



Selection of satellite constellations with space weather monitoring payloads for Iran

Available in: Journal.isrc.ac.ir

Journal of Space Science,
Technology & Applications
(Persian)

Vol. 5, No. 2, pp.: 23-33
2026

DOI:
[10.22034/jsssta.2024.464398.1192](https://doi.org/10.22034/jsssta.2024.464398.1192)

Article Info

Received: 2024-07-02
Accepted: 2024-08-30

Keywords

Space weather, Satellite
constellation, STK, Coverage
area, Visible satellite, Payload

How to Cite this article

M. Khoshshima, S. Aminabadi,
H. Jalili, S. Karami
“Selection of satellite
constellations with space
weather monitoring payloads
for Iran”, *Journal of Space
Science, Technology &
Applications*, Vol. 5, No. 2, pp.
23-33, 2026

Masoud Khoshshima^{1*}, Sahar Aminabadi², Hadi Jalili³, Saber Karami⁴

^{1*} Associate professor, Iranian Space Research Center, Tehran, Iran
m.khoshshima@isrc.ac.ir

² M.Sc. in Aerospace Engineering, College of Interdisciplinary Science and Technology,
University of Tehran, Tehran, Iran
sahar.aminabadi@ut.ac.ir

³ Assistant Professor, Iranian Space Research Center, Tehran, Iran
h.jalili@isrc.ac.ir

⁴ Researcher in Astronomy and Astrophysics, Iranian Space Research Center, Tehran, Iran
s.karami@isrc.ac.ir

Abstract

Monitoring the space weather and managing its disruptive phenomena is crucial to mitigate its adverse effects. Research shows that space platforms, especially satellite constellations with appropriate payloads, can complement ground-based monitoring networks. This study focused on selecting satellite constellations to ensure full Iran and the Middle East coverage. Payload selection was based on the country's space weather monitoring needs and strategies. The payloads include a magnetometer, proton-electron ion detector, radio occultation, Ion drift meter, and radiation monitor. STK software was used to design and analyze the satellite constellations. The design was initially performed assuming one ground station and then by creating a network of ground stations (5 stations) at an orbital altitude of 500 km, inclination of 45 and 55 degrees, and using a symmetric satellite constellation with a Walker Delta pattern. The superior satellite constellations were chosen from 778 scenarios using the statistical parameter comparison method, which included minimum visible satellites and cumulative coverage. After evaluating scenarios, the two superior constellations identified were 7x10 and 14x1. Utilizing a 45 degree orbital inclination and a network of dispersed ground stations minimizes the required number of satellites and provides comprehensive coverage of Iran.

به‌گزینی منظومه‌های ماهواره‌ای با محموله‌های پایش اقلیم فضای ایران

مسعود خوش‌سیما^{۱*}، سحر امین‌آبادی^۲، هادی جلیلی^۳ و صابر کرمی^۴

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

۲- دانشجویان علوم و فناوری‌های میان‌رشته‌ای، دانشگاه تهران، تهران، ایران - sahar.aminabadi@ut.ac.ir

۳- پژوهشگاه فضایی ایران، تهران، ایران - h.jalili@isrc.ac.ir

۴- پژوهشگاه فضایی ایران، تهران، ایران - s.karami@isrc.ac.ir

نویسنده مسئول*

چکیده

پایش پیوسته اقلیم فضا و مدیریت پدیده‌های مخرب آن، جهت کاهش آسیب‌های ناشی از اقلیم فضا امری حیاتی است. تحقیقات نشان می‌دهد که سکوه‌های فضایی، به‌ویژه منظومه‌های ماهواره‌ای با محموله‌های مناسب می‌توانند به‌عنوان مکمل شبکه پایش زمینی عمل کنند. این پژوهش بر به‌گزینی منظومه‌های ماهواره‌ای جهت پوشش کامل ایران و خاورمیانه تمرکز داشته است. محموله‌های این مأموریت شامل حسگر میدان مغناطیسی، آشکارسازی پروتون‌ها، الکترون‌ها و یون‌های آسیب‌زا، نهفتگی رادیویی، اندازه‌گیری حرکت یونی و پایشگر تشعشعات جهت پایش اقلیم فضا متناسب با راهبرد کشور انتخاب‌شده‌اند. از نرم‌افزار اس‌تی‌کی به‌منظور طراحی و تحلیل منظومه‌های ماهواره‌ای استفاده شده است. طراحی ابتدا با فرض یک ایستگاه زمینی و سپس ایجاد شبکه ایستگاه‌های زمینی (۵ ایستگاه) در ارتفاع مداری ۵۰۰ کیلومتری، میل مداری ۴۵ و ۵۵ درجه و به‌کارگیری منظومه ماهواره‌ای متقارن با الگوی واکر، انجام شد. منظومه‌های ماهواره‌ای برتر، با استفاده از مقایسه پارامترهای آماری شامل حداقل تعداد ماهواره در دید و پوشش تجمعی، از میان ۷۷۸ سناریو انتخاب شد. بر اساس نتایج، دو منظومه ۷×۱۰ و ۱۴×۱ کوچک‌ترین سناریوهایی هستند که الزامات مسئله را برآورده می‌کنند. علاوه بر این، استفاده از میل مداری ۴۵ و شبکه ایستگاه‌های زمینی پراکنده سبب کاهش تعداد کل ماهواره‌ها شده و پوشش کامل ایران را فراهم می‌آورد.

تاریخچه داوری

دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۱۲

پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۰۹

واژه‌های کلیدی

اقلیم فضا، منظومه ماهواره‌ای، اس‌تی‌کی، سطح پوشش، ماهواره درگذر، محموله ماهواره

نحوه استناد به این مقاله

مسعود خوش‌سیما، سحر امین‌آبادی، هادی جلیلی و صابر کرمی، "به‌گزینی منظومه‌های ماهواره‌ای با محموله‌های پایش اقلیم فضای ایران"، *دوفصلنامه علوم، فناوری و کاربردهای فضایی*، جلد پنجم، شماره دوم، صفحات ۳۳-۲۳، ۱۴۰۴.

