Available in:
Journal.isrc.ac.ir

Journal of Space Science, Technology & Applications (Persian)

Vol. 3, No. 1, pp.:123-144
2023

DOI:
10.22034/jssta.2023.385587.1111

Article Info

Received: 2023-02-14
Accepted: 2023-07-01

Keywords

infrastructure, Socio-Economic effects of space weather

How to Cite this article

Seyede Elahe Khatoonabadi Kalali, Aida Kazemi Hokmabad, Amirreza Kosari, Reza Amjadifard, Vahid Bohlouri, "The Effects of Space Weather on Economic Processes and Human Civilization Infrastructures", *Journal of Space Science, Technology and Applications*, vol 3 (1), p.: 123-144, 2023.

Original Article

The Effects of Space Weather on Economic Processes and Human Civilization Infrastructures

Seyede Elahe Khatoonabadi Kalali[1], Aida Kazemi Hokmabad[2], Amirreza Kosari [3]*, Reza Amjadifard[4], Vahid Bohlouri[5]

[1]MSc., Faculty of New Sciences and Technologies, University of Tehran, Tehran, Iran
elahe.khatonabadi@ut.ac.ir
[2]MSc., Faculty of New Sciences and Technologies, University of Tehran, Tehran, Iran
aida.kazemi.hkm@ut.ac.ir
[3]Associate Prof., Faculty of New Sciences and Technologies, University of Tehran, Tehran, Iran
kosari_a@ut.ac.ir
[4] Satellite Research Institute, Iranian Space Research Center (ISRC), Tehran, Iran
r.amjadifard@isrc.ac.ir
[5] Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Technical and Vocational University, Tehran, Iran, v_bohlouri@tvu.ac.ir
*Corresponding Author

Abstract

This paper investigates solar activities and its phenomena from the perspective of risks on the functioning of urban infrastructures, industrial systems and economic structure affected by such phenomena. Also, according to the existing analyzes and results, the basic requirements to prevent the severity of the resulting injuries have been introduced. Space weather events can cause disruptions in the power grid, telecommunications and radio communications, airlines, railways, and in addition cause damage to pipelines, oil and mining industry, and aviation each of these cases it is examined as an economic infrastructure in this paper. Also, the effect of these phenomena in damage and dysfunction in satellites that are used for global positioning, telecommunications and weather forecasting has been investigated. Considering the importance of the items mentioned in this article, an attempt has been made to investigate the research done in some other countries regarding the impact of space weather phenomena on socio-economic systems and to study the disruptions and failures caused by this impacts in the industries and socio-economic infrastructures of the society. This studies can help in the formation of the necessary fields and preventive actions in facing the dangers of space weather in order to lead the scientific community to investigate similar cases in the country in order to create management arrangements and related technological.

مقاله پژوهشی

دسترس‌پذیر در نشانی:
Journal.isrc.ac.ir

دو فصلنامه
علـوم، فـناوری و
کاربردهـای فضـایی

سال سوم، شماره ۱، صفحه ۱۴۴-۱۲۳
بهار و تابستان ۱۴۰۲

DOI:
10.22034/jssta.2023.385587.1111

تاثیرات اقلیم فضا بر فرایندهای اقتصادی و زیرساخت‌های تمدنی بشر

سیده الهه خاتون‌آبادی‌کلالی[۱]، آیدا کاظمی‌حکم‌آباد[۲]، امیررضا کوثری*[۳]،
رضا امجدی‌فرد[۴]، وحید بهلوری[۵]

۱- کارشناس ارشد، دانشکده علوم و فنون نوین دانشگاه تهران، تهران، ایران elahe.khatonabadi@ut.ac.ir
۲- کارشناس ارشد، دانشکده علوم و فنون نوین دانشگاه تهران، تهران، ایران aida.kazemi.hkm@ut.ac.ir
۳- دانشیار، دانشکده علوم و فنون نوین دانشگاه تهران، تهران، ایران kosari_a@ut.ac.ir
۴- پژوهشکده سامانه‌های ماهواره، پژوهشگاه فضایی ایران r.amjadifard@isrc.ac.ir
۵- استادیار، گروه مهندسی برق، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران v_bohlouri@tvu.ac.ir
*نویسنده مسئول

تاریخچه داوری

دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۲۵
پذیرش: ۱۴۰۲/۰۴/۱۰

واژه‌های کلیدی

اقلیم فضا، خورشید، زیرساخت‌های شهری، اثرات اقتصادی-اجتماعی

نحوه استناد به این مقاله

سیده الهه خاتون‌آبادی کلالی، آیدا کاظمی حکم‌آباد، امیررضا کوثری، رضا امجدی‌فرد، وحید بهلوری. " تاثیرات اقلیم فضا بر فرایندهای اقتصادی و زیرساختهای تمدنی بشر"، *دوفصلنامه علوم، فناوری و کاربردهای فضایی*، جلد سوم، شماره اول، صفحات ۱۲۳-۱۴۴، ۱۴۰۲.

چکیده

این مقاله، فعالیت‌های خورشیدی و پدیده‌های آن را از منظر مخاطرات بر نحوه عملکرد زیرساخت‌های شهری، سیستم‌های صنعتی و ساختار اقتصادی متأثر از این‌گونه پدیده‌ها بررسی می‌نماید. هم‌چنین، با توجه به تحلیل‌ها و نتایج موجود، نیازمندی‌های اساسی به منظور جلوگیری از شدت آسیب‌های وارده ناشی از این پدیده‌ها نیز معرفی شده است. رویدادهای اقلیم فضا می‌تواند باعث اختلال در شبکه انرژی الکتریکی، ارتباطات مخابراتی-رادیویی، خطوط حمل و نقل هوایی، زمینی، ریلی و علاوه بر آن باعث آسیب به خطوط لوله، صنعت نفت و معدن، و هوانوردی شود که هر کدام از این موارد به عنوان یک زیرساخت اقتصادی در این مقاله بررسی شده است. هم‌چنین، اثر این پدیده‌ها در آسیب و اختلال بر عملکرد در ماهواره‌ها با مأموریت موقعیت‌یابی جهانی، مخابراتی و پیش‌بینی آب و هوا بررسی شده است. با توجه به اهمیت موارد مذکور، در این مقاله سعی شده، به بررسی تحقیقات صورت پذیرفته در پاره‌ای از کشورهای دیگر در خصوص تاثیر پدیده‌های اقلیم فضا در سیستم‌های اقتصادی- اجتماعی نیز پرداخته و اختلالات و خرابی‌های ناشی از آن در صنایع و زیرساخت‌های اقتصادی- اجتماعی جامعه مورد مطالعه قرار گیرد. این امر به نوبه خود می‌تواند در شکل‌گیری زمینه‌های لازم و اقدامات پیش‌گیرانه در مواجهه با مخاطرات اقلیم فضا و نیز سوق دادن جامعه علمی به بررسی موارد مشابه در کشور برای ایجاد تمهیدات مدیریتی و فناوری‌های مرتبط کمک نماید.

۱- مقدمه

رویدادهای اقلیم فضا که عمدتاً ناشی از فعالیت‌های خورشیدی است؛ به سبب تولید جریان‌های مغناطیسی می‌تواند اختلالات شدیدی در اتمسفر فوقانی و محیط نزدیک به زمین ایجاد کرده و به نوبه خود قادر است تحت شرایط خاص، اختلالات و خساراتی را در زیرساخت‌های شهری و صنعتی برخی مناطق مسکونی سطح کره زمین یا در سیستم‌های هوایی و فضایی یا حتی بر سلامتی موجودات کره زمین و انسان‌ها وارد نماید [۱]. به طور نمونه، پدیده‌های اقلیم فضا می‌توانند باعث ایجاد اختلال در شبکه توزیع انرژی الکتریکی، شبکه تلفن، شبکه اینترنت، شبکه ریلی و هوایی و ایجاد خرابی در لوله‌های انتقال نفت و پتروشیمی شود. هم‌چنین، اقلیم فضا اثرات مخربی بر عملکرد سیستم‌های هوافضایی، تشدید مخاطرات سلامتی سرنشینان از جمله فضانوردان، مسافران و خدمه خطوط هوایی به همراه خواهد داشت. این موارد، لزوم دستیابی به دانش‌هایی در خصوص پیش‌بینی دقیق تهدیدات ناشی از نظام اقلیم فضا و زمان‌بندی رویدادها، برنامه‌ریزی و آماده‌سازی تمهیداتی به منظور به حداقل رساندن اثرات اقتصادی- اجتماعی این پدیده‌ها را در ذهن متبادر می‌سازد [۲].

بزرگ‌ترین رویداد ثبت شده از زمان نظارت علمی بر فعالیت توفان‌های مغناطیسی، توفان کارینگتون[1] است که بین ۲۷ آگوست تا ۷ سپتامبر ۱۸۵۹ رخ داد و سیستم تلگراف را در سراسر جهان مختل کرد [۱]. امروزه، بروز چنین رویدادهایی در سطح کارینگتون می‌تواند باعث شود که منابع انرژی، حمل و نقل هوایی، مخابرات و سایر زیرساخت‌های حیاتی به صورت جدی تهدید شود. یک رویداد عظیم اقلیم فضایی، امروزه به طور بالقوه بیش از ۲ تریلیون دلار در سطح جهان هزینه در پی خواهد داشت. در شاهد مثالی دیگر از آسیب‌های رویدادهای اقلیم فضا می‌توان به واقعه دسامبر ۲۰۰۶ اشاره کرد که طی آن توفان خورشیدی ایجاد شده به بخش تصویربرداری اشعه ایکس خورشیدی ماهواره‌ای GOES[2] آسیب وارد نمود و باعث اختلال شدید غیرمنتظره در سیستم ناوبری GPS این ماهواره شد که این آسیب علاوه بر جنبه اقتصادی از منظر از کار افتادن سامانه موقعیت‌یابی جهانی و اختلال در آن نیز حائز اهمیت بوده است [۲]. بتسدا[3] در تحقیقات انجام شده، به طور مستقل تأثیرات رویدادهای اقلیم فضایی ایالات متحده را که از چهار بخش مختلف برق، هوانوردی، ماهواره و GNSS[4] تشکیل می‌شوند، در نظر گرفته و تخمین هزینه خسارات مربوطه را مورد بررسی قرار داده است [۳]. ایشی[5] و همکاران در مطالعه‌ای، رابطه بین مقیاس رویدادهای اقلیم فضایی و میزان وقوع آنها در کشور ژاپن را بررسی کرده و تأثیرات اجتماعی این پدیده‌ها را در طی سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۹ مورد بحث قرار داده‌اند [۴]. این مطالعه، با تمرکز بر زمینه‌های برق، عملیات ماهواره‌ای، ارتباطات و پخش، استفاده از موقعیت‌یابی ماهواره، هوانوردی، فعالیت‌های فضایی انسان و زندگی روزمره در سطح زمین خلاصه‌ای جامع از این بررسی را ارائه کرده است.

ورمن[6] و همکاران در پژوهشی، تعداد محدودی از مطالعات تأثیری که وجود داشت را مورد بررسی قرار داده، هم‌چنین پارامترها و هزینه‌ها را برای رویدادهای متوسط، رویدادهایی با شدت پایین‌تر و حتی با شدت بیش‌تر برآورد کرده‌اند [۵]. بررسی رویدادهای شدید این امکان را فراهم می‌کند تا حد بالای هزینه-های بالقوه برآورد شده و درک کلی انسان را از اثرات بالقوه اقلیم فضا ارتقا دهد. شکوفا و باقراسکویی نیز به موضوع اقلیم فضا، چالش‌ها و اهمیت بین‌المللی آن و نقشه راه پیشنهادی برای فعالیت‌ها در این حوزه پرداخته‌اند [۶].

علاوه بر این، شکوفا و همکاران بنا به ضرورت انجام مطالعات، پایش و ارائه سرویس‌های مرتبط با رخدادهای اقلیم فضا و ایجاد یک مرکز ملی برای نیل به این اهداف اشاره کرده‌اند [۷]. خاتون آبادی و همکاران، در پژوهشی دیگر با مطالعه تحقیقات و گزارش‌های موجود در زمینه اقلیم فضا، به تاثیرات مخرب اقلیم فضا بر تعدادی از زیرساخت‌های جامعه پرداخته و اثرات اقتصادی و اجتماعی ناشی از رویدادهای اقلیم فضا را مورد بررسی قرار دادند [۸].

با توجه به اهمیت و ضرورتی که آسیب‌های اقلیم فضا می‌تواند بر زیرساخت‌های تمدنی و فرایندهای اقتصادی داشته

[1] Carrington
[2] Geostationary Operational Environmental Satellite
[3] Bethesda
[4] Global Navigation Satellite Systems
[5] Ishii
[6] Worman

باشد، هم‌چنان که مطالعات پیشین نیز نشان می‌دهد؛ بررسی و دسته‌بندی این مخاطرات و نحوه مواجهه با آن‌ها در این مقاله مطالعه شده است. علاوه بر این، به دلیل وابستگی تاثیرات پدیده‌های اقلیم فضا در زیرساخت‌های حیاتی بشر، اختلال در یک زیرساخت می‌تواند باعث اخلال در زیرساخت‌های دیگر نیز شود. در راستای ضرورت مطالعه این تاثیرات بر زیرساخت‌های جامعه، پس از معرفی سیستم‌های متأثر، به اهمیت پایش اقلیم فضا در سطح جهانی و ملی پرداخته شده است. از طرفی اقدامات پیش‌گیرانه‌ای در سطح دنیا برای کاهش اثرات مخرب اقلیم فضا انجام گرفته که در این مقاله تمهیدات مورد نیاز نیز بررسی شده و زیرساخت‌ها و نظام سازمان‌یافته‌ای نیز در ایران به منظور نیل به این اهداف معادل‌سازی شده است.

۲- تاثیرات اقلیم فضا بر زیرساخت‌های اقتصادی

در این بخش، به بررسی مخاطرات ناشی از پدیده‌های اقلیم فضا بر زیرساخت‌های شهری و سیستم‌های فناورانه ساخته دست بشر پرداخته می‌شود. در ابتدا، زیرساخت‌های آسیب‌پذیر معرفی شده و اختلالات ناشی از بروز پدیده‌های اقلیم فضا بر آن‌ها و تخمین هزینه‌های آسیب به زیرساخت‌ها شرح داده می شود.

رویدادهای اقلیم فضا در فضاپیما می‌توانند ناهنجاری‌های عملیاتی کوتاه مدتی را توسط ذرات پرانرژی و کمربند تشعشعی به دلیل تشعشعات[1] کیهانی ایجاد کند. علاوه بر تخریب تجهیزات الکترونیکی حیاتی و آسیب به تراشه‌ها، آرایه‌های خورشیدی[2] و سیستم‌های اپتیکی، ردیاب‌های ستاره‌ای[3] و برخی از حسگرها نیز تحت تاثیر قرار می‌گیرند [۱] و [۹].

سیستم‌های فناوری‌ای که اقلیم فضا بر آنها تأثیر می‌گذارد، از سیستم‌های تلگراف ایزوله در دهه ۱۸۴۰ به سیستم‌های ارتباطی کابلی اقیانوسی و قاره‌ای، از یک ژنراتور برق‌رسانی چند بلوک شهر در دهه ۱۸۸۰ تا شبکه‌های انتقال نیروی بین قاره‌ای، از تلگراف بی‌سیم در دهه ۱۸۹۰ تا ارتباطات سراسری از طریق رادیو و ماهواره ها توسعه یافته‌اند [۱۰].

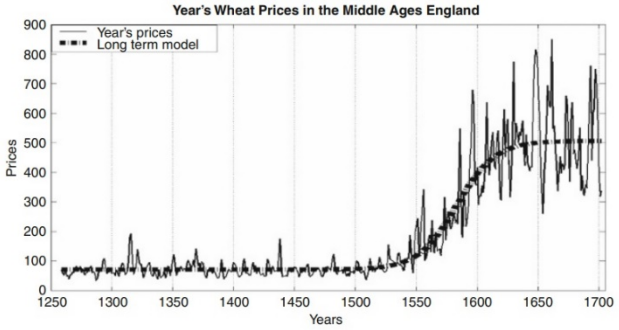
این رویدادها می‌توانند در حالاتی خاص، تأثیرات قابل توجهی در لایه‌های مختلف سیستم‌های اقتصادی- اجتماعی داشته باشند و از این‌رو، تدوین برنامه‌های متناسب با سطح مخاطرات آن برای مدیریت جوامع مرتبط، امری خطیر است. با توجه به شیوه عملکرد این رویدادها، برنامه‌ریزی و تأمین بودجه برای توانمندسازی[4] در حوادث غیرمترقبه و مدیریت مناسب این رخدادها، دشوار به نظر می‌رسد. علاوه بر این، واکنش‌های اجتماعی و سازمانی به رویدادهای اقلیم فضا نیازمند روش‌شناسی جداگانه و منحصربه‌فردی نسبت به موارد مرسوم است [۱].

