

Original Research Paper

Sensitivity Analysis of Orbital Parameters on the Number of Satellite Passes over Ground Stations in Space Weather Missions

Sahar Aminabadi¹, Masoud Khoshshima^{2*} , Saber Karami³, Hadi Jalili⁴ , and Jamal Aghayari⁵

1. College of Interdisciplinary Science and Technology, University of Tehran, Tehran, Iran

2. Satellite Systems Research Institute, Iranian Space Research Center, Tehran, Iran

3-5. Space Research Center, Iranian Space Research Center, Tehran, Iran

ARTICLE INFO**ABSTRACT****Article History:**

Received 03 September 2025

Revised 15 October 2025

Accepted 22 October 2025

Available Online 03 November 2025

Keywords:

Sobol sensitivity analysis

Orbital parameters

Ground station

Space weather

Satellite pass


This study investigates the influence of orbital parameters on the number of satellite visibility events from ground stations, with the aim of optimizing orbit design for space weather monitoring missions. A two-body dynamical model was employed to simulate the satellite trajectory over a 24-hour period, and the number of visibility passes was evaluated with respect to a network of five ground stations located across Iran. The contribution of key orbital elements—including semi-major axis, eccentricity, inclination, RAAN, argument of perigee, and mean anomaly—was quantified using the global Sobol sensitivity analysis method. The first-order Sobol indices revealed that inclination and argument of perigee exert the strongest independent influence on visibility, with maximum values of 0.45 and 0.18, respectively. In contrast, parameters such as RAAN and mean anomaly exhibited minimal first-order effects, yet their total indices indicated highly significant interactive contributions, in some cases exceeding 0.9. Furthermore, scenarios corresponding to the maximum number of daily passes were identified. All five stations recorded configurations yielding up to nine passes within 24 hours. The associated orbital parameters exhibited diverse geometrical characteristics, ranging from nearly circular orbits with low eccentricity (0.0028) to more elongated orbits with higher eccentricity (0.0915), and inclinations spanning approximately 40° to 60°. These findings demonstrate the critical role of both independent and interactive effects of orbital elements in determining ground visibility, and they provide valuable insights for the multi-objective design of satellite orbits aimed at enhancing temporal coverage, maximizing pass frequency, and improving the efficiency of space weather monitoring missions.

* Corresponding Author's E-mail: m.khoshshima@isrc.ac.ir

How to Cite this Article:

S. Aminabadi, M. Khoshshima, S. Karami, H. Jalili, and J. Aghayari, "Sensitivity Analysis of Orbital Parameters on the Number of Satellite Passes over Ground Stations in Space Weather Missions," *Journal of Space Science and Technology*, Vol. ??, No. ??, pp. 1-14, ????, (in Persian), <https://doi.org/10.22034/jsst.yyyy.nnnn>.

**COPYRIGHTS**

© 2024 by the authors. Published by ARI. This article is an open access article distributed under the terms and  ACCESS conditions of [The Creative Commons Attribution 4.0 International \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

حساسیت‌سنجی پارامترهای مداری بر تعداد گذر ماهواره از ایستگاه زمینی در مأموریت پایش اقلیم فضا

سحر امین‌آبادی^۱، مسعود خوش‌سیما^{۲*}، صابر کرمی^۳، هادی جلیلی^۴، و جمال آغایاری^۵

- ۱- کارشناسی ارشد، دانشکده علوم و فناوری‌های میان‌رشته‌ای، دانشگاه تهران، تهران، ایران
- ۲- دانشیار، پژوهشکده سامانه‌های ماهواره، پژوهشگاه فضایی ایران، تهران، ایران
- ۳- دانشجوی دکتری، مرکز تحقیقات فضایی، پژوهشگاه فضایی ایران، تهران، ایران
- ۴- استادیار، مرکز تحقیقات فضایی، پژوهشگاه فضایی ایران، تهران، ایران
- ۵- دکتری، مرکز تحقیقات فضایی، پژوهشگاه فضایی ایران، تهران، ایران

چکیده

تأثیر پارامترهای مداری بر تعداد دفعات رؤیت‌پذیری ماهواره از ایستگاه‌های زمینی با هدف بهینه‌سازی طراحی مدار در مأموریت‌های پایش اقلیم فضا مورد بررسی قرار گرفت. در این راستا، مسیر ماهواره با استفاده از مدل دینامیکی دو جسم طی یک بازه ۲۴ ساعته شبیه‌سازی شد و تعداد دفعات در دید بودن نسبت به شبکه‌ای شامل پنج ایستگاه زمینی در نقاط مختلف ایران محاسبه گردید. برای ارزیابی سهم هر یک از پارامترهای مداری شامل نیم‌قطر اصلی، خروج از مرکز، میل مداری، گره صعودی، آرگومان حضیض و ناسانی میانگین بر تعداد گذرها، از روش تحلیل حساسیت جهانی سوپول استفاده شد. نتایج شاخص‌های مرتبه اول نشان داد که میل مداری و آرگومان حضیض به‌ترتیب با بیشترین مقادیر شاخص (تا ۰/۴۵ و ۰/۱۸) بیشترین تأثیر مستقل را بر خروجی مدل دارند. در مقابل، پارامترهایی نظیر گره صعودی و ناسانی میانگین اگرچه در شاخص مرتبه اول تأثیر اندکی داشتند، اما در شاخص کل، اثر تعاملی آن‌ها بسیار چشم‌گیر بوده و در مواردی از ۰/۹ نیز فراتر رفته است. در ادامه، سناریوهایی با بیشترین تعداد رؤیت در بازه زمانی شبانه‌روز شناسایی شدند؛ به‌گونه‌ای که ایستگاه‌های زمینی ۱ تا ۵ همگی سناریوهایی با ۹ گذر ثبت کرده‌اند. پارامترهای مداری متناظر با این سناریوها ترکیب‌های متنوعی از ویژگی‌های هندسی را شامل می‌شوند؛ از جمله مدارهایی با خروج از مرکز پایین (۰/۰۲۸) یا بالا (۰/۰۹۱۵) و میل‌های مداری در حدود بازه ۴۰ تا ۶۰ درجه. این یافته‌ها می‌توانند به طراحی دقیق‌تر و چندهدفه‌ی مدارهای ماهواره‌ای برای بهبود پوشش زمانی، افزایش دفعات گذر و ارتقاء قابلیت پایش اقلیم فضا کمک کنند.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت ۱۲ شهریور ۱۴۰۴
بازنگری ۲۳ مهر ۱۴۰۴
پذیرش ۳۰ مهر ۱۴۰۴
اولین انتشار ۱۲ آبان ۱۴۰۴

واژه‌های کلیدی:

تحلیل حساسیت سوپول
پارامترهای مداری
ایستگاه زمینی
اقلیم فضا
گذر ماهواره

پست الکترونیکی نویسنده مسئول: m.khoshsima@isrc.ac.ir

How to Cite this Article:

S. Aminabadi, M. Khoshsima, S. Karami, H. Jalili, and J. Aghayari, "Sensitivity Analysis of Orbital Parameters on the Number of Satellite Passes over Ground Stations in Space Weather Missions," *Journal of Space Science and Technology*, Vol. ??, No. ??, pp. 1-14, ????, (in Persian), <https://doi.org/10.22034/jsst.yyyy.nnnn>.



COPYRIGHTS

© 2024 by the authors. Published by ARI. 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/)

علائم و اختصارات

نماد	توضیح
a	نیم‌قطر اصلی
e	خروج از مرکز
i	میل مداری
Ω	صعود راست از گره صعودی
ω	آرگومان حضیض
M	ناسانی میانگین
E	ناسانی خروج از مرکز
r_a	شعاع اوج
r_p	شعاع حضیض
r	فاصله لحظه‌ای ماهواره از مرکز زمین
μ	ثابت گرانشی زمین
n	حرکت میانگین
R_E	شعاع زمین
ω_E	سرعت زاویه‌ای چرخش زمین
r_{ECI}	بردار موقعیت ماهواره در چارچوب زمین مرکزی اینرسی
v_{ECI}	بردار سرعت ماهواره در چارچوب زمین مرکزی اینرسی
r_{GS}	بردار موقعیت ایستگاه زمینی
Y	تعداد گذرهای ماهواره از ایستگاه زمینی
S_1	شاخص سوپول مرتبه اول
S_T	شاخص سوپول کل

مقدمه

تشدید فعالیت‌های خورشیدی و پدیده‌های مرتبط با اقلیم فضا در سال‌های اخیر، چالش‌های مهمی را برای عملکرد سامانه‌های فضایی و زمینی پدید آورده است. طوفان‌های خورشیدی و پرتاب‌های جرم تاجی^۱ از جمله رویدادهایی هستند که می‌توانند عملکرد ماهواره‌ها، سامانه‌های ناوبری، شبکه‌های برق و سلامت انسان را مختل کنند. از این رو، پایش مستمر و دقیق اقلیم فضا برای کاهش آسیب‌پذیری زیرساخت‌ها و افزایش آمادگی در برابر این پدیده‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. منظومه‌های ماهواره‌ای مدار پایین زمین^۲ به دلیل نزدیکی به زمین، توانایی جمع‌آوری داده‌های دقیق، پایش به‌هنگام، پوشش گسترده و هزینه عملیاتی مناسب، به ابزاری کلیدی در رصد اقلیم فضا تبدیل شده‌اند. نمونه‌هایی از این منظومه‌ها شامل سوارم^۳ برای مطالعه میدان

مغناطیسی زمین [۱،۲]، منظومه ماهواره‌ای ناوبری جهانی ناوبری سیکلون^۴ برای بررسی طوفان‌های استوایی و چگالی ترموسفر [۳] و ماموریت‌های در دست توسعه نظیر قطب‌سنج یکپارچه‌ساز تاج خورشیدی و هلیوسفر^۵ برای تصویربرداری از تاج خورشیدی و هلیوسفر [۳] هستند. این ماهواره‌ها به محموله‌هایی نظیر مغناطیس‌سنج، طیف‌سنج، نقشه‌بردار داپلر و تصویرگرهای پیشرفته مجهز هستند که امکان بررسی دقیق‌تر ساختار و رفتار اقلیم فضا را در مقیاس جهانی فراهم می‌آورند. در نتیجه، توسعه و بهره‌برداری از این منظومه‌ها نقش مهمی در محافظت از زمین و زیرساخت‌های حیاتی آن در برابر تهدیدات اقلیم فضا ایفا می‌کند.

