

10.22034/jssta.2026.505054.1230

Article Info

Accepted: 2025-09-15

Keywords

Gravity waves, Transverse ionospheric disturbances, artificial heating system, satellite, Total Electron Content

How to Cite this article

M. R. Kardgar, A. H. Rabcie,
“Observing gravity waves
due to artificial heating
system”, *Journal of Space*
Science, Technology &
***Applications*, Vol. 5, No. 2,**
pp. 136-143, 2026.

Mohammad Reza Kardgar^{1*}, Amir Hossein Rabiei²

¹ *Student (PhD), Nuclear Physics, Faculty of Physics, Imam Hossein University (IHU), Tehran, Iran.
mmrezakardgar@gmail.com

² PhD student, Optics and Laser, Faculty of Physics, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.
Rabiei95amir@gmail.com

Abstract

In this article, the measurement of changes in the total electron content of the Earth's ionosphere along the path of the GPS satellite signal due to the effects of the SURA artificial heating system on 15/03/2010 is described. A decrease in the values of Total Electron Content (TEC) is related to sunset and twilight region. But a different behavior is observed in the trend of TEC data. The experimental data obtained from two stations MDVJ and ARTU were examined. The results show that Traveling Ionospheric Disturbances (TID) and Gravity Waves (GW) are also propagated in long distances, and their intensity is greater in the east of the heating system than in the west. Also, the range of the waves or disturbances propagated is about 0.25 TEC. The type of waves that are emitted are gravity waves. These waves were observed in the fourth and fifth harmonic of the heating period.

مشاهده امواج گرانشی در اثر سامانه گرمایش مصنوعی

محمد رضا کاردگر*^۱ و امیر حسین ربیعی^۲

^۱- دانشجوی دکتری، فیزیک هسته ای، دانشکده فیزیک، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران-

mmrezakardgar@gmail.com

^۲- دانشجوی دکتری، اپتیک و لیزر، دانشکده فیزیک، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران-

Rabiei95amir@gmail.com

* نویسنده مسئول

چکیده

در این مقاله اندازه‌گیری تغییرات در محتوای کل الکترون یون‌سپهر زمین در امتداد مسیر انتشار سیگنال ماهواره GPS ناشی از تأثیرات سامانه گرمایش مصنوعی SURA در تاریخ ۲۰۱۰/۰۳/۱۵ شرح داده شده است. کاهش در مقادیر محتوای کل الکترون (TEC) با غروب خورشیدی و ناحیه گرگومیش مرتبط است، اما رفتاری متفاوت در روند تغییرات داده‌های TEC، مشاهده می‌شود. در این پژوهش داده‌های تجربی حاصل از دو ایستگاه گیرنده منظومه‌های ماهواره‌ای MDVJ و ARTU مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد اختلالات یون‌سپهری متحرک (TID) و امواج گرانشی (GW) در فواصل دور نیز منتشر می‌شوند و شدت آن‌ها در شرق سامانه گرمایش بیشتر از غرب آن است. همچنین دامنه تغییرات امواج یا اختلالات منتشرشده در حدود ۰/۲۵ TEC است. در پژوهش حاضر، بر اساس دوره تناوب امواج نشان داده شده است که جنس امواجی که منتشر می‌شوند از نوع امواج گرانشی است. این امواج در هماهنگی‌های چهارم و پنجم دوره تناوب گرمایش مشاهده شده‌اند.

دسترس‌پذیر در نشانی:

Journal.isrc.ac.ir

دوفصلنامه علوم، فناوری و

کاربردهای فضایی

سال پنجم، شماره ۲، صفحه ۱۴۳-۱۳۶

پاییز و زمستان ۱۴۰۴

DOI:

10.22034/jssta.2026.505054.1230

تاریخچه داوری

دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۲۰

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۲۴

واژه‌های کلیدی

امواج گرانشی، محتوای کلی الکترون، اختلالات یونسفری متحرک، سامانه گرمایش مصنوعی، ماهواره، محتوای الکترون کل

نحوه استناد به این مقاله

محمد رضا کاردگر و امیر حسین ربیعی، "مشاهده امواج گرانشی در اثر سامانه گرمایش مصنوعی"، دوفصلنامه علوم، فناوری و کاربردهای فضایی، جلد پنجم، شماره دوم، صفحات ۱۴۳-۱۴۰۴، ۱۳۶.