۲-۱- ارزیابی تاثیرات اقلیم فضا بر اقتصاد

در ابتدا با مرور تاریخچه‌ای از اثرات اقلیم فضا بر اقتصاد می‌توان دید بهتر و جامع‌تری از اهمیت این موضوع پیدا کرد. حدود ۲۰۰ سال پیش، ستاره‌شناس معروف ویلیام هرشل[5]، این فرضیه را طرح کرد که قیمت گندم در انگلستان به طور مستقیم با تعداد لکه‌های خورشیدی مرتبط است. او متوجه شد که وقتی تعداد لکه‌های خورشیدی کم است، باران کم‌تری می‌بارد [۱۱]. مشاهدات هرشل که بر اساس قیمت‌های منتشر شده گندم بود نشان می‌داد که پنج دوره طولانی، تعداد لکه‌های خورشیدی با گندم گران قیمت همبستگی دارد. این مشاهدات باعث شد، این ایده توسط اقتصاددان و منطق‌دان انگلیسی، ویلیام استنلی جوونز[6] نیز اتخاذ شود. او توجه خود را به نوسانات قیمت گندم از ۱۲۵۹ تا ۱۴۰۰ معطوف نمود و نشان داد که فواصل زمانی بین قیمت‌های بالا، نزدیک به ۱۰ تا ۱۱ سال است. این اثر بعداً توسط راجرز[7] منتشر شد. همزمانی این فواصل با دوره چرخه ۱۱ ساله فعالیت خورشیدی، او را بر آن داشت تا پیشنهاد کند که چرخه فعالیت خورشیدی یک عامل "همگام‌سازی" در نوسانات قیمت گندم است. به عنوان گام بعدی، او نظریه خود را به بازارهای سهام قرن نوزدهم در انگلستان تعمیم داد و تحت تأثیر همزمانی نزدیک پنج اختلال حاد مالی در بورس، با حداقل پنج لکه خورشیدی قرار گرفت که قبل از این موارد اتفاق افتاده بود. او پیشنهاد کرد که هم فعالیت‌های خورشیدی و هم فعالیت‌های

[1] Exposure
[2] solar arrays
[3] star trackers
[4] Rehabilitation
[5] William Hersche
[6] William Stanley Jevons
[7] Rogers

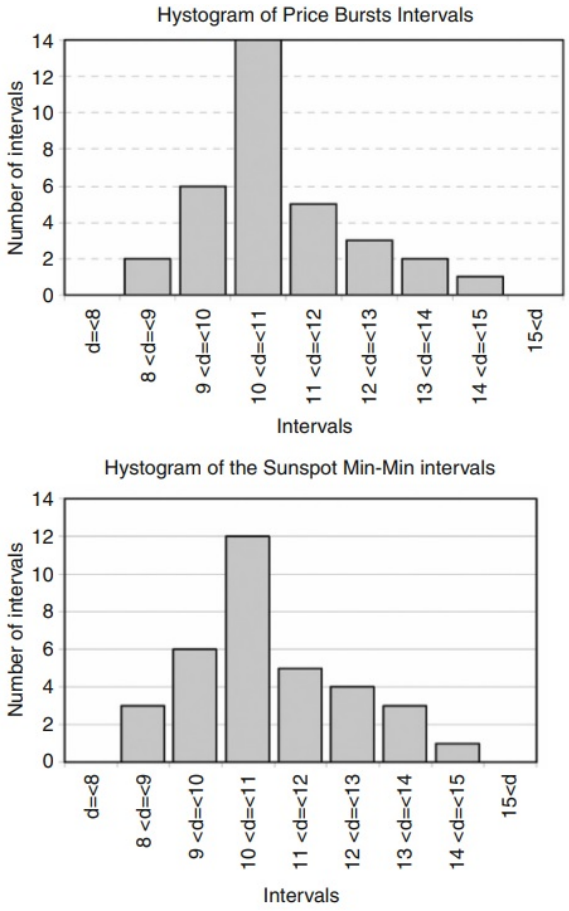
اقتصـــادی تحت یک فرایند هارمونیک با دوره ثابت یکســـان ۱۱ ســـال اســـت. با این حال، کشـــف بعدی رفتار غیرهارمونیک چرخه‌های خورشیدی، همراه با دوره‌های متغیر از ۸ تا ۱۵ سال و مشـــاهده بعدی عدم تطابق بین اختلالات حاد مالی پیش‌بینی شـــده توســـط او و اختلال‌های واقعی، اســـتدلال او را از بین برد. راجرز برای تحلیل داده از تأثیرات احتمالی فعالیت خورشیدی و شـــدت CR[1] بر قیمت گندم (از طریق تغییرات آب و هوایی) اســـتفاده کرده اســـت. در ادامه، نمودار قیمت گندم انگلســـتان به عنوان تابعی از زمان در ســـال‌های ۱۲۵۰ تا ۱۷۰۰ میلادی در شکل ۱ آورده شده است.



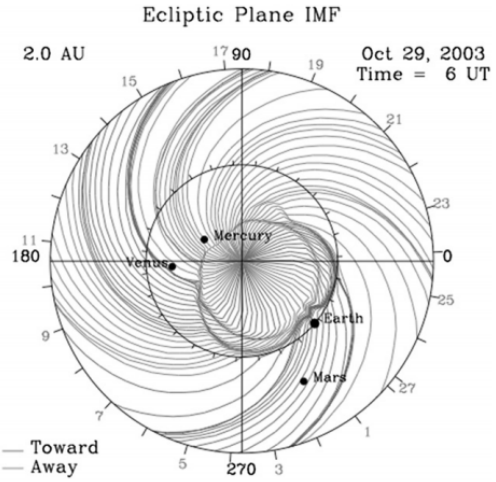
شکل ۱: قیمت گندم در انگلستان در طول ۱۲۵۹-۱۷۰۲ با تغییر قیمت در ۱۵۳۰-۱۶۳۰[۱۱]

در ادامه در شکل ۲، داده‌ها تجزیه و تحلیل شدند و توزیع فواصل تغییرات قیمت با توزیع فواصل بین حداقل چرخه‌های خورشیدی مورد مقایسه قرار گرفتند [۱۱]. در تجزیه و تحلیل صورت گرفته مشخص شد که برای توزیع فاصله حداقل لکه‌های خورشیدی پارامترهای آماری برآورد شده عبارت بودند از میانه ۱۰/۷ سال، میانگین ۱۱/۰۲ سال، انحراف استاندارد ۱/۵۳ سال و برای توزیع بازه جهش قیمت، پارامترهای آماری برآورد شده عبارتند از میانه ۱۱/۰ سال، میانگین ۱۱/۱۴ سال و انحراف معیار ۱/۴۴ سال [۱۱]. بنابراین، در این تحلیل تاثیر دوره‌های خورشیدی بر قیمت گندم به دست آمد و مشخص شد این قیمت ارتباطی با دوره‌های خورشیدی دارد.

در یک بررســـی دیگر از اثرات توفان‌های خورشـ یدی، اثرات مرتبط با توفان اواخر اکتبر و اوایل نوامبر ســـال ۲۰۰۳ مورد مطالعه قرار گرفته که موثر در قطع برق اروپا و آسـ یب دائمی ترانسفورماتورها در آفریقای جنوبی بوده است. شکل ۳، موج شوک بین سیاره‌ای و CME را درست زمانی نشـــان می‌دهد که در ســـاعت UT ۰۶۰۰، ۲۹ اکتبر ۲۰۰۳ به زمین رسیدند و توفان ژئو-مغناطیسی شدیدی را آغاز کردند [۲].



شکل ۲: هیستوگرام توزیع بازه‌ای برای جهش‌های قیمت گندم برای دوره ۱۲۴۹-۱۷۰۲، و فواصل حداقل لکه‌های خورشیدی در طول ۱۷۰۰- ۲۰۰۰ [۱۱]



شکل ۳: پیش‌بینی میدان مغناطیسی بین سیاره‌ای پس از رویداد بسیار بزرگ X17.2/4B خورشیدی در ۲۸ اکتبر ۲۰۰۳ [۲]

[1] Cosmic ray

۳- اثرات اقلیم فضا بر روی سیستم‌های فناوری

مطالعه‌ای در اروپا در سال ۲۰۱۹ صورت گرفت که بر اساس آن خسارات اقتصادی به زیرساخت‌های زمینی و فضایی ناشی از رویدادهای متوسط اقلیم فضایی را طی ۱۵ سال بعد از آن، ۱۳ میلیارد یورو برآورد کرد که در صورت وقوع حوادث شدید ممکن است بسیار بیش‌تر از این مقادیر نیز شود. بهره‌گیری از سیستم‌های هشدار اولیه و اقدامات متناظر با کاهش شدت آسیب‌ها می‌تواند این هزینه را تا ۳/۲ میلیارد یورو کاهش دهد.

جریان‌های الکتریکی بزرگ به طور مداوم در مگنتوسفر[1] و یونوسفر[2] وجود دارند. برخورد باد خورشیدی با مگنتوسفر باعث ایجاد تغییر در سیستم فعلی می‌شود و در پیامد آن، میدان مغناطیسی زمین به ویژه در عرض‌های جغرافیایی بالا منجر به ایجاد شفق‌های قطبی قابل مشاهده و یک سری جریان یونوسفری شدید می‌شود [۱۲].

تغییرات جریان‌های مگنتوسفر و یونوسفر به عنوان اختلالات یا توفان‌های ژئومغناطیسی در سطح زمین دیده می‌شوند و مطابق با نظریه قانون القای فارادی[3]، تغییرات ژئومغناطیسی با یک میدان ژئوالکتریک همراه است. اگرچه سیستم الکتروجت شفق از اهمیت ویژه‌ای در مورد اختلالات ژئو-مغناطیسی برخوردار است، اما اثرات مشابهی در عرض‌های جغرافیایی پایین‌تر نیز مشاهده شده است. زمین از مواد رسانا تشکیل شده، بنابراین میدان ژئوالکتریک جریان‌های درون زمین را به حرکت در می‌آورد. این‌ها هم‌چنین بر اختلال ژئوالکترومغناطیسی مشاهده شده در سطح زمین تأثیر می‌گذارند و به ویژه در میدان الکتریکی، سهم زمین قابل توجه است [۱۲].

۳-۱- برق

یک رویداد اقلیم فضایی می‌تواند جریان‌های القای ژئومغناطیسی (GIC[4]) را تولید کند که ممکن است توسط رساناهای موثر روی سطح زمین مانند شبکه برق منتقل شود. هنگامی که GICها وارد شبکه برق می‌شوند، به عنوان منابع جریان مستقیم (DC) عمل می‌کنند که در کنار جریان‌های متناوب معمولی (AC) تولید شده در نیروگاه‌ها جریان می‌یابند و در طول خطوط برق به ایستگاه‌های برق منتقل می‌شوند. ناسازگاری‌های اساسی بین جریان‌های DC و AC ممکن است در عملکرد ترانسفورماتورهای ولتاژ فوق‌العاده بالا (EHV) اختلال ایجاد کند [۳] و [۱۳].

در مارس ۱۹۸۹، GIC ناشی از یک توفان مغناطیسی در مقیاس بزرگ، باعث از کار افتادن سیستم انتقال نیرو به دلیل عملکرد غیرضروری رله‌های حفاظتی و خاموشی ۹ ساعته در اطراف شهر کبک کانادا شد که حدود ۶ میلیون نفر را تحت تأثیر قرار داد. در ۳۰ اکتبر ۲۰۰۳، یک ترانسفورماتور در آفریقای جنوبی بر اثر گرمای بیش از حد در نزدیکی هسته آهنی خود سوخت که به GIC نسبت داده شد. GIC در ژاپن نیز مشاهده شده است [۴].

۳-۲- خطوط لوله

آشفتگی‌های مغناطیسی ناشی از رویدادهای خورشیدی می‌تواند در خوردگی خطوط لوله تأثیر بگذارد. خطوط لوله با ترکیبی از فلزات، از جمله آهن ساخته شده‌اند. درصورت وجود رطوبت، آهن زنگ می‌زند. این واکنش که کاهش اکسیژن[5] نامیده می‌شود، زمانی رخ می‌دهد که الکترون‌ها از فلز جدا شوند [۱۴]. خطوط لوله نفت و گاز مدفون زیرزمین یا زیر آب مستعد خوردگی هستند که ممکن است در نقاطی رخ دهد که جریان الکتریکی از فلز به زمین اطراف جریان می‌یابد. بنابراین، خطوط لوله توسط یک پوشش عایق پوشانده می‌شود. با این حال، عایق کامل نیست و به خصوص سوراخ‌های احتمالی در پوشش مشکل‌ساز است. برای جلوگیری از خوردگی، خطوط لوله به یک سیستم حفاظت کاتدی مجهز شده‌اند که سعی می‌کند خط لوله را در پتانسیل کمی منفی نسبت به زمین (بین ۸۰۰-۹۵۰- میلی ولت و ۱۱۰۰-۱۳۰۰ میلی ولت [۱۵]) نگه دارد. اگر پتانسیل منفی بیش از حد بزرگ شود، ممکن است فرایندهای مضر مختلفی اتفاق بیفتد، بنابراین باید در تنظیم پتانسیل دقت شود [۱۲].

[1] Magnetosphere

[2] Ionosphere

[3] Faraday's law of induction

[4] Geomagnetically induced current

[5] Oxydoreduction

خوردگی توسط جریان‌های الکتریکی که در طول توفان‌های مغناطیسی و توفان‌های فرعی[1] در زمین پخش می‌شوند، افزایش می‌یابد. اختلاف پتانسیل با زمین می‌تواند چندین ولت مثبت شود و منجر به نشت الکترون شود. به ویژه عرض‌های جغرافیایی بالا در معرض خطر هستند و خط لوله‌ای که در آلاسکا از شمال به جنوب می‌گذرد یا شبکه خطوط لوله اسکاندیناوی در معرض خوردگی تسریع شده قرار دارند و در شرایطی که اغلب بسیار سخت هست نیاز به نظارت دائمی دارند. تعمیرات خطوط لوله گران است، نه تنها به دلیل محیط متخاصم عرض‌های جغرافیایی بالا یا بیابان‌ها، بلکه به این دلیل که قطع جریان الکتریکی، یک عملیات طولانی و ظریف است. اگر اندازه‌گیری دقیق جریان‌های ناشی از توفان‌های فرعی امکان‌پذیر بود، تعمیر و نگهداری سخت‌تر و مقرون به صرفه‌تر می‌شد. در این مورد، به جای پیش‌بینی فعالیت خورشیدی، تمایل بیشتر به نظارت است [۱۴]. میدان الکتریکی در سطح زمین پارامتر کلیدی هنگام محاسبه GIC در یک شبکه است زیرا تحت تأثیر تغییرات پیکربندی شبکه قرار نمی‌گیرد [۱۶].

در این راستا، پژوهشی درباره خطوط لوله نفت و گاز کشور آذربایجان انجام گرفته است. نکته قابل اشاره به این تحقیق، نزدیک بودن کشور آذربایجان به ایران از لحاظ جغرافیایی و مشترک بودن این دو کشور از نظر خطوط نفت و گاز است. تولید مقادیر زیادی نفت و گاز در آذربایجان مستلزم انتقال آنها به بازارهای جهانی است. خطوط لوله انتقال نفت و گاز از سه کشور آذربایجان، گرجستان و ترکیه با ساختارهای زمین‌شناسی و جغرافیایی متفاوت عبور می‌کنند. این خطوط لوله، چه در حال استفاده و چه در حال ساخت، تأثیر مهمی بر اقتصاد آذربایجان و منطقه کریدور انرژی جنوب[2] با هزینه حدود یک میلیون دلار یا بیش‌تر در هر کیلومتر دارند. هزینه سیستم حفاظت کاتدی برای پروژه‌های بسیار بزرگ (ده‌ها یا صدها میلیون دلار) بین ۰/۱٪ و ۰/۲٪ متغیر است. این مبالغ بسیار زیاد سرمایه‌گذاری شده در این خطوط لوله فراملی[3] را نشان می‌دهد که می‌تواند بالقوه در معرض اختلال ناشی از تغییرات شدید اقلیم فضایی باشد [۱۵]. با توجه به این تحقیق، می‌توان اهمیت حفاظت از خطوط نفت و گاز در ایران را خاطر نشان کرد.