یکی از مطالعات در زمینه استفاده از منظومه‌های ماهواره‌ای کوچک^۶ در پایش اقلیم فضا، پژوهشی است که توسط ورخوگلیادووا و همکاران در سال ۲۰۲۱ انجام شده است. در این تحقیق، نویسندگان به بررسی خلأهای موجود در مشاهدات اقلیم فضا پرداخته و پیشنهاد داده‌اند که منظومه‌های ماهواره‌ای کوچک می‌توانند با بهره‌گیری از سنسورهای کوچک و ارزان، بسیاری از این شکاف‌ها را در زمینه‌هایی مانند ورودی‌های خورشیدی به مدل‌های پیش‌بینی، کنترل تابش فضایی، بودجه انرژی لایه‌های بالایی جو و مدل‌سازی نیروی درگ پوشش دهند. همچنین مشخصه‌های طراحی و سنجش این منظومه‌ها، از جمله نیاز به ارسال آنی داده‌ها، استفاده از مدارهای قطبی یا بین‌سیاره‌ای و بهینه‌سازی زیرساخت ایستگاه‌های زمینی مورد توجه قرار گرفته است. یافته‌های این مطالعه، مکملی ارزشمند برای تحلیل‌های عددی ارائه شده در این تحقیق محسوب می‌شوند و می‌توانند به‌عنوان پایه‌ای برای طراحی دقیق‌تر ماموریت‌های آینده در حوزه‌ی رصد اقلیم فضا به‌کار گرفته شوند [۴].

افزون بر این، دقت در پایش وضعیت اقلیم فضا با تعداد عبورهای ماهواره‌ای از یک موقعیت جغرافیایی خاص مرتبط است. افزایش تعداد عبورها فرصت‌های بیشتری برای جمع‌آوری داده‌های دقیق فراهم می‌سازد که در نتیجه، وضوح مکانی و زمانی مشاهدات بهبود یافته و اعتبار تحلیل‌های اقلیم فضا افزایش می‌یابد. یکی از مهم‌ترین تکنیک‌های به‌کار رفته در این حوزه، روش اختفای رادیویی سامانه‌های ناوبری ماهواره‌ای جهانی^۷ است که توسط منظومه‌هایی نظیر کاسمیک^۸ برای استخراج پارامترهایی همچون پروفیل چگالی الکترون و مقدار کل الکترون استفاده شده است [۵]. داده‌های حاصل از این روش، با افزایش تعداد عبورها، دقت بالاتری پیدا کرده و این امکان را می‌دهد تا ارتباط دقیق میان اختلالات فضایی نظیر طوفان‌های ژئومغناطیسی با رفتار

5. Polarimeter to UNify the Corona and Heliosphere
6. SmallSats
7. GNSS-RO
8. Cosmic

1. CMEs
2. LEO
3. Swarm
4. Cyclone Global Navigation Satellite System

سامانه‌های ماهواره‌ای و ناهنجاری‌های ثبت‌شده تحلیل شود [۶]. هرچند افزایش تعداد عبورهای ماهواره‌ای موجب بهبود پایش می‌شود، کیفیت نهایی داده‌ها تحت تأثیر نوع سامانه، شرایط جوی و روش‌های پردازش نیز قرار دارد [۷]. در نتیجه، در کنار افزایش حجم داده‌ها، بهره‌گیری از مدل‌سازی و تحلیل‌های پیشرفته نیز ضرورتی اجتناب‌ناپذیر در مطالعات اقلیم فضا است.

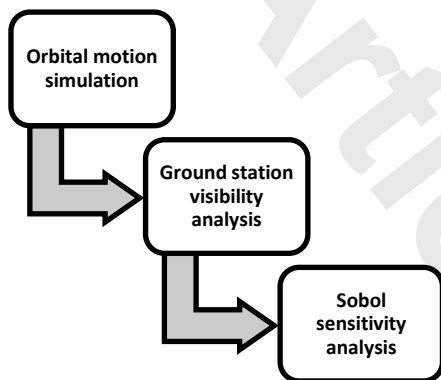
تحلیل حساسیت یکی از روش‌های رایج در مطالعات عددی است که از طریق آن می‌توان میزان تأثیر تغییرات پارامترهای مختلف بر نتایج نهایی را ارزیابی کرد. این روش با کمی‌سازی ارتباط میان متغیرهای ورودی (پارامترهای طراحی) و متغیرهای خروجی (معیارهای عملکردی)، درک بهتری از رفتار سیستم فراهم می‌کند و به شناسایی پارامترهایی که بیشترین تأثیر را بر خروجی‌ها دارند، کمک می‌نماید [۸]. در همین راستا، مطالعات مختلفی انجام شده است؛ برای مثال، در [۹] از تحلیل حساسیت جهت بررسی تعداد مناسب تکرارهای مونت‌کارلو به منظور حصول نتایج آماری معتبر، شناسایی پارامترهای کلیدی نظیر طول عمر ماهواره پس از پایان مأموریت و تأثیر فعالیت‌های پرتاب و تغییر مدل‌های ترافیک فضایی بر پیش‌بینی وضعیت بقایای مداری استفاده شده است. این مطالعه با تحلیل تعادل میان زمان‌بندی دفع و الزامات قانونی، به ارائه نتایجی پرداخته است که در بهبود مدیریت بقایای مداری و استراتژی‌های کاهش موثر هستند. همچنین، در [۱۰] تحلیل حساسیت جهانی و محلی برای بررسی تأثیر منابع مختلف عدم قطعیت شامل اقلیم فضا، شرایط اولیه مداری و درگ اتمسفری بر طول عمر مداری ماهواره‌های مدار نزدیک زمین استفاده شده است. این مطالعه با استفاده از شاخص‌های سوبول^۱، سهم هر متغیر ورودی در عدم قطعیت کلی طول عمر مداری را شناسایی و روشی به نام ضریب تصحیح درگ برای بهبود دقت پیش‌بینی معرفی کرده است. تحلیل حساسیت سوبول بر اساس تجزیه واریانس است که از نمونه‌گیری مونت‌کارلو برای محاسبه شاخص‌های حساسیت استفاده می‌کند. روش حساسیت سنجی سوبول ابزاری منعطف است که برای تحلیل مسائل خطی و غیرخطی قابل استفاده می‌باشد. روش سوبول به ارزیابی مشارکت متغیرهای ورودی در واریانس خروجی مدل می‌پردازد و این ویژگی سبب می‌شود که روش سوبول برای طیف وسیعی از مدل‌ها قابل استفاده باشد. قدرت این روش در تحلیل تعاملات بین ورودی‌ها باعث می‌شود که برای مسائل غیرخطی بسیار مفید باشد، ولی همچنین در مسائل خطی نیز کاربرد دارد [۱۱]. در [۱۲]، تحلیل حساسیت به منظور ارزیابی احتمال برخورد میکروترومیدها و بقایای مداری با فضاپیماها به کار گرفته شده است. در این روش، سازه فضاپیما به پنل‌های کوچک تقسیم شده و

احتمال برخورد برای هر پنل به تفکیک محاسبه شده است؛ همچنین با استفاده از مدل‌های مختلف بقایای فضایی، میزان عدم قطعیت در پیش‌بینی‌ها ارزیابی شده است. مطالعه ارائه شده در مرجع [۱۳] با بهره‌گیری از تحلیل حساسیت، اثر عواملی چون نرخ پرتاب‌ها، اندازه منظومه‌های ماهواره‌ای و عمر پس از مأموریت را بر پویایی جمعیت اشیای مداری بررسی کرده است. این پژوهش نشان می‌دهد که افزایش فعالیت‌های پرتاب و گسترش منظومه‌های ماهواره‌ای منجر به افزایش غیرخطی جمعیت بقایا و نرخ برخورد در مدار پایین زمین می‌شود. در [۱۴]، تحلیل حساسیت در چارچوب طراحی چند فضاپیما برای شناسایی قمرهای سیاره‌ای انجام شده است. این تحقیق تأثیر تغییرات در تعداد فضاپیما، موقعیت‌های ملاقات و نقاط فرود بر میزان پوشش سطح ماه و قابلیت اطمینان مأموریت را بررسی کرده و به ارائه چارچوبی برای تحلیل نوسانات عملیاتی و عدم قطعیت پرداخته است.

