیب مداری ۹۸ درجه، حدود ۱۴ گذر در روز است. برای وضوح مکانی عرضی ۱/۳ کیلومتر، عرض نوار اسکن در هر گذر ۱۰/۴ کیلومتر است. با توجه به مساحت کشور (۱۶۴۸۱۹۵ کیلومتر مربع) پایش تمام جغرافیای آن، حدود ۲۳۰ روز طول می‌کشد. علت این افزایش زمان، عرض باریک نوار اسکن و مساحت وسیع کشور است. در صورت انتخاب وضوح مکانی عرضی ۱۰ کیلومتر، عرض نوار اسکن به ۸۰ کیلومتر افزایش یافته است و پایش کل کشور در ۳۰ روز انجام می‌شود. برای وضوح مکانی عرضی ۳۰ کیلومتر، عرض نوار اسکن به ۲۴۰ کیلومتر می‌رسد و زمان پایش کل کشور به حدود ۱۰ روز کاهش می‌یابد.

جدول (۴): الزامات اپتیکی سنجنده

نام پارامتر	مقدار
نسبت کانونی	f/۹
میدان دید	۱۴-۱۵ میلی رادیان
تعداد نمونه	۸
تعداد پیکسل در هر نمونه	بزرگ‌تر مساوی ۲۰
حداقل طول موج	۰/۷۵۸ میکرومتر برای اکسیژن، ۱/۵۹۱ و ۲/۰۴۲ میکرومتر برای دی‌اکسید کربن
حداکثر طول موج	۰/۷۷۲ میکرومتر برای اکسیژن، ۱/۶۲۱ و ۲/۰۸۱ میکرومتر برای دی‌اکسید کربن
وضوح طیفی	بزرگ‌تر از ۱۷۰۰۰ برای اکسیژن بزرگ‌تر از ۲۰۰۰۰ برای دی‌اکسید کربن
نمونه‌برداری طیفی	بزرگ‌تر از ۲ پیکسل بر نمونه

جدول (۵): مقایسه‌ی وضوح مکانی و مدت‌زمان پایش کل جغرافیای

کشور برای میدان دیدهای مختلف

میدان دید عرضی (میلی رادیان)	وضوح مکانی عرضی (کیلومتر)	عرض نوار اسکن شده در هر گذر ماهواره (کیلومتر)	زمان لازم برای پایش کل کشور (روز)
۱۴-۱۵	۱/۳	۱۰/۴	۲۳۰
۱۱۴	۱۰	۸۰	۳۰
۳۳۹	۳۰	۲۴۰	۱۰

فیلتر پلارایزر عبور می‌کند. فیلتر پلارایزر، تنها پرتوهای نور با یک پلاریزاسیون خاص را عبور می‌دهد و با حذف نور پراکنده، کیفیت سیگنال‌ها را بهبود می‌بخشد. نور پس از عبور از فیلتر، به سیستم رله هدایت می‌شود. این سیستم وظیفه‌ی تقسیم پرتو به کانال‌های طیفی مختلف را بر عهده دارد. در این سنجنده، سه کانال طیفی وجود دارد که شامل: کانال ۰/۷۶ میکرومتر برای اکسیژن و کانال‌های ۱/۶۱ و ۲/۰۶ میکرومتر برای دی‌اکسید کربن می‌شود. هر کانال به‌طور مستقل توسط یک طیف‌سنج تحلیل می‌شود. درنهایت، نور به طیف‌سنج می‌رسد که وظیفه‌ی آن، تجزیه نور به اجزای طیفی مختلف است. اجزای طیف‌سنج شامل یک شیار ورودی، کولیماتور انکساری، شبکه‌ی پراش منعطف و یک دوربین بازتابی است که تصویر طیفی را بازسازی می‌کند. نور طیفی پس از عبور از طیف‌سنج، به آشکارساز هدایت می‌شود که آن را به سیگنال‌های الکتریکی تبدیل می‌کند و برای پردازش و تحلیل به سیستم ارسال می‌کند.