۱- مقدمه

صنعت فضایی به عنوان یکی از ارکان اساسی پیشرفت‌های علمی و فناوری در عصر حاضر، نقش تعیین‌کننده‌ای در ارتباطات جهانی، ناوبری دقیق، سنجش‌ازدور و اکتشافات فضایی ایفا می‌کند. با این حال، عملکرد بهینه سیستم‌های فضایی به شدت تحت تأثیر پدیده‌های دینامیک یون‌سپهری قرار دارد که از جمله مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به: امواج گرانشی^۱، اختلالات یونوسفری متحرک^۲ (TID) و محتوی الکترونی کل^۳ (TEC) اشاره کرد.

محتوای کل الکترون یکی از پارامترهای مهم یون‌سپهر است که به صورت گسترده در مطالعات فضایی و فناوری‌های مرتبط با سیستم‌های ناوبری ماهواره‌ای جهانی^۴ (GNSS) کاربرد دارد. TEC نشان‌دهنده تعداد کل الکترون‌های آزاد در ستون عمودی یون‌سپهر است و تأثیر قابل توجهی بر روی انتشار سیگنال‌های رادیویی و دقت موقعیت‌یابی GNSS دارد. استفاده از داده‌های GNSS برای اندازه‌گیری و پایش TEC امکان‌پذیر شده است که این امر باعث بهبود درک ما از پدیده‌های یون‌سپهر و فضای جوی اطراف زمین شده است و کاربردهای متعددی در بهینه‌سازی عملکرد سیستم‌های فضایی و افزایش پایداری ارتباطات ماهواره‌ای دارد [۱].

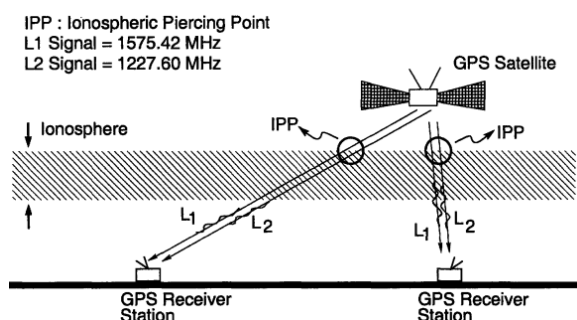
مطالعات متعددی نشان می‌دهند که پایش دقیق TEC با بهره‌گیری از شبکه‌های گسترده GNSS قادر است اختلالات ناشی از یون‌سپهر را کنترل کند، خطرات مرتبط با آب‌وهوای فضایی را کاهش می‌دهد و ایمنی قابل توجهی در زمینه ناوبری، ارتباطات و ایمنی مأموریت‌های فضایی به وجود آورد [۲، ۳].

تحقیقات نظری و تجربی اخیر در مورد پدیده‌های غیرخطی که هنگام انتشار یک موج رادیویی قدرتمند در یون‌سپهر به وجود می‌آیند را بررسی می‌کند. رزونانس هیبرید بالا باعث ایجاد امواج پلاسمای هیبرید بالا و پایین قوی و همچنین سبب بی‌نظمی‌های یون‌سپهری می‌شود و انتشار رادیویی یون‌سپهر مصنوعی را القا می‌کند. یک موج الکترومغناطیسی با حالت O که به صورت عمودی به پلاسمای ناحیه F یون‌سپهر منتقل می‌شود، طیف وسیعی از فرآیندهای پلاسمای را تحریک می‌کند که منجر به ظهور آشفتگی مصنوعی یون‌سپهری می‌شود، به عنوان مثال، هنگامی که فرکانس هیبریدی بالایی نزدیک به مضرری از فرکانس ژئرومغناطیسی الکترونی است، امواج پلاسمای و امواج صوتی یونی برانگیخته می‌شوند، الکترون‌ها به طور مؤثر شتاب می‌گیرند و درخششی

مصنوعی از یون‌سپهر ظاهر می‌شود، تولید حالت‌های مختلف پلاسمای HF و LF، ناهمگنی‌های چگالی پلاسمای در مقیاس از ده‌ها سانتی‌متر تا کیلومترها، افزایش دمای الکترون، شتاب و یونیزاسیون الکترون و ... ایجاد می‌شود [۴-۶].