از سوی دیگر، در زمینه تحلیل پوشش زمینی و رویت‌پذیری ماهواره‌های مدار پایین نیز پژوهش‌هایی با رویکرد تحلیلی و بهینه‌سازی انجام شده است. به عنوان نمونه، مرگان-جونز و لوسکات در سال ۲۰۱۹ با ارائه مدلی هندسی مبتنی بر مدارهای کپلری، شاخصی تحت عنوان میانگین زمان دید ماهواره ۲ را معرفی کردند و نشان دادند که انتخاب بهینه مکان ایستگاه‌های زمینی و پارامترهای مداری می‌تواند مدت‌زمان و گستره پوشش را به طور قابل توجهی افزایش دهد [۱۵]. در ادامه، وانگ و همکاران چارچوبی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک تطبیقی و موازی برای بهینه‌سازی چندمعیاره‌ی ۳ منظومه‌های مدار پایین ارائه کردند. این روش با در نظر گرفتن اغتشاشات مداری و محدودیت‌های دینامیکی، بهبود قابل توجهی در پوشش، پایداری و تاب‌آوری منظومه‌های لئو ایجاد کرد. نتایج این مطالعات نشان می‌دهد که تحلیل هندسی رویت‌پذیری و بهینه‌سازی الگوریتمی، دو رویکرد مکمل در طراحی و تحلیل مأموریت‌های فضایی به شمار می‌روند و می‌توانند مبنای طراحی شبکه‌های ماهواره‌ای باشند [۱۶]. با این حال، تحلیل کمی سهم پارامترهای مداری بر رویت‌پذیری ماهواره از ایستگاه زمینی با بهره‌گیری از شاخص‌های حساسیت جهانی تاکنون کمتر مورد توجه قرار گرفته است.

بر این اساس، هدف اصلی پژوهش حاضر شناسایی پارامترهای مداری با بیشترین تأثیر بر تعداد گذر ماهواره از ایستگاه زمینی در مأموریت‌های پایش اقلیم فضا است. افزایش تعداد دفعات در دید بودن، امکان دسترسی به داده‌های بلادرنگ را فراهم می‌کند و در نتیجه دقت تحلیل و پیش‌بینی رخدادهای اقلیم فضا افزایش می‌یابد. نوآوری این

ماهواره‌ها در طول ۲۴ ساعت ارزیابی می‌شود. ۳- تحلیل حساسیت سوبول: در نهایت، با بهره‌گیری از روش سوبول، سهم هر یک از پارامترهای مداری در تعیین تعداد ماهواره‌های قابل مشاهده محاسبه می‌شود (شکل ۱).



شکل ۱- فرایند تحلیل حساسیت.

Fig. 1. Sensitivity analysis process.

در این فرآیند، پارامترهای مداری به‌عنوان ورودی‌هایی در بازه پیوسته تعریف شده‌اند. برای هر مجموعه نمونه‌گیری شده از این پارامترها، شبیه‌سازی مداری انجام و بررسی می‌شود که آیا ماهواره در لحظه مشخصی از منظر ایستگاه زمینی قابل مشاهده است یا خیر. سپس، با استفاده از تجزیه واریانس در چارچوب روش سوبول، اثرات مستقل و تعاملی هر پارامتر بر تعداد دفعات در دید بودن، کمی‌سازی می‌شود. نتایج حاصل از محاسبه شاخص‌های حساسیت سوبول، امکان رتبه‌بندی پارامترهای مداری را بر اساس میزان تأثیرگذاری فراهم می‌سازد. در ادامه روش ریاضی مسئله مورد بررسی قرار خواهد گرفت:

موقعیت مداری

حرکت مداری ماهواره در این پژوهش بر پایه مدل دو جسم^۱ تحلیل می‌شود [۲۰]؛ مدلی که در آن تنها نیروی گرانشی زمین به‌عنوان عامل تأثیرگذار در دینامیک حرکت ماهواره در نظر گرفته می‌شود. در این چارچوب، شتاب ماهواره متناسب با معکوس مجذور فاصله آن از مرکز زمین بوده و معادله حرکت آن به‌صورت زیر تعریف می‌شود (معادله ۱):

$$\ddot{\mathbf{r}} = -\frac{\mu}{r^3} \mathbf{r} \quad (1)$$

در معادله ۱، $\ddot{\mathbf{r}}$ شتاب ماهواره، μ ثابت گرانشی زمین، r فاصله ماهواره از زمین و \mathbf{r} بردار موقعیت ماهواره نسبت به زمین می‌باشد.

تحقیق در به‌کارگیری روش تحلیل حساسیت جهانی سوبول برای ارزیابی هم‌زمان تأثیر پارامترهای مداری در حوزه مشاهده زمینی است. انتظار می‌رود نتایج این پژوهش ضمن شناسایی پارامترهای مداری کلیدی، راهنمایی عملی برای انتخاب مدارهای بهینه در مأموریت‌های پایش اقلیم فضا فراهم آورد. در ادامه، مدل مداری، روش تحلیل حساسیت و یافته‌های عددی به تفصیل تشریح می‌شوند.

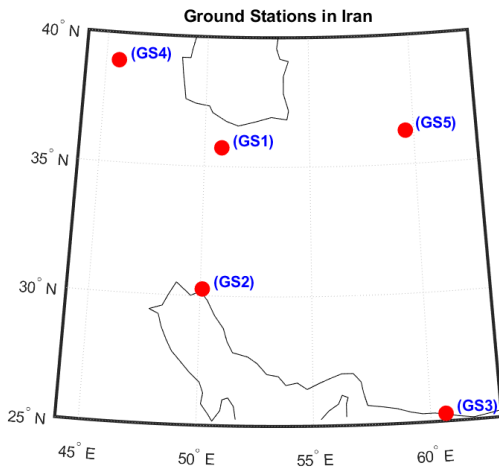
روش تحقیق

در این پژوهش، موقعیت ماهواره با فرض مدل دو جسم و شرایط ایده‌آل (بدون در نظر گرفتن اختلالات گرانشی و جوی) طی یک شبانه‌روز در فضای پیوسته شبیه‌سازی شده است. سپس با تعریف ایستگاه‌های زمینی در عرض‌های جغرافیایی مشخص [۱۷]، تعداد دفعات قرارگیری ماهواره در محدوده دید مستقیم ایستگاه‌ها استخراج گردید. به‌عبارت دیگر، معیار در دید بودن ماهواره از منظر ایستگاه زمینی به‌عنوان شاخص کلیدی برای ارزیابی عملکرد مدار در نظر گرفته شد [۱۸].

پارامترهای مداری شامل نیم‌قطر اصلی (a)، خروج از مرکز (e)، آرگومان حضیض (ω)، میل مداری (i)، گره صعودی (Ω) و ناسانی میانگین (M) به‌عنوان متغیرهای ورودی مدل تعریف شدند. این پارامترها هندسه سه‌بعدی مدار و الگوی رؤیت‌پذیری ماهواره از ایستگاه‌های زمینی را تعیین می‌کنند.

برای تحلیل نقش این متغیرها، از روش تحلیل حساسیت جهانی سوبول به‌عنوان ابزار اصلی استفاده شده است [۱۹]. این روش با محاسبه سهم هر پارامتر در واریانس خروجی مدل، امکان تفکیک اثرات مستقل و تعاملی متغیرها را فراهم می‌سازد. برخلاف روش‌های تحلیل حساسیت محلی که تنها به بررسی تغییرات کوچک در اطراف یک نقطه مرجع می‌پردازند، تحلیل سوبول قادر است رفتار مدل را در کل دامنه تعریف شده برای ورودی‌ها ارزیابی کند. این ویژگی در مدل‌هایی که دارای تعاملات غیرخطی و پیچیده میان پارامترها هستند مانند مدل‌سازی رؤیت‌پذیری ماهواره‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است.

شکل ۱ فرآیند کلی تحلیل حساسیت پژوهش پیش رو را نمایش می‌دهد. این فرآیند شامل سه مرحله اصلی است: ۱- شبیه‌سازی حرکت مداری: با استفاده از مدل ریاضی، مسیر حرکت مداری ماهواره‌ها در بازه زمانی مشخص (۲۴ ساعت) شبیه‌سازی می‌گردد. ۲- تحلیل دید از ایستگاه‌های زمینی: در این مرحله، با در نظر گرفتن موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های زمینی، وضعیت در دید بودن



شکل ۲- توزیع جغرافیایی ایستگاه‌های زمینی.

Fig. 2. Geographical distribution of the ground stations.

جدول ۱، مختصات جغرافیایی و ارتفاع هر یک از ایستگاه‌ها را ارائه می‌دهد. این اطلاعات در فرایند محاسبه دید ماهواره از سطح زمین به‌کار گرفته شده‌اند.

جدول ۱- مشخصات شبکه ایستگاه‌های زمینی.

Table 1. Geographical coordinates of the ground station network.

	Longitude (degrees)	Latitude (degrees)	Altitude (kilometers)
Ground Station 1	50.8114	35.7277	1.165
Ground Station 2	50.0925	30.2602	0.16
Ground Station 3	60.6496	25.2927	0.006
Ground Station 4	45.6289	38.9307	0.73
Ground Station 5	59.6062	36.297	0.966

در ادامه، با استفاده از مختصات جغرافیایی ایستگاه‌ها و موقعیت زمانی ماهواره در دستگاه مختصات زمین‌مرکزی اینرسی، وضعیت در دید بودن ماهواره از منظر هر ایستگاه زمینی محاسبه می‌شود.