الزامات اپتیکی سنجنده

الزامات اپتیکی موردنیاز سنجنده‌ی پیشنهادی بر اساس محاسبات سیستمی و الزامات سنجنده‌ی ماهواره اوکو ۲، تعیین و در جدول (۴) ارائه شده است. این الزامات، شامل نسبت کانونی یک‌نهم برای جمع‌آوری نور بیشتر و بهبود نسبت سیگنال به نویز است. نسبت سیگنال به نویز موردنیاز بیش از ۴۰۰ است که از طریق انتخاب دقیق باندهای طیفی، استفاده از آشکارسازهای با حساسیت بالا، طراحی اپتیکی پیشرفته، کالیبراسیون دقیق و الگوریتم‌های پردازش داده بهینه قابل حصول است. همچنین میدان دید آن برای ایجاد وضوح مکانی ۱-۲ کیلومتر برابر ۱۴-۱۵ میلی‌رادیان در نظر گرفته شده است. عرض نوار اسکن شامل ۸ نمونه است که هر نمونه از میانگین‌گیری داده‌های ۲۰ پیکسل به دست می‌آید. محدوده‌های طول‌موجی برای کانال‌های مختلف دی‌اکسید کربن و اکسیژن، امکان تشخیص نوارهای جذبی این گازها را فراهم می‌کند. وضوح طیفی بیشتر از ۱۷۰۰۰ برای کانال اکسیژن و بیشتر از ۲۰۰۰۰ برای کانال‌های دی‌اکسید کربن، تحلیل دقیق ستون‌های گازی را ممکن می‌سازد. همچنین نمونه‌برداری طیفی با بیش از ۲ پیکسل برای هر نمونه، از دست رفتن داده‌ها را کاهش می‌دهد و دقت اندازه‌گیری‌ها را تضمین می‌کند. این ویژگی‌ها طراحی سنجنده را برای اندازه‌گیری دقیق غلظت گازها و

بررسی الزامات حرارتی سنجنده

قلب سنجنده‌ی پیشنهادی، سه آشکارساز است که به صورت مجزا قرار گرفته‌اند اما از نظر حرارتی به هم کوپل شده‌اند. آشکارسازهای دی‌اکسید کربن، با استفاده از سیستم خنک‌کننده‌ی کرایو تا دمای ۱۲۰ کلوین و آشکارساز اکسیژن تا دمای ۱۸۰ کلوین سرد می‌شوند. طیف‌سنج و بستر اپتیکی آن نیز با استفاده از رادیاتور خارجی که در دمای ۲۵- درجه سانتی‌گراد عمل می‌کند، در دمای $5 \pm 0/15$ درجه سانتی‌گراد نگهداری می‌شوند. یک رادیاتور دوم نیز در دمای ۲۰- درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شده است تا برای خنک کاری تجهیزات الکترونیکی، مورد استفاده قرار گیرد. تلسکوپ ماهواره در هنگام مأموریت رو به زمین و در راستای محور سمت‌القدم است [۳۳].

با توجه به الزامات حرارتی که بیان شد، به منظور نگهداری تجهیزات محموله و پلتفرم در محدوده‌های دمایی مجاز نیاز به استفاده از اجزاء غیرفعال و فعال در طراحی زیرسیستم کنترل حرارت ماهواره است. اجزاء غیرفعال شامل: پتوهای عایق چندلایه، پوشش‌های سطحی و فیلم‌های حرارتی و مدیریت انتقال تلفات حرارتی از طریق سطح و اجزای سازه به رادیاتورهای ماهواره است. اجزاء فعال نیز شامل: گرم‌کن و لوله‌های حرارتی با ضریب هدایت متغیر هستند.

مدل‌سازی حرارتی ساده‌ی ماهواره

مدل حرارتی ماهواره‌ی بررسی‌شده، یک مدل بسیار ساده است. سطح تحتانی مدل با رنگ سفید در نظر گرفته شده و به طرف زمین یا سمت‌القدم فرض شده است. سطح فوقانی نیز که به طرف اوج یا سمت‌الراس است، با رنگ سفید پوشیده شده و دارای ضریب جذب $0/15$ و ضریب انتشار تشعشعی $0/87$ است. این ماهواره، در مدار پایین زمین و در ارتفاع ۷۰۰ کیلومتری در نظر گرفته شده است.