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

دوفصلنامه علوم، فناوری و
کاربردهای فضایی

سال پنجم، شماره ۲، صفحه ۲۳-۳۳
پاییز و زمستان ۱۴۰۴

DOI:

[10.22034/jsssta.2024.464398.1192](https://doi.org/10.22034/jsssta.2024.464398.1192)

۱- مقدمه

اقلیم فضا برای توصیف تغییرات خورشید، بادهای خورشیدی، هواسپهر^۱، مغناطیس‌سپهر^۲ و گرم‌سپهر^۳ استفاده می‌شود و می‌تواند بر عملکرد و قابلیت اطمینان سامانه‌ها و زیرساخت‌های زمین پایه و فضاپایه تأثیر بگذارد [۱]. گستردگی رخدادهای اقلیم فضا و تأثیر این رخدادهای بر سامانه‌های زمینی، هوایی و فضایی، تمامی کشورهای دنیا را تحت تأثیر قرار می‌دهد. از جمله زیان‌های حاصل از رخدادهای اقلیم فضا می‌توان به آسیب فضاانوردان، اختلال ارتباطات و آسیب به شبکه انتقال توان اشاره نمود.

با پیشرفت صنعت مخابرات ماهواره‌ای، ظهور تورسم فضایی و وابستگی به شبکه بی‌سیم در برقراری ارتباط، تمدن بشری در برابر مشکلات ناشی از رخدادهای اقلیم فضا آسیب‌پذیرتر می‌شوند [۲]؛ بنابراین، لازم است کشورهای مختلف در قالب ایجاد شبکه‌های مشترک و تشکیل سازمان‌هایی باهدف مشترک به درک بهتر و پیش‌بینی چنین پدیده‌هایی بپردازند. باین‌حال، به دلیل شدیدتر بودن برخی از اثرات پدیده‌های اقلیم فضا در نواحی جغرافیایی مختلف، نیاز است تا هر کشور علاوه بر بهره بردن از اطلاعات و پیش‌بینی‌های بین‌المللی در حوزه اقلیم فضا، گام‌های راهبردی در جهت بومی‌سازی رصد و پایش اقلیم فضا برداشته شود [۳].

به‌عنوان نمونه، خطوط لوله در ایران یکی از اصلی‌ترین اهدافی هستند که پایش آن می‌تواند در طولانی‌مدت به کشور کمک کند؛ زیرا آشفته‌گی‌های مغناطیسی ناشی از رویدادهای خورشیدی در خوردگی خطوط لوله مؤثر است. خوردگی توسط جریان‌های الکتریکی ناشی از طوفان‌های مغناطیسی و طوفان‌های فرعی افزایش می‌یابد. اختلاف پتانسیل موجود بین خطوط لوله و زمین می‌تواند تا چندین ولت نیز افزایش یابد که این پدیده منجر به نشت الکترون می‌شود. همچنین، صنعت نفت و معدن که به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین صنایع فعال در کشور شناخته می‌شوند، از اندازه‌گیری‌های مغناطیسی به‌صورت گسترده برای جست‌وجوی منابع طبیعی در داخل زمین و جهت‌دهی در حفاری استفاده می‌کنند. طوفان‌های مغناطیسی ناشی از رخدادهای اقلیم فضا می‌توانند میدان مغناطیسی را مختل کرده و باعث کاهش دقت در حفاری شوند. علاوه بر این،

این رخدادهای بر هوانوردی، شبکه‌های برق، خودروها، مخابرات رادیویی و دیگر زیرساخت‌ها نیز تأثیرات مخربی دارند [۴]. طبق بررسی‌های انجام‌شده در [۵]، واکنش هواسپهر به فعالیت‌های خورشیدی، به‌ویژه در عرض‌های جغرافیایی پایین تا متوسط (محل قرارگیری کشور ایران) در طول طوفان‌های ژئومغناطیسی، به عواملی مانند زمان محلی و تغییرات فصلی وابسته است. این پژوهش نشان می‌دهد که دینامیک و الکتروپدینامیک گرم‌سپهر-هواسپهر در ایجاد ناپایداری‌ها و تغییرات در سراسر محتوای الکترونی^۴ نقش مهمی دارند. همچنین، این تغییرات می‌توانند به تشکیل حباب‌های پلاسما و گسترش ناهنجاری یونیزاسیون استوایی^۵ به عرض‌های جغرافیایی بالاتر منجر شوند که اختلالات قابل‌توجهی در سیگنال‌های سیستم ناوبری ماهواره‌ای جهانی^۶ ایجاد می‌کند. به‌عنوان نمونه، در طول طوفان‌های شدید، شاخص جهانی Kp که نمایانگر فعالیت‌های ژئومغناطیسی است، به مقدار ۸ ارتقا می‌یابد که نمایانگر افزایش فعالیت ژئومغناطیسی است. چنین مقادیر بالایی با اختلالات شدید هواسپهر در ارتباط است و بر سامانه‌های ارتباطی و ناوبری در عرض‌های جغرافیایی کم تا متوسط تأثیر می‌گذارد. ازاین‌رو، توسعه سامانه‌هایی که اقلیم فضایی کشور را پایش کنند بسیار ضروری و راهبردی است.

روش‌های پایش اقلیم فضا به دودسته کلی اندازه‌گیری زمینی (در محل) که شامل زیرساخت‌های زمینی برای بررسی شرایط مغناطیسی، بادهای خورشیدی و جریان ذرات پرانرژی است و همچنین زیرساخت‌های فضایی که شامل پیش‌بینی انفجارهای خورشیدی و فوران جرم از تاج خورشیدی^۷ است، تقسیم می‌شود. درحالی‌که پایش خورشید از نقاط لاگرانژی در فضا صورت می‌گیرد، پایش مغناطیس کره، هواسپهر و گرم‌سپهر نیازمند اندازه‌گیری در محل است. ازاین‌رو، با توجه به پیچیدگی و عدم تقارن ساختار میدان مغناطیسی محیط ذرات درگیر و دینامیک آن‌ها لازم است تا وضعیت میدان مغناطیسی و توزیع ذرات در نقاط مختلف محیط نمونه‌برداری و به تصویر کشیده شود تا بتوان با داشتن نظارت کافی بر آن‌ها، فرایندهای درگیر را با دقت مناسبی مدل‌سازی نمود [۶]؛ بنابراین،

^۵ Equatorial ionization anomaly^۶ GNSS^۷ Coronal Mass Ejection^۱ Ionosphere^۲ Magnetosphere^۳ Thermosphere^۴ Total electron content