بی‌نظمی در مقیاس بزرگ با مقیاس ۵-۵۰ کیلومتر را می‌توان به طور مؤثر با استفاده از سیگنال‌های فرکانس دوگانه منظومه‌های ماهواره‌ای نظیر GPS یا GLONASS مطالعه کرد. انتشار در ناحیه گرم شده، چنین سیگنال‌هایی افزایش فاز اضافی در مسیر حرکت موج سبب می‌شود که توسط پراکندگی امواج رادیویی در پلاسمای یون‌سپهر تعیین شده و با محتوای کل الکترون (TEC) مرتبط است [۷، ۸].

امواج رادیویی از منظومه ماهواره‌ای GPS که برای اندازه‌گیری TEC استفاده می‌شوند، سیگنال‌های L1 و L2 هستند، این فرکانس‌های حامل به ترتیب ۱۵۷۵.۴۲ مگاهرتز و ۱۲۲۷.۶۰ مگاهرتز است. ایستگاه‌های گیرنده GPS روی زمین این سیگنال‌ها را شناسایی می‌کند و اختلاف فاز و راه بین این دو موج را مقایسه می‌کنند. شکل ۱. به بررسی شماتیک این مبحث می‌پردازد [۹].



شکل (۱): ساختار اندازه‌گیری محتوای الکترون کل (TEC) توسط ماهواره و ایستگاه‌های زمینی

ارتباط بین مؤلفه‌های TEC بدین صورت است:

$$VTEC = STEC \cdot \cos X \quad (۱)$$

که در آن پارامتر VTEC مؤلفه عمودی پارامتر STEC است و پارامتر X زاویه سمتی ماهواره با ایستگاه زمینی است. محتوای الکترون کل (TEC) تعداد کل الکترون‌های موجود در طول مسیر بین فرستنده و گیرنده رادیویی است. امواج رادیویی تحت تأثیر حضور الکترون‌ها قرار می‌گیرند. هر چه تعداد الکترون‌ها در مسیر موج رادیویی بیشتر باشد، سیگنال رادیویی بیشتر تحت تأثیر قرار می‌گیرد. TEC برحسب الکترون بر مترمربع اندازه‌گیری می‌شود.

³ Total Electron Content

⁴ Global Navigation Satellite System

¹ Gravity Waves

² Traveling Ionospheric Disturbances

ماهواره در هر زمان مقادیر زاویه سمتی و ارتفاعی^۹، مکان نقطه تقاطع یون‌سپهری^{۱۱}، مقادیر STEC، VTEC به دست خواهد آمد [۱۰].

توان تابشی مؤثر سامانه گرمایش مصنوعی در فرکانس‌های انتخاب شده بسته به تعداد فرستنده‌ها و بخش‌های آنتن درگیر در آزمایش‌ها و فرکانس عملیاتی در بازه ۶۵-۱۵۰ مگاهرتز بود. داده‌ها مورد بررسی توسط ایستگاه‌های Vasilsursk، Zelenodolsk، Kazan در سال‌های ۲۰۱۵ و ۲۰۱۷ توسط آقای Kogogin و Nasyrov و دیگر همکاران مورد بررسی قرار گرفته است [۵، ۶]. ایستگاه Vasilsursk در موقعیت جغرافیایی 46.50E 56.08N و ایستگاه Zelenodolsk در موقعیت جغرافیایی 55.52N، 48.33E ایستگاه Kazan در موقعیت جغرافیایی 55.48N، 49.08E قرار دارد. فاصله بین ایستگاه Vasilsursk و Zelenodolsk در حدود ۱۶۰ کیلومتر است و فاصله بین ایستگاه Kazan و Vasilsursk در حدود ۲۰۰ کیلومتر است. همان‌طور که از **Error! Reference source not found.** مشاهده می‌شود ایستگاه‌های مورد بررسی توسط Kogogin و Nasyrov با رنگ نارنجی نشان داده شده است. ایستگاه‌های مورد بررسی این مقاله با رنگ سیاه شامل دو ایستگاه است. ایستگاه اول Mendeleev در غرب مسکو با نام اختصاری (MDVJ) در 37.21 E درجه و 56.02 N درجه قرار دارد و ایستگاه دوم Arti با نام اختصاری (ARTI) در 56.42N و 58.56E قرار دارد. فاصله بین دو ایستگاه MDVJ و ARTI در حدود ۱۵۰۰ کیلومتر است. این ایستگاه‌ها بدین دلیل انتخاب شده است که به صورت رایگان در دسترس عموم قرار گرفته شده و دیگر اینکه نشان دهد، قابلیت مشاهده اثرات سامانه گرمایشی از فواصل دور وجود دارد. فاصله بین ایستگاه MDVJ و مرکز گرمایش مصنوعی در حدود ۶۰۰ کیلومتر است و فاصله بین ایستگاه ARTI و مرکز گرمایش مصنوعی در حدود ۸۵۰ کیلومتر است.