در دید بودن ماهواره

در این بخش، معیار در دید بودن ماهواره از ایستگاه زمینی تعریف می‌شود. شرط در دید بودن ماهواره‌ها که با استفاده از مرجع [۱۸] شبیه‌سازی شده است، از مفهوم افق محلی و هندسه کروی زمین برای بیان در دید بودن ماهواره استفاده می‌کند. به‌طور خاص، این شرط بر

موقعیت ماهواره در هر لحظه از طریق آنومالی میانگین (M) محاسبه می‌شود که مقدار آن به‌صورت خطی با زمان افزایش می‌یابد:

$$M = M_0 + nt \quad (2)$$

که مقدار اولیه آن برابر صفر در نظر گرفته می‌شود. در معادله ۲، n میانگین حرکت ماهواره است که نرخ ناسانی میانگین را مشخص می‌کند و برابر با $\sqrt{\frac{\mu}{a^3}}$ می‌باشد. برای محاسبه موقعیت ماهواره در هر لحظه، آنومالی خروج از مرکز (E) باید محاسبه شود:

$$M = E - e \sin E \quad (3)$$

پس از حل معادله بالا، ناسانی حقیقی (v) از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$v = 2 \tan^{-1} \left[\sqrt{\frac{1+e}{1-e}} \tan \frac{E}{2} \right] \quad (4)$$

با داشتن (a, e, v) بردارهای موقعیت و سرعت در قاب مداری پریفوکال به‌دست می‌آید:

$$\vec{r} = r \cdot \begin{bmatrix} \cos v \\ \sin v \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\vec{v} = \sqrt{\frac{\mu}{a(1-e^2)}} \begin{bmatrix} -\sin v \\ e + \cos v \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

برای بیان موقعیت و سرعت ماهواره در سیستم مختصات زمین مرکزی اینرسی^۱، از ترکیب ماتریس‌های چرخش حول زوایای مداری استفاده می‌شود. بنابراین موقعیت ماهواره در طول زمان محاسبه می‌شود. مختصات حاصل شده پایه تحلیل در دید بودن ماهواره از منظر ایستگاه‌های زمینی خواهد بود.

ایستگاه زمینی

برای بررسی وضعیت در دید بودن ماهواره و تحلیل تأثیر پارامترهای مداری بر تعداد دفعات مشاهده از سطح زمین، از یک شبکه شامل پنج ایستگاه زمینی استفاده شده است. انتخاب این ایستگاه‌ها با هدف پوشش جغرافیایی متنوع در عرض‌های مختلف ایران صورت گرفته است تا اثر تغییرات عرض جغرافیایی بر الگوی گذر ماهواره‌ها ارزیابی شود [۱۷]. موقعیت این ایستگاه‌ها در شکل ۲ نمایش داده شده است.

محاسبه شاخص‌های حساسیت سوبول

برای هر ورودی X_i ، شاخص‌های هر مرتبه و شاخص کلی به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$S_i = \frac{E \left[Y_B \cdot \left(Y_{A_B^{(i)}} - Y_A \right) \right]}{VAR(Y)} \quad (7)$$

$$S_T = \frac{1}{2} \times \frac{E \left[\left(Y_A - Y_{B_A^{(i)}} \right)^2 \right]}{VAR(Y)} \quad (8)$$

در این روابط، Y_B ، Y_A ، $Y_{A_B^{(i)}}$ و $Y_{B_A^{(i)}}$ خروجی‌های مدل برای ماتریس‌های مربوطه (A, B) ، $(A_B^{(i)}, B_A^{(i)})$ هستند و امید ریاضی نیز با استفاده از میانگین‌گیری بر روی نمونه‌ها تخمین زده شده است.

شاخص‌های حساسیت سوبول در بازه $(0, 1)$ تعریف می‌شوند و معیاری برای سنجش میزان سهم هر متغیر ورودی در واریانس خروجی مدل به‌شمار می‌روند. شاخص مرتبه اول تنها اثر مستقیم و مستقل یک متغیر بر خروجی را اندازه‌گیری می‌کند، در حالی که شاخص کل علاوه بر اثر مستقیم، تمامی اثرات تعاملی آن متغیر با سایر ورودی‌ها را نیز در نظر می‌گیرد. در یک سیستم بدون هم‌پوشانی یا وابستگی میان متغیرها، مجموع شاخص‌های مرتبه اول برابر با یک خواهد بود. با این حال، در اغلب مدل‌های واقعی که شامل برهم‌کنش‌های غیرخطی بین متغیرها هستند، مجموع شاخص‌های مرتبه اول معمولاً کمتر از یک است و اختلاف آن با عدد یک نمایانگر میزان اثرات تعاملی در سیستم است. این تفاوت می‌تواند با مقایسه مجموع شاخص‌های مرتبه اول با مجموع شاخص‌های کل تحلیل شده و میزان پیچیدگی یا غیرخطی بودن مدل را آشکار سازد. به‌طور خاص، اگر تفاوت بین شاخص کل و شاخص مرتبه اول برای یک متغیر زیاد باشد، نشان‌دهنده آن است که این متغیر اگرچه به‌صورت مستقل اثر کمی دارد، اما در ترکیب با سایر متغیرها اثر قابل توجهی بر خروجی مدل دارد. این موضوع می‌تواند در طراحی‌های بهینه‌سازی، مدل‌سازی غیرخطی یا کاهش ابعاد^۲ مورد توجه قرار گیرد. در بخش بعدی نتایج حاصل از تحلیل حساسیت سوبول مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

نتایج

به‌منظور انجام حساسیت‌سنجی، محدوده تغییرات برای پارامترهای مداری اصلی مطابق جدول ۲ فرض شده است.

اساس زاویه مرکزی α زاویه بین بردارهای مرکز زمین به ایستگاه زمینی و مرکز زمین به ماهواره عمل می‌کند. وقتی $90^\circ \leq \alpha \leq 270^\circ$ باشد، ماهواره در نیم‌کره بالایی نسبت به صفحه افق محلی ایستگاه زمینی قرار دارد، یعنی خط دید بین ایستگاه و ماهواره توسط جرم زمین مسدود نمی‌شود. این مفهوم به این معناست که زمین به‌عنوان یک مانع کروی در نظر گرفته شده و اگر ماهواره زیر خط افق (زاویه کمتر از 90° درجه یا بیشتر از 270° درجه) باشد، قابل مشاهده نیست. به‌عبارت دیگر، این شرط از ایده خط دید مستقیم^۱ در یک سیستم کروی استفاده می‌کند و تضمین می‌کند که ماهواره در محدوده‌ای باشد که از نظر هندسی برای ایستگاه زمینی قابل رؤیت است.

حساسیت‌سنجی سوبول

تحلیل حساسیت سوبول به‌عنوان یک روش تحلیل حساسیت جهانی برای بررسی تأثیر تغییرات ورودی‌های مدل بر خروجی به‌کار گرفته می‌شود [۱۹]. در این تحقیق، پارامترهای مداری به‌عنوان متغیرهای ورودی در نظر گرفته شده و تعداد ماهواره‌های در دید از ایستگاه‌های زمینی به‌عنوان خروجی مدل تعریف می‌شود.

برای تخمین شاخص‌های حساسیت، از یک روش عددی مبتنی بر نمونه‌برداری مونت کارلو استفاده شده است. در این روش، ابتدا دو مجموعه نمونه مستقل از فضای پارامترهای ورودی ایجاد شده است. این نمونه‌ها در قالب دو ماتریس A و B تولید شده‌اند که هر کدام شامل N ردیف (تعداد نمونه‌ها) و M ستون (تعداد پارامترهای ورودی) می‌باشند. به‌بیان دیگر، هر ماتریس دارای ابعاد $N \times M$ است، که در آن پارامترهای ورودی شامل میل مداری، آرگومان حضیض، گره صعودی، خروج از مرکز، ناسانی میانگین و نیم‌قطر اصلی مدار هستند.

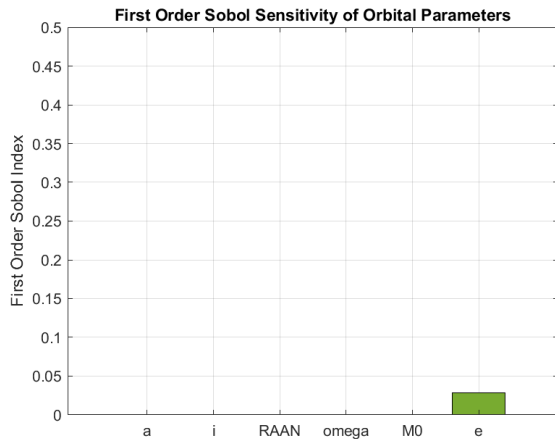
برای هر پارامتر ورودی X_i ، یک ماتریس ترکیبی $A_B^{(i)}$ ساخته می‌شود که در آن تمام ستون‌ها از A گرفته شده و تنها ستون i از B جایگزین شده است. این جابه‌جایی به‌منظور بررسی اثر مستقل پارامتر X_i بر خروجی مدل انجام می‌شود. همچنین برای محاسبه شاخص حساسیت کلی، ماتریس $B_A^{(i)}$ ساخته می‌شود که در آن فقط ستون i از A و سایر ستون‌ها از B هستند.