یادشده بین ۴۰۰ تا ۶۵۰ کیلومتری از سطح زمین قرار داشت و مدار اغلب آن‌ها دایروی بود. از جمله محموله‌های مورد استفاده توسط این کیوب‌ستها می‌توان به کاوشگر لانگمیر^{۱۶}، حسگر اندازه‌گیری حرکت یونی^{۱۷} و مگنتومتر^{۱۸} اشاره کرد که اغلب در پایش پلاسما استفاده می‌شوند [۹]. استانیسکیا^{۱۹} و همکاران در ۲۰۲۳ منظومه ماهواره‌ای کوچکی را به‌عنوان بخشی از D3S جهت پایش تأثیر اقلیم فضا بر زمین از طریق نظارت بر نوار قطبی، طراحی کردند. مأموریت اصلی این منظومه پایش شفق شمالی^{۲۰} و جنوبی^{۲۱} بود. علاوه بر ابزارهای حیاتی در پایش اقلیم شامل تصویرگرهای لیزری^{۲۲} و میدان گسترده^{۲۳}، می‌توان از پایشگر رادیویی و مغناطیس‌سنج به‌عنوان محموله ثانویه جهت پایش میدان مغناطیسی و رادیویی استفاده نمود. این تحقیق، برای کمینه‌سازی تعداد ماهواره با حفظ پوشش پیوسته در نوار شفق^{۲۴} از مدار میان زمین (مئو) استفاده کرده است. به‌کارگیری این مدار، چالش‌هایی نظیر دسترسی، پایداری و دوز تشعشعی در استفاده از ماهواره‌های کوچک^{۲۵} ایجاد می‌کند. این پروژه نسبت به پروژه قبلی این گروه اینوست^{۲۶} در حوزه‌های مانورپذیری، مخابرات و اطمینان‌پذیری بهبود داشته است [۷].

در پژوهش پیش رو، هدف به‌گزینی منظومه‌های ماهواره‌ای برتر با محموله‌های منتخب برای پایش اقلیم فضا به‌منظور پوشش کشور ایران و منطقه خاورمیانه است. گزینش منظومه ماهواره‌ای با مأموریت پایش، الزام سیستمی فرکانس زمانی هر رویداد و پوشش سطح کشور در هر شبانه‌روز صورت می‌گیرد. بر اساس موارد یادشده، منظومه منتخب باید بتواند در هر شبانه‌روز حداقل یک‌بار سراسر ناحیه کشور ایران را تحت پوشش خود قرار داده و در هر لحظه حداقل یک ماهواره بر فراز هر یک از ایستگاه‌های زمینی باشد. انتخاب محموله‌های این منظومه متناسب با نیازها و راهبرد کشور در حوزه پایش اقلیم تعیین خواهد شد. طراحی و تحلیل این منظومه ماهواره‌ای با استفاده از نرم‌افزار است‌کی^{۲۷} انجام‌شده است. استخراج مشخصات فنی و پارامترهای مداری، پوشش و

به‌کارگیری منظومه‌های ماهواره‌ای در درک، پیش‌بینی و شناخت تأثیر رخداد‌های اقلیم فضا، مؤثر است.

طی سال‌های اخیر تحقیقات زیادی در حوزه به‌کارگیری منظومه‌های ماهواره‌ای در پایش اقلیم فضا ارائه‌شده است. سازمان فضایی اروپا در قالب سامانه D3S^۸ در تلاش است تا با فراهم آوردن زیرساخت‌های زمین‌پایه و فضاپایه بتواند نظارت بر اقلیم فضا را توسعه دهد. از جمله زیرساخت‌های فضایی می‌توان به توسعه محموله‌های متنوع و پر مصرف^۹ جهت نظارت بر اقلیم فضا اشاره کرد. هدف آژانس فضایی اروپا از توسعه چنین محموله‌هایی افزایش دقت پایش اقلیم فضا و کاهش هزینه‌های اقتصادی است، اما به دلیل محدود بودن فرصت‌های پرتاب، این سنجنده‌ها معمولاً به‌عنوان محموله ثانویه در ماهواره‌های دیگر به فضا پرتاب می‌شوند؛ لذا الزامات اندازه‌گیری شامل پایش کمربند رادیویی و مغناطیس‌سپهر، سنجش هواسپهر و گرم‌سپهر، اندازه‌گیری جو زمین و محیط مغناطیسی آن و آشکارسازی ذرات میکرو است که به ترتیب بر روی انتشار سیگنال‌های رادیویی بین ماهواره و ایستگاه زمینی، ماهواره‌های پائین زمین و طول عمر ماهواره‌ها تأثیر می‌گذارد [۶، ۷]. ژانگ^{۱۰} و همکاران در سال ۲۰۲۲ با استفاده از منظومه ماهواره‌ای فنگیان (در دو مدار قطبی پائین زمین و زمین ثابت) پدیده‌های مربوط به هواشناسی و اقلیم فضا را با نگرشی عمیق‌تر درک و پیش‌بینی کردند. در این پروژه، ۷ ماهواره فنگیان در حال فعالیت بودند که از این تعداد ۳ ماهواره در مدار قطبی پائین زمین و ۴ ماهواره در مدار زمین ثابت قرار گرفته بودند. از جمله محموله‌های مورد استفاده در این مأموریت می‌توان به حسگرهای پایش محیط فضا^{۱۱}، اندازه‌گیری طیف مرئی تا مادون‌قرمز^{۱۲}، پایشگر ردوبرق^{۱۳} و اندازه‌گیری پروفایل‌های دما و رطوبت جو زمین از مدار زمین ثابت^{۱۴} اشاره کرد [۸]. فرانسیسکو^{۱۵} و همکاران در سال ۲۰۲۳ به‌مرور و معرفی کیوب‌ست‌هایی پرداختند که جهت پایش هواسپهر به فضا پرتاب‌شده‌اند یا در انتظار پرتاب هستند. ارتفاع تمام مأموریت‌های