ماهواره‌های مورد بررسی در این تحقیق G08، G28 از منظومه ماهواره‌ای GPS است. رد زمینی ماهواره‌ها در نقطه تقاطع یون‌سپهری در شکل ۲ نشان داده شده است که از اطراف ایستگاه‌های گیرنده اطلاعات منظومه ماهواره‌ای عبور می‌کنند.

($1 \text{ TEC Unit TECU} = 10^{16} \text{ electrons/m}^2$) مقادیر TEC عمودی در یون‌سپهر زمین می‌تواند از یک تا چند ده TECU متغیر باشد.

در ادامه به بررسی تأثیر سامانه گرمایشی SURA در ایجاد امواج گرانشی و اختلالات متحرک یونسفری پرداخته خواهد شد.

۲- روش تحقیق

سامانه SURA یکی از پیشرفته‌ترین سامانه‌های گرمایش مصنوعی یون‌سپهر است که در آزمایشگاه مؤسسه تحقیقات علمی رادیوفیزیکی^۵ در نیژنی نوگورود روسیه واقع شده است. این سامانه با استفاده از فرستنده‌های پرتوان امواج کوتاه، قادر به تابش یون‌سپهر و ایجاد تحریک‌های کنترل‌شده در لایه‌های بالای جو زمین است. در آزمایش‌های مختلف اندازه‌گیری که بین سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۳ انجام شده‌اند، تابش یون‌سپهر با استفاده از امواج قطبیده و تنظیم‌شده به سمت الراس، یا با انحراف ۱۲ درجه به سمت جنوب در راستای نصف‌النهار مغناطیسی زمین صورت گرفته است [۵، ۶]. این توانمندی‌ها به محققان امکان می‌دهد تا فرآیندهای پیچیده انتقال انرژی و پویایی پلاسما در یون‌سپهر را مطالعه کرده و اثرات آن بر سیستم‌های فضایی و ارتباطی را بررسی کنند. در این مقاله به بررسی داده‌های حاصل از گرمایش مصنوعی، آزمایش سامانه SURA، در تاریخ ۲۰۱۰/۰۳/۱۵ پرداخته می‌شود. روش تحقیق بدین صورت است که در ابتدا خروجی نهایی یک گیرنده ناوبری که شامل فایل خام دانلود می‌شود و به فایل مشاهده و ناوبری^۶ تبدیل می‌شود. فرمت این داده به صورت RINEX^۷ است و آن یک فرمت تبادل داده برای داده‌های خام سیستم ناوبری ماهواره‌ای است. RINEX برای داده‌های GNSS دریافت، بایگانی و توسط CDDIS^۸ ناسا ارائه می‌شود. با دانلود این اطلاعات از سایت CDDIS می‌توان به این داده‌ها دسترسی پیدا کرد.^۹

با استفاده از فایل‌های مشاهده و ناوبری و بایاس ارائه شده توسط CDDIS و با استفاده از الگوریتم ارائه شده جهت محاسبه مقادیر TEC توسط آقای Seemala و نرم‌افزار ارائه شده توسط آن‌ها فرمتی از داده به دست خواهد آمد که در آن، به ازای هر

^۹ <https://cddis.nasa.gov/archive/gnss/data/daily/>

^{۱۰} Azimuth and Elevation Angle

^{۱۱} Ionospheric Pierce Point

^۵ NIRFI

^۶ Observation and navigation

^۷ Receiver Independent Exchange Format

^۸ Crustal Dynamics Data Information System



شکل (۲): نقشه به همراه مسیر حرکت ماهواره و ایستگاه‌های اندازه‌گیری و ناحیه گرمایش سامانه گرمایش SURA، خط سیاه مسیر حرکت ماهواره G8 و خط آبی ماهواره مسیر حرکت G28

خورشید میزان TEC کمتری را مشاهده کند. با مقایسه پیشینه نمودارهای شکل ۳ این نکته کاملاً مشهود است؛ اما شاهد رفتاری متفاوت در روند این تغییرات مشاهده می‌شود.