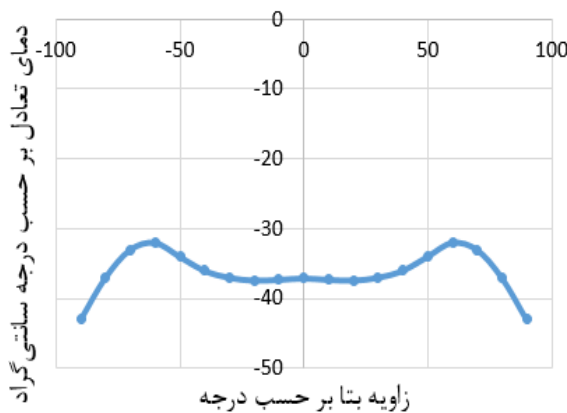
مدل هندسی ساده‌شده‌ی ماهواره با استفاده از نرم‌افزار Desktop Thermal ساخته شد و با در نظر گرفتن مقادیر ثابت‌های خورشیدی آلبدو و مادون قرمز زمین، شارهای حرارتی وارد بر سطوح مختلف ماهواره به ازای زوایای مختلف بتا، محاسبه گردید. زاویه‌ی بتا، زاویه‌ی بین صفحه‌ی مداری ماهواره و بردار تابش خورشید است و به تعیین میزان تابش خورشید روی ماهواره کمک می‌کند. به منظور تحلیل حرارتی مدل ماهواره، مقادیر شارهای حرارتی محیطی

به دست آمده به عنوان ورودی در برنامه نرم‌افزار SINDA مورد استفاده قرار گرفت و دمای سطوح در مدل اولیه‌ی ماهواره، محاسبه شد. در این مرحله از تلفات حرارتی داخلی ماهواره صرف نظر شده و صرفاً بارهای محیطی تشعشعی در نظر گرفته شده است.

شکل (۱)، تغییرات دمایی دیواره‌های جانبی ماهواره را در این مدل نشان می‌دهد. با توجه به اینکه کنترل وضعیت این ماهواره از نوع تعادل سه محوره است و پایداری آن با روش چرخش ماهواره به دور خود نیست، اختلاف بسیار شدید دمایی مابین وجهی که در مقابل خورشید قرار گرفته با وجهی که در سایه قرار دارند مشاهده می‌شود؛ بنابراین به منظور کنترل حرارت سازه و متعاقباً اجزاء اصلی ماهواره، بایستی کل سطوح جانبی سازه با پتوهای عایق چندلایه پوشانده شوند.

در شکل (۲)، نتایج دمای متوسط برای وجه فوقانی مدل در یک دور مدار در وضعیت دائمی به ازای زوایای مختلف بتا (از ۹۰- تا ۹۰+ درجه) نشان داده شده است. صفحه فوقانی ماهواره با تابش خورشیدی به صورت موازی قرار گرفته است و هیچ‌گونه شار خورشیدی را دریافت نمی‌کند. با توجه به اینکه این سطح ماهواره در راستای محور اوج قرار دارد، شار حرارتی دریافتی مادون قرمز زمین و آلبدوی آن نیز صفر است، بنابراین دمای بسیار سردی را تجربه می‌کند. این وجه در زاویه‌ی بتای صفر درجه در طول مدت روز، بیشترین شار خورشیدی را دریافت می‌کند و بیشترین مقدار دما را در این بازه‌ی دمایی دارد که آن هم حدوداً ۸۰- درجه‌ی سانتی‌گراد و بسیار پایین است. در زوایای بتای بین صفر و ۹۰ درجه نیز به تدریج میزان شار خورشیدی وارده به این سطح کم می‌شود، در نتیجه منحنی دما سیر نزولی دارد. لازم به ذکر است که همه‌ی سطوح نسبت به زاویه‌ی بتای صفر درجه، دمای متقارن دارند. در هر صورت، این وجه با دمای بسیار پایینی که دارد برای انتخاب رادیاتورهای ماهواره موقعیت مناسبی نداشته و ضروری است با پتوهای عایق چندلایه پوشانده شود.