پس از اجرای مدل برای ردیف‌های موجود در ماتریس‌های A ، B ، $B_A^{(i)}$ و $A_B^{(i)}$ ، شاخص‌های حساسیت مرتبه اول و کل برای هر پارامتر با استفاده از روابط ۷ و ۸ محاسبه می‌شوند.

جدول ۲- محدوده تغییرات پارامترهای ورودی در تحلیل حساسیت سوبول.

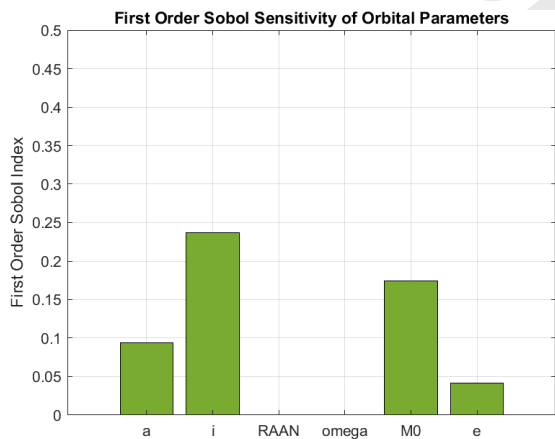
Table 2. Range of input parameters in Sobol sensitivity analysis.

Variable	Range of Variation
Semi-major axis (km)	[6771-8371]
Inclination (degrees)	[26-60]
Right ascension of the ascending node (RAAN) (degrees)	[0-360]
Argument of perigee (degrees)	[0-360]
Mean anomaly (degrees)	[0-360]



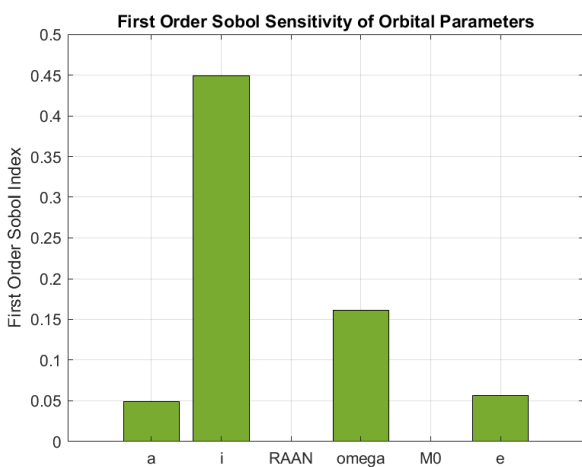
شکل ۴- شاخص مرتبه اول سوبول (ایستگاه زمینی ۲).

Fig. 4. First-order Sobol sensitivity indices (Ground Station 2).



شکل ۵- شاخص مرتبه اول سوبول (ایستگاه زمینی ۳).

Fig. 5. First-order Sobol sensitivity indices (Ground Station 3).



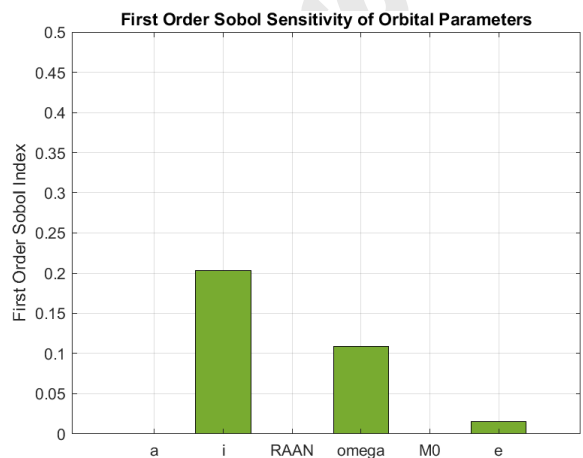
شکل ۶- شاخص مرتبه اول سوبول (ایستگاه زمینی ۴).

Fig. 6. First-order Sobol sensitivity indices (Ground Station 4).

برخلاف تحلیل‌های گسسته، این روش با پوشش یکنواخت فضای طراحی، روندهای رفتاری سیستم و تعاملات میان متغیرها را بهتر آشکار می‌کند. نمونه‌برداری پیوسته (۵۰۰۰ نمونه) همچنین دقت شاخص‌های جهانی مانند شاخص سوبول را افزایش می‌دهد. محدوده‌های فوق به گونه‌ای انتخاب شده‌اند که بازه‌ای متنوع از پیکربندی‌های مداری را با توجه به عرض جغرافیایی ایران در مدار پائین زمین در بر گرفته و امکان ارزیابی دقیق اثر هر متغیر بر عملکرد منظومه ماهواره‌ای را فراهم می‌سازند. در ادامه، نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل حساسیت سوبول برای هر یک از پارامترها، همراه با تفسیر دقیق اثرگذاری آن‌ها بر تعداد گذرهای ماهواره‌ای، به تفصیل گزارش می‌شود.

شاخص مرتبه اول

در این بخش، شاخص‌های مرتبه اول سوبول برای شش پارامترهای مداری شامل نیم‌قطر بزرگ، خروج از مرکز، آرگومان حضیض، میل مداری، صعود راست از گره صعودی و ناسانی میانگین مورد بررسی قرار گرفته است. شاخص مرتبه اول میزان تأثیر مستقل هر پارامتر را بر واریانس خروجی مدل (تعداد گذرهای ماهواره از ایستگاه زمینی) نشان می‌دهد (شکل‌های ۱ تا ۷).



شکل ۳- شاخص مرتبه اول سوبول (ایستگاه زمینی ۱).

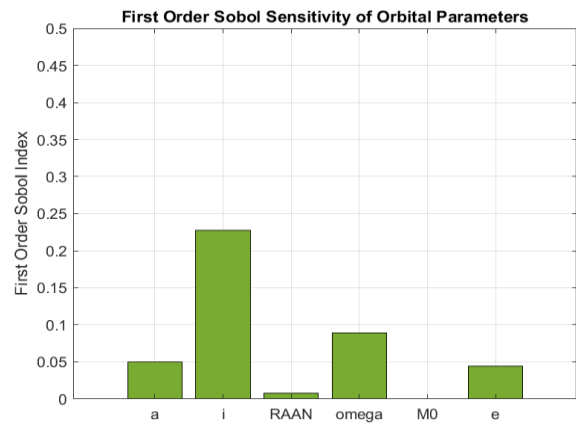
Fig. 3. First-order Sobol sensitivity indices (Ground Station 1).

بر اساس نتایج عددی ارائه شده در شکل ۸، مشاهده می‌شود که پارامتر میل مداری در تمامی ایستگاه‌های زمینی دارای بیشترین تأثیر مستقل بر تعداد دفعات در دید بودن ماهواره است؛ به گونه‌ای که مقدار شاخص مرتبه اول آن از حدود ۰/۲ در ایستگاه ۱ و تا بیش از ۰/۴۵ در ایستگاه ۳ متغیر بوده است. این موضوع نقش کلیدی میل مداری در پوشش عرض‌های جغرافیایی متنوع و افزایش احتمال رؤیت‌پذیری را تأیید می‌کند. علاوه بر آن، آرگومان حضیض نیز در ایستگاه‌های ۱، ۴ و ۵ تأثیر قابل توجهی با شاخص‌هایی در حدود ۰/۱ تا ۰/۱۵ از خود نشان داده است که عمدتاً ناشی از تغییرات موضعی مکان حضیض مدار و اثر آن بر هم‌راستایی گذرها نسبت به ایستگاه‌ها می‌باشد. یکی از نتایج قابل توجه در تحلیل حساسیت، مقدار نسبتاً بالای شاخص مرتبه اول میان‌ناسانی اولیه در ایستگاه ۳ با مقدار ۰/۱۷۴ است؛ در حالی که همین پارامتر در سایر ایستگاه‌ها تأثیر ناچیزی داشته یا عملاً صفر بوده است. این تفاوت را می‌توان با توجه به موقعیت جغرافیایی ایستگاه ۳ و نحوه تعامل آن با هندسه مداری توضیح داد. ایستگاه ۳ در عرض جغرافیایی نسبتاً پایین (حدود ۲۵ درجه شمالی) قرار دارد، که آن‌را به مرز پوشش مداری برخی از مدارهایی با میل پایین نزدیک می‌کند. در چنین شرایطی، تغییر در مقدار ناسانی میانگین به صورت مؤثر تعیین می‌کند که آیا ماهواره در زمان‌های کلیدی، از افق ایستگاه عبور می‌کند یا خیر.

از سوی دیگر، صعود راست از گره صعودی در تمام ایستگاه‌ها تأثیر بسیار ناچیزی داشته و مقدار شاخص آن نزدیک به صفر است. همچنین نیم‌قطر بزرگ و خروج از مرکز نیز به جز در ایستگاه ۱ (با حدود ۰/۱)، در سایر ایستگاه‌ها شاخص‌هایی کمتر از ۰/۰۵ را ثبت کرده‌اند. این نتایج نشان می‌دهد که برخی پارامترها به صورت مستقل تأثیر اندکی بر عملکرد مدل دارند، اما ممکن است در تعامل با سایر پارامترها نقش مهم‌تری ایفا کنند؛ موضوعی که در بخش بعدی با بررسی شاخص‌های کل سوبول مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت.