در ایستگاه ARTU، ماهواره G08 طلوع خود را در میانه زمان گرمایش شروع می‌کند و اولین اثرات ناشی از گرمایش، به صورت موج در ساعت ۱۷/۸ مشاهده می‌گردد و برخلاف روند طبیعی، داده‌های TEC افزایش می‌یابد. ماهواره G28 پس از خاموش شدن سامانه گرمایشی طلوع کرده و از نقطه‌ای که ماهواره G28 ناهنجاری‌های گرمایش را گذارش کرده عبور می‌کند این ماهواره نیز در زمان ۱۹/۰ ناهنجاری‌های افزایشی را مشاهده می‌کند و برخلاف روند طبیعی محیط محتوای کلی الکترون با شدت کمتری نسبت به موج اولیه افزایش می‌یابد. از مقایسه میزان افزایش TEC در نقاط ناهنجاری و دوره تناوب امواج مشاهده‌شده در زمان ۱۷/۸ و ۱۹/۰ تأیید می‌شود که همانگ‌های مرتبه بالاتر امواج گرانشی توانایی اختلالات کمتری را دارند.

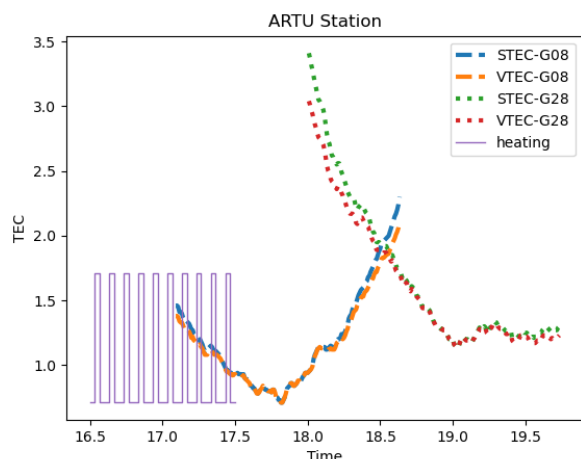
با توجه به شکل ۴، دامنه تغییرات این ایستگاه در حدود ۰/۲۵ TEC و در ایستگاه دیگر در نهایت به مقدار ۰/۱۷۵ TEC می‌رسد؛ بنابراین به‌طور کلی نتیجه گرفته می‌شود که شدت امواج گرانشی یا اختلالات یون‌سپهری متحرک در راستای شرق بیشتر از راستای غرب بوده است [۱۱].

شکل ۴ به بررسی داده‌های VTEC برای دو ماهواره G08 و G28 در دو ایستگاه MDVJ و ARTU در زمان حضور هر ماهواره در اطراف ایستگاه می‌پردازد. این نمودارها از تفاضل مقدار VTEC مشاهده‌شده از رگرسیون مرتبه ۳ آن به دست می‌آید. در نتیجه

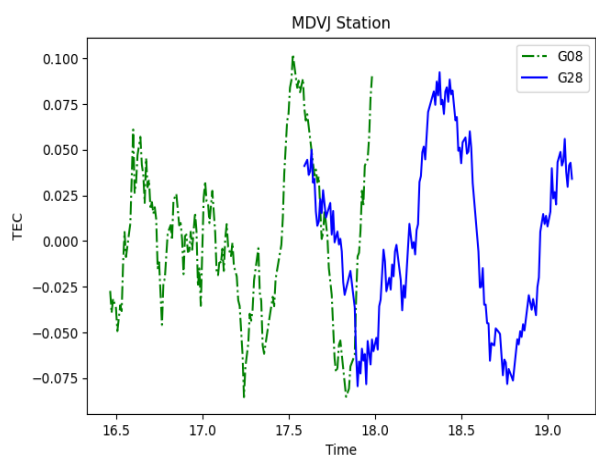
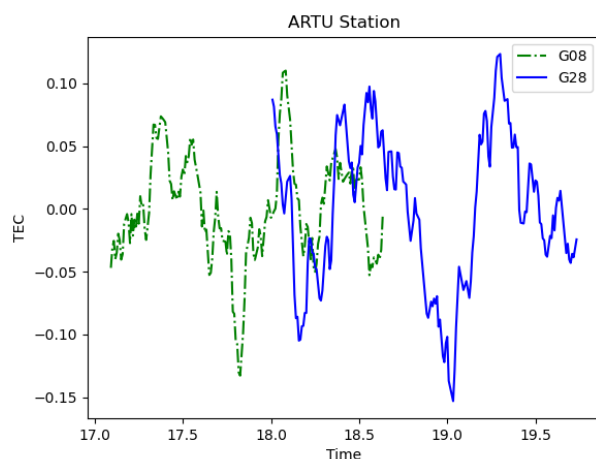
۳- بحث و نتیجه‌گیری