شکل (۳)، دمای تعادل را برای صفحه‌ی تحتانی ماهواره در زوایای مختلف نشان می‌دهد. از آنجاکه صفحه‌ی تحتانی همواره رو به زمین است، دمای آن به شدت تحت تأثیر شار حرارتی مادون قرمز و آلبدوی زمین است و چون مقادیر فوق تقریباً ثابت هستند، تغییرات دمایی این صفحه نیز محدود است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در چند نقطه‌ی محدود از مدار، شار خورشیدی تشعشعی کوچکی به این سطح تابیده می‌شود که موجب تغییر دما با زاویه‌ی بتا می‌شود.



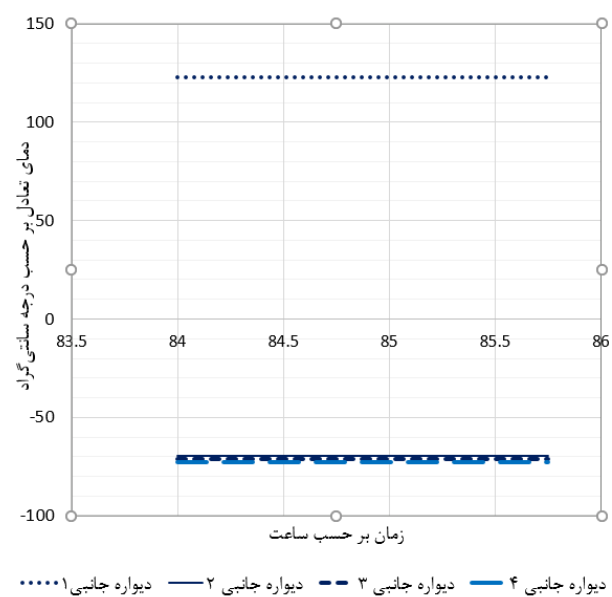
شکل (۳): دمای تعادل سطح تحتانی مدل ماهواره به ازای زوایای بتای مختلف

الزامات پلتفرم

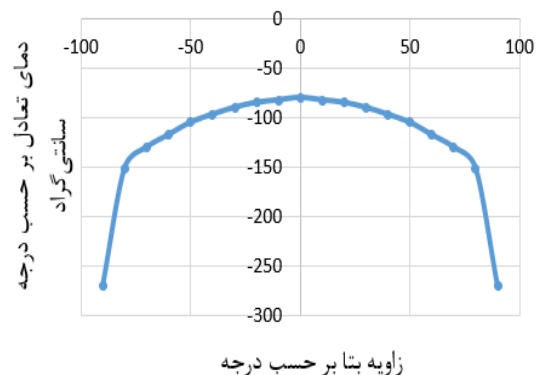
سازه‌ی پلتفرم موردنیاز برای ماهواره‌ی پیشنهادی پایش گاز گلخانه‌ای، حداقل به طول ۲ متر و مقطع شش‌وجهی با قطر ۱ متر است تا اجزای اساسی و محموله‌ی آن چیدمان شود. توان الکتریکی موردنیاز آن که توسط یک جفت پانل خورشیدی بازشو تأمین می‌شود بیش از ۹۰۰ وات است. به‌منظور دریافت بیشترین توان خورشیدی و تعقیب آن به عملگر دورانی پلنل‌ها حول محور گام پلتفرم نیاز است. باتری‌های موردنیاز پیشنهادی به ظرفیت ۳۵ آمپر ساعت و از نوع نیکل-هیدروژن هستند تا توان موردنیاز در شب مدار را تأمین نمایند. پایدارسازی ماهواره به روش فعال و با استفاده از چرخ‌های واکنشی انجام می‌شود. برای حسگرهای کنترل وضعیت، تعقیب‌کننده‌ی ستاره و واحد اندازه‌گیری اینرسی پیشنهاد می‌شود. طیف‌سنج‌ها به‌منظور جمع‌آوری داده‌های دقیق نیاز به راستای هدف‌گیری دقیق دارند؛ بنابراین، یکی از الزامات کنترلی پلتفرم، دقت بالای نشانه‌گیری است. حفظ زاویه با تلورانس 0.1° درجه موردنیاز است، زیرا هرگونه کاهش در دقت نشانه‌روی می‌تواند منجر به کاهش کیفیت داده‌ها شود. علاوه بر این، پایداری نشانه‌گیری نیز اهمیت زیادی دارد تا از لرزش یا حرکت‌های ناخواسته ماهواره در طول مشاهدات جلوگیری شده و داده‌ها به‌طور پیوسته و بدون نویز ثبت شوند. به دلیل نیاز به نشانه‌گیری دقیق و ثبات جهت‌گیری، کنترل سه محوره‌ی پلتفرم ضروری است و بنابراین ماهواره چرخش به دور محور خود ندارد.