شاخص مرتبه نهایی

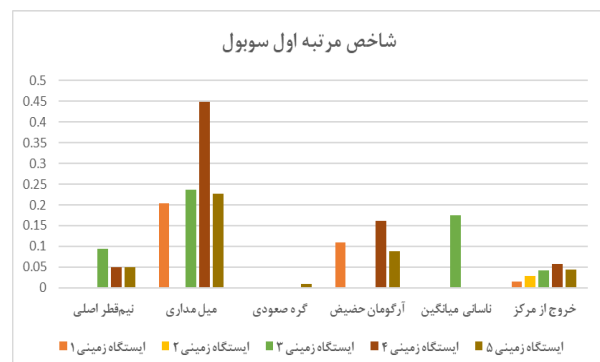
شاخص کل در تحلیل حساسیت جهانی، بیانگر سهم کلی پارامتر ورودی در واریانس خروجی مدل است. این شاخص شامل تأثیرات مستقیم و همچنین تمام تعاملات آن پارامتر با سایر پارامترها می‌شود. به عبارت دیگر، حتی اگر یک پارامتر به تنهایی تأثیر زیادی نداشته باشد، ممکن است در ترکیب با سایر پارامترها اثر قابل توجهی بر خروجی بگذارد که در شاخص کل منعکس می‌شود (شکل‌های ۹ الی ۱۳).



شکل ۷- شاخص مرتبه اول سوبول (ایستگاه زمینی ۵).

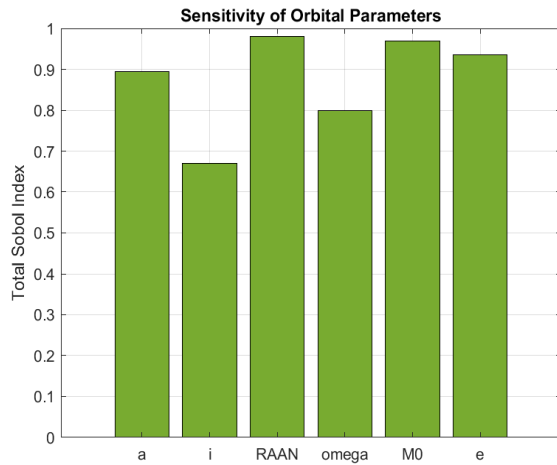
Fig. 7. First-order Sobol sensitivity indices (Ground Station 5).

نتایج به دست آمده از تحلیل عددی (شکل‌های ۳ تا ۷) نشان می‌دهد که در میان پارامترهای مداری، میل مداری بیشترین مقدار شاخص مرتبه اول را به خود اختصاص داده است. این شاخص در برخی ایستگاه‌ها مانند ایستگاه ۳ تا حدود ۰/۴۵ افزایش یافته که بیانگر تأثیر مستقل و قوی میل مداری بر تعداد دفعات رؤیت‌پذیری ماهواره است. پس از آن، آرگومان حضیض در ایستگاه‌های ۱، ۳ و ۵ با شاخص‌هایی بین ۰/۱ تا ۰/۱۸ نقش نسبتاً مؤثری داشته و ناسانی میانگین نیز به‌ویژه در ایستگاه‌های ۱ و ۵ با مقادیر شاخص در حدود ۰/۱۵ تا ۰/۲، اثر قابل توجهی از خود نشان داده است. از سوی دیگر، پارامترهایی مانند نیم‌قطر اصلی و خروج از مرکز عمدتاً دارای شاخص‌هایی کمتر از ۰/۱ بوده‌اند و صعود راست از گره صعودی در کلیه ایستگاه‌ها تأثیر مستقیمی نزدیک به صفر داشته است. این نتایج نه تنها نقش کلیدی میل مداری در پوشش عرض‌های جغرافیایی مختلف را تأیید می‌کند، بلکه بر اهمیت نسبی پارامترهایی مانند آرگومان حضیض و ناسانی میانگین نیز در برخی موقعیت‌های جغرافیایی خاص دلالت دارد. شکل ۸، تغییرات شاخص مرتبه اول سوبول در ایستگاه‌های زمینی مشخص شده را نمایش می‌دهد.



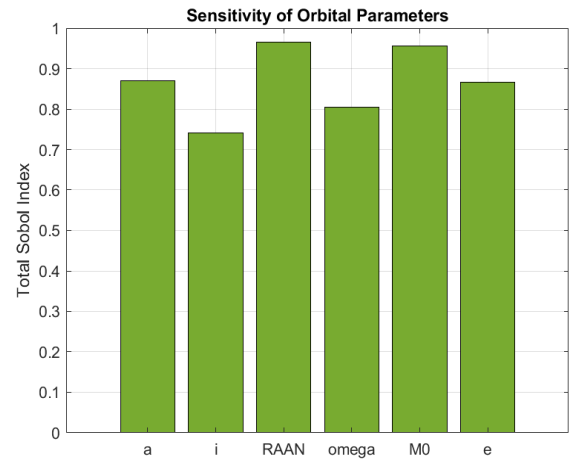
شکل ۸- تغییرات شاخص مرتبه اول سوبول در هر ایستگاه زمینی.

Fig. 8. Variation of first-order Sobol indices of orbital parameters across ground stations.



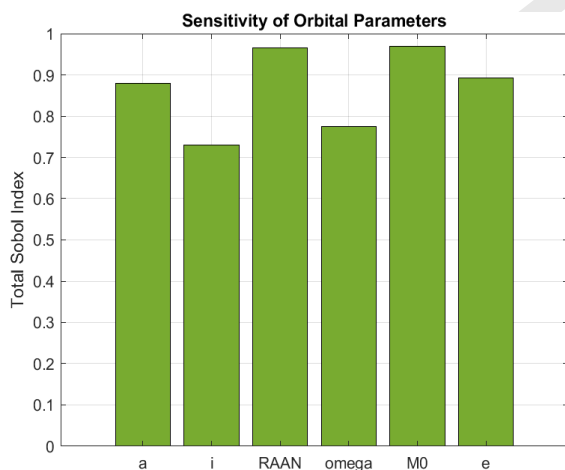
شکل ۱۲- شاخص مرتبه نهایی سوبول (ایستگاه زمینی ۴).

Fig. 12. Total Sobol sensitivity indices (Ground Station 4).



شکل ۹- شاخص مرتبه نهایی سوبول (ایستگاه زمینی ۱).

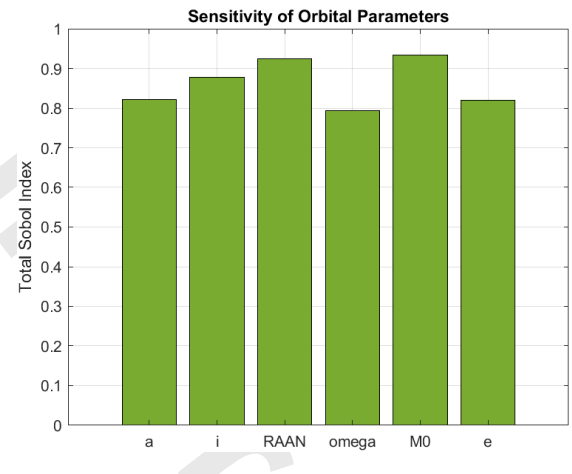
Fig. 9. Total Sobol sensitivity indices (Ground Station 1).



شکل ۱۳- شاخص مرتبه نهایی سوبول (ایستگاه زمینی ۵).

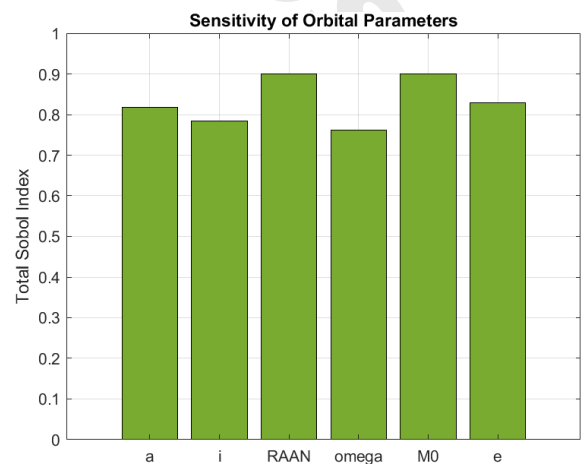
Fig. 13. Total Sobol sensitivity indices (Ground Station 5).

در تحلیل حساسیت جهانی، شاخص کل سوبول میزان تأثیر هر پارامتر ورودی را به صورت جامع در واریانس خروجی مدل ارزیابی می‌کند؛ این شاخص علاوه بر اثرات مستقل، کلیه تعاملات غیرخطی و ترکیبی هر پارامتر با سایر متغیرها را نیز در نظر می‌گیرد. همان‌طور که در شکل‌های ۹ تا ۱۳ دیده می‌شود، برخلاف شاخص مرتبه اول، تمامی پارامترهای مداری در شاخص کل مقادیر قابل توجهی را ثبت کرده‌اند. به‌طور خاص، پارامترهای صعود راست از گره صعودی و ناسانی میانگین در تمامی ایستگاه‌ها دارای بیشترین مقدار شاخص کل بوده‌اند؛ به‌طوری‌که مقدار آن‌ها در برخی ایستگاه‌ها از ۰/۹۵ نیز فراتر رفته است. در ادامه، پارامترهای خروج از مرکز، نیم‌قطر اصلی و آرگومان حضیض نیز در بیشتر ایستگاه‌ها دارای شاخص‌هایی بین ۰/۸ تا ۰/۹۵ بوده‌اند، که نشان‌دهنده اثرات تعاملی قوی این پارامترها با



شکل ۱۰- شاخص مرتبه نهایی سوبول (ایستگاه زمینی ۲).