¹⁸ Magnetometer

¹⁹ Staniscia

²⁰ Aurora Borealis

²¹ Aurora Australis

²² Optical imagers

²³ UV wide-field imagers

²⁴ Auroral Oval

²⁵ smallsat

²⁶ InnoSat

²⁷ STK

⁸ Distributed Space weather Sensor System

⁹ Hosted payloads

¹⁰ Zhang

¹¹ SEM

¹² MERSI

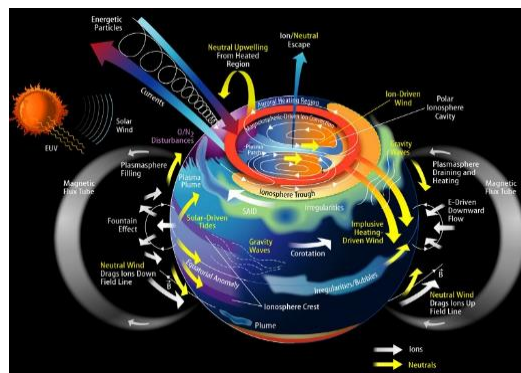
¹³ LMI

¹⁴ GIIRS

¹⁵ Francisco

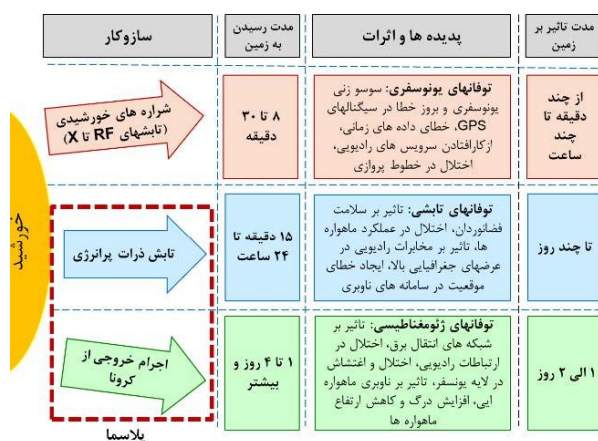
¹⁶ Langmuir probes

¹⁷ Ion Drift Meter



شکل (۱): عوامل مؤثر در اقلیم فضا [۱۲]

پایش مداوم پدیده‌های اقلیم فضا نیز از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است، زیرا این پدیده‌ها می‌توانند تأثیرات قابل‌توجهی بر زیرساخت‌های زمینی و فضایی داشته باشند. همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، شراره‌های خورشیدی و سایر عوامل مرتبط با فعالیت‌های خورشیدی می‌توانند به اختلال در سامانه‌های ناوبری، ایجاد نویزهای شدید در ارتباطات رادیویی و حتی تأثیرات مضر بر سلامت فضانوردان منجر شوند. به دلیل تغییرات زمانی سریع در این پدیده‌ها، از چند دقیقه تا چند روز، ضروری است که این پدیده‌ها به‌صورت پیوسته و با دقت رصد شوند تا امکان پیش‌بینی دقیق و اتخاذ تدابیر پیشگیرانه فراهم شود. پایش مداوم به حفظ عملکرد صحیح سامانه‌های حیاتی و کاهش خطرات احتمالی کمک می‌کند.



شکل (۲): مکانیسم پدیده‌های اقلیم فضا و تأثیرات زمانی و کیفی آن‌ها بر سامانه‌های فضایی و زمینی [۳]

انتخاب نوع محموله‌های پایش از پارامترهای خروجی طراحی است. محموله‌های منتخب برای طراحی سیستمی این منظومه شامل حسگر بررسی اختلالات میدان مغناطیسی^{۲۸}، محموله‌ای جهت آشکارسازی پروتون‌ها، الکترون‌ها و یون‌های آسیب‌زا^{۲۹}، نهفتگی رادیویی^{۳۰} جهت اندازه‌گیری هواسپهر، اندازه‌گیری حرکت یونی^{۳۱} و پایشگر تشعشعات^{۳۲} است.

۲- مبانی فیزیکی و اهمیت پایش اقلیم

پدیده‌های اقلیم فضا شامل فعالیت‌های خورشیدی، هورسپهر، مغناطیس‌سپهر، شفق قطبی، هواسپهر و جو فوقانی هستند که هرکدام تأثیرات خاصی بر محیط فضایی زمین دارند. از آنجاکه خورشید منبع اصلی است، شراره‌های آن باعث افزایش چگالی هواسپهر و در نتیجه ایجاد طوفان‌های ژئومغناطیسی می‌شود. علاوه بر این، هورسپهر، به‌عنوان یک حباب مغناطیسی عظیم که منظومه شمسی را احاطه کرده است، امکان پیش‌بینی اثرات احتمالی این اقلیم بر زمین را فراهم می‌کند. مغناطیس‌سپهر که منطقه‌ای محافظ در اطراف جو زمین است، با جلوگیری از ورود پلاسمای باد خورشیدی، از زمین در برابر طوفان‌های ژئومغناطیسی محافظت می‌کند. همچنین، شفق قطبی که از برهم‌کنش ذرات باردار پرنانژی با گازهای جوی پدید می‌آید، گاهی موجب ایجاد اختلالاتی در ارتباطات و ناوبری می‌شود. هواسپهر که لایه‌ای در جو بالایی زمین است، بر انتشار امواج رادیویی و دقت سامانه‌های ناوبری تأثیر می‌گذارد. نهایتاً، جو فوقانی که شامل لایه‌های میان‌سپهر^{۳۳}، گرم‌سپهر و برون‌سپهر^{۳۴} است، نقشی کلیدی در محاسبه پسار^{۳۵} جوی و تأثیرات آن بر سامانه‌های فضایی دارد؛ بنابراین، این عوامل همگی در کنار هم به شکل‌گیری و تغییرات اقلیم فضا منجر می‌شوند [۱۱].

³² Radiation Monitor

³³ Mesosphere

³⁴ Exosphere

³⁵ Drag

²⁸ Magneto Meter

²⁹ Proton Electron Ion Detector

³⁰ Radio Occultation

³¹ Ion Drift Meter

ایستگاه زمینی ۳	۶۰.۶۴۹۶	۲۵.۲۹۲۷
ایستگاه زمینی ۴	۴۵.۶۲۸۹	۳۸.۹۳۰۷
ایستگاه زمینی ۵	۵۹.۶۰۶۲	۳۶.۲۹۷



شکل (۳): پراکندگی ایستگاه‌های زمینی

۳-۳- عناصر مداری

در گام دوم، به تعیین پارامترهای مداری پرداخته شده است. ۶ المان مداری کپلری، با در نظر گرفتن محدودیت‌های پرتابگر و شرایط محیطی ایران انتخاب شدند.

در مشخص کردن ارتفاع مداری (h)، باید توجه داشت که هرچند قرار دادن ماهواره در ارتفاع بالاتر سبب کاهش تعداد کل ماهواره‌ها می‌شود؛ اما مشخصات پرتابگر (پرتابگر سیمرغ) نقش مهمی در تعیین ارتفاع مأموریت دارد، لذا ارتفاع مداری در مأموریت پیش رو را برابر با ۵۰۰ کیلومتری از سطح زمین فرض می‌کنیم. با توجه به ارتفاع مداری مفروض، خروج از مرکز (e) برابر با ۰ فرض شده است. میل مداری (i) یکی دیگر از عناصر مداری است که به مختصات جغرافیایی محل پرتاب و همین‌طور منطقه پایش وابسته است. در پژوهش پیش رو با توجه به قرارگیری ایران در میل مداری میانه، یک‌بار مسئله با در نظر گرفتن پایگاه پرتاب در سمنان و بار دیگر با در نظر گرفتن پایگاه پرتاب در چابهار حل و تأثیر تغییر شیب مداری بررسی شد. بنابراین، اگر پایگاه پرتاب سمنان به‌عنوان محل پرتاب و ناحیه ایران به‌عنوان هدف پایش انتخاب شود، می‌توان میل مداری ۵۵ درجه را به‌عنوان شیب مداری مأموریت فرض کرد. در ادامه، اگر پایگاه پرتاب در چابهار مفروض باشد، میل مداری ۴۵ درجه برای مأموریت مفروض است. میل مداری تأثیر زیادی بر روی چگونگی تشکیل الگوی پوششی دارد و پوشش را تابعی از عرض جغرافیایی (L) معرفی می‌کند. در عرض‌های جغرافیایی میانه (پژوهش حاضر)، میل مداری و عرض جغرافیایی تقریباً بر یکدیگر منطبق هستند [۱۳].