برای مشاهده اثرات ناشی از ناشی از سامانه گرمایش مصنوعی SURA در این مقاله از دو ایستگاه استفاده شد. تا در فواصل دورتر اثرات آن‌ها را چه به صورت اختلالات یون‌سپهری متحرک (TID) یا چه به صورت امواج گرانشی مورد بررسی قرار گیرد. سامانه گرمایش مصنوعی در فرکانس ۴/۳ MHz و در زمان ۱۶:۳۰ تا ۱۷:۳۰ با نرخ ۲ دقیقه روشن و ۴ دقیقه مکث با توان مؤثر تابش 120MW اعمال شده است. بدین ترتیب دوره تناوب گرمایشی ۶ دقیقه است. فضای مورد بررسی برای ایستگاه‌ها به صورت مربعی به طول و عرض ۴ درجه که ایستگاه در مرکز آن قرار دارد و زمان مورد بررسی از ساعت ۱۶:۰۰ تا ۲۰:۰۰ است.

نتایج حاصل از داده‌های تجربی در شکل ۳ و ۴ نشان داده شده است. در این شکل ماهواره‌ها براساس زمان حضور خود در اطراف ایستگاه ترسیم شده‌اند. در ایستگاه MDVJ ماهواره G08 حدود ۹۰ دقیقه زودتر از ماهواره G28 طلوع کرده است، بنابراین امکان اندازه‌گیری چگالی الکترون را در زمان اجرای فرایند گرمایش دارد. با توجه به سرعت اختلالات ناشی از گرمایش، تنها در بازه انتهایی ارتباط خود با ایستگاه، توانست مقدار کمی از ناهنجاری را مشاهده کند؛ اما ماهواره G28 در لحظه غروب خود به منطقه احتمالی عبور امواج اختلالی می‌رسد. به دلیل میرایی نوسانات و باز ترکیب پلاسمای یون‌سپهری در عمل هیچ‌گونه اثری از آن را مشاهده نمی‌شود. با توجه به اینکه ایستگاه ARTU، در شرق ایستگاه MDVJ قرار گرفته است، انتظار می‌رود نسبت به فاصله از زمان غروب



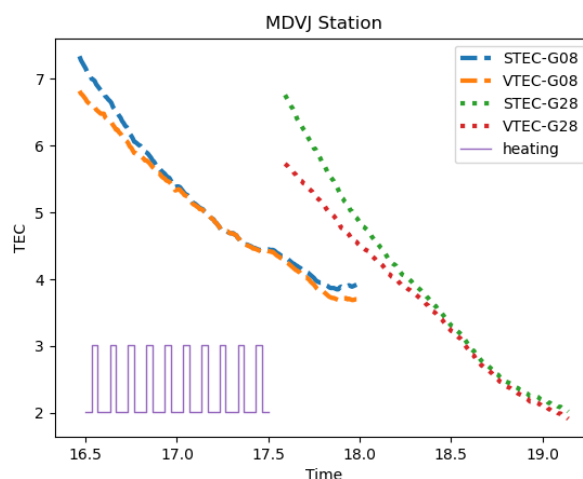
شکل (۳): داده‌های محتوای کلی الکترون برای دو ماهواره G08, G28 در ایستگاه MDVJ و ARTU به همراه زمان فعالیت سامانه گرمایش مصنوعی به صورت الگوی نوسانی



شکل ۱. منحنی تغییرات داده‌های STEC در گذر زمان برای ایستگاه‌های ARTU, MDVJ

می‌توان میزان تغییرات را برحسب زمان مشاهده کرد. نتایج نشان می‌دهد که دامنه تغییرات برای ایستگاه ARTU در حدود 0.25 TEC است که نصف خروجی‌های مشاهده‌شده در مقاله Kogogin و همکاران در ایستگاه Kazan است [۵]. این گزاره تأییدی است بر اینکه امواج گرانشی انرژی و دامنه خود را در حین انتشار از دست می‌دهند. نکته قابل توجه در این مقاله این است که در مقالات قبلی با استفاده از ایستگاه‌های نزدیک و غیرقابل دسترس عموم به اثبات امواج گرانشی ناشی از سامانه گرمایشی پرداخته‌اند درحالی‌که در این مقاله براساس ایستگاه‌های عمومی و در فواصل دورتر به اثبات این پدیده پرداخته است.