Fig. 10. Total Sobol sensitivity indices (Ground Station 2).



شکل ۱۱- شاخص مرتبه نهایی سوبول (ایستگاه زمینی ۳).

Fig. 11. Total Sobol sensitivity indices (Ground Station 3).

مؤثر یک پیکربندی مداری با هدف بهبود پوشش زمینی، باید علاوه بر تأثیرات مستقل، اثرات متقابل میان پارامترها نیز در نظر گرفته شود. چنین نگاهی جامع، مسیر بهینه‌سازی دقیق‌تر مدار را هموار کرده و موجب افزایش دفعات رؤیت‌پذیری ماهواره از زمین و ارتقاء کارایی مأموریت‌های پایش اقلیم فضا خواهد شد.

سناریو با بیشترین تعداد گذر

در راستای تکمیل تحلیل حساسیت و بررسی ویژگی‌های عملیاتی مطلوب مدارها، سناریوهایی که بیشترین تعداد دفعات در دید بودن ماهواره از ایستگاه‌های زمینی را طی بازه ۲۴ ساعته ثبت کرده‌اند، مورد شناسایی و تحلیل قرار گرفتند. این شناسایی بر پایه نمونه‌برداری در فضای پیوسته پارامترهای مداری انجام شده است، به گونه‌ای که تمام ترکیبات ممکن در محدوده تعریف‌شده به‌طور یکنواخت پوشش داده شده‌اند. پارامترهای مداری متناظر با این سناریوها شامل نیم‌قطر بزرگ، میل مداری، صعود راست از گره صعودی، آرگومان حضیض، ناسانی میانگین و خروج از مرکز می‌باشند (جدول ۳ الی ۷).

جدول ۳- سناریو برتر (ایستگاه زمینی ۱).

Table 3. Best-case scenario parameters (Ground Station 1).

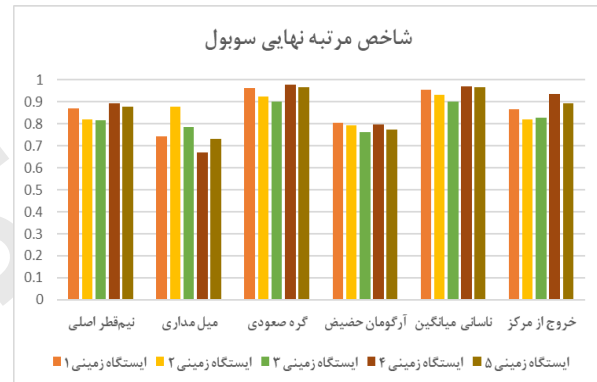
Parameter	Value
Semi-major axis (km)	7324.21
Orbital inclination (degrees)	58.45
RAAN (degrees)	67.77
Argument of perigee (degrees)	44.35
Mean anomaly (degrees)	243.64
Eccentricity	0.0552
Maximum pass	9

جدول ۴- سناریو برتر (ایستگاه زمینی ۲).

Table 4. Best-case scenario parameters (Ground Station 2).

Parameter	Value
Semi-major axis (km)	7884.27
Orbital inclination (degrees)	55.04
RAAN (degrees)	68.72
Argument of perigee (degrees)	12.47
Mean anomaly (degrees)	285.99
Eccentricity	0.0915
Maximum pass	9

سایر متغیرهاست. حتی میل مداری، که در برخی ایستگاه‌ها در شاخص مرتبه اول بیشترین اثر مستقل را داشت، در این بخش در برخی موارد شاخصی کمتر از سایر پارامترها داشته (در حدود ۰/۷ تا ۰/۹) اما همچنان دارای تأثیر ترکیبی قابل توجهی بوده است. شکل ۱۴، تغییرات شاخص مرتبه نهایی سوپول در ایستگاه‌های زمینی مشخص شده را نمایش می‌دهد.



شکل ۱۴- تغییرات شاخص نهایی سوپول در هر ایستگاه زمینی.

Fig. 14. Variation of total Sobol indices of orbital parameters across ground stations.

نتایج حاصل از شاخص کل سوپول برای پارامترهای مداری در پنج ایستگاه زمینی منتخب در ایران در شکل ۱۴ نمایش داده شده است. این شاخص که هم اثرات مستقیم و هم تعاملات هر پارامتر با سایر متغیرها را در نظر می‌گیرد، دیدی جامع از حساسیت مدل نسبت به ورودی‌ها ارائه می‌دهد. همان‌طور که در نمودار مشاهده می‌شود، پارامترهای صعود راست از گره صعودی، ناسانی میانگین و آرگومان حضیض در تمامی ایستگاه‌ها دارای بالاترین مقدار شاخص کل هستند و عمدتاً شاخص‌هایی بیش از ۰/۹ را ثبت کرده‌اند. این موضوع نشان‌دهنده نقش برجسته‌ی این پارامترها در تعاملات پیچیده با سایر متغیرهاست؛ به‌ویژه در شرایطی که اثرات مستقل آن‌ها (در شاخص مرتبه اول) محدود بود. در مقابل، میل مداری که در شاخص مرتبه اول بیشترین سهم را در بسیاری از ایستگاه‌ها به‌خود اختصاص داده بود، در شاخص کل نیز همچنان مقدار بالایی دارد (در بازه‌ی ۰/۷ تا ۰/۹) اما نسبت به برخی دیگر از پارامترها اندکی پایین‌تر قرار گرفته است. این کاهش نسبی به‌روشنی نشان می‌دهد که میل مداری بیشتر اثر مستقیم دارد تا تعاملی. خروج از مرکز و نیم‌قطر بزرگ نیز در تمامی ایستگاه‌ها دارای مقادیر شاخص کل بالاتر از ۰/۸ هستند که نشان‌دهنده اثرات غیرمستقیم و ترکیبی مهم آن‌ها در تعیین تعداد گذرهاست؛ حتی در حالی که در شاخص مرتبه اول اثر ناچیزی داشتند. در مجموع، تحلیل شاخص کل سوپول تأکید می‌کند که برای طراحی

جدول ۵- سناریو برتر (ایستگاه زمینی ۳).

Table 5. Best-case scenario parameters (Ground Station 3).

Parameter	Value
Semi-major axis (km)	7298.74
Orbital inclination (degrees)	40.42
RAAN (degrees)	57.75
Argument of perigee (degrees)	233.53
Mean anomaly (degrees)	115.74
Eccentricity	0.047
Maximum pass	9

جدول ۶- سناریو برتر (ایستگاه زمینی ۴).

Table 6. Best-case scenario parameters (Ground Station 4).

Parameter	Value
Semi-major axis (km)	8063.92
Orbital inclination (degrees)	57.91
RAAN (degrees)	125.55
Argument of perigee (degrees)	353.64
Mean anomaly (degrees)	266.61
Eccentricity	0.0028
Maximum pass	9

جدول ۷- سناریو برتر (ایستگاه زمینی ۵).

Table 7. Best-case scenario parameters (Ground Station 5).

Parameter	Value
Semi-major axis (km)	7520.11
Orbital inclination (degrees)	59.73
RAAN (degrees)	109.93
Argument of perigee (degrees)	318.45
Mean anomaly (degrees)	306.53
Eccentricity	0.02
Maximum pass	9

مطابق نتایج جداول ۳ تا ۷، در تمامی ایستگاه‌های پنج‌گانه، حداکثر تعداد گذر ثبت‌شده برابر با ۹ مرتبه بوده است. پارامترهای مداری متناظر با این سناریوها، تنوعی از ویژگی‌های هندسی مختلف را نشان می‌دهند.

به‌عنوان نمونه، سناریوی ایستگاه ۲ دارای مداری با نیم‌قطر حدود ۷۸۸۴ کیلومتر، میل مداری ۵۵/۰۴ درجه و خروج از مرکز نسبتاً بالا (۰/۰۹۱۵) است، در حالی که ایستگاه ۳ با میل مداری پایین‌تر (۴۰/۴۲ درجه) و خروج از مرکز ۰/۰۴۷، توانسته است عملکرد مشابهی داشته باشد. در ایستگاه ۴، مدار تقریباً دایروی بوده و خروج از مرکز آن به حدود ۰/۰۰۲۸ کاهش یافته است. همچنین، سناریوی ایستگاه ۱ با میل مداری ۵۸/۴۵ درجه و خروج از مرکز ۰/۰۵۵۲ و ایستگاه ۵ با میل ۵۹/۷۳ درجه و خروج از مرکز ۰/۰۲ نیز عملکرد خوبی در پوشش زمینی از خود نشان داده‌اند. این نتایج بیانگر آن هستند که اگرچه میل مداری در بازه تقریبی ۴۰ تا ۶۰ درجه، اثر تعیین‌کننده‌ای در رُویت‌پذیری دارد، اما سایر پارامترها نظیر گره صعودی، آرگومان حضیض و ناسانی میانگین نیز در ترکیب با خروج از مرکز و نیم‌قطر اصلی می‌توانند به نحو موثری بر افزایش تعداد عبورها اثر بگذارند.