۳- طراحی و تحلیل پیکره‌بندی منظومه ماهواره‌ای

همان‌طور که پیش‌تر ذکر شد هدف این پژوهش گزینش پیکره‌بندی برتر جهت پایش اقلیم فضا و انتخاب محموله‌های سنجشی و پایشی با تمرکز بر ایران است. منظومه‌های ماهواره‌ای در شرایط ایدئال، بدون در نظر گرفتن اغتشاشات مداری و با رعایت محدودیت‌ها و فرضیات مناسب، طراحی و تحلیل خواهند شد تا ارتباط دائمی با ایستگاه زمینی برقرار باشد. این تحقیق تلاش کرده است تا با بهره‌گیری از ظرفیت‌های موجود کشور در بخش پرتاب که بر پارامترهای مداری نظیر میل مداری و ارتفاع تأثیرگذار است و همچنین محدودسازی سایر المان‌های مداری، بهترین مدل منظومه را برای کاربری در پایش اقلیم فضا انتخاب کند. محدودسازی المان‌های مداری در یک منظومه ماهواره‌ای از جمله روش‌هایی است که به کمک آن می‌توان پاسخ حدودی مسئله را یافت [۱۰]. علاوه بر این، به شناسایی اهداف و نیازهای کشور در حوزه اقلیم فضا کمک می‌کند و به پژوهش‌های آتی در زمینه طراحی مأموریت‌های پایش اقلیم فضا، نظیر ارزیابی حساسیت المان‌های مداری، بهینه‌سازی منظومه ماهواره‌ای و انتخاب ایستگاه‌های زمینی و محموله‌های مناسب، یاری می‌رساند.

۳-۲- ایستگاه زمینی

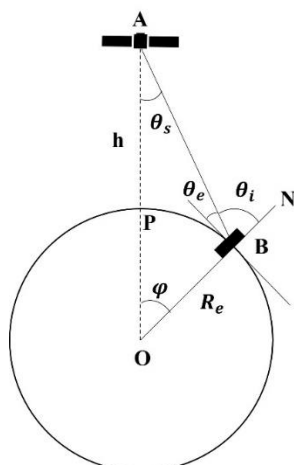
در گام اول به تعیین محل ایستگاه زمینی پرداخته می‌شود. موقعیت مکانی ایستگاه فضایی ماهدشت کرج، در جدول ۱ بیان شده است؛ بنابراین، در گام اول، با فرض این ایستگاه به‌عنوان دریافت‌کننده داده‌ها، به بررسی مسئله پرداخته شد. سپس، با اضافه کردن به تعداد ایستگاه‌های زمینی و ساخت شبکه ایستگاه‌های زمینی، تلاش گردید تا تعداد کل ماهواره‌ها کاهش یابد. مشخصات ایستگاه‌های زمینی مفروض و محل آن‌ها به ترتیب در جدول ۲ و شکل ۳ نشان داده شده است. همچنین، تمامی ایستگاه‌های زمینی یادشده دارای زاویه فراز ۲۰ درجه‌ای هستند.

جدول (۱): مشخصات ایستگاه زمینی ماهدشت

طول جغرافیایی (درجه)	۵۰.۸۱۱۴
عرض جغرافیایی (درجه)	۳۵.۷۲۷۷

جدول (۲): مشخصات ایستگاه‌های زمینی مفروض

ایستگاه زمینی ۲	طول جغرافیایی (درجه)	عرض جغرافیایی (درجه)
	۵۰.۹۲۵	۳۰.۲۶۰۲



شکل (۴): هندسه حسگر در پوشش [۱۳]

جدول (۴): معرفی پارامترهای شکل ۴

عنوان	پارامتر
میدان دید	θ_s
زاویه فراز	θ_e
زاویه برخورد	θ_i
زاویه مرکزی زمین	φ

برای محاسبه حداکثر زاویه میدان دید به‌صورت زیر عمل

می‌شود:

$$\theta_e + \theta_i = 90 \quad (۱)$$

$$\Delta OAB \rightarrow \hat{B} = 90 + \theta_e \quad (۲)$$

$$\frac{\sin \theta_s}{\sin \theta_s} = \frac{\sin B}{\sin B} = \frac{\sin \varphi}{AB} \quad (۳)$$

$$\frac{OB}{\sin \theta_s} = \frac{OA}{\sin B} \quad (۴)$$

$$\frac{R_e}{R_e} = \frac{R_e + h}{R_e + h} \quad (۵)$$

$$\sin \theta_s = \frac{\sin B \times R_e}{R_e + h} \quad (۶)$$

$$\theta_s = \sin^{-1} \left(\frac{\sin B \times R_e}{R_e + h} \right)$$

حسگر با پهنای نوار پوشش ۱۰۰ کیلومتری ($\theta_s = 6^\circ$) در

شکل ۵ نشان داده‌شده است:

مقدار آرگومان حضیض (ω) که یکی دیگر از عناصر مداری است، برابر با ۰ فرض می‌شود. دو المان مداری دیگر یعنی ناسانی حقیقی (θ) و صعود راست از گره صعودی (Ω) با توجه به استفاده از منظومه ماهواره‌ای از ۰ تا ۳۶۰ درجه تغییر می‌کنند. جدول ۳ به‌صورت خلاصه المان‌های مداری مفروض را نشان می‌دهد:

جدول (۳): مقادیر مفروض برای پارامترهای مداری

پارامتر مداری	مقدار
h	۵۰۰ (کیلومتر)
i	۴۵ و ۵۵ (درجه)
e	۰
ω	۰ (درجه)
θ	۳۶۰-۰ (درجه)
Ω	۳۶۰-۰ (درجه)