۳-۳- صنایع نفت و معدن

اندازه‌گیری‌های مغناطیسی به طور گسترده‌ای برای جستجوی منابع طبیعی در داخل زمین و هم‌چنین به منظور هدایت حفاری و یافتن این منابع استفاده می‌شود. اندازه‌گیری‌ها برای تعیین جهت رشته مته و در نتیجه برای هدایت جهت حفاری استفاده می‌شود. توفان‌های مغناطیسی ناشی از اقلیم فضا می‌تواند میدان مغناطیسی را مختل کرده و منجر به کاهش دقت جهت حفاری شود. بسیاری از کسب و کارهای پیش‌رو درگیر در حفاری، مانند BP، Shell، Schlumberger، Statoil و ConocoPhillips، به دنبال اطلاعاتی در مورد شرایط ژئومغناطیسی نزدیک هستند تا بتوانند در دوره‌های آرام، برآوردها را برنامه‌ریزی کنند. آنها اغلب از برآورد در شرایط آشفته اجتناب می‌کنند زیرا نتایج تولید شده ممکن است بی‌ارزش باشند. در توفان مغناطیسی سال ۱۹۸۹، یک شرکت اکتشافی دریای شمال گزارش داد که ابزارهایی که برای هدایت سر مته‌ها به سمت پایین استفاده می‌شوند، نوسانات حدود ۱۲ درجه را تجربه کرده‌اند. این کسب و کارها باید هزینه توقف عملیات حفاری (که صدها هزار دلار در روز هزینه دارد) را در مقابل هزینه‌هایی که ممکن است ناشی از اشتباهات در مسیر رشته حفاری باشد بسنجد، به ویژه خطر تلاقی مسیرهای چاه دیگر، که می‌تواند منجر به انفجار شود [۱۷].

۴-۳- راه آهن

عموماً پیشرفت‌های فناورانه خطر اثرات نامطلوب ناشی از توفان‌های خورشیدی را افزایش داده است. پیش از این، قطارهای بخار به دلیل ساختار عمده مکانیکی، کم‌تر در معرض توفان خورشیدی بودند، اما قطارهای الکتریکی فعلی از این منظر بسیار آسیب‌پذیر هستند. علاوه بر این، راه‌آهن‌ها می‌توانند به دلیل وابستگی[4] (از طریق ریل‌های بلند) جریان‌های الکتریکی اضافی را از مدارهای مسیر به سیستم‌های علامت‌دهی راه‌آهن برگردانند. اساساً این پدیده مشابه جریان‌های الکتریکی است که شبکه برق را در صورت وقوع توفان مغناطیسی بزرگ بی‌ثبات می‌کنند [۱].

[1] Sub-storms
[2] South Energy Corridor Region
[3] Transnational
[4] Insufficient isolation

از طرفی GICها می‌توانند سیستم‌های علامت‌دهی [1] را مختل کنند، اگرچه خوش‌بختانه این یک اتفاق مکرر نیست ولی به طور قطع در سوئد سال ۱۹۸۲ چنین بود. این واقعیت که این رخداد خیلی به ندرت اتفاق می‌افتد به این معنی نیست که می‌توان نسبت به این امر بی‌تفاوت بود، زیرا یک تصادف ریلی جان افراد زیادی را به خطر می‌اندازد. تشعشعات کیهانی نیز احتمالاً بر راه آهن تأثیر می‌گذارد. هم‌چنین، از دست رفتن برق در قطار سریع‌السیر آلمان، به محض راه‌اندازی در سال ۱۹۹۰ مشاهده شد. یک مطالعه دقیق نشان داد که اجزای الکترونیکی تحت تأثیر پرتوهای کیهانی قرار گرفتند که اثرات آن توسط میدان‌های الکتریکی شدید دستگاه نظارت [2] تقویت شد [۱۴].

شواهدی مبنی بر اثرات اقلیم فضا بر سیستم‌های راه آهن نه تنها در سوئد بلکه در کشورهای دیگر مانند روسیه، سیبری و غیره نیز وجود دارد که در جدول ۱ نشان داده شده است [۱]. تحقیق در مورد رویدادهای اقلیم فضا اگرچه در سیستم‌های دیگر کاملاً تکامل یافته است، اما در زیرساخت‌های راه آهن هنوز در مراحل اولیه است [۱].

جدول ۱: رویدادهای اقلیم فضایی در راه آهن در چندین کشور [۱]

سال	مکان	رویداد
مارس ۱۸۴۷	بریتانیا	جریان‌های الکتریکی خود به خودی بر روی تلگراف در چندین بخش از مسیر راه آهن مشاهده شد.
می ۱۹۲۱	ایالات متحده / سوئد	به دلیل انفجار تلگراف در ایستگاه راه آهن نیویورک و سوئد، ایستگاه تلفن آتش گرفت.
جولای ۱۹۸۲	سوئد	سیگنال‌های راه آهن به طور خودکار توسط ولتاژ القایی از سبز به قرمز تبدیل شدند.
مارس ۱۹۸۹	روسیه	توفان ژئومغناطیسی سیستم‌های خودکار راه‌آهن را مختل و سیگنال‌های متعددی را با گزارش انسداد کاذب مسیر راه‌آهن ایجاد کرد.
آپریل ۲۰۰۰	روسیه	ناهنجاری‌های غیرقابل توضیح در مدارهای راه آهن روسیه گزارش شد.
مارس ۲۰۰۱	روسیه	مدارهای راه آهن انسداد مسیرهای کاذب را با فعالیت توفان ژئومغناطیسی شدید توصیف کردند.
اکتبر ۲۰۰۳	روسیه	ناهنجاری‌های غیرقابل توضیح در مدارهای راه آهن مشاهده شد.
نوامبر ۲۰۰۴	روسیه	سیگنال‌های حاکی از انسداد کاذب در خطوط راه آهن روسیه با رفتار تصادفی سیگنال‌ها مرتبط است.

[1] Signaling
[2] The monitoring apparatus

۳-۵- خودرو

اتومبیل‌ها و سایر وسایل نقلیه جاده‌ای، حاوی مقدار فزاینده‌ای از الکترونیک دیجیتال (مثلاً برای مدیریت فعالیت‌های موتور) هستند که ممکن است توسط SEE [3] در اثر پرتوهای کیهانی و توفان‌های تشعشع خورشیدی مختل شوند. این موضوع در بخشی از یک مطالعه رسمی در ایالات متحده آمریکا در خصوص کنترل الکترونیکی وسایل نقلیه و برآورد شتاب ناخواسته آمده است. این گزارش که در تابستان ۲۰۱۱ منتشر شده، حاوی مجموعه‌ای جامع از توصیه‌ها در خصوص بهترین راهکارهای تضمین ایمنی و قابلیت اطمینان در کنترل الکترونیکی وسایل نقلیه جاده‌ای است که به نوعی شامل استانداردهای طراحی و آزمون‌های کاهش خطرات ناشی از SEEها نیز می‌شود [۱۷].

مشاغل حوزه حمل و نقل می‌توانند در معرض مجموعه‌ای از اثرات اقلیم فضا نیز قرار گیرند. کسب وکارهایی که سیستم‌های حمل و نقل را اداره می‌کنند، به توصیه‌های هدفمند در مورد این‌گونه مخاطرات و راهکارهایی برای کاهش اثرات آن‌ها نیاز دارند. این گزینه‌ها شامل رویه‌های عملیاتی خوب و دسترسی به اطلاعات در مورد شرایط اقلیم فضا است. کسب وکارهایی که از صنعت حمل و نقل حمایت می‌کنند، می‌توانند به فرصت‌هایی برای ارائه خدماتی که به اپراتورها کمک می‌کند تا خطرات ناشی از پدیده‌های اقلیم فضا را کاهش دهند نیز نگاه جامع‌تری داشته باشند [۱۷].

۳-۶- مخابراتی و رادیویی

اولین مشاهدات و گزارشات ناشی از اثرات اقلیم فضا بر سیستم‌های تکنولوژیکی بیش از ۱۵۰ سال پیش در تجهیزات تلگراف انجام شد. از آن زمان تاکنون، سیستم‌های راه دور بارها از اضافه ولتاژ، وقفه در عملیات و حتی آتش‌سوزی ناشی از جریان GIC تجهیزات رنج برده‌اند. چنین مشکلاتی حداقل در اروپای شمالی و هم‌چنین در آمریکای شمالی بارها گزارش شده است [۱۲].

امواج با طول موج بلند (۳۰ تا ۳۰۰ کیلوهرتز) و امواج با طول موج متوسط (۳۰۰ تا ۳۰۰۰ کیلوهرتز) که برای ناوبری یا ارسال

[3] Single event effects

رادیویی استفاده می‌شوند، زمین را در یونوسفر ارتفاع پایین دربر می‌گیرد. امواج کوتاه یا با فرکانس بالا (۳ تا ۳۰ مگاهرتز) که توسط رادیو هامز[1]، تلفن‌های همراه، رادیو FM یا تاکسی استفاده می‌شود، روی یونوسفر منعکس می‌شود. امواج UHF یا VHF (کم‌تر از ۳ گیگاهرتز) که برای تلفن، تلویزیون یا رادیو FM استفاده می‌شوند در همه شرایط از یونوسفر عبور می‌کنند، اما تحت تضعیف و تغییرات فازی قرار می‌گیرند که به ساختار ستون الکترونی[2] که باید از آن عبور کنند، بستگی دارد [۱۴].

یونوسفر تا حد زیادی تحت تأثیر تشعشعات یونیزه ساطع شده از خورشید، شامل شار الکترومغناطیسی و ذرات پرانرژی است. منابع اصلی این تابش مربوط به مناطق فعال خورشید است که امکان دارد میزبان لکه‌های خورشیدی باشد. محققان در طی سال‌های متمادی سعی بر این داشته‌اند تا الگوهایی را توسعه دهند که رابطه بین تعداد لکه‌های خورشیدی و اثرات یونسفری در آن مشاهده و توصیف ریاضیاتی شود. از جمله سایر عوامل تاثیرگذار در نقش‌دهی وضعیت یونسفر در دوره‌های آشفته آن، می‌توان به سایر پدیده‌های خورشیدی نظیر پرتاب‌های جرم تاجی (CMEs) و پیکربندی‌های میدان مغناطیسی بین سیاره‌ای (IMF[3]) اشاره کرد. لکه‌های خورشیدی در روندهای بلندمدت رفتار یونوسفر نیز نقش قابل توجهی دارند و خواص آماری یونوسفر را می‌توان با دقت مناسبی بر حسب تعداد لکه‌های خورشیدی پارامتریزه کرد [۱۸]. در جداول ۲ و ۳ به ترتیب می‌توان اثرات یونوسفر در VLF[4] و اختلالات یونوسفر در سیستم‌های رادیویی فرکانس بالا HF را مشاهده کرد.

اقلیم فضا به طرق مختلف بر ارتباطات رادیویی تأثیر می‌گذارد. تغییرات در چگالی و ساختار لایه یونوسفر مسیر انتقال را تغییر می‌دهد و حتی می‌تواند از انتقال سیگنال‌های رادیویی HF به طور کامل جلوگیری کند. افزایش لایه D[5] به دلیل یونیزاسیون توسط شراره‌های خورشیدی که به عنوان بازتاب دهنده امواج رادیویی در فرکانس‌های مختلف و جاذب در فرکانس‌های اضافی عمل می‌کند، می‌تواند منجر به خاموشی رادیویی شود [۱].

جدول ۲: اثرات یونوسفر در VLF [۱۸]

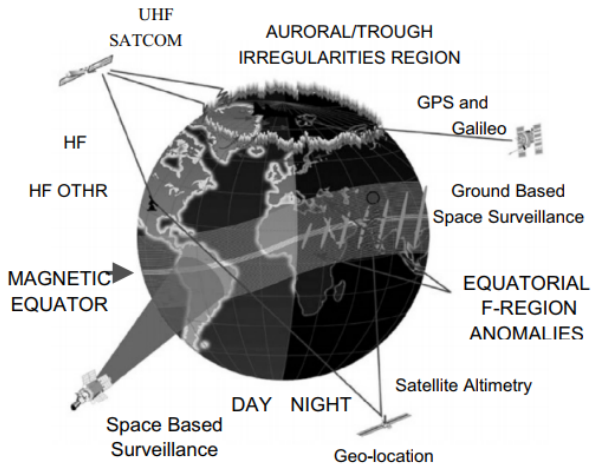
رویداد	تغییر یونوسفر	نتیجه سیستم
شراره خورشیدی	اختلالات ناگهانی یونوسفر (SIDS): اشعه ایکس خورشیدی باعث یونیزاسیون بیش از حد در زیرلایه D معمولی، در سمت تابش نور خورشید به زمین می شود و ارتفاع موثر بازتاب را تغییر می‌دهد. (رویداد وسیع و آنی)	ناهنجاری فاز ناگهانی (SPA یا افزایش فاز موجی) افزایش قدرت سیگنال بالای ۱۶ کیلوهرتز در مسیرهای نور خورشیدی
رویداد پروتون خورشیدی	اختلال قطبی به دلیل پدیده ذرات پرانرژی. این اختلال باعث یونیزاسیون بیش از حد در لایه D در کلاهک قطبی می‌شود. (رویداد گسترده و آنی)	تاخیر فاز و دامنه کاهش می‌یابد: *چندین ساعت در عرض‌های میانی *۱۰ تا ۲۰ روز مسیرهای hi-lat /transpolar
توفان مغناطیسی و پدیده شفق قطبی	بارش در ناحیه شفق قطبی باعث یونیزاسیون بیش از حد در ناحیه D می‌شود، اما این رویدادها در مکان و زمان بیش‌تر محلی هستند.	تغییرات نامنظم در فاز و دامنه با تناوب ۱۰- ثانیه، به ویژه در شب و در مسیرهای طولانی

مجموعه متنوعی از سیستم‌های آسیب‌پذیر از اثرات ناشی از لایه یونوسفر در شکل ۴ آمده است. این موارد که وابسته به ساعات شبانه روز، ارتفاع و طول و عرض جغرافیایی تنوع و پراکندگی خاصی را داراست شامل ارتباطات فرکانس بالا زمین-زمین (HF)، ارتباطات فضا-زمین، GNSS (سیستم‌های ماهواره‌ای ناوبری جهانی)، مانند GPS (سیستم موقعیت‌یابی جهانی) و گالیلو[6] - به ویژه سیستم‌های تک فرکانس، رادارهای HF فرا افق[7]، ارتفاع سنج‌های ماهواره‌ای[8] و رادارهای فضاپایه[9] است. ارتباطات (HF) و سیستم‌های راداری برای عملکرد خود به یونوسفر متکی هستند ولی برای حفظ کارکرد مناسب در مواجهه با اختلالات ناشی از پدیده‌هایی نظیر اقلیم فضا نیز باید چاره‌اندیشی شود [۱۹].