در ارتباط با نیازهای دمایی محموله‌ی پیشنهادی، به‌ویژه برای نگهداری آشکارسازها در دمای بسیار پایین، سیستم‌های سردکننده کرایوژنیک فضایی موردنیاز است که تاکنون در کشور طراحی و

در زوایای بتای 60° - درجه و 60° + درجه، سطح تحتانی در معرض بیشترین مقدار شار خورشیدی قرار می‌گیرد، به این جهت بیشترین مقدار دما در این زوایا اتفاق افتاده است. نظر به اینکه در زوایای 90° + درجه و 90° - درجه، شار حرارتی آلبیدو کمترین مقدار است و فقط شار حرارتی مادون‌قرمز زمین به سطح فوق می‌رسد، کمترین مقدار دما در این زوایا رخ داده است. با توجه به اینکه دمایی عملیاتی رادیاتورهای حدود منفی بیست درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شده است، این سطح نیز به‌عنوان رادیاتور انتخاب نشده و برای این ماهواره، رادیاتورهای مستقل از سازه اصلی موردنیاز است.



شکل (۱): تغییرات دمایی دیواره‌های جانبی مدل ماهواره



شکل (۲): دمای تعادل سطح فوقانی مکعب به ازای زوایای بتای مختلف

ثبات نشانه‌گیری نیاز دارد و لذا پلتفرم موردنیاز آن چرخش ندارد و نیازمند سیستم کنترل وضعیت سه محوره است. تمامی وجوه ماهواره بایستی با پتوی‌های عایق چندلایه پوشانده شود و در نتیجه به پانل‌های خورشیدی باز شو نیاز است.

در طراحی و ساخت یک ماهواره‌ی داخلی به‌منظور پایش گاز دی‌اکسید کربن به پلتفرم ماهواره‌ای با سطح مقطع یک مترمربع و طول دو متر نیاز است که مجهز به پانل‌های خورشیدی باز شو، با سیستم کنترل وضعیت سه محوره باشد. همچنین در رابطه با زیرسیستم کنترل حرارت لازم است طراحی و ساخت لوله‌های حرارتی با ضریب هدایت متغیر و سیستم‌های کرایوژنیک مورد توجه قرار گیرد. این پژوهش، گامی مؤثر در جهت شناسایی چالش‌های پیش روی بخش فضایی کشور جهت ورود به حوزه‌ی ساخت ماهواره‌های پایش گازهای گلخانه‌ای است که نیاز به سرمایه‌گذاری وسیع در بخش تحقیق و توسعه برای کسب دانش فنی مرتبط و نیز مستندسازی داده‌های پایش اقلیم را آشکار می‌سازد. این موضوع در پژوهش‌های اخیر متخصصین فناوری فضایی کشور نیز مورد تأکید و اهمیت قرار گرفته است [۳۴-۳۵].

تعارض منافع

"هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است."

تشکر و قدردانی

مقاله حاضر برگرفته از طرح پژوهشی با کد ۱۰۱۰۸۰۱۰۱۱ می‌باشد که با حمایت مالی سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران به انجام رسیده است. بدین‌وسیله مراتب قدردانی و تشکر از این سازمان محترم ابراز می‌گردد.