آخرین پارامتری که در این بخش مورد بحث قرار می‌گیرد پهنای نوار پوشش^{۳۶} است که به‌عنوان یک خروجی در طراحی سیستمی یکی از پارامترهای تأثیرگذار در پوشش است. در حالت ایدئال و بدون در نظر گرفتن حسگرهای موجود و وزن آن‌ها، بیشترین زاویه دید در ارتفاع ۵۰۰ کیلومتری از سطح زمین با توجه به زاویه فراز ۲۰ درجه‌ای می‌تواند برابر با ۶۰ درجه باشد (شکل ۴). اما در واقعیت این اتفاق نمی‌افتد و همواره میدان دید حسگر با توجه به الزامات مربوط به وزن و هزینه کمتر از این مقدار خواهد بود. در این پژوهش، این پارامتر برابر با ۶ درجه فرض شد که پهنای نوار پوشش ۱۰۰ کیلومتری ایجاد کرده است. به‌عبارت دیگر، پهنای نوار پوشش به‌صورت حداقلی در نظر گرفته شده است. پارامتر پهنای پوشش، در درک مساحت تحت پوشش جهت دستیابی به هدف مسئله مفید است و در بخش پوشش تجمعی مورد استفاده قرار خواهد گرفت.

کل ماهواره‌ها، p تعداد صفحات مداری بافاصله مساوی و f بیانگر فاصله نسبی ماهواره‌ها در صفحات مجاور است. منظومه‌های ماهواره‌ای در این مدل به صورت $m \times n$ نمایش داده می‌شوند، که n تعداد مدار و m تعداد ماهواره در هر مدار است.

۳-۵- محموله‌ها

مطابق با مطالبی که در بخش مقدمه و مبانی فیزیکی و اهمیت پیش اقلیم به تفصیل بیان شد، نظارت مستمر بر اقلیم فضا از اهمیت بالایی برخوردار است. انتخاب دقیق محموله‌های تخصصی برای مأموریت، تأثیر مستقیمی بر طراحی ماهواره، مشخصات مداری و موفقیت کلی مأموریت خواهد داشت.

انتخاب محموله‌های مناسب، جهت پیش اقلیم فضا فرایندی چندوجهی است که معیارهای علمی، فنی و اهداف مأموریت را در برمی‌گیرد. با عنایت به اینکه محموله‌ها در ارتفاع‌های مداری مختلف، عملکرد متفاوتی دارند، مؤثرترین محموله‌های پیش اقلیم فضا در مدار لئو، محموله‌هایی هستند که می‌توانند شرایط دینامیکی محیط فضا را با تمرکز بر فعالیت‌های خورشیدی و اثرات آن بر مغناطیس‌سپهر و هواسپهر را به صورت دقیق پایش کنند [۱۵ و ۱۶]؛ لذا در پژوهش حاضر، با الگوبرداری از تحقیقات مشابه و همچنین برنامه‌های راهبردی کشور در پیش اقلیم فضا، محموله‌های مناسب در این حوزه مطابق با جدول ۵ پیشنهاد می‌گردد:

جدول (۵): محموله‌های مأموریت هدف

نشان اختصاری	محموله
RM	پایشگر تشعشعات
MAG	پایشگر میدان مغناطیسی
RO	نهفتگی رادیویی برای اندازه‌گیری هواسپهر
PEID	آشکارساز پروتون‌ها، الکترون‌ها و یون‌های آسیب‌زا
IDM	اندازه‌گیری حرکت یونی

۴- شبیه‌سازی

برای شبیه‌سازی منظومه‌های ماهواره‌ای از نرم‌افزار استی‌کی که به عنوان یکی از کاربردی‌ترین نرم‌افزارهای حوزه شبیه‌سازی مأموریت‌های فضایی شناخته می‌شود، استفاده شده است. این نرم‌افزار با دریافت ورودی‌های مسئله به شبیه‌سازی مأموریت



شکل (۵): پهنای نوار پوشش

۳-۳-۱- تعداد ماهواره و مدار

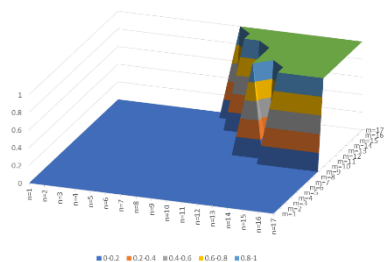
تعداد کل ماهواره‌ها عامل اساسی در تعیین هزینه است. از این رو، طراحی مطلوب، طراحی است که با حداقل تعداد ماهواره بتوان به پوشش مطلوب دست یافت. نکته قابل توجه در تعیین تعداد ماهواره این است که حداقل تعداد ماهواره الزاماً منجر به حداقل هزینه نمی‌شود، زیرا یک منظومه کوچک ممکن است ماهواره‌های بزرگ‌تر و یا ماهواره‌هایی با فناوری پیچیده‌تر نیاز داشته باشد. علاوه بر این یک منظومه با تعداد ماهواره کمتر باید در ارتفاع بالاتر قرار گیرد که این مسئله سبب افزایش هزینه پرتاب می‌شود. در تحقیق حاضر از ماهواره‌های کوچک برای حمل محموله‌ها استفاده شده است. در تعیین تعداد صفحات مداری باید توجه داشت که تغییر صفحه پیش‌ران‌ش زیادی مصرف می‌کند؛ بنابراین تغییر صفحه فقط گاهی به صرفه است. این موضوع بدین معنی است که منظومه‌های ماهواره‌ای با تعداد صفحات کم مداری از نظر عملکردی ثبات بیشتری دارند [۱۳].

۳-۴- مدل منظومه ماهواره‌ای

گام بعدی در طراحی منظومه ماهواره برای پیش اقلیم فضا، ارائه مدل پیشنهادی برای چینش ماهواره‌ها و مدارها است. یکی از مدل‌های پرکاربرد در منظومه‌های ماهواره‌ای، مدل واکر [۱۴] است. این مدل که توسط واکر در سال ۱۹۷۷ ارائه شد، دارای دو زیر مدل دلتا ۳۷ و ستاره‌ای ۳۸ است. در طراحی منظومه ماهواره‌ای هدف در این پژوهش از مدل دلتای واکر استفاده خواهیم کرد. این مدل به صورت $i = t/p/f$ نشان داده می‌شود؛ i میل مداری، t تعداد

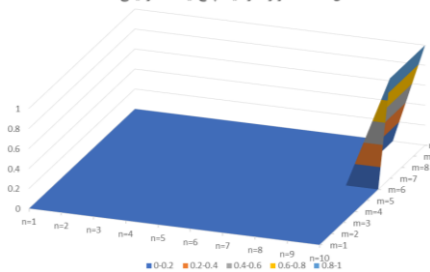
اساس نتایج، می‌توان دریافت که استفاده از میل مداری ۴۵ درجه، بر روی تعداد کل ماهواره‌ها اهمیت به سزایی دارد و تعداد کل ماهواره‌ها را به شکل محسوسی کاهش می‌دهد.