[1] Radio hams
[2] Electron column
[3] Interplanetary magnetic field
[4] Very Low Frequency
[5] لایه D درونی‌ترین لایه است که از سطح زمین ۴۸ تا ۹۰ کیلومتر فاصله دارد.
[6] Galileo
[7] HF over-the-horizon radars
[8] Satellite altimeters
[9] Space-based radars

جدول ۳: اختلالات یونوسفر موثر بر سیستم های رادیویی HF [۱۸]

اختلالات یونوسفر				
	تقریب فرکانس وقوع			
اختلال	حداقل خورشیدی	حداکثر خورشیدی	زمان و مدت	اثرات انتشار	علت احتمالی
الف) اختلال ناگهانی یونوسفر (SID)	۲/ سال	۲/هفته	همه اثرات تقریبا به طور هم‌زمان شروع می‌شود. مدت زمان - ۱۱۲ ساعت	در نیم‌کره نور خورشید، جذب قوی لایه D(محو شدن موج کوتاه)، انعکاس VLF غیرعادی، اثرات ناحیه F	افزایش شار اشعه ایکس و EUV خورشیدی از شراره‌های خورشیدی
ب) جذب کلاهک قطبی (PCA)	۰	۱/ ماه	چند ساعت پس از شعله‌ور شدن شروع می‌شود. یک تا چند روز	جذب شدید امواج رادیویی در مناطق قطبی مغناطیسی، انعکاس VLF غیرعادی	پروتون‌های خورشیدی ۱ تا ۱۰۰ مگا ولت
ج) توفان مغناطیسی	۲۲/سال	۲۶/ سال	ممکن است برای روزها با تغییرات روزانه قوی ادامه یابد.	اثرات ناحیه F، افزایش foF2 در طول روز اول، سپس کاهش foF2، با تغییرات مربوطه در MUF	برهم‌کنش پلاسمای کم انرژی خورشیدی با میدان مغناطیسی زمین، باعث بارش الکترون‌های پرانرژی، اثرات شفق، گرمایش و تولید TID می‌شود.
د) جذب شفق (AA)	اساساً همه جا حاضر است.		پدیده‌های پیچیده‌ای که از ساعت‌ها تا روزها طول می‌کشد.	افزایش جذب در امتداد بیضی شفق در مناطق صد تا هزار کیلومتری. K اسپوراتیک ممکن است MUF را افزایش دهد.	بارش الکترون‌هایی با انرژی چند ده keV در یک بیضی شکل، ناحیه استوای کلاهک قطبی
ه)اختلالات سفر (جابجایی) (TID)	اساساً همه جا وجود دارد و مقیاس‌های بزرگ‌تر در طول توفان‌های مغناطیسی افزایش می‌یابد.		معمولاً دوره‌ها از ده‌ها تا ساعت است.	تغییرات foF2 یا تغییرات متناظر MUF بعضاً دوره‌ای	امواج جوی



شکل ۴: سیستم های تحت تأثیر یونوسفر [۱۹].

۳-۷- هوانوردی

عوامل مهمی در هوانوردی وجود دارد که می‌تواند تحت تأثیر اقلیم فضا قرار گیرد که مهم‌ترین آن ارتباطات رادیویی، موقعیت‌یابی و دوز قرار گرفتن اعضای خدمه تحت تشعشعات است. یک پدیده اقلیم فضا ممکن است منجر به از دست دادن یکی از معیارها شود، به عنوان مثال ارتباط رادیویی فرکانس بالا HF. در این راستا اگر چندین پدیده خورشیدی به طور هم‌زمان اتفاق بیفتد، حتی ممکن است به تعلیق پروازها نیاز باشد [۴].

امروزه استفاده از GNSS برای موقعیت‌یابی در هوانوردی در حال افزایش است. ناوبری منطقه وسیع (RNAV)، که از امواج رادیویی از جمله GNSS استفاده می‌کند، مسیرهای هوایی کوتاه-تری را نسبت به مسیرهای تعیین شده توسط روش‌های ناوبری قبلی امکان‌پذیر می‌کند. بنابراین نصب RNAV در حال ترویج و استفاده از آن در حال گسترش است که البته پدیده‌های خورشیدی تاثیر زیادی بر آن و در نتیجه هوانوردی خواهد داشت. موقعیت‌یابی کد هم به عنوان یکی از انواع موقعیت‌یابی تک فرکانس با استفاده از یک شبه‌برد[1]، در ناوبری هوانوردی استفاده می‌شود. از طرفی تأثیر تأخیر یونوسفر در موقعیت‌یابی تک فرکانس زیاد است. اختلالات یونوسفر مانند توفان‌های مثبت یونوسفر و حباب‌های پلاسما باعث افزایش خطاهای محدوده‌یابی و کاهش دقت موقعیت‌یابی در این دستگاه می‌شود [۴].

هنگامی که پرتوهای کیهانی کهکشانی (GCRs) یا SEPهای پرانرژی به جو برخورد می‌کنند، با تولید ذرات ثانویه مختلف مانند نوترون‌ها، یک بارش هوا[2] ایجاد می‌کنند. خدمه هواپیما و مسافران به دلیل این ذرات ثانویه در معرض دوز تشعشع افزایش یافته قرار می‌گیرند. نرخ دوز GCR به پتانسیل مدولاسیون خورشیدی بستگی دارد و به تدریج با یک دوره تقریباً ۱۱ ساله تغییر می‌کند. در مقابل، نرخ دوز SEP به طور ناگهانی هنگامی که یک رویداد بزرگ ذرات خورشیدی رخ می‌دهد افزایش می‌یابد و SEPs می‌تواند یک خطر بالقوه برای خدمه هواپیما و مسافران باشد [۴].

۳-۸- ماهواره و ناوبری

صنعت ماهواره بسیار متنوع است و به مهندسان و اپراتورهایی نیاز دارد که در ارتباط با مدارهای مختلف زمین فعالیت کرده و بر

[1] Pseudo-range

[2] Air-shower

طیفی از چالش‌های زیست محیطی غلبه کنند تا انواع مختلف خدمات ماهواره‌ای را ارائه دهند (مانند ارتباطات، سنجشی، رصد زمین و غیره) [۵] و [۲۰].

بسیاری از اجزای فضا می‌توانند بر ماهواره‌ها و راکت‌ها تأثیر بگذارند. تاثیر اقلیم فضا اساساً به انرژی اجزا بستگی دارد. اجزای کم انرژی در تعامل با سطوح ماهواره‌ها (پوشش‌های حرارتی، سلول‌های خورشیدی، آنتن‌ها) عبارتند از فوتون‌ها (از UV تا رادیو)، باد خورشیدی، جو و اتم‌ها و مولکول‌های مختلف آن، یونوسفر، پلاسما در مگنتوسفر، گرد و غبار سبک، ریزشهاب‌ها و ریزگردها. این تعامل به موقعیت ماهواره/ پرتاب‌گر در فضا بستگی دارد. ماهواره‌ها و پرتاب‌گرها در ارتفاع پایین تحت تأثیر همه این اجزا (به جز باد خورشیدی) قرار می‌گیرند، در حالی که مأموریت بین سیاره‌ای می‌تواند با شهاب سنگ‌ها، فوتون‌ها، باد خورشیدی، پرتوهای کیهانی کهکشانی و خورشیدی و مگنتوسفرهای مختلف تعامل داشته باشد. با افزایش انرژی، ذرات و فوتون‌ها می‌توانند در بدنه ماهواره نفوذ کنند. هم‌چنین این اجزا با فضانوردان، به ویژه در طول فعالیت‌های اضافی (EVA[1]) تعامل دارند [۱۲].

یون‌های پر انرژی هم‌چنین می‌توانند سبب ایجاد یک رویداد منفرد (SEEs) در تجهیزات الکترونیک شوند (خطاهای سخت‌افزاری منفرد[2]، آشفتگی‌های یک رویداد[3]، لچ-آپ‌ها[4]، فرسودگی[5]، تحریک گیت[6] و قطع دی الکتریک[7]). این اثرات معمولاً ناشی از یون‌های سنگین است، اما ذرات سبک مانند پروتون‌ها یا نوترون‌ها می‌توانند از طریق واکنش‌های هسته‌ای[8] با سیلیکون در داخل تجهیزات الکترونیک، اثراتی مانند یون‌های سنگین را ایجاد کنند (در آینده، به دلیل کوچک‌سازی فزاینده، پروتون‌ها ممکن است بتوانند مستقیماً القا کنند) [۲۱]. اثرات SEE، از آنجایی که پراکنده هستند، نگرانی عمده‌ای برای اقلیم فضا دارند. برخی از آنها دائمی هستند، یا به طور مستقیم (مثلاً لچ-آپ، فرسودگی کاری) یا غیرمستقیم (مثلاً تغییرات در حافظه برنامه دائمی). SEEها به‌عنوان رویدادهای پروتون خورشیدی، نوترون‌ها را در ارتفاعات پایین ایجاد می‌کنند و می‌توانند مستقیماً در ارتفاعات بالاتر تعامل داشته باشند، به ویژه برای پرتاب‌های GTO[9] و بین سیاره‌ای با لانچر Ariane V [۱۲].

یک دلیل فرسودگی سلول‌های خورشیدی همان‌طور که در ماهواره GOES[10] در طی توفان بزرگ ماه مارس ۱۹۹۱ نیز مشاهده شد، به دلیل جابه‌جایی اتم‌ها[11] در داخل سلول بود که ناشی از اثر ذرات با انرژی بالا است. با توجه به پوشش شیشه‌ای که روی سلول قرار دارد، ذرات باید انرژی کافی برای عبور از این پوشش را داشته باشند (اما نه آنقدر زیاد که از کل سلول عبور کنند)، بخشی از انرژی خود را در آن باقی بگذارند و باعث آسیب دائمی می شوند. جابه‌جایی اتم هم‌چنین می‌تواند توسط ذرات کم انرژی در نزدیکی سطح سلول‌های خورشیدی ایجاد شود که اثرش آنی است. آشفتگی‌های رویداد منفرد در طول پرتاب Ariane V بدون هیچ‌گونه رویداد ذرات پرانرژی خورشیدی در حال انجام، ثبت شد. تعداد SEUها[12] می‌تواند در طول چنین رویدادی افزایش یابد. با این وجود، افزونگی رایانه‌های روی این لانچر، خطای مهلک را دور از انتظار می‌سازد [۱۲]. به طور نمونه در ژانویه ۱۹۹۴ نیز دو ماهواره مخابراتی کانادا دچار اختلال شد که بازیابی آن ۶ ماه طول کشید [۲۲].

عموماً اثرات فیزیکی که باعث نگرانی می‌شود شامل دوز تجمعی[13]، ناهنجاری‌ها (آنومالی‌ها)[14]، اختلالات پیوند[15]، از دست دادن ارتفاع[16] و از دست دادن جهت‌گیری[17] است. ساخت ماهواره‌های مخابراتی برای کار در مدار زمین ثابت (GEO) و GNSS برای کار در مدار متوسط زمین (MEO) که در آن محیط تشعشع بسیار شدید است؛ مستلزم فراهم نمودن تدابیر و بسترهای حفاظتی خاصی در طراحی است تا کارکرد مناسب ماهواره‌ها در برابر دوزهای تجمعی تابشی زیاد[18] و رفتارهای ناهنجاری[19] ماهواره که می‌تواند ناشی از شارژ سطحی و عمیق دی‌الکتریکباشد

[1] Extra vehicular activities
[2] Single hard errors
[3] Single event upsets
[4] Latchups
[5] Burnouts
[6] Gate
[7] Dielectric ruptures
[8] Nuclear reactions
[9] Geostationary transfer orbit
[10] NOAA meteorological satellite series
[11] Atom displacements
[12] Single event upsets
[13] Cumulative dosage
[14] Anomalies
[15] Link disruptions
[16] Loss of altitude
[17] Loss of orientation
[18] High cumulative radiation dosages
[19] Anomalous

را حفظ کند [۵]. مهندسان و اپراتورهای LEO توضیح دادند که دارایی‌های آنها نسبتاً بیش‌تر توسط اتمسفر محافظت می‌شود، اما با این وجود نگران تشعشعات، به خصوص در شرایط سخت‌تر که بیش‌تر از حد معمول به اتمسفر نفوذ می‌کند، هستند. هم‌چنین نگرانی در مورد رویداد شدید اقلیم فضایی و تعداد زیاد فضاپیماهای LEO که به طور بالقوه ممکن است به دلیل گرمای بیش از حد اتمسفر ارتفاع را از دست بدهند امری قابل تامل است [۲۳]. یک برخورد تصادفی می‌تواند باعث برخوردهای آبشاری شده (به عنوان مثال، سندرم کسلر) و به طور بالقوه بسیاری از خدمات اجتماعی حیاتی مانند پایش زمین و تصویربرداری را تحت‌الشعاع قرار می‌دهد [۳]. پدیده‌های اقلیم فضا پتانسیل قابل توجهی برای اختلال در سیستم‌های حمل و نقل، به ویژه از طریق تأثیر بر سامانه‌های ناوبری و کنترل دارد. کسب و کارها باید از اتکا به ناوبری ماهواره‌ای به عنوان تنها منبع داده‌های موقعیت خودداری کنند. خطر اصلی در این زمینه، احتمال از دست دادن سیگنال ناوبری ماهواره‌ای به طور کامل است [۱۷].

کاربران موقعیت‌یابی جهانی همواره در حال افزایش هستند؛ راکت‌های نظامی، وسایل هوانوردی، ماهواره‌ها، وسایل نقلیه اورژانسی، تعداد فزاینده‌ای از خودروها، کشتی‌ها و غیره از این جمله‌اند. فرکانس‌های مورد استفاده در محدوده یک گیگاهرتز هستند. یک اغتشاش مغناطیسی قوی که منجر به تغییرات در غلظت الکترونی در جو می‌شود، می‌تواند منجر به خطاهایی بین چند ده برابر متر تا یک کیلومتر در تعیین موقعیت شود. این خطاها می‌تواند در برخی موارد عواقب غیرقابل صرف نظری برای ماموریت هواپیماها یا کشتی‌ها به همراه داشته باشد [۱۴] و [۲۴]. اقلیم فضا می‌تواند روی سیگنال‌های GNSS تداخل ایجاد کند و باعث ایجاد خطاهای موقعیت‌یابی و از دست دادن قفل با اثرات بالقوه وابسته به استفاده مخصوص از اطلاعات منتشر شده موقعیت، ناوبری و زمان‌بندی با منظومه‌های ماهواره‌ای GNSS (بطور مثال سیستم موقعیت‌یاب جهانی ایالات متحده (GPS)، GLONASS روسی) شود [۵] و [۲۵]. مهندسان و اپراتورهای ماهواره باید بر طیفی از چالش‌های محیطی غلبه کنند تا مأموریت‌های ماهواره‌ای در مدارهای مختلف بتوانند انواع مختلفی از خدمات ماهواره‌ای را ارائه دهند. بنابراین، ذی‌نفعان در سراسر صنعت سطوح مختلفی از نگرانی را در مورد تأثیرات فیزیکی متفاوت اقلیم فضا بر روی ماهواره‌ها ابراز کردند که در جدول ۴ آورده شده است [۳].

جدول ۴: اثرات فیزیکی مختلف اقلیم فضا بر ماهواره ها [۳].