مراجع

- [1] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), *Climate Change 2021: The Physical Science Basis: Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press, 2021.
 - [2] A. L. Salvia, W. Leal Filho, L. L. Brandli, and J. S. Griebeler, "Assessing research trends related to Sustainable Development Goals: Local and global issues," *J. Cleaner Prod.*, vol. 208, pp. 841–849, 2019.
 - [3] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability: Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on*
- ساخته نشده‌اند. از آنجاکه ماهواره‌ی حامل این محموله چرخش ندارد، اختلاف دمایی شدید بین وجهی که در مقابل خورشید قرار دارد و سایر وجوه جانبی ماهواره ایجاد می‌شود، بنابراین تمامی وجوه ماهواره بایستی با پتوی‌های عایق چندلایه پوشانده شوند. این موضوع همچنین موجب می‌شود که پانل‌های خورشیدی را نتوان روی وجوه ثابت ماهواره قرارداد و در نتیجه به پانل‌های خورشیدی باز شو نیاز است.
- برای مدیریت مومنوم زاویه‌ای، از چرخ‌های عکس‌العمل برای کنترل دقیق و از عملگرهای مغناطیسی برای تخلیه‌ی مومنوم استفاده می‌شود که ثبات بلندمدت ماهواره را در برابر نیروهای خارجی مانند فشار تابش خورشید تضمین می‌کنند. علاوه بر این، نیاز به چندین ردیاب ستاره و واحدهای اندازه‌گیری اینرسی است تا عملکرد مداوم ماهواره حتی در صورت بروز خرابی در قطعات اصلی تضمین شود.
- ### بحث و نتیجه‌گیری
- در مقاله‌ی حاضر به بررسی انواع ماهواره‌های پایش گازهای گلخانه‌ای و محموله‌های آن‌ها پرداخته شد و در نهایت، یک سنجنده که ضمن داشتن دقت مناسب، کمترین پیچیدگی ساخت و نیز حداقل جرم و توان مصرفی را داشته باشد، به‌منظور پایش گاز دی‌اکسید کربن پیشنهاد گردید. این سنجنده‌ی سنجنش‌ازدور بر پایه‌ی فناوری طیف‌سنجی مبتنی بر توری پراش در باندهای مادون‌قرمز نزدیک (۰.۷۶ میکرومتر) و مادون‌قرمز موج-کوتاه (۱/۶ و ۲/۰۶ میکرومتر) عمل می‌کند و برای اندازه‌گیری و ثبت انرژی بازتاب شده از سطح زمین و جو به کار می‌رود. لازم به ذکر است که با تغییر باندهای طیفی، این سنجنده قادر به پایش سایر گازهای گلخانه‌ای از جمله گاز متان (۱/۶۵ و ۲/۳ میکرومتر) نیز است. الزامات سنجنش‌ازدور این سنجنده بر اساس محاسبات سیستمی و نیز الزامات سنجنده‌ی ماهواره‌ی اوکو ۲، تعیین شد. برای دستیابی به‌وضوح مکانی در حدود ۱ تا ۲ کیلومتر، کل کشور هر ۲۳۰ روز یک‌بار پایش می‌شود. در صورت نیاز به پایش سریع‌تر دو راهکار وجود دارد: ۱- کاهش وضوح مکانی که مستلزم افزایش میدان دید است، ۲- استفاده از منظومه‌ی ماهواره‌ای. با تغییر وضوح مکانی به ۱۰ کیلومتر امکان پایش کل کشور به‌صورت ماهیانه فراهم می‌شود و برای دوره‌ی پایش ۱۰ روزه هم وضوح مکانی به ۳۰ کیلومتر خواهد رسید. این محموله برای جمع‌آوری داده‌های باکیفیت به پلتفرم با دقت نشانه‌روی بالا و