حداقل ماهواره در دید (تک ایستگاه زمینی)



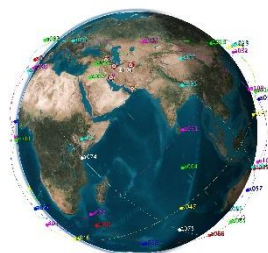
شکل (۶): حداقل تعداد ماهواره در دید (تک ایستگاه زمینی) در میل مداری ۴۵ درجه

حداقل تعداد ماهواره در دید (پنج ایستگاه زمینی)



شکل (۷): حداقل تعداد ماهواره در دید (پنج ایستگاه زمینی) در میل مداری ۴۵ درجه

شکل ۸، نمای سه‌بعدی سناریو ۷×۱۰ در میل مداری ۴۵ درجه را نمایش می‌دهد:



شکل (۸): منظومه ماهواره‌ای ۱۰×۱۰ با فرض ۵ ایستگاه زمینی در میل مداری ۴۵

پرداخته و علاوه بر ارائه نمایش گرافیکی، گزارش‌هایی در مورد عملکرد هر سناریو ارائه می‌دهد.

در تحقیق پیش رو، ۵۷۸ سناریو متفاوت با در نظرگیری یک ایستگاه زمینی و ۲۰۰ سناریو با در نظرگیری ۵ ایستگاه زمینی در سراسر ایران در نرم‌افزار استی کی شبیه‌سازی شد. پیکره‌بندی‌های شبیه‌سازی‌شده از نظر تعداد مدار (n) و تعداد ماهواره در مدار (m) با یکدیگر متفاوت هستند. کوچک‌ترین منظومه ماهواره‌ای شبیه‌سازی‌شده، منظومه ماهواره‌ای ۱×۱ و بزرگ‌ترین منظومه ماهواره‌ای شبیه‌سازی‌شده در این پژوهش ۱۷×۱۷ بوده است. به عبارت دیگر با افزایش گام به گام تعداد ماهواره و تعداد مدار تلاش شده است تا اهداف نهایی مسئله برآورده شود. همان‌طور که گفته شد، منظومه‌های ماهواره‌ای در این پژوهش از الگوی دلتای واکر تبعیت می‌کنند. سایر المان‌های مداری در جدول ۳ ارائه شده است. نتایج تحقیق در مورد پارامتر آماری حداقل تعداد ماهواره در گذر از منظر ایستگاه زمینی و همچنین تجمعی پوشش ۳۹ بحث کرده است. پوشش تجمعی، نشان‌دهنده نسبت مساحت تحت پوشش به کل مساحت مورد نظر توسط منظومه ماهواره‌ای در یک شبانه‌روز است. پوشش تجمعی به محل و تعداد ایستگاه‌های زمینی وابسته نیست. طبق هدف مسئله مدلی برتر از سایرین است که همواره یک ماهواره در دید ایستگاه زمینی باشد و بتواند کل مساحت ایران را در یک شبانه‌روز تحت پوشش قرار دهد.

۵- نتایج شبیه‌سازی

در این بخش نتایج برای میل مداری ۴۵ درجه به صورت کامل و همراه با نمودارهای مربوطه مورد بحث قرار می‌گیرد و در مورد میل مداری ۵۵ درجه به ذکر سناریوهای برتر بسنده خواهد شد. شکل ۶ و ۷ به ترتیب نشان‌دهنده تعداد ماهواره در دید برای یک ایستگاه زمینی و پنج ایستگاه زمینی در میل مداری ۴۵ درجه است. بر این اساس، سناریوهای ۱۱×۱۲ و ۷×۱۰ به ترتیب نشان‌دهنده کوچک‌ترین منظومه‌های ماهواره‌ای هستند که با فرض داشتن یک و پنج ایستگاه زمینی، شرط در دید بودن حداقل یک ماهواره از منظر ایستگاه زمینی در هر لحظه را برآورده می‌کنند. همچنین، سناریوهای ۱۷×۱۵ و ۱۰×۱۰ نیز دو سناریو در میل مداری ۵۵ درجه هستند که به الزامات یادشده پاسخ می‌دهند. بر

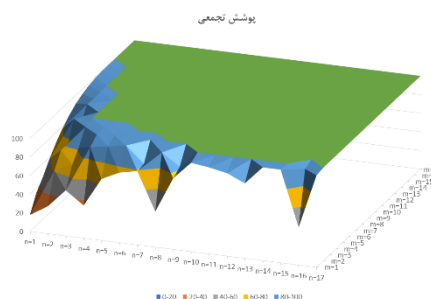
مشاهده شده است، همین‌طور اگر تعداد ایستگاه‌های زمینی را از ۱ به ۵ افزایش و شبکه ایستگاه‌های زمینی تشکیل داده شود، سناریوهای 7×10 و 10×10 اولین سناریوها در میل مداری ۴۵ و ۵۵ درجه خواهند بود که شرط یادشده را برآورده می‌سازند؛ بنابراین، ایجاد شبکه ایستگاه‌های زمینی و استفاده از میل مداری ۴۵ درجه به‌صورت چشمگیری می‌تواند تعداد کل ماهواره را جهت دستیابی به هدف کاهش دهد. علاوه بر این، استفاده از میل مداری ۴۵ درجه سبب دستیابی به منظومه ماهواره‌ای کوچک‌تر در بررسی پارامتر پوشش تجمعی شد.

توسعه فناوری و استفاده از پرتابگرهای پیشرفته‌تر، بهینه‌سازی محل ایستگاه‌های زمینی، حساسیت سنجی در محیط پیوسته، استفاده از لینک بین ماهواره‌ای، استفاده از حسگرهایی با میدان دید بزرگ‌تر و بهینه‌سازی‌های عددی می‌تواند منجر به دستیابی به منظومه‌های ماهواره‌ای کوچک‌تر شود.