نتیجه‌گیری

تحلیل تأثیر پارامترهای مداری بر عملکرد پوشش زمینی ماهواره‌ها نشان داد که تنظیم دقیق این پارامترها می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی تعداد دفعات رُویت‌پذیری از ایستگاه‌های زمینی را افزایش دهد. استفاده از تحلیل حساسیت جهانی سوپول، امکان تفکیک اثرات مستقل و تعاملی هر پارامتر ورودی را فراهم کرد. نتایج حاصل از شاخص‌های مرتبه اول نشان دادند که میل مداری در اغلب ایستگاه‌ها بیشترین تأثیر مستقل را دارد (با شاخص‌هایی تا حدود ۰/۴۵)، در حالی که پارامترهایی مانند آرگومان حضیض و ناسانی میانگین در برخی ایستگاه‌ها نقش مؤثری ایفا کرده‌اند.

از سوی دیگر، بررسی شاخص‌های کل سوپول نشان داد که تقریباً تمامی پارامترها، حتی آن‌هایی که در تحلیل مرتبه اول نقش کم‌رنگی داشتند، مانند گره صعودی یا خروج از مرکز، دارای اثرات تعاملی چشم‌گیر با سایر متغیرها هستند و شاخص‌هایی فراتر از ۰/۸ را ثبت کرده‌اند. این موضوع ضرورت توجه به برهم‌کنش‌های غیرخطی میان پارامترها در طراحی‌های مداری را نشان می‌دهد. این یافته نشان می‌دهد که در طراحی‌های مداری، صرفاً تمرکز بر اثرات مستقل کافی نیست و برهم‌کنش‌های غیرخطی میان پارامترها نقشی تعیین‌کننده در بهینه‌سازی پوشش زمینی ایفا می‌کنند.

همچنین بررسی سناریوهای برتر در هر ایستگاه نشان داد که مدارهای موفق دارای ترکیب‌های متفاوتی از پارامترها هستند. به‌عنوان مثال، در ایستگاه ۴ با خروج از مرکز بسیار پایین (۰/۰۰۲۸) و در ایستگاه ۲ با خروج از مرکز حدود ۰/۰۹، هر دو توانسته‌اند بیشترین تعداد عبور (۹ بار) را ثبت کنند. این موضوع نشان می‌دهد که مدارهای دایروی و بیضوی هر دو می‌توانند در صورت تنظیم مناسب سایر پارامترها، کارایی

- C. Rocken, "GNSS radio occultation technique and space weather monitoring," in *26th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2013)*, Nashville, TN, 2013, pp. 2508–2522.
- [6] H. S. Choi *et al.*, "Analysis of GEO spacecraft anomalies: Space weather relationships," *Space Weather*, vol. 9, no. 6, 2011, Art. no. 597, <https://doi.org/10.1029/2010SW000597>.
- [7] M. Nowakowski, E. Dudek, and A. Rosiński, "The influence of varying atmospheric and space weather conditions on the accuracy of position determination," *Sensors*, vol. 23, no. 5, 2023, Art. no. 2814, <https://doi.org/10.3390/s23052814>.
- [8] J. Gross and S. Rudolph "Rule-based spacecraft design space exploration and sensitivity analysis," *Aerospace Science and Technology*, vol. 59, pp. 162–171, 2016, <https://doi.org/10.1016/j.ast.2016.10.007>.
- [9] R. Reynolds, P. Eichler, A. Bade, P. Krisko, and N. Johnson, "Sensitivity analysis of the orbital debris environment using the evolve 4.0 model," *Advances in Space Research*, vol. 23, no. 1, pp. 175–185, 1999, [https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(99\)00002-2](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(99)00002-2).
- [10] L. Dell'Elce and G. Kerschen, "Probabilistic assessment of lifetime of low-earth-orbit spacecraft: Uncertainty propagation and sensitivity analysis," *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, vol. 38, no. 5, pp. 886–899, 2015, <https://doi.org/10.2514/1.G000149>.
- [11] C. Chen, S. D. Huang, G. Z. Cao, G. Jing, and L. Yan, "Thrust force ripple analysis of linear switched reluctance motors using Sobol sensitivity analysis method," in *13th International Symposium on Linear Drives for Industry Applications (LDIA)*, Wuhan, China, 2025, <https://doi.org/10.1109/LDIA49489.2021.9505782>.
- [12] D. Q. Hu, R. Q. Chi, Y. Y. Liu, and B. J. Pang, "Sensitivity analysis of spacecraft in micrometeoroids and orbital debris environment based on panel method," *Defence Technology*, vol. 19, pp. 126–142, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.dt.2021.11.001>.
- [13] G. L. Somma, H. G. Lewis, and C. Colombo, "Sensitivity analysis of launch activities in low earth orbit," *Acta Astronautica*, vol. 158, pp. 129–139, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2018.05.043>.
- [14] R. Teja Nallapu and J. Thangavelautham, "Design and sensitivity analysis of spacecraft swarms for planetary moon reconnaissance through co-orbits," *Acta Astronautica*, vol. 178, pp. 854–869, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2020.10.008>.
- [15] I. Morgan Jones and P. Loskot, "Regional coverage analysis of leo satellites with kepler orbits," *arXiv*, 2019, <https://doi.org/10.48550/arXiv.1910.10704>.
- [16] C. Qin, Y. Gao, and Y. Wang "The optimization of low Earth orbit satellite constellation visibility with genetic algorithm for improved navigation potential,"

بالایی در پوشش زمینی داشته باشند.
این یافته‌ها می‌توانند به‌عنوان مبنایی علمی برای طراحی بهینه منظومه‌های ماهواره‌ای مورد استفاده قرار گیرند و با افزایش تعداد دفعات عبور ماهواره از ایستگاه‌های زمینی، به ارتقای پوشش زمانی، بهبود وضوح داده‌ها و افزایش دقت در پایش و تحلیل پدیده‌های اقلیم فضا کمک کنند؛ موضوعی که در تصمیم‌سازی‌های مرتبط با پیش‌بینی مخاطرات فضایی و حفاظت از زیرساخت‌های حیاتی زمین نقش کلیدی ایفا می‌کند.
پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آینده، اثر اغتشاشات مداری از جمله نامتقارن بودن میدان گرانشی زمین، فشار تابشی خورشید و درگ جوی نیز در مدل وارد شود تا پایداری و دقت نتایج در شرایط واقعی‌تر بررسی گردد. علاوه بر این، توسعه‌ی چارچوب حاضر برای تحلیل چندماهواره‌ای و بررسی تعامل پارامترهای مداری در پیکربندی‌های منظومه‌ای (به‌ویژه در مأموریت‌های تصویربرداری و رصد اقلیم فضا) می‌تواند مسیر تازه‌ای برای بهینه‌سازی آرایش مداری و زمان‌بندی عبور ماهواره فراهم آورد. در نهایت، ترکیب روش تحلیل حساسیت سوبول با الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه، می‌تواند رویکردی کارآمد برای طراحی خودکار مدارهای مأموریت‌محور با هدف بیشینه‌سازی پوشش زمانی و مکانی باشد.

تعارض منافع

هیچگونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

مراجع

- [1] H. Tabatabaei and M. Mashhadi Hossainali, "Evaluation of electron density measurements of Swarm and CSES satellites for using in ionospheric studies," *Journal of Geospatial Information Technology*, vol. 11, no. 3, pp. 1–19, 2023, (in Persian), <https://doi.org/10.61186/jgit.11.3.1>.
- [2] "Swarm (Geomagnetic LEO Constellation)." Last updated: (2024, May, 02). [Online]. Available: <https://www.eoportal.org/satellite-missions/swarm#0.1.FDCNPZ.3WQ32K.TRGIWM.X>
- [3] A. Caspi *et al.*, "Small satellite mission concepts for space weather research and as pathfinders for operations," *Space Weather*, vol. 20, no. 2, 2022, Art. no. e2020SW002554, <https://doi.org/10.1029/2020SW002554>.
- [4] O. P. Verkhoglyadova *et al.*, "Addressing gaps in space weather operations and understanding with small satellites," *Space Weather*, vol. 19, no. 3, 2021, Art. no. e2020SW002566, <https://doi.org/10.1029/2020SW002566>.
- [5] X. Yue, W. S. Schreiner, Y. H. Kuo, D. C. Hunt, and

National Conference on Computational and Experimental Mechanics, Tehran, Iran, 2023, (in Persian).

- [19] A. Saltelli, "Making best use of model evaluations to compute sensitivity indices," *Computer Physics Communications*, vol. 145, no. 2, pp. 280–297, 2002, [https://doi.org/10.1016/S0010-4655\(02\)00280-1](https://doi.org/10.1016/S0010-4655(02)00280-1).
- [20] H. D. Curtis, *Orbital Mechanics for Engineering Students: Revised Reprint*. 4rd ed. Butterworth Heinemann, 2020.

Scientific Reports, vol. 15, 2025, Art. no. 30798, <https://doi.org/10.1038/s41598-025-16815-7>.

- [17] M. Khoshsima, S. Aminabadi, H. Jalili, and S. karami, "Selection of satellite constellations with space weather monitoring payloads for Iran," *Space Science, Technology and Applications*, 2025, (in Persian), <https://doi.org/10.22034/jssta.2024.464398.1192>.
- [18] M. Haji Jafari, S. Aminabadi, M. Mokari Qahrudi, A. H. Mohammadi, and R. Ahmadpur Rahkalai, "Developing a Tool for simulating the number of satellite passages in LEO circular orbits," in *5th*

Article in Press