در ایستگاه ARTU دوره تناوب ناهنجاری اول و ناهنجاری دوم به ترتیب ۲۴ دقیقه و ۳۰ دقیقه اندازه‌گیری می‌شود. از طرفی دوره تناوب امواج، مقدار یکتایی را در هر ارتفاع به خود اختصاص می‌دهند. بدین ترتیب از کنار هم قرار دادن دوره تناوب اندازه‌گیری شده در ایستگاه ARTU با ارتفاعی که محتوای کلی الکترون محاسبه می‌گردد می‌توان نتیجه گرفت که امواج شناسایی شده در محدوده امواج گرانشی قرار می‌گیرند [۱۲]. بر اساس یافته‌های تجربی توسط آقای Chernogor و Frolov امواج گرانشی با هماهنگی‌های بالاتر دوره تناوب گرمایش، امکان ایجاد و انتشار دارند. ناهنجاری‌های مشاهده‌شده در این بررسی هماهنگ چهارم و پنجم دوره تناوب گرمایش است [۱۳].



۴- نتیجه‌گیری

سامانه گرمایش مصنوعی توانایی گرم کردن یون‌سپهر و تغییر چگالی و ایجاد پدیده‌هایی در آن را دارد با اعمال الگوریتم نوسانی بر روی موج گرمایشی می‌توان امواج گرانشی و اختلالات یونسفری متحرک در محیط ایجاد کرد. در این مقاله اثرات ناشی از سامانه گرمایشی مصنوعی SURA در تاریخ ۲۰۱۰/۰۳/۱۵ توسط ۲ ایستگاه MDVJ و ARTU پایش شد و نتایج آن با مقالات قبلی در این زمینه مورد مقایسه قرار گرفت. این بررسی‌ها نشان می‌دهد که سامانه فوق توانایی تولید امواج گرانشی بلند برد را دارد و می‌توان اثرات ناشی از سامانه گرمایشی را در فواصل بلند و با استفاده از ایستگاه‌های عمومی مشاهده و اثبات کرد. همچنین این مقاله نشان می‌دهد که میزان تأثیرات اختلالات یون‌سپهری در شرق سامانه گرمایش نسبت به غرب آن بیشتر است و امواج به‌صورت متقارن منتشر نمی‌شوند. دامنه نوسانات منتشرشده TEC ۰/۲۵ برآورد می‌شود. همچنین می‌توان بر اساس دوره تناوب امواج منتشرشده، نشان داد که امواج منتشرشده از جنس گرانشی هستند و در هماهنگی‌های چهارم و پنجم دوره تناوب گرمایش مشاهده شدند.

در این تحقیق، روشی برای مطالعه امواج گرانشی و اثبات فعالیت سامانه‌های گرمایش مصنوعی با استفاده از ایستگاه‌های عمومی ارائه شده است. این روش با بهره‌گیری از داده‌های قابل‌دسترس و تحلیل‌های پیشرفته، امکان رصد و تفسیر دقیق‌تر امواج گرانشی را فراهم می‌آورد. همچنین، این روش می‌تواند به‌عنوان ابزاری مؤثر برای تأیید فعالیت سامانه‌های گرمایش مصنوعی مورد استفاده قرار گیرد و به پژوهشگران فعال در این حوزه کمک شایانی نماید.

۵- پیشنهادها

برای ادامه بهتر براساس یافته‌ها و نتایج این تحقیق، پیشنهادهای زیر برای بهبود مطالعات آتی و کاربردهای عملی مطرح می‌شود:

- ارتقاء دقت اندازه‌گیری‌ها از طریق استفاده از فناوری‌های جدید GNSS و به‌کارگیری روش‌های پیشرفته پردازش داده‌ها که می‌تواند به کاهش خطاهای یون‌سپهر کمک کند.
- گسترش دامنه مطالعه براساس نحوه انتشار امواج در موقعیت‌های جغرافیایی مختلف

• توسعه مدل‌های پیش‌بینی یون‌سپهر بر پایه داده‌های لحظه‌ای RINEX برای بهبود کارایی سیستم‌های ناوبری و ارتباطات ماهواره‌ای.