اثر فیزیکی	تعریف	نکاتی از ذینفعان مورد تحقیق
دوز تجمعی	مقدار کل تشعشعات یونیزه کننده یا غیریونیزه کننده که یک ماهواره در طول عمر خود در معرض آن قرار می‌گیرد.	•بسیار وابسته به مشخصات ماموریت، استانداردها برایLEOها راحت و برای MEOها وGEO ها بالاترین است. •اثر فیزیکی یک فرآیند طبیعی و پذیرفته شده در صنعت است که باعث سایش آهسته و پیوسته می‌شود. به طور محافظه کارانه با مهندسی و طراحی به حساب می‌آید. • مهندسی بیش از حد (حاشیه x2-3 معمولی است) پرهزینه است اما کم‌تر از تلاش برای طراحی کامل یک ماهواره (عمر با ماموریت برنامه‌ریزی شده به پایان می‌رسد) یا از دست دادن زودهنگام آن هزینه دارد. • تجربه نشان می‌دهد که حداقل خورشیدی ممکن است برای ماهواره‌ها آسیب بیش‌تری داشته باشد، زیرا فعالیت خورشیدی قوی از آنها در برابر یون‌های سنگین واقعاً آسیب‌رسان در پرتوهای کیهانی محافظت می‌کند. • افزایش استفاده از فناوری های تجاری خارج از دسترس با مشخصات دوز تجمعی کمتر در حال حاضر نشان دهنده یک خطر ناشناخته است زیرا ماهواره‌های استفاده کننده از این قطعات در سال‌های اخیر توسط اقلیم فضایی آزمایش نشده‌اند. • تمام اجزای ماهواره از جمله محموله و پلتفرم را تخریب کنید.
ناهنجاری‌ها	هر گونه نقص در رفتار عادی و پیش‌بینی شده یک ماهواره یا زیرسیستم ماهواره‌ای (مانند برق، وضعیت، پایداری، جهت‌گیری) که به راحتی قابل توضیح نیست.	• طیف وسیعی از نقص‌ها امکان‌پذیر است و نیاز به افزایش حجم کاری برای اپراتورها برای عیب‌یابی و بازیابی عملیات نامی دارد. ناهنجاری‌ها به ندرت به اندازه‌ای شدید هستند که بر ارائه خدمات ماهواره‌ای تأثیر بگذارند و می‌توانند مربوط به اقلیم فضا نباشند. • بخش بزرگی از ناهنجاری‌ها تکرار می‌شوند، موارد جدید به منابع بیش‌تری نیاز دارند و حل آنها می‌تواند هزینه‌های قابل توجهی را به همراه داشته باشد. • برخی از طرح‌ها نسبت به سایرین حساس‌تر هستند و حل ناهنجاری‌ها مستلزم رویه‌های احتمالی است که هزینه‌های عملیاتی دارند. • تنها ناهنجاری‌هایی که توانایی ماهواره را کاهش می‌دهند، نگرانی اصلی هستند. • اثر به فناوری استفاده از ماهواره، عملکرد آن و نحوه تأثیر رویداد بر آن فناوری خاص (مانند چرخ‌های مومنتومی، ردیاب‌های ستاره‌ای و غیره) بستگی دارد.
اختلالات اتصال	هر گونه تخریب یا وقفه در انتشار یا دریافت سیگنال‌هایی که برای انتقال اطلاعات به یا از ماهواره استفاده می‌شود.	• قابلیت اطمینان یک اتصال ماهواره‌ای خاص بیش‌تر به سبب دلایل مختلف غیراقلیم فضایی (مانند باران، آب و هوا) کاهش می‌یابد. • احتمال وقوع بستگی به این دارد که از چه باندهایی برای ارسال/ دریافت سیگنال‌ها استفاده می‌شود و این‌که چگونه فضا بر این باندها تأثیر می‌گذارد. ماهواره‌ها از فرکانس‌های سیگنال مختلف برای تله‌متری (مسافت‌سنجی)، ردیابی و کنترل (TT&C) و برای ارائه خدمات استفاده می‌کنند. • هزینه‌ها برای دستیابی به سطوح بالایی از قابلیت اطمینان به سرعت افزایش می‌یابد و بنابراین به ارزش خدمات برای کاربر نهایی و هم‌چنین بودجه آنها بستگی دارد. • برای ماهواره‌های تجاری که باید ۲۴/۷ سیگنال ارسال و دریافت کنند بنابراین هرگونه وقفه در سیگنال (حتی یک دقیقه) مشکل‌ساز است. زمان پول است و هزینه‌ها به صورت غیرخطی با مدت زمانی که یک مشکل سیگنال به طول می‌انجامد مقیاس می‌شود. • نگرانی بزرگی برای اپراتورهای ماهواره‌ای است زیرا می‌توانند مستقیماً بر درآمد تأثیر بگذارند.
از دست دادن ارتفاع	کاهش سرعت ماهواره و به نوبه خود ارتفاع، به دلیل افزایش پسای اتمسفر.	•روند عادی که اقلیم فضا به سادگی می تواند تسریع کند. • از دست دادن ارتفاع به دلیل افزایش نیروی درگ فقط مربوط به ماهواره های LEO. تلفات کوچک (تقریبا ۱۰۰ s m -۱۰ s) تنها در صورت ایجاد خطرات برخورد باعث عمل می‌شود، اما تلفات بزرگتر (تقریبا ۱۰ s km -۱) ممکن است باعث تغییر موقعیت شود. رویدادهایی که در آن تراسترها باید روشن شوند، نگرانی خاصی دارند، زیرا سوخت را کاهش می‌دهند و سوخت در نهایت محدودیت کلیدی در طول عمر ماموریت است. • با شلوغ شدن حریم فضایی، ممکن است اثر مشکل‌سازتر شود: یک برخورد ناشی از اقلیم فضا می‌تواند باعث برخوردهای آبشاری شود (مثلاً سندرم کسلر).

۹-۳- تخمین هزینه

رویدادهای شـــدید اقلیم فضـــایی می‌تولند تعداد زیادی از سیستم‌های فناوری مدرن را در بخش‌های مختلف صنعت مختل کنـد. هزینـه‌های اجتماعی- اقتصـــادی آن‌ها اگر بـه طور موثر پیش‌بینی نشـده و کاهش نیابد، بسـیار زیاد خواهد بود. پیش‌بینی پدیده‌ها و برآورد خســـارات، اهمیت زیادی در ارائه خدمات برای پیش‌گیری یا جبران‌ســـازی اثر رویداد اقلیم فضـــا قبل از وقوع یا بعد از آن در یک رویداد بزرگ دارد.

به دلیل اهمیت خسارات وارد شده توسط رویدادهای اقلیم فضا، تحقیقات متعددی در زمینه برآورد هزینه خسارات انجام شده است. برای مثال آژانس فضایی اروپا (ESA[1]) با توجه به شرایط اقتصادی سال ۲۰۱۶ در طی گزارشی تخمین هزینه‌ای ارائه داد. در این گزارش، یک رویداد اقلیم فضایی شدید (شامل خاموشی رادیویی، توفان ژئومغناطیسی و توفان تشعشع خورشیدی) فرض شده که می‌تواند ۱۴.۹۷۱ میلیون یورو در تعدادی از صنعت‌ها هزینه داشته باشد. جدول ۵ جزئیات این تخمین را از سال ۲۰۱۶ تا ۲۰۳۲ ارائه می‌کند [۲۶].

جدول ۵ : آماری که به عنوان NPV[2] در دوره ۲۰۱۶-۲۰۳۲ گزارش شده است

دامنه	۲۰۱۶ (۱ سال)	۲۰۲۴ (۹ سال)	۲۰۲۳ (۱۷ سال)
طراحی و عملیات فضاپیما	M۹۱۲/۹- €	M ۱۱۲۳/۲ - €	M ۱۳۸۹/۴ - €
عملیات پرتاب	M ۰/۰۰۸ - €	M ۰/۰۳۷ - €	M ۰/۰۵۱ - €
هوانوردی	M ۶۶۳۵/۶ - €	M۱۱۱۳۹/۸ - €	M ۱۸۷۰۱/۵- €
بهره‌برداری از منابع	M ۱۹۷/۵ - €	M۲۳۴/۹ - €	M ۲۷۹/۵ - €
اپراتورهای سیستم برق	M ۵۶۳۰/۵ - €	M ۶۳۶۴ - €	M ۷۱۹۵/۲- €
حمل و نقل جاده‌ای	M۱۵۹۵/۴ - €	M ۱۷۸۳ - €	M ۱۹۹۲/۸- €
کل	M۱۴۹۷۱/۹ - €	M۲۰۶۴۴/۹ - €	M۲۹۵۵۸ /۴ - €

اکثر مخاطراتی که بر اساس تأثیرات مستقیم و غیرمستقیم اجتماعی- اقتصادی ناشی از رویدادهای اقلیم فضا ایجاد می‌شوند، عمدتاً بر زیرساخت‌های تکنولوژیکی (مانند خطوط هوایی تجاری، صنعت ماهواره، عملیات حفاری و نقشه‌برداری، اپراتورهای شبکه برق، طراحان خطوط لوله و کاربران سیستم‌های ناوبری مبتنی بر ماهواره و غیره) و سلامت انسان، اثر می‌گذارند. در اروپا، مطالعات انجام گرفته توسط ESA و PwC[3] تخمین زده که خدمات برنامه اقلیم فضا ESA می‌تواند در مقایسه با سناریوی «اقدام نکردن»، صرفه جویی ۲۶۵۶ میلیون یورویی داشته باشد. به علاوه در صورت عدم صرفه‌جویی می‌تواند ۱۳۱۳۵ میلیون یورو هزینه دربر داشته باشد. جدول ۶ جزئیات این تخمین هزینه را از سال ۲۰۱۶ تا ۲۰۳۲ نشان می‌دهد [۲۶].

جدول ۶: گزارش تخمین هزینه ESA از سال ۲۰۱۶ تا ۲۰۳۲

هزینه/سود	سناریوی عدم اقدام	عمل به سناریوی ESA	ارزش افزوده خدمات ESA
مزایای دامنه کاربر			
عملیات ماهواره‌ای	-€ ۲۸۳ M	-€ ۲۶۷ M	€ ۲۶ M
عملیات پرتاب	-€ ۰/۳ M	-€ ۰/۱ M	€ ۰/۲ M
بهره‌برداری از منابع	-€ ۳۲۷ M	-€۱۳۵ M	€ ۱۹۲ M
عملیات شبکه برق	-€ ۵۷۷۱ M	-€۴۵۴۶ M	€ ۱۲۲۵ M
هوانوردی	-€ ۳۳۱۲ M	-€۳۰۶۶ M	€ ۲۴۶ M
لجستیک[4]/ حمل و نقل جاده‌ای	-€ ۳۴۳۲ M	-€۲۸۸۸ M	€ ۵۴۴ M
مزایای سرمایه‌گذاری			
تاثیر تولید ناخالص داخلی (GDP)	_	€ ۹۵۲ M	€۹۵۲ M
مزایای کل	-€ ۱۳۱۳۵ M	-€۹۹۵۰ M	€ ۳۱۸۵ M
هزینه‌های برنامه	_	-€ ۵۲۹ M	-€۵۲۹ M
مجموع مزایای خالص	-€ ۱۳۱۳۵ M	-€۱۰۴۷۹ M	€ ۲۶۵۶ M
		نسبت سود/ هزینه	۶

۹-۳-۱- تخمین هزینه برق

در ســـال ۲۰۱۶ تخمین زده شـــد که هزینه مقاوم کردن[5] شـبکه برق ایالات متحده در برابر تأثیرات احتمالی اقلیم فضـایی ممکن است ۵۰ میلیون تا ۱ میلیارد دلار باشد. هم‌چنین، طیف گســـترده‌ای از هزینـه‌هـایی را کـه می‌توانـد بـا مقـاوم شـــدن ترانســـفورماتورهای آســ یب‌پذیر مرتبط باشـــد، برآورد شـــد. کم

[1] European Space Agency
[2] Net Present Value
[3] PricewaterhouseCoopers
[4] Logistics
[5] Hardening

هزینه‌ترین گزینه معمولاً نصب دستگاه‌های مسدود کننده GIC است که می‌تواند حداقل ۵۰۰۰۰۰ دلار برای هر ترانسفورماتور EHV[1] هزینه داشته باشد. اگر این اقدام مهندسی در تمام ترانسفورماتورهای آسیب‌پذیر اجرا شود، کل هزینه‌ها ۵۰ میلیون دلار تا ۱۰۰ میلیون دلار می‌شود. گران‌ترین گزینه، جایگزینی ترانسفورماتورهای آسیب‌پذیر است. اگر همه ترانسفورماتورهای آسیب‌پذیر جایگزین شوند، هزینه‌های صنعت حدود ۵۰۰ میلیون دلار تا ۱ میلیارد دلار خواهد بود (جدول ۷). تخمین هزینه نهایی برای سرمایه‌گذاری حفاظتی حدود ۵۰ میلیون دلار و ۱ میلیارد دلار است. اگر یک رویداد اقلیم فضایی باعث قطع برق شود، هزینه‌های مصرف‌کنندگان برق ایالات متحده برآورد شده است که امکان دارد برای یک رویداد متوسط حدود ۴۰۰ تا ۱۰ میلیارد دلار و برای یک رویداد شدیدتر حدود ۱ تا ۲۰ میلیارد دلار باشد [۳].

جدول ۷: برآورد هزینه بالقوه استاندارد "NERC TPL-007-1" برای مقاوم کردن سیستم انتقال ولتاژ فوق العاده بالا (EHV) ایالات متحده در برابر اقلیم فضا

نوع ترانسفورماتور	هزینه F.O.B[2]	هزینه نصب	تعداد کل در ایالات متحده	تعداد (٪) که ممکن است نیاز به مقاوم شدن داشته باشد	تخمین هزینه	
					گزینه‌ی کمترین هزینه (مسدود کردن)	گزینه‌ی هزینه بالا (جایگزینی)
تک فاز	m۴/۵~$	۵/۷~$ m	۱۷۰۰~	۱۰۲-۱۷۰~ (۶ تا ۱۰٪)	۵۰-۹۰~$ m	b۰/۵-۱~$
سه فاز	m۷/۵~$	m۹/۶~$	۳۰۰~	۳-۱۵~ (۱ تا۵٪)	m۲-۸~$	m۳۰-۱۰۰~$
کل			۲۰۰۰~	۱۰۵-۱۸۵~	-۱۰۰~$ m۵۰	b۰/۵-۱~$

تخمین زده می‌شود که قطعی ناشی از رویدادهای اقلیم فضا ممکن است حداکثر ۹ ساعت طول بکشد. مدت زمان این وقفه سرویس متناسب با دیگر نمونه‌های قطعی‌ها است که مناطق وسیعی را تحت تاثیر قرار داده (مانند قطعی هیدرو-کبک در سال ۱۹۸۹، قطعی غرب آمریکای شمالی در سال ۱۹۹۶ و قطعی شمال شرق در سال ۲۰۰۳) اما آسیب زیرساختی قابل‌توجهی دربر نداشته است. اگرچه دو مورد آخر از این خاموشی‌ها به دلیل رویدادهای اقلیم فضا نبودند، اما در نظر گرفتن آنها به عنوان رویدادهای مشابه مناسب است زیرا آنها به تلاش‌ها و روش‌های بازیابی مشابهی نیاز دارند و بنابراین مدت زمان خاموشی مشابهی دارند (جدول ۸). برای مثال اگر رویداد شدیدی بر نیوانگلند تأثیر بگذارد، هزینه‌های تخمینی کم‌تر است (حدود ۱ میلیارد دلار تا ۳ میلیارد دلار) و اگر رویداد به جای آن بر جنوب شرق تأثیر بگذارد (حدود ۷ میلیارد دلار تا ۲۰ میلیارد دلار) بیش‌ترین هزینه را دارد.

جدول ۸: حد بالا برای هزینه بالقوه قطعی برق ۹ ساعته که در تمام بازارهای برق وجود دارد

بازار برق	پیک تقاضا (MW)	هزینه قطعی ۹ ساعته
California (CAISO)	۵۰۰۰۰	b۲- ۵~$
Midcontinent ISO (MISO)	۱۲۷۱۲۵	b ۶-۱۰~$
New England (ISO-NE)	۲۸۱۳۰	b ۱-۳~$
New York (NYISO)	۳۳۹۵۶	b ۱-۳~$
Northwest	۶۹۶۲۱	b ۳-۶~$
PJM	۱۶۵۴۹۲	b ۸-۱۰~$
Southeast	۱۷۰۰۰۰	b ۸-۲۰~$
Southwest	۴۲۰۰۰	b ۲-۴~$
SPP	۴۵۲۷۹	b ۲-۴~$
Texas	۶۹۶۲۱	b ۳-۶~$

۲-۹-۳- تخمین هزینه هوانوردی

یک رویداد اقلیم فضای شدید ممکن است برای اپراتورهای هواپیمایی حدود ۱ تا ۳۰ میلیون دلار هزینه داشته باشد. یک رویداد اقلیم فضایی متوسط نیز ممکن است برای اپراتورهای هواپیمایی ایالات متحده حدود ۴۰۰۰۰۰ تا ۵ میلیون دلار هزینه داشته باشد. این تخمین فقط بر شرکت‌های هواپیمایی که در مسیرهای قطبی پرواز می‌کنند تأثیر می‌گذارند. هنگامی که مرکز پیش‌بینی اقلیم فضایی NOAA یک توفان S3 یا شدیدتر را پیش‌بینی می‌کند، همه اپراتورهای هواپیمایی مسیر پروازهای قطبی برنامه‌ریزی شده را به عرض‌های جغرافیایی پایین‌تر تغییر می‌دهند. برآورد هزینه‌ای که انجام شده شامل ترکیب اطلاعات در مورد هزینه‌های مسیریابی مجدد قطبی، تعداد پروازهای تغییر مسیر یافته و درصد پروازهای قطبی انجام شده توسط شرکت‌های هواپیمایی ایالات متحده است. برای کاهش خسارات ناشی از رویدادهای اقلیم فضا، هزینه‌های مرتبط با مسیریابی مجدد قطبی حدود ده هزار تا صدهزار دلار در هر پرواز است. فواصل طولانی‌تر بین مقاصد، مصرف سوخت، زمان سفر را افزایش می‌دهد و اغلب به توقف‌های اضافی به اضافه هزینه فرود برای سوخت‌گیری و تغییر خدمه نیاز دارد. این تخمین هزینه با صرفه‌جویی در هزینه‌های گزارش شده در پروازهای قطبی آورده شده در جدول ۹ مطابقت دارد. این جدول شامل نمونه کوچکی از تمام

[1] Extra-High Voltage(e.g. 765-345 kV)

[2] Factory on Board

مسیرهای قطبی است که توسط خطوط هوایی مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد.