- radiometrically calibrated products,” *Atmos. Meas. Tech.*, vol. 10, no. 1, pp. 59–81, 2017.
- [17] A. Eldering, T. E. Taylor, C. W. O'Dell, and R. Pavlick, “The OCO-3 mission: Measurement objectives and expected performance based on one year of simulated data,” *Atmos. Meas. Tech.*, vol. 12, no. 4, pp. 2341–2370, 2019.
- [18] European Space Agency (ESA), “Copernicus Sentinel-5P.” Accessed: Aug. 21, 2025. [Online]. Available: https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-5P
- [19] GHGSat, “World's first commercial CO₂ sensor in orbit.” Accessed: Aug. 21, 2025. [Online]. Available: <https://www.ghgsat.com/en/newsroom/worlds-first-commercial-co2-sensor-in-orbit/>
- [20] Y. Zhang, J. Liu, L. Liu, W. Wang, L. Wang, and D. Wang, “TanSat: A Chinese satellite for global carbon dioxide monitoring,” *Remote Sens.*, vol. 9, no. 6, Art. no. 596, 2017.
- [21] G. Meng, Y. Wen, M. Zhang, Y. Gu, W. Xiong, Z. Wang, and S. Niu, “The status and development proposal of carbon sources and sinks monitoring satellite system,” *Carbon Neutrality*, vol. 1, no. 1, Art. no. 32, 2022.
- [22] Y. Zhao, Y. Liu, and X. Zhang, “Gaofen-5: A new satellite for environmental monitoring and analysis,” *Remote Sens.*, vol. 11, no. 6, Art. no. 674, 2019.
- [23] X. Liu, S. Zhang, and Y. Hu, “Monitoring of atmospheric greenhouse gases using Gaofen-5 satellite,” *Environ. Sci. Technol.*, vol. 54, no. 5, pp. 2751–2760, 2020.
- [24] Y. Wang, J. Zhang, and X. Liu, “The launch of China's DQ-1 satellite for atmospheric monitoring,” *Remote Sens.*, vol. 14, no. 5, Art. no. 1040, 2022.
- [25] L. Zhang, C. Zhao, and H. Li, “DQ-2: The next-generation atmospheric monitoring satellite,” *Environ. Monit. Assess.*, vol. 195, no. 2, Art. no. 82, 2023.
- [26] O. Bock, J. Bremer, and D. Zeng, “The MERLIN mission: A lidar-based approach for methane monitoring,” *Remote Sens. Environ.*, vol. 266, Art. no. 112689, 2022.
- [27] K. Gerilowski, *et al.*, “The Methane Remote Sensing Lidar Mission (MERLIN): An intergovernmental approach to global climate monitoring,” *Atmos. Meas. Tech.*, vol. 13, no. 7, pp. 4131–4144, 2020.
- [28] N. Strasser, C. Wührer, C. Köhl, M. Haiml, D. Viehmann, and M. Kritzler, “MERLIN (MEthane Remote sensing LIidar mission): Heading towards PFM and observation of interesting effects,” in *Proc. Int. Conf. Space Optics (ICSO 2022)*, SPIE, vol. 12777, Art. no. 127770X, 2023.
- [29] L. S. Rothman, I. E. Gordon, Y. Babikov, A. Barbe, D. C. Benner, P. F. Bernath, M. Birk, *et al.*, “The HITRAN2012 molecular spectroscopic database,” *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, vol. 130, pp. 4–50, 2013.
- [30] T. Röckmann, *et al.*, “Active and passive remote sensing of greenhouse gases,” *Remote Sens. Environ.*, vol. 178, pp. 180–193, 2016.
- [31] D. W. T. Griffith and J. Notholt, “Active remote sensing of greenhouse gases using laser technology,” *Atmos. Meas. Tech.*, vol. 9, no. 5, pp. 1901–1913, 2016.
- [32] R. Haring, R. Pollock, B. Sutlin, and D. Crisp, “Current development status of the Orbiting Carbon Observatory instrument optical design,” in *Infrared Spaceborne Remote Sensing XIII*, Proc. SPIE, vol. 5883, pp. 61–70, 2005.
- Climate Change*. Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press, 2022.
- [4] S. Zhao, M. Liu, M. Tao, W. Zhou, X. Lu, Y. Xiong, F. Li, and Q. Wang, “The role of satellite remote sensing in mitigating and adapting to global climate change,” *Sci. Total Environ.*, vol. 904, Art. no. 166820, 2023.