• انجام مطالعات بیشتر درباره اثرات TID و امواج گرانشی بر روی TEC و تأثیرات آن بر کارکرد فناوری‌های فضایی، به‌منظور بهبود تصحیح‌های مربوطه در سیستم‌های GNSS.

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

تشکر و قدردانی

نویسندگان مراتب سپاس و قدردانی خود را از Gopi Krishna Seemala¹² به دلیل استفاده از نرم‌افزار GPS-TEC/Gopi مقالات مرتبط با این پژوهش ابراز می‌دارند. همچنین از مرکز Crustal Dynamics Data Information System (CDDIS) وابسته به NASA به دلیل فراهم‌سازی داده‌های ناوبری به صورت عمومی و مورد استفاده در این پژوهش صمیمانه قدردانی می‌شود.

مراجع

- [1] T. Tsugawa, M. Nishioka, M. Ishii, K. Hozumi, S. Saito, A. Shinbori, Y. Otsuka, A. Saito, S. Buhari, M. Abdullah, and P. Supnithi, "Total electron content observations by dense regional and worldwide international networks of GNSS," *Journal of Disaster Research*, vol. 13, no. 3, pp. 535-545, 2018.
- [2] C. Jiang, Q. An, S. Wang, W. Nie, H. Zhu, and G. Liu, "Accuracy assessment of the ionospheric total electron content derived from COSMIC-2 radio occultation based on multi-source data," *Advances in Space Research*, vol. 73, no. 10, pp. 5157-5170, 2024.
- [3] M. Ou, D. Fan, C. Wang, and L. He, "A simulation study of the Argo program-enhanced global ionospheric modeling," *Advances in Space Research*, vol. 73, no. 3, pp. 1865-1874, 2024.
- [4] A. V. Gurevich, "Nonlinear effects in the ionosphere," *Physics-Uspekhi*, vol. 50, no. 11, p. 1091, 2007.
- [5] I. Nasyrov, D. Kogogin, A. Shindin, S. Grach, and R. Zagretdinov, "The measurement of the ionospheric total content variations caused by a powerful radio emission of "Sura" facility on a network of GNSS-receivers," *Advances in Space Research*, vol. 57, no. 4, pp. 1015-1020, 2016.
- [6] D. Kogogin, I. Nasyrov, S. Grach, A. Shindin, and R. Zagretdinov, "Dynamics of large-scale ionospheric inhomogeneities caused by a powerful radio emission of the Sura facility from the data collected onto

- ground-based GNSS network," *Geomagnetism and Aeronomy*, vol. 57, no. 1, pp. 93-106, 2017.
- [7] E. Afraimovich and N. Perevalova, "GPS monitoring of the Earth's upper atmosphere," *Irkutsk: SC RRS SB RAMS*, vol. 480, 2006.
- [8] R. Pradipta, "Could global warming affect space weather?: case studies of intense ionospheric plasma turbulence associated with natural heat sources," Massachusetts Institute of Technology, 2007.
- [9] R. Pradipta, "Generation of acoustic-gravity waves in ionospheric HF heating experiments: simulating large-scale natural heat sources," *Ph. D. Thesis*, 2012.
- [10] G. K. Seemala, "Estimation of ionospheric total electron content (TEC) from GNSS observations," in *Atmospheric remote sensing*: Elsevier, 2023, pp. 63-84.
- [11] E. Andreeva *et al.*, "Radiotomography and HF ray tracing of the artificially disturbed ionosphere above the Sura heating facility," *Radio Science*, vol. 51, no. 6, pp. 638-644, 2016.
- [12] P. K. Knížová and Z. Mošna, "Acoustic-gravity waves in the ionosphere during solar eclipse events," *Acoustic Waves*, pp. 303-320, 2011.
- [13] L. Chernogor and V. Frolov, "Features of propagation of the acoustic-gravity waves generated by high-power periodic radiation," *Radiophysics and Quantum Electronics*, vol. 56, no. 4, pp. 197-215, 2013.