جدول ۹: صرفه‌جویی در زمان و هزینه مسیرهای قطبی بین دو شهر نمونه

دو شهر	صرفه‌جویی در زمان	صرفه‌جویی در هزینه (دلار کانادا)	صرفه‌جویی در هزینه (دلار آمریکا)
آتلانتا تا سئول	۱۲۴ دقیقه	۴۴۰۰۰$	۴۱۰۰۰~$
بوستون تا هنگ‌کنگ	۱۳۸ دقیقه	۳۳۰۰۰$	۳۱۰۰۰~$
لس‌آنجلس تا بانکوک	۱۴۲ دقیقه	۳۳۰۰۰$	۳۱۰۰۰~$
نیویورک تا سنگاپور	۲۰۹ دقیقه	۴۴۰۰۰$	۴۱۰۰۰~$

علاوه بر تحمیل هزینه‌های مالی بر صنعت هواپیمایی، رویدادهای اقلیم فضا ممکن است از لحاظ وقفه سرویس‌های پروازی بر کاربران خطوط هوایی با هزینه‌های تخمینی حدود ۹۰۰ هزار تا ۵ میلیون دلار و ۶ میلیون تا ۲۰۰ میلیون دلار برای توفان‌های مفروض متوسط و شدید تأثیر بگذارد [۳].

۳-۹-۳- تخمین هزینه ماهواره و ناوبری

به علاوه تخمین زده شد که ساخت ماهواره‌هایی که قادر به مقاومت در برابر اثرات اقلیم فضا هستند ممکن است حدود ۴۰۰ تا ۷۰۰ میلیون دلار برای تولیدات ایالات متحده هزینه‌بر باشد (جدول ۱۰). تعیین کمیت این‌که چه درصدی از هزینه ساخت ماهواره ممکن است به طور خاص به اقلیم فضا نسبت داده شود، امر دشواری است ولی برآوردهای ارائه شده کلی چیزی مابین ۱٪ تا ۱۰٪ از هزینه‌های ساخت یک ماهواره را تقریب می‌زنند. محدوده پایین‌تر برآورد (حدود ۱-۵٪) مربوط به ماهواره‌هایی با مهندسی تکرارشونده[1] (RE) می‌شود، در حالی‌که محدوده بالاتر (حدود ۶-۱۰٪) برای ماهواره‌هایی با مهندسی غیر تکرارشونده[2] (NRE) اعمال می‌شود. به عنوان یک نمونه، هزینه مربوط به ساخت ماهواره با کاربرد نظارت نظامی، ۶/۱ میلیارد دلار در سال ۲۰۱۶ بود. از آنجایی که این ماهواره‌ها معمولاً مستلزم NRE هستند، این‌گونه می‌توان برآورد کرد که سرمایه‌گذاری محافظتی ۶ تا ۱۰ درصد کل هزینه با رقمی مابین ۴۰۰ تا ۶۰۰ میلیون دلار، در این زمینه تخصیص داده شده است [۳].

جدول ۱۰: برآورد هزینه سرمایه‌گذاری‌های محافظتی انجام شده توسط صنعت جهانی ماهواره در سال ۲۰۱۶ [۳]

نوع ماموریت	درآمد تولید جهانی	مهندسی تکرارشونده (RE)	مهندسی غیر تکرارشونده (NRE)	تخمین هزینه سرمایه گذاری های حفاظتی ۲۰۱۶	
				در سطح جهانی	ایالات متحده
نظارت نظامی	b۶/۱~$		•	۶۰۰-۴۰۰~$ m	
ارتباطات تجاری	b۲/۲~$	•		m۱۰۰-۲۰~$	
ارتباطات غیرنظامی/ نظامی	b۰/۸۳~$		•	m۸۰-۵۰~$	
نظارت زمین	b۱/۷~$	•		m۸۰-۲۰~$	
ناوبری (GNSS)	b۱/۷~$	•		m۸۰-۲۰~$	
علمی	b۰/۷۰~$		•	m۷۰-۴۰~$	
هواشناسی	b۰/۵۶~$		•	m۶۰-۳۰~$	
تحقیق و توسعه	b۰/۱۴~$		•	m۱۴-۸~$	
کل	b۱۳/۹$			b۱-۰/۶~$	-۴۰۰~$ m۷۰۰

رویداد اقلیم فضایی در هر دو حالت متوسط و شدید شامل خسارت دارایی‌های ماهواره می‌شود. با هزینه‌های صنعت ماهواره‌ای ایالات متحده این خسارات به ترتیب حدود ۲۰۰ میلیون دلار تا ۲ میلیارد دلار و حدود ۲ میلیارد دلار تا ۸۰ میلیارد دلار تخمین زده می‌شود. هم‌چنین تخمین زده می‌شود که یک رویداد متوسط ممکن است برای کاربران GNSS ۴ تا ۸ میلیون دلار هزینه داشته باشد، در حالی‌که یک رویداد شدیدتر ممکن است حدود ۱۰۰ تا ۶۰۰ میلیون دلار هزینه دربر داشته باشد. هزینه‌ها بسته به مشخصات ماموریت، سازنده و مشتری بسیار متفاوت است. تخمینی از این هزینه‌ها در جدول ۱۱ آورده شده است [۳].

طبق برنامه ESA، از دست دادن GPS در صورت عدم اقدامات مناسب، خسارت ۳.۴۳۲ میلیون یورو ایجاد می‌کند. اگر طبق برنامه ESA اقدامات انجام گیرد این خسارات به ۲.۸۸۸ میلیون یورو کاهش می‌یابد که ۵۴۴ میلیون یورو مزیت بیش‌تری نسبت به عدم اقدام حاصل می‌شود [۲۷].

همچنین با توجه به تخمین هزینه ایالات متحده آمریکا در این زمینه در جدول ۱۲، ۹ نوع مختلف از برنامه‌های کاربردی GNSS با تمرکز در بازارهای انبوه آنها ترسیم شده است. محدوده وسیعی در قیمت و کیفیت گیرنده GNSS، از تقریبا ۱۰ دلار تا بیش از تقریبا ۱۰۰,۰۰۰ دلار برای هر گیرنده گزارش شده است. منافع اقتصادی فناوری‌های

[1] Recurring engineering

[2] Non-recurring engineering

فعال GNSS در این ۹ برنامه مختلف ممکن است در مجموع ۳۷/۱ تا ۷۴/۵ میلیارد دلار در سال باشد [۳].

جدول ۱۱: هزینه‌های معمول انواع مختلف دارایی‌های ماهواره بر اساس ماموریت تغییر می‌کند [۳]

نوع ماموریت	ارزش دارایی‌های معمول (به ازای هر ماهواره)			
	تخمین ذینفعان	تخمین نشات گرفته		
		درآمد تولیدی	پرتاب‌های ۲۰۱۶ (٪ از کل)	تخمین نهایی
نظارت زمین	۳۰۰۰۰۰$	b۱/۷~$	۶۴)٪۵۱(	m۳۰$
ارتباطات تجاری	m۲۰۰-۲۵۰$	b۲/۲~$	۲۰)٪۱۶(	m۱۰۰$
ناوبری (GNSS)	m۲۰۰$	b۱/۷~$	۱۳) ٪۱۰ (	m۱۰۰$
نظارت نظامی	b۱-۲$	b۶/۱~$	۱۳) ٪۱۰ (	m۵۰۰$
تحقیق و توسعه	m۱۰-۲۰$	b۰/۱۴~$	۸) ٪۶ (	m۲۰$
هواشناسی	m۱۵۰$	b۰/۵۶~$	۴)٪۳(	m۱۰۰$
علمی	m۵۰۰-۷۵۰$	b۰/۷۰~$	۴) ٪۳ (	m۲۰۰$
ارتباطات غیر نظامی/ نظامی	m۲۰۰-۲۵۰$	b۰/۸۳~$	۲) ٪۲ (	m۴۰۰$
کل		b۱۳/۹$	۱۲۶) ٪۱۰۰ (	۲۰-۵۰۰~$ m

جدول ۱۲: برآورد هزینه حوزه‌های کاربردی مختلف ناشی از قطعی یک ساعته سیستم GNSS در ایالات متحده [۳]

کاربرد GNSS	بازار گیرنده	اولویت‌های کاربر		نیازهای کیفی	٪ از کاربران با خاموشی	محدوده مزایا (میلیاردها/ سال)	هزینه‌های تخمین زده شده	
		دقت	تداوم				در کاربرد	در بازار
خدمات مبتنی بر مکان مصرف کننده	بازار انبوه	کم	کم	کم	٪۱۰۰	۷/۳-۱۸/۹$	۳-۶$ m	۳-۶$ m
زمان‌سنجی	دقت بالا، زمان‌بندی و راه‌حل‌های مدیریت دارایی	بالا	کم	متوسط	٪۱۰	۰/۰۲۵-$ ۰/۰۵۰	۹۰۰$ -۲۰۰۰	۲- $ m۱
کشاورزی دقیق		بالا	کم			۱۰-۱۷/۷$	۰/۳-۰/۶$ m	
نقشه‌برداری		بالا	کم			۹/۸-۱۳/۴$	۰/۳-۰/۵$ m	
ساخت و ساز		بالا	کم			۲/۲-۷/۷$	۰/۰۸-۰/۳$ m	
تلماتیک وسایل نقلیه ناوگان		بالا	کم			۷/۶-۱۶/۲$	۰/۳-۰/۶$ m	
حمل و نقل دریایی	راه‌حل‌های مهم مسئولیت حمل و نقل و ایمنی	بالا	بالا	بالا	٪۱	$ ۳	۴۰۰	-$ ۸۰۰ ۲۰۰۰
حمل و نقل هوایی		بالا	بالا			$ ۸	-۴۰۰$ ۶۰۰$	
حمل و نقل ریلی		بالا	بالا			$ ۰	۳۰۰-۳۰۰	
کل						$ ۵	m۴-۸~$	

در جدول ۱۳ می‌توان پیش‌بینی هزینه قطعی سیستم GNSS را مشاهده کرد.

جدول ۱۳: پیش‌بینی هزینه قطعی سیستم GNSS در سناریوی رویداد شدید (۱-۳ روز) [۳]

کاربرد GNSS	بازار گیرنده	نیازهای کیفی	٪ از کاربران با خاموشی	محدوده مزایا (میلیاردها/ سال)	هزینه‌های تخمین زده شده	
					در کاربرد	در بازار
خدمات مبتنی بر مکان مصرف کننده	بازار انبوه	کم	٪۱۰۰	۱۸/۹-۷/۳$	۲۰۰-۲۰$ m	-۲۰$ m۲۰۰
زمان‌سنجی	دقت بالا، زمان‌بندی و راه‌حل‌های مدیریت دارایی	متوسط	٪۱۰۰	-۰/۰۲۵$ ۰/۰۵۰	۰/۴-۰/۷$ m	-۸۰$ m۵۰۰
کشاورزی دقیق				۱۷/۷-۱۰$	۱۰۰-۳۰$ m	
نقشه‌برداری				۱۳/۴-۹/۸$	۱۰۰-۳۰$ m	
ساخت و ساز				۷/۷-۲/۲$	m۶۰-۶$	
تلماتیک وسایل نقلیه ناوگان				۱۶/۳-۷/۶$	۱۰۰-۲۰$ m	
حمل و نقل دریایی	راه حل های مهم مسئولیت حمل و نقل و ایمنی	بالا	٪۱۰	-۰/۱۰۶$ ۰/۲۶۳	۰/۳-۰/۱۰۳$ m	-۰/۰۶$ m۰/۴$
حمل و نقل هوایی				-۰/۱۱۹$ ۰/۱۶۸	۰/۱-۰/۱۰۲$ m	
حمل و نقل ریلی				-۰/۰۱۰$ ۰/۱۰۰	-۳۰۰۰$ ۸۰۰۰۰$	
کل					m۶۰۰-۱۰۰~$	

علاوه بر تخمین هزینه صنایع ذکر شده، یکی از موارد موثر سوسوزن[1] است که می‌تواند به دلیل کاهش سیگنال GNSS، عملیات اکتشافی و ساخت و ساز را مجبور به توقف کند. خسارتی که در صورت عدم اقدامات مناسب در مورد سوسوزن ایجاد می‌شود، ۳۳/۳ میلیون یورو است. اگر طبق برنامه ESA اقدامات انجام گیرد، این خسارات به ۲۴/۷ میلیون یورو کاهش می‌یابد که ۸/۶ میلیون یورو مزیت بیش‌تری نسبت به عدم اقدام حاصل می‌شود. هم‌چنین، ۱٪ از ماموریت‌های اکتشافی ناموفق از دست رفته در زمان حداکثر خورشیدی به اقلیم فضا نسبت داده می‌شود. خسارتی که در صورت عدم اقدامات مناسب در ماموریت‌های اکتشافی ایجاد می‌شود، ۲۴۸ میلیون یورو است. اگر طبق برنامه ESA اقدامات انجام گیرد، این خسارات به ۱۰۲ میلیون یورو کاهش می‌یابد که ۱۴۶میلیون یورو مزیت بیش‌تری نسبت به عدم اقدام حاصل می‌شود [۲۷].

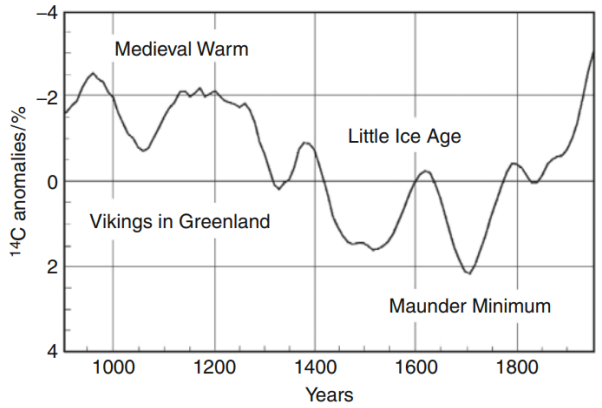
[1] Scintillation

فعالیت‌های حفاری افقی نیز مستلزم نظارت مداوم بر شرایط ژئومغناطیسی است. خسارتی که در صورت عدم اقدامات مناسب در حفاری افقی ایجاد می‌شود، ۲۵ میلیون یورو است. اگر طبق برنامه ESA اقدامات انجام گیرد، این خسارات به ۱۳ میلیون یورو کاهش می‌یابد که ۱۲ میلیون یورو مزیت بیش‌تری نسبت به عدم اقدام حاصل می‌شود. بهینه‌سازی حفاری و کاهش زمان تخلیه چاه مستلزم خواندن مداوم ژئومغناطیس است. خسارتی که در صورت عدم اقدامات مناسب در بهینه‌سازی حفاری ایجاد می‌شود، ۱۹/۹ میلیون یورو است. اگر طبق برنامه ESA اقدامات انجام گیرد این خسارات به ۴/۵ میلیون یورو کاهش می‌یابد که ۲۴/۴ میلیون یورو مزیت بیش‌تری نسبت به عدم اقدام حاصل می‌شود [۲۷].

۴- اثرات اقلیم فضا بر محیط‌های اجتماعی

در این بخش به تغییراتی که اقلیم فضا بر آب و هوای زمین دارد و متعاقب آن اثری که این تغییرات آب و هوایی بر جوامع بشری می‌گذارد، پرداخته می‌شود. سطح فعالیت خورشیدی از مشاهدات مستقیم حدود ۴۵۰ سال گذشته و از داده‌های هسته‌های کیهانی (تغییرات شدت CR[1]) برای بیش از ۱۰۰۰۰ سال شناخته شده است. در طول این دوره، یک همبستگی کیفی قابل توجه بین دوره‌های آب و هوای سرد و گرم و سطوح بالا و پایین شدت CR کهکشانی (فعالیت کم و زیاد خورشیدی) وجود دارد. از شکل ۵ می‌توان دید که در طول ۱۰۰۰ تا ۱۳۰۰ سال پس از میلاد، شدت CR کم و فعالیت خورشیدی بالا بود، که مصادف با دوره گرم قرون وسطی بود (در این دوره وایکینگ‌ها در گرینلند ساکن شدند). بعد از سال ۱۳۰۰ پس از میلاد، فعالیت خورشیدی کاهش و شدت CR افزایش یافت که یک دوره سرد طولانی به دنبال داشت (به اصطلاح عصر یخبندان کوچک، که شامل حداقل Maunder ۱۶۴۵- ۱۷۱۵ پس از میلاد بود و تا اواسط قرن نوزدهم ادامه داشت [۱۱] و [۲۸].