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

شکل ۹، درصد تجمعی پوشش را نشان می‌دهد. طبق نتایج به‌دست‌آمده، سناریو 14×1 کوچک‌ترین منظومه ماهواره‌ای با کمترین تعداد مدار در میل مداری ۴۵ و با پهنای نوار پوشش ۱۰۰ کیلومتری است که به پوشش تجمعی صددرصدی در طول یک شبانه‌روز رسیده است. همچنین، سناریو 17×1 اولین سناریو در میل مداری ۵۵ درجه است که می‌تواند در طول یک شبانه‌روز حداقل یک‌بار تمام مساحت ایران را تحت پوشش قرار دهد. بر اساس نتایج، استفاده از میل مداری میان‌تری (۴۵ درجه) سبب دستیابی به منظومه ماهواره‌ای کوچک‌تر در پوشش تجمعی می‌شود.



شکل (۹): پوشش تجمعی برحسب درصد در میل مداری ۴۵ درجه

۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش بر به‌گزینی منظومه ماهواره‌ای باهدف پایش اقلیم فضا پرداخته شد. بر اساس بررسی‌های صورت گرفته محموله‌های حسگر بررسی اختلالات میدان مغناطیسی، محموله آشکارسازی پروتون‌ها، الکترون‌ها و یون‌های آسیب‌زا، نهفتگی رادیویی جهت اندازه‌گیری هواسپهر، اندازه‌گیری حرکت یونی و پایشگر تشعشعات می‌توانند جهت کاربری پایش اقلیم فضا در ارتفاع پائین زمین در ایران بکار گرفته شوند. در ادامه، گزینش پیکره‌بندی‌های برتر با استفاده از روش مقایسه دو پارامتر حداقل تعداد ماهواره درگذر و رسیدن به پوشش صد درصد در ناحیه ایران صورت گرفته است. بدین منظور ۷۷۸ منظومه ماهواره‌ای متفاوت، با در نظرگیری یک و ۵ ایستگاه زمینی، در ارتفاع ۵۰۰ کیلومتری از سطح زمین، در میل مداری ۴۵ و ۵۵ درجه و با پیروی از الگوی دلتای واکر در استی‌کی انجام شد.

طبق نتایج به‌دست‌آمده، با در نظر گرفتن یک ایستگاه زمینی، منظومه‌های ماهواره‌ای 11×12 و 17×15 اولین منظومه‌های ماهواره‌ای در میل مداری ۴۵ و ۵۵ درجه هستند که در هر لحظه، حداقل یک ماهواره از منظومه‌های یادشده بر فراز ایستگاه زمینی

مراجع

- [1] A. Thaduri, D. Galar, and U. Kumar, "Space weather climate impacts on railway infrastructure," *Int. J. Syst. Assur. Eng. Manag.*, vol. 11, no. 2, pp. 267–281, Jul. 2020, doi: 10.1007/s13198-020-01003-9.
- [2] M. Moldwin, *An Introduction to Space Weather*. Cambridge University Press, 2022. Accessed: Dec. 31, 2023. [Online]. Available: <https://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=1hOUEAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR9&dq=space+weather&ots=3dsQAZWaf6v&sig=AyQWcgw9S1iPFG9OYDZ0qReZULs>
- [3] O. Shekoofa, M. Khoshsima, S. Ghazanfarinia, and F. Bagheroskouei, "Toward the establishment of a national center for space weather services: Vision, mission and organization," *Journal of Space Science, Technology and Applications*, vol. 1, no. 2, pp. 34–48, Feb. 2022, doi: 10.22034/jssta.2022.309735.1034.
- [4] A. Kosari, E. Khatoonabadi, A. Kazemi, R. Amjadifard, and V. Bohlouri, "The effects of space weather on economic processes and human civilization infrastructures," *Space Science, Technology and Applications*, vol. 3, no. 1, pp. 123–144, Jul. 2023.
- [5] N. Imtiaz, W. Younas, and M. Khan, "Response of the low-to mid-latitude ionosphere to the geomagnetic storm of September 2017," in *Annales Geophysicae*, Copernicus Publications, Göttingen, Germany, 2020, pp. 359–372. Accessed: Aug. 18, 2024. [Online]. Available: <https://angeo.copernicus.org/articles/38/359/2020/angeo-38-359-2020.html>

- Services and Supporting Research, Department of Commerce, Silver Spring, MD, USA, 2013.
- [12] B. Pongračić, S. Kos, and D. Brčić, "Spatial assessment of GPS ionospheric delay model during St. Patrick's geomagnetic storm," Mar. 2019.
- [13] J. R. Wertz, "Mission geometry: Orbit and constellation design and management," *Space Technol. Libr.*, 2001. Accessed: Nov. 16, 2023. [Online]. Available: <https://cir.nii.ac.jp/crid/1573105974999212416>
- [14] J. G. Walker, "Continuous whole-earth coverage by circular-orbit satellite patterns," Royal Aircraft Establishment, Farnborough, U.K., 1977.
- [15] E. Stevenson, V. Rodríguez-Fernández, E. Minisci, and D. Camacho Fernandez, "A deep learning approach to space weather proxy forecasting for orbital prediction," 2020. Accessed: Aug. 17, 2024. [Online]. Available: <https://oa.upm.es/id/eprint/64345>
- [16] R. Miteva, S. W. Samwel, and S. Tkatchova, "Space weather effects on satellites," *Astronomy*, vol. 2, no. 3, pp. 165–179, 2023.
- [6] S. Kraft, A. Lupi, and J.-P. Luntama, "ESA's distributed space weather sensor system (D3S) utilizing hosted payloads for operational space weather monitoring," *Acta Astronaut.*, vol. 156, pp. 157–161, 2019.
- [7] G. Staniscia, B. Lagaune, S. Berge, M. Battelino, and S. Kraft, "A small satellite constellation for monitoring of the aurora," 2023. Accessed: Dec. 02, 2023. [Online]. Available: <https://digitalcommons.usu.edu/smallsat/2023/all2023/77/>
- [8] Z. Peng, X. U. Zhe, G. Min, X. I. E. Lizi, X. Di, and L. I. U. Chang, "Progress of Fengyun meteorological satellites since 2020," *空间科学学报*, vol. 42, no. 4, pp. 724–732, 2022, doi: 10.11728/cjss2022.04.yg14.
- [9] C. Francisco, R. Henriques, and S. Barbosa, "A review on CubeSat missions for ionospheric science," *Aerospace*, vol. 10, no. 7, p. 622, 2023.
- [10] M. H. Jafari and S. Aminabadi, "Investigating orbital configurations for a LEO satellite telephony constellation over the territory of Iran," *Journal of Space Science, Technology and Applications*, vol. 1, no. 2, pp. 138–146, 2022.
- [11] S. P. Williamson *et al.*, "Report on space weather observing systems: Current capabilities and requirements for the next decade," Office of the Federal Coordinator for Meteorological