- [5] C. J. Merchant, O. Embury, C. E. Bulgin, *et al.*, “Satellite-based time-series of sea-surface temperature since 1981 for climate applications,” *Sci. Data*, vol. 6, no. 1, Art. no. 223, 2019.
- [6] J. Yang, P. Gong, R. Fu, M. Zhang, J. Chen, S. Liang, B. Xu, J. Shi, and R. Dickinson, “The role of satellite remote sensing in climate change studies,” *Nature Climate Change*, vol. 3, no. 10, pp. 875–883, 2013.
- [7] World Meteorological Organization (WMO), “Essential Climate Variables.” Accessed: Aug. 21, 2025. [Online]. Available: <https://gcos.wmo.int/en/essential-climate-variables>
- [8] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), *Climate Change 2014: Synthesis Report: Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press, 2014.
- [9] J. Heymann, M. Reuter, M. Hilker, M. Buchwitz, O. Schneising, H. Bovensmann, J. P. Burrows, *et al.*, “Consistent satellite XCO₂ retrievals from SCIAMACHY and GOSAT using the BESD algorithm,” *Atmos. Meas. Tech.*, vol. 8, no. 7, pp. 2961–2980, 2015.
- [10] M. Zhang, X.-Y. Zhang, R.-X. Liu, and L.-Q. Hu, “A study of the validation of atmospheric CO₂ from satellite hyperspectral remote sensing,” *Adv. Climate Change Res.*, vol. 5, no. 3, pp. 131–135, 2014.
- [11] C. Crevoisier, A. Chédin, H. Matsueda, T. Machida, R. Armante, and N. A. Scott, “First year of upper tropospheric integrated content of CO₂ from IASI hyperspectral infrared observations,” *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 9, no. 14, pp. 4797–4810, 2009.
- [12] C. Serio, G. Masiello, P. Mastro, A. Cersosimo, P. Pasquariello, and S. Venafrà, “Simultaneous retrieval of OCS and CO₂ from the IASI shortwave spectral band: Assessment of the accuracy of the retrieval products and validation with *in situ* observations,” in *Proc. SPIE, Remote Sens. Clouds Atmos. XXV*, vol. 11531, Art. no. 1153107, 2020.
- [13] S. S. Kulawik, D. B. A. Jones, R. Nassar, F. W. Irion, J. R. Worden, K. W. Bowman, T. Machida, *et al.*, “Characterization of Tropospheric Emission Spectrometer (TES) CO₂ for carbon cycle science,” *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 10, no. 12, pp. 5601–5623, 2010.
- [14] Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA), “About Greenhouse Gases Observing Satellite ‘IBUKI’ (GOSAT).” Accessed: Aug. 21, 2025. [Online]. Available: <https://global.jaxa.jp/projects/sat/gosat/>
- [15] World Meteorological Organization (WMO), “OCO-2 (Orbiting Carbon Observatory-2).” Accessed: Aug. 21, 2025. [Online]. Available: https://space.oscar.wmo.int/satellites/view/oco_2
- [16] D. Crisp, H. R. Pollock, R. Rosenberg, L. Chapsky, R. A. M. Lee, *et al.*, “The on-orbit performance of the Orbiting Carbon Observatory-2 (OCO-2) instrument and its

- [35] O. Shekoofa, M. Khoshsim, S. Ghazanfarinia, and F. Bagheroskouei, "Toward the establishment of a national center for space weather services: Vision, mission and organization," *Space Sci. Technol. Appl.*, vol. 1, no. 2, pp. 34–48, 2022, doi: 10.22034/jssta.2022.309735.1034. (in Persian).
- [33] J. G. Rivera, J. I. Rodriguez, and D. L. Johnson, "Development of the Orbiting Carbon Observatory instrument thermal control system," *SAE Int. J. Aerosp.*, vol. 1, pp. 268–279, 2008.
- [34] A. Hashemi, S. Shakhshi, M. Haghgoo, T. Abdollahi, H. Bazrafshan, M. Abedi, *et al.*, "Exploring the multifaceted landscape of space industry applications: Thematic analysis of strategic policy plans of developed and developing countries," *Space Sci. Technol. Appl.*, no. e216288, 2025, doi: 10.22034/jssta.2024.461961.1172. (in Persian).