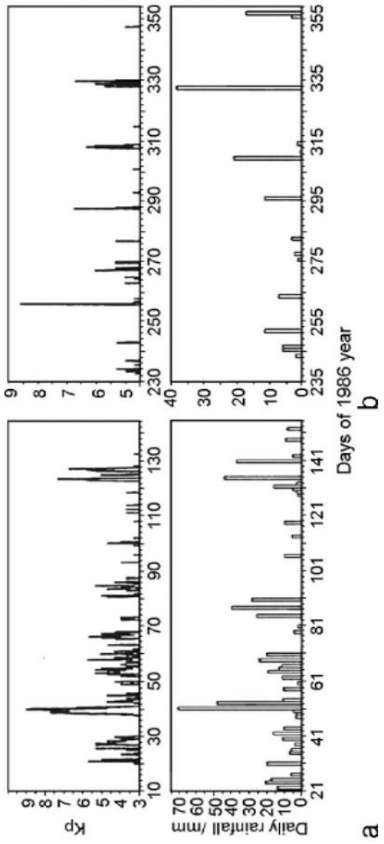
تعدادی پدیده فضایی وجود دارد که بر آب و هوای زمین تأثیر می‌گذارند و تغییرات بلندمدت و کوتاه مدت آن را تعیین می‌کنند مانند [۱۱] تغییرپذیری انرژی شار تابش خورشید، فعالیت متغیر خورشیدی، میدان مغناطیسی خورشیدی عمومی همراه با پدیده‌های مرتبط با باد متغیر خورشیدی، جهش‌های جرم تاجی و شوک‌ها در هلیوسفر و پرتوهای کیهانی مدوله‌شده کهکشانی، CR خورشیدی تولید شده در طول شراره‌های بزرگ خورشیدی، بارش الکترون‌ها و پروتون‌های پرانرژی از مگنتوسفر زمین در خلال اختلالات مغناطیسی و غیره.



شکل ۵: تغییر شدت CR در غلظت رادیو کربن در طول هزاره گذشته منعکس شده است. حداقل Maunder به دوره ۱۶۴۵-۱۷۱۵ اشاره دارد، زمانی که لکه‌های خورشیدی نادر بودند [۱۱]

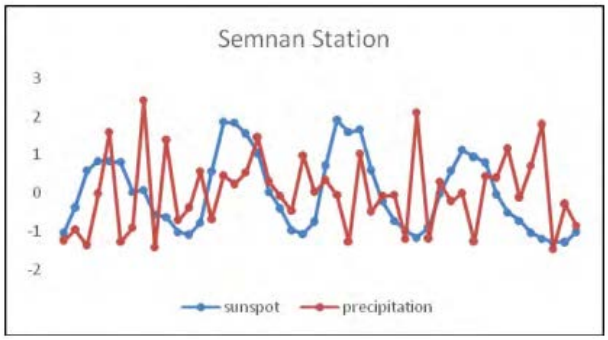
رابطه آشکار مشاهده شده در عرض‌های جغرافیایی بالا و متوسط، با کاهش شدت CR کهکشانی (انرژی در محدوده MeV و GeV) با افزایش فعالیت خورشیدی و ژئومغناطیسی و با ظهور شارهای CR خورشیدی که جو را یونیزه می‌کنند، توضیح داده می‌شود. در نزدیکی خط استوا، در ناحیه ناهنجاری مغناطیسی برزیل[2] (BMA)، بخش اصلی CR کهکشانی و خورشیدی توسط یک میدان ژئومغناطیسی محافظت می‌شود. این میدان در ارتفاع ۲۰۰ تا ۳۰۰ کیلومتری قرار دارد و شامل شارهای بزرگی از پروتون‌های پرانرژی و الکترون‌هایی است که در کمربند تابشی داخلی به دام افتاده‌اند. اختلالات مغناطیسی قابل توجه می‌تواند باعث بارش این ذرات و متعاقب آن یونیزه شدن جو شود. در منطقه BMA دو نوع همبستگی مشاهده شد: (۱) همبستگی در مقیاس زمانی کوتاه و طولانی بین شاخص فعالیت ژئومغناطیسی Kp و بارندگی در ایالت سائوپائولو[3]؛ (۲) همبستگی ناهمبستگی[4] بارندگی‌ها با چرخه های ۱۱ و ۲۲ ساله فعالیت خورشیدی برای ۱۸۶۰-۱۹۹۰ در فورتالزا[5]. شکل ۶، رابطه زمانی بین شاخص Kp و باران را در کامپیناس[6] و در اباجارا[7] در طی سال ۱۹۸۶ نشان می‌دهد. از شکل ۶ می‌توان مشاهده کرد که با تاخیر ۵ تا ۱۱ روزه، تقریباً هر افزایش قابل توجه (>۳/۰) شاخص Kp با افزایش بارندگی همراه است [۱۱].

[1] Cosmic rays
[2] Brazilian Magnetic Anomaly
[3] Sao Paulo State
[4] Correlation-anti-correlation
[5] Fortaleza
[6] Campinas
[7] Ubajara



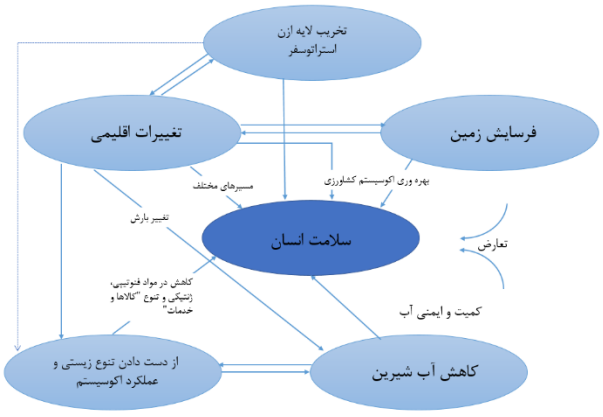
شکل ۶: شاخص Kp فعالیت ژئومغناطیسی (پانل‌های بالا) و سطح بارندگی (پانل‌های پایین) در a) کامپیناس پنل سمت چپ و در b) اباجارا پنل‌های سمت راست در سال ۱۹۸۶ [۱۱]

همچنین در ایران نیز در زمینه تاثیر لکه‌ها بر بارندگی استان سمنان پژوهشی انجام گرفته است. به منظور بررسی لکه‌های خورشیدی و تاثیر آن بر روی بارندگی استان سمنان، با مراجعه به تارنمای سازمان ژئوفیزیک آمریکا (NGDC[1]) آمار ۴۵ ساله (۱۹۶۵-۲۰۱۰) تعداد لکه‌ها دریافت شده است. نتایج نشان داد با افزایش بیش از حد نرمال لکه‌های خورشیدی، مقادیر انرژی رسیده به سطح زمین افزایش یافته است، در نتیجه افزایش انرژی و به وجود آمدن مازاد انرژی، سبب تقویت سامانه‌هایی از جمله پرفشارهای دینامیکی چون آزور[2] گشته و سبب شده است تا مانع از ورود جریانات غربی به منطقه و کاهش بارش در منطقه شود. در شکل ۷، خط قرمز مقادیر بارندگی و خط آبی مقادیر لکه‌های خورشیدی است و با توجه به این نمودار مشخص شد در زمان بالا بودن تعداد لکه‌ها به دلیل بالا بودن فعالیت خورشیدی، شرایط برای بارندگی کاهش یافته و مقادیر بارش پایین‌تر از حد نرمال است و در زمان کم شدن لکه‌ها شرایط بالعکس رخ داده است [۲۹].



شکل ۷: نمودار سری زمانی بارندگی سالانه و تعداد لکه‌های خورشیدی ایستگاه سمنان [۲۹]

اثرات سلامت، انواع دیگری از تاثیرات تغییرات آب و هوای جهانی است که بخشی از مجموعه بزرگ‌تری از تغییرات محیطی جهانی به شمار می‌آید. همان‌طور که در شکل ۸ نشان داده شده، این تغییرات بر یکدیگر اثر می‌گذارند و اغلب تأثیرات متقابلی را اعمال می‌کنند. با در نظر گرفتن روندهای آتی در تجارت و توسعه اقتصادی، مطالعات مدل‌سازی تخمین زده‌اند که تغییرات آب و هوا باعث کاهش جزیی در سطح جهانی در حدود ۲ تا ۴ درصد در بازده غلات (که نشان دهنده دو سوم انرژی غذایی جهان است) می‌شود. کاهش میزان تخمین زده شده در عملکرد مناطق ناامن غذایی در جنوب آسیا، خاورمیانه، شمال آفریقا و آمریکای مرکزی به طور قابل توجهی بیش‌تر خواهد بود [۳۰].



شکل ۸: روابط متقابل بین انواع عمده تغییرات محیطی جهانی، از جمله تغییرات آب و هوا [۳۰]

[1] National Geophysical Data Center

[۲] پرفشار آزور که در آمریکا با نام پر فشار برمودا یا پرفشار اطلس شمالی نیز شناخته می‌شود، مرکز عظیمی از هوای نیمه استوایی پرفشاری است که بر فراز جزایر آزور در اقیانوس اطلس قرار دارد.

از دیگر اثراتی که اقلیم فضا بر اجتماع می‌گذارد می‌توان به تأثیر توفان‌های ژئومغناطیسی (GMS) بر بازده بازار سهام جهان و کشورها اشاره نمود. برای شاخص جهانی و اکثر شاخص‌های بین‌المللی، سطوح غیرمعمول بالای فعالیت مغناطیسی در هفته گذشته، تأثیر منفی آماری و اقتصادی قابل توجهی بر بازده سهام امروز دارد. نتایج با نظریه‌های روانشناختی "عدم تبیین خلق و خو" مطابقت دارد، زیرا مشخص شده که GMS بر قضاوت و رفتار افراد تأثیر منفی می‌گذارد [۳۱] و [۳۲]. بنابراین، از آنجاکه این رویدادها بر بازار سهام تاثیر می‌گذارد، اثرات اقتصادی آن نیز گریبان‌گیر جامعه است.

۵- اقدامات پیش‌گیرانه در مواجهه با مخاطرات اقلیم فضا و معادل‌سازی اقدامات برای ایران

شواهد تاریخی نشان می‌دهد که بسیاری از زیرساخت‌های حیاتی انسان در فضا و روی زمین در برابر اثرات رویدادهای اقلیم فضا آسیب‌پذیر هستند. از آنجایی‌که جامعه به طور فزاینده‌ای به خدماتی که این زیرساخت‌ها ارائه می‌دهند متکی است، همواره آمادگی کافی در برابر خطرات ناشی از رویداد شدید اقلیم فضایی در صنعت و جامعه باید ارزیابی شود. بنابراین، پایش اقلیم فضا برای پیش‌بینی و محافظت از زیرساخت‌های جوامع بشری امری ضروری به نظر می‌رسد. اصولا پایش اقلیم فضا به سه مرحله اصلی تقسیم می‌شود: نظارت، هشدار و اعلام خطر [۳۳]. مهم‌ترین مرجع جهانی برای پیش‌بینی و نظارت بر اقلیم فضا و هم‌چنین منبع رسمی هشدار دهنده در خصوص پدیده‌های اقلیم فضا، مرکز پیش‌بینی اقلیم فضایی است که بخشی از اداره ملی اقیانوسی و جوی ایالات متحده آمریکا (NOAA[1]) است. در سال‌های گذشته این تنها مرکز ۲۴/۷ (۲۴ ساعته و در ۷ روز هفته) غیرنظامی پیش‌بینی اقلیم فضایی بود [۲۹] و [۳۰]. این هشدارها به هزاران نفر ارسال می‌شود و توسط سازمان‌های دولتی و اپراتورهای زیرساخت به طور مقتضی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۳۳]. با این حال، اداره Met بریتانیا اکنون قابلیت پیش‌بینی و هشدار خود را توسعه داده که از اکتبر ۲۰۱۴ به طور کامل عملیاتی شده است [۳۴]. برای مدیریت تاثیرگذار در کاهش اثرات یک رویداد بزرگ اقلیم فضایی تأثیرات ایجاد شبکه‌های بین‌المللی در این حوزه امری حائز اهمیت است. این مشارکت‌های بین‌المللی حتی در کارایی نحوه تدوین پروتکل‌های واکنش به یک رویداد نیز موثر است.

کشور چین نیز همانند ایالات متحده و کشورهای اروپایی اقدامات و سیاست‌گذاری‌هایی در راستای مقابله با خطرات رخداد اقلیم فضا انجام گرفته است [۳۵].

طرح‌ریزی نقشه راه یکی از مهم‌ترین مراحل سیاست‌گذاری و اقدام به منظور پیشرفت پایش و نظارت اقلیم فضا است [۳۶]. در این راستا پژوهشگران و محققان مطالعات و فعالیت‌های چشم‌گیری در زمینه اقلیم فضا داشته‌اند که با بررسی و تجزیه و تحلیل این مطالعات نقشه راهی در سطح جهانی ارائه شده است. کشور ایران نیز می‌تواند با الگوبرداری نقشه راه توصیه شده جهانی و امکان‌سنجی درون کشوری، نقشه راهی متناسب با سیاست‌های کشور مد نظر قرار دهد.

برای پیشبرد نقشه راه جهانی و جلوگیری از خسارات و آسیب‌های وارده توسط رویدادهای اقلیم فضا، لازم و ضروری است که همه کشورها جدا از اختلافات سیاسی و منطقه‌ای با یکدیگر همکاری کنند و به منظور بهبود استانداردهای زندگی و سلامت انسان بکوشند. در راستای این سیاست، ایران نیز باید در زمینه اقلیم فضا در جوامع بین‌الملل و در کنفرانس‌های جهانی حضور و فعالیت مستمر و مفید داشته باشد. گام اول این است که با الگوبرداری از کشورهای پیش‌رو در زمینه اقلیم فضا، بستری مناسب برای پیشبرد اهداف کوتاه مدت و بلند مدت پایش اقلیم فضا فراهم شود. لازمه تحقق این امر پیوستگی مطالعه و بررسی مقالات روز دنیا و گزارش‌های سازمان‌های مطرح دنیا (مانند ناسا و ایسا) است تا با علم روز دنیا همگام شویم. در گام دوم، به منظور الگوبرداری مناسب نیاز است سازمان‌ها و وزارتخانه‌های ایران همانند کشورهای پیش‌رو، هماهنگی و تعامل داشته باشند. برای مثال سازمان‌ها و وزارتخانه‌های درگیر ایالات متحده آمریکا در جدول ۱۴ آورده شده و نقش آنها در برنامه اقدام نیز به اختصار نمایش داده شده است. هم‌چنین در این جدول سازمان‌ها و نهادهای مختلف در ایران معادل‌سازی شدند.

[1] National Oceanic and Atmospheric Administration

جدول ۱۴: استراتژی ملی اقلیم فضای ایالات متحده آمریکا در سال ۲۰۱۹ [1]، اهداف برنامه اقدام و مقایسه آن با سازمان‌ها وزارتخانه‌های ایران

حوزه‌ها و موضوعات / سازمان ها و ادارات ایالات متحده	تقویت حفاظت از امنیت ملی، امنیت داخلی و دارایی ها و عملیات تجاری در برابر اثرات اقلیم فضا	توسعه و انتشار دقیق و به موقع اقلیم فضا برای توصیف و پیش بینی آن.	ایجاد برنامه‌ها و رویه‌ها برای واکنش به رویدادهای اقلیم فضا و بازیابی از آن‌ها	سازمان ها و ادارات معادل در ایران
DHS	✖	✖	✖	وزارت اطلاعات
DOC	✖	✖	✖	وزارت امور اقتصادی و دارایی
DOD	✖	✖	✖	وزارت دفاع و پشتیبانی نیروهای مسلح
DOE	✖	✖	✖	وزارت نیرو
DOI	✖	✖	✖	وزارت کشور
DOS	✖	✖	✖	وزارت امور خارجه
DOT	✖		✖	سازمان حمل و نقل کشور (سازمان هواپیمایی، سازمان کشتی‌رانی، سازمان حمل و نقل جاده‌ای، سازمان حمل و نقل درون شهری، شرکت راه آهن)
EPA	✖	✖	✖	سازمان حفاظت از محیط زیست
FCC	✖			وزارت ارتباطات و فناوری اطلاعات
HHS	✖		✖	وزارت بهداشت، درمان و آموزش پزشکی
NASA	✖	✖	✖	سازمان فضایی
NRC	✖		✖	سازمان انرژی اتمی
NSF	✖	✖		وزارت علوم، تحقیقات و فناوری
Treas.	✖	✖	✖	سازمان خزانه‌داری کل کشور

در ایران گردآوری مشکلات و خرابی‌های صنایع و زیرساخت‌های مختلف مانند نیروگاه‌های برق، خطوط انتقال نفت و گاز، صنایع فضایی، حمل و نقل جاده‌ای، کشتی‌رانی، ریلی، هوایی و غیره از اهمیت بالایی برخوردار است. هم‌زمانی این مشکلات با رویدادهای اقلیم فضایی باید مورد مقایسه و بررسی قرار گیرد و برای رفع یا پیش‌گیری از آنها تمهیدات اساسی در نظر گرفته شود. در راستای ایجاد این تمهیدات ضروری است که از دانش متخصصان در این حوزه استفاده شود. هم‌چنین گسترش روابط بین‌الملل با کشورهای پیشرفته که در این حوزه پیش‌رو هستند، زیربنای علمی سازمانی برای پایش این اطلاعات را می‌تواند شکل دهد.

ایران یکی از بزرگ‌ترین و مهم‌ترین قطب‌های صادرات نفت و گاز در جهان است و یکی از مهم‌ترین زیرساخت‌هایی که تحت تاثیر اقلیم فضا قرار می‌گیرد، خطوط لوله نفت و گاز است و از آنجایی که درآمد اصلی ایران از صادرات نفت و گاز است، از این‌رو، مدیریت و سیاست‌های مربوط به اقلیم فضا حائز اهمیت فراوان است. این یک مساله فراملی است و علاوه بر این که توجه به آن در ایران از ضروریات است، لزوم ملاحظه و سنجش آن از مرزهای یک کشور فراتر می‌رود. برای جلوگیری از آسیب به این خطوط در سطح بین‌الملل باید مشارکت بین کشورها برقرار باشد. هم‌چنین، صنعت معدن یکی دیگر از صنایع پرکاربرد در ایران است. اکتشاف و حفاری هم در صنعت معدن و هم در صنعت نفت و گاز یکی از نیازهای اولیه و اساسی است که می‌تواند تحت تاثیر رویدادهای اقلیم فضا دچار مشکلات و خطاهایی شود، بنابراین، بررسی این تاثیرات بر صنایع اهمیت بالایی دارد.

ایران از کشورهای پرتاب‌کننده ماهواره است که روز به روز صنعت فضایی در آن پیشرفته‌تر می‌شود. پرتاب‌گر و تزریق ماهواره‌ها در مدار می‌تواند تحت تاثیر پدیده‌های اقلیم فضا قرار گیرد و باعث اختلال یا به طور کلی شکست عملیات یا از دست رفتن ماهواره شود. در زمینه ارتباطات مانند سیستم‌های مخابراتی و اینترنتی نیز این پدیده‌ها آسیب‌زا هستند و می‌تواند موجب خسارات مادی و روانی شوند.

برق نیز از حیاتی‌ترین زیرساخت‌ها است که قطعی آن می‌تواند مشکلات عدیده‌ای برای جامعه به خصوص برای نیروهای فوریتی و اورژانسی ایجاد نماید. به عنوان مثال قطعی برق در اتاق عمل و بخش مراقبت‌های ویژه بیمارستان، قطعی سیستم‌های بانکی، اختلال در سیستم‌های راهنمایی و رانندگی، قطعی آنتن‌های مخابراتی و همچنین قطعی تلفن و اینترنت از مواردی است که می‌تواند مشکل‌آفرین باشد.

زیرساخت‌های ریلی، کشتی‌رانی و هوانوردی هم صنایع دیگری هستند که می‌توانند متاثر از این پدیدها باشند و در حمل و نقل و تجارت برای ایران نقشی حیاتی دارند و جان و مال انسان‌ها را تحت تاثیر قرار می‌دهند. هم‌چنین، در زمینه هوانوردی، تاخیر در پروازها هم می‌تواند خسارت مالی در پی داشته باشد و هم می‌تواند افکار عمومی را مختل کند و باعث ایجاد هرج و مرج فراوان شود. با توجه به تحقیقات و اطلاعات گسترده در زمینه اقلیم فضا ایالات متحده آمریکا، برای تخمین تقریبی خسارت‌های مالی ناشی از اقلیم فضا در کشور ایران، می‌توان ایالت‌هایی که

[1] DHS = Department of Homeland Security; DOC = Department of Commerce; DOD = Department of Defense; DOE = Department of Energy; DOI = Department of the Interior; DOS = Department of State; DOT = Department of Transportation; EPA = Environmental Protection Agency; FCC = Federal Communications Commission; HHS = Department of Health and Human Services; NASA = National Aeronautics and Space Administration; NRC = Nuclear Regulatory Commission; NSF = National Science Foundation; and Treas. = Department of the Treasury.

دارای عرض جغرافیایی مشابه با ایران (بین ۲۵ تا ۴۰ درجه شمالی) هستند را به عنوان نمونه همسان‌سازی کرد. در اینجا فهرستی از این ایالت‌ها نام برده شده است:

۱. کالیفرنیا: حدوداً عرض ۳۲ تا ۴۲ درجه شمالی را شامل می‌شود.
۲. آریزونا: عرض حدوداً ۳۲ تا ۳۷ درجه شمالی دارد.
۳. نیومکزیکو: بخشی از آن در حدود ۳۱ تا ۳۷ درجه شمالی قرار دارد.
٤. نوادا: عرض جغرافیایی حدوداً ۳۵ تا ۴۲ درجه شمالی دارد.
٥. یوتا: عرض حدوداً ۳۷ تا ۴۲ درجه شمالی را شامل می‌شود.
٦. کلرادو: عرض جغرافیایی حدوداً ۳۷ تا ۴۱ درجه شمالی دارد.
۷. نیویورک: بخشی از نیویورک در حدود ۴۰ تا ۴۵ درجه شمالی قرار دارد.
۸. نیوجرسی: عرض جغرافیایی حدوداً ۳۹ تا ۴۱ درجه شمالی دارد.
۹. دلاور: بخشی از دلاور در حدود ۳۲ تا ۳۶ درجه شمالی قرار دارد.

با توجه به جدول ۸ و ایالت‌های نام برده شده می‌توان تخمین حدودی برای قطعی برق ۹ ساعته در ایران نیز در نظر گرفت.

علاوه بر تعامل سازمان‌ها در داخل کشور برای پیشبرد اقدامات موثر در این زمینه و دسترسی به داده‌های دقیق و تخصصی‌تر، نیازمند تعامل و ارتباط نهادهای داخلی با سازمان‌های بین‌المللی آن‌ها هستیم. داشتن و فراهم نمودن تجهیزات (نرم‌افزاری و سخت‌افزاری) و استفاده از فناوری به روز دنیا، بنیان‌های اساسی نظارت و پایش اقلیم فضا است که می‌تواند نقش بسیار موثری در پیش‌بینی و اقدامات به موقع در مقابل رویدادهای اقلیم فضا داشته باشد. از این‌رو، بهبود تجهیزات موجود و اضافه کردن ابزارهای کاربردی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. استفاده از تجهیزات پیشرفته و مدیریت سازمانی کارآمد دو عامل مهم و جدانشدنی در راستای فعالیت‌های اقلیم فضا هستند و باید در هماهنگی کامل و مفید با یکدیگر باشند.

نیاز است تا یک روند درون سازمانی معین برای پیش‌بینی اقلیم فضا در ایران تدوین شود. با پیش‌بینی دقیق و موثر اقلیم فضا می‌توان خدمات‌رسانی مفید و به موقعی به سازمان‌ها و زیرساخت‌های جامعه ارائه داد. در نتیجه پیش‌بینی اقلیم فضا، زیرساخت‌ها می‌توانند از بروز خسارات و آسیب‌های احتمالی ناشی از اقلیم فضا جلوگیری کنند.

۶- نتیجه‌گیری

پدیده‌های اقلیم فضا شامل توفان‌های خورشیدی، شارش ذرات پرانرژی و توفان‌های الکترومغناطیسی بر فرایندهای اقتصادی و برخی زیرساخت‌های جامعه بشری از جمله انرژی الکتریکی، صنعت کشاورزی، ارتباطات رادیویی، نفت و معدن، هوانوردی، عملکرد ماهواره‌ها، موقعیت‌یابی، حمل و نقل (زمینی-هوایی-ریلی-دریایی) و آب و هوا تأثیر داشته که می‌تواند باعث اختلال در آن‌ها و به تبع آن‌ها اختلال در زندگی بشر و کاهش عملکرد اقتصادی جوامع و صنایع شود. در این مقاله، تأثیر پدیده‌های اقلیم فضا بر شبکه برق، تولید محصولات کشاورزی، سرویس‌دهی ماهواره‌ها، موقعیت‌یابی، خودرو، حمل و نقل و تجارت و آب و هوای زمین، از نظر فنی و اقتصادی، به طور مجزا بررسی شده و اختلالات مربوط به هر کدام مطالعه شد. از طرفی اقدامات پیش‌گیرانه در مواجهه با مخاطرات پدیده‌های اقلیم فضا در صنایع مختلف مورد بررسی قرار گرفت. در این راستا سعی شد تمهیدات سازمان‌ها و صنایع مختلف بررسی شود و هم‌چنین معادل‌سازی برخی از این تمهیدات برای سازمان‌های موجود در کشورمان نیز پیشنهاد شد. واکنش‌های اجتماعی و سازمانی به رویدادهای اقلیم فضا نیازمند روش‌شناسی جداگانه و منحصربه‌فردی است که برای مطالعات آتی در این حوزه پیشنهاد می‌شود.

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

مراجع

[1] A. Thaduri, D. Galar, and U. Kumar, “Space weather climate impacts on railway infrastructure,” *Int. J. Syst. Assur. Eng. Manag.*, vol. 11, pp. 267–281, 2020.

[2] E. K. Fry, “The risks and impacts of space weather: Policy recommendations and initiatives,” *Space Policy*, vol. 28, pp. 180–184, 2012.

[21] D. N. Baker, “Space science: How to cope with space weather,” *Science (80-.).*, vol. 297, no. 5586, pp. 1486–1487, 2002.
[22] D. N. Baker, “Impact of Space Weather on Human Technology.”
[23] P. Cannon, “Extreme space weather: impacts on engineered systems and infrastructures,” 2013.
[24] A. Coster and A. Komjathy, “Space Weather and the Global Positioning System,” *Sp. Weather*, vol. 6, no. 6, p. 6, 2008.
[25] “Report of the Assessment Committee for the National Space Weather Program,” 2006.
[26] M. Aliberti and L. Wells, “European Weather Services: Status and Prospects,” *Eur. Sp. Policy Inst.*, 2019.
[27] “Space Weather Study Results: Summary of CBA,Results by domain Summary Charts, Sensitivity analyses, Downstream market.”
[28] L. I. Dorman, “Space weather and dangerous phenomena on the Earth: Principles of great geomagnetic storms forcasting by online cosmic ray data,” *Ann. Geophys.*, vol. 23, pp. 2997–3002, 2005.
[29] M. Kayanian, H. H. Mohammadi, and F. Rasouli, "Investigation of sunspots and its relationship with rainfall in Semnan province." (In Persian).
[30] A. J. McMichael *et al.*, “Climate change and human health: RISKS AND RESPONSES,” *World Heal. Organ.*, vol. 90, no. 2, pp. 93–99, 2003.
[31] A. Krivelyova and C. Robotti, *Playing the Field: Geomagnetic Storms and International Stock Markets*. 2003.
[32] J. Štetiarová and K. Kudela, “A MONITORING OF SPACE WEATHER EFFECTS ON SOME PARAMETERS OF MENTAL PERFORMANCE AND HEALTH IN AVIATION PERSONNEL-,” 2006.
[33] E. Krausmann, E. Andersson, T. Russell, and W. Murtagh, “Space Weather & Critical Infrastructures: Findings and Outlook,” 2016.
[34] Department for Business Innovation and Skills, “Space Weather Preparedness Strategy,” 2015.
[35] China National Space Administration, “China’s Space Capacity Building,” 2017.
[36] C. J. Schrijver *et al.*, “Understanding space weather to shield society: A global road map for 2015-2025 commissioned by COSPAR and ILWS,” *Adv. Sp. Res.*, vol. 55, no. 12, pp. 2745–2807, 2015.

COPYRIGHTS

© 2023 by the authors. Licensee Iranian Space Research Center of Iran. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

[3] M. Bethesda, “Social and Economic Impacts of Space Weather in the United States,” 2017.
[4] M. Ishii *et al.*, “Space weather benchmarks on Japanese society,” *Earth, Planets Sp.*, vol. 73, 2021.
[5] S. Worman, S. Taylor, T. Onsager, J. Adkins, D. N. Baker, and K. F. Forbes, “The social and economic impacts of moderate and severe space weather,” in *Extreme Events in Geospace: Origins, Predictability, and Consequences*, Elsevier Inc., 2018, pp. 701–710.
[6] O. Shekoofa and F. Bagheroskouei, "Looking at space climate phenomena, monitoring and forecasting systems, and the road map for preparing against them," 2020. (In Persian).
[7] O. Shekoofa, M. Khoshsima, S. Ghazanfarinia, and F. Bagheroskouei, "Toward the Establishment of a National Center for Space Weather Services: Vision, Mission and Organization," Science, Technology and Space Applications, vol. 1, no. 2, pp. 34–48, 2022. (In Persian).
[8] E. Khatoonabadi Kalali, A. Kazemi HokmAbad, A. Kosari, and O. Shekoofa, “Social and Economic Effects Caused by Space Weather,” in *20st International Conference Of Iranian Aerospace,Tehran, Iran*, 2022. (In Persian).
[9] P. Song, H. J. Singer, and G. L. Siscoe, *Geophysical Monograph Series*. 2000.
[10] G. Siscoe, “The space-weather enterprise: past, present, and future,” *J. Atmos. Solar-Terrestrial Phys.*, pp. 1223–1232, 2000.
[11] L. I. Dorman, “The Role of Space Weather and Cosmic Ray Effects in Climate Change,” 1st ed., Elsevier B.V., 2009, pp. 43–76.
[12] H. Koskinen *et al.*, “Space Weather Effects Catalogue,” pp. 1–41, 2001.
[13] J. P. Eastwood *et al.*, “The Economic Impact of Space Weather: Where Do We Stand?,” *Risk Anal.*, vol. 37, no. 2, pp. 206–218, 2017.
[14] J. Lilensten and J. Bornarel, *Space Weather, Environment and Societies*. 2006.
[15] E.S.Babayev *et al.*, “Technological , Socio-Economic and Ecological Aspects of Space Weather Impacts on the Normal Operation of Oil and Gas Pipeline Systems and Reliability of Electric Power Supply Grids in Azerbaijan and the South Energy Corridor Region,” *Euro-Asian J. ofsustainable energy Dev. policy Technol.*, pp. 15–26.
[16] R. Pirjola, A. Pulkkinen, and A. Viljanen, “Studies of space weather effects on the Finnish natural gas pipeline and on the Finnish high-voltage power system,” *Adv. Sp. Res.*, vol. 31, pp. 795–805, 2003.
[17] M. Hapgood and A. Thomson, “Its impact on Earth and implications for business,” 2010.
[18] J. M. GOODMAN, *SPACE WEATHER & TELECOMMUNICATIONS*. 2005.
[19] I. A. Daglis, *Effects of Space Weather on Technology Infrastructure*. 2004.
[20] N. Romanova, N. Crosby, and V. Pilipenko, “Relationship of worldwide rocket launch crashes with geophysical parameters,” *Int. J. Geophys.*, vol. 2013, p. 15, 2013.