



تحلیل بی‌هنجاری‌های یونسفری در زمین‌لرزه‌ها با استفاده از شاخص میانگین و تبدیل فوریه زمان کوتاه

لیدا کوشکی^۱
بهزاد وثوقی^۲
سیدرضا غفاری رزین^۳

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۱۰/۱۳

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۸/۲۸

چکیده

پدیده زمین‌لرزه هر ساله در جهان و مخصوصاً کشور لرزه‌خیزی چون ایران، زیان‌های جانی و مالی هنگفتی به بار می‌آورد و پیش‌بینی زمین‌لرزه به یکی از چالش‌های بزرگ دانشمندان در دهه‌های اخیر تبدیل شده است. از جمله این پیش‌نشانگرها می‌توان به وقوع بی‌هنجاری در پارامترهای یونسفری قبل از زمین‌لرزه اشاره نمود. پارامتر مورد بررسی در این تحقیق محتوای الکترون کلی (TEC) است و مناطق مطالعاتی برای بررسی، زمین‌لرزه دوگانه اهر- ورزقان با بزرگای ۶/۵ و زمین‌لرزه سرپل ذهاب با بزرگای ۶/۳ است. در زمین‌لرزه اهر- ورزقان از مشاهدات شش ایستگاه GPS و در زمین‌لرزه سرپل ذهاب از مشاهدات پنج ایستگاه GPS شبکه جهانی IGS، به منظور محاسبه مقدار محتوای الکترون کلی (TEC) یونسفر استفاده شده است. تبدیل فوریه زمان کوتاه (STFT) و پارامترهای آماری میانگین و انحراف معیار برای کشف بی‌هنجاری‌های موجود در سری زمانی یونسفر به کار گرفته شده‌اند. همچنین تغییرات شاخص‌های ژئومغناطیسی و آب و هوایی KP، Dst، F10.7، Vsw، E_y (میدان مغناطیسی) و IMFbZ (میدان مغناطیسی بین‌سیاره‌ای) برای اطلاع از شرایط روزهای قبل از وقوع زمین‌لرزه مورد بررسی و آنالیز قرار گرفته‌اند. نتایج نشان می‌دهد که برای زمین‌لرزه اهر- ورزقان، بی‌هنجاری‌هایی در ۱۱، ۱۲، ۱۳ و نیز ۵ روز قبل از زمین‌لرزه وجود دارد. اما برای زمین‌لرزه سرپل ذهاب، در ۶، ۷، ۱۳ و ۲۱ روز قبل از زمین‌لرزه، بی‌هنجاری‌هایی قابل مشاهده است. آنالیزهای انجام گرفته در این مقاله نشان می‌دهد که در صورت بررسی کلیه پارامترهای ژئومغناطیسی و آب و هوایی قبل از وقوع زمین‌لرزه، می‌توان با آنالیز سری زمانی یونسفر با روش STFT، بی‌هنجاری‌های موجود را به صورت مستقیم مشاهده نمود. توجه به این نکته ضروری است که در روزهایی که شرایط ژئومغناطیسی و آب و هوایی آرامی حاکم نیست، نمی‌توان تنها وقوع زمین‌لرزه را علت بی‌هنجاری‌های کشف شده در سری زمانی یونسفر، دانست.

واژه‌های کلیدی: یونسفر، TEC، تبدیل فوریه زمان کوتاه، پیش‌نشانگری زمین‌لرزه، GPS

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، ایران kushki.kntu@gmail.com

۲- استاد دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، ایران vosoghi@kntu.ac.ir

۳- استادیار گروه مهندسی نقشه‌برداری، دانشکده مهندسی علوم زمین، دانشگاه صنعتی اراک (نویسنده مسئول) mr.ghafari@arakut.ac.ir

۱- مقدمه

لایه یونسفر به عنوان لایه‌ای از جو، در ارتفاع ۶۰ تا تقریباً ۱۰۰۰ کیلومتری سطح زمین قرار دارد. به دلیل تابش خورشید و برخورد این ذرات به اتم‌ها، الکترون‌ها جدا شده و باقی‌مانده اتم به صورت یون‌هایی در کنار یکدیگر شناور می‌شوند، در این حالت محیط یونیزه شده، حالت پلاسمایی داشته و به همین دلیل به آن واژه یونسفر اطلاق می‌شود (سبیر، ۲۰۰۳).

وجود الکترون‌ها و ذرات باردار در این ناحیه، از عوامل اصلی تأثیر یونسفر بر انتشار امواج است؛ چراکه امواج بخش عمده‌ای از مسیر خود در راستای رسیدن از ماهواره به گیرنده را در یونسفر که محیطی پاشنده بوده و انتشار امواج وابسته به بسامد موج حامل است، طی می‌کنند. این امواج در هنگام عبور از لایه یونسفر دچار تأخیر و یا تقدم خواهند شد. تولید الکترون آزاد در یونسفر به عوامل زیادی از جمله دوره فعالیت خورشیدی، فعالیت ژئومغناطیسی، امواج گرانشی و لرزه‌ای بستگی دارد. در حالت کلی یونسفر دارای تغییرات زمانی و مکانی است. تغییرات مکانی تحت تأثیر میدان مغناطیسی زمین بوده و خورشید عامل اصلی یونیزاسیون در یونسفر به حساب می‌آید؛ بنابراین میزان تراکم الکترون‌ها وابسته به زمان در روز، تغییر فصل و نیز تغییر موقعیت جغرافیایی است.

تغییرات زمانی یونسفر نیز در دو دسته کلی تغییرات منظم و تغییرات نامنظم قابل تقسیم است. تغییرات منظم شامل تغییرات روزانه، فصلی، نیم‌سالانه، سالانه و تغییرات ناشی از فعالیت‌های لکه‌های خورشیدی با دوره تناوب ۲۷ روزه و ۱۱ ساله است. تغییرات نامنظم (به دلیل شرایط آب و هوایی، زمین‌لرزه، سونامی، آتش‌فشان، طوفان‌های ژئومغناطیسی و اثر خورشیدی) و حوادث انسانی (پرتاب موشک، انفجار هسته‌ای و ...) ایجاد می‌شود. بررسی تغییرات نامنظم دشوار و اغلب غیرممکن است، این در حالی است که تغییرات منظم اغلب قابل مدل کردن و پیش‌بینی است (اسچانک و ناکی، ۲۰۰۰).

با توجه به اهمیت بالای این لایه از جو در بسیاری از زمینه‌ها از قبیل مشاهدات ژئودزی ماهواره‌ای، سیستم‌های

مخابراتی، فیزیک جو و مطالعات فضایی مانند هواشناسی، مطالعه تغییرات مکانی و زمانی آن بسیار مهم است. به همین دلیل مدل‌سازی یونسفر به یکی از مهم‌ترین اهداف ژئودزی فضایی از سال ۱۹۷۰ میلادی تا به امروز مبدل شده است. مدل‌سازی یونسفر با استفاده از مشاهدات GPS در دو دسته کلی مدل‌های تک لایه و چندلایه تقسیم‌بندی می‌شود (کلوبوچار، ۱۹۹۶؛ غفاری رزین، ۲۰۱۵). هدف از مدل‌سازی تک لایه، مدل‌سازی محتوای الکترون کلی در راستای قائم است که کاربردهای مختلفی دارد. به طور مثال می‌توان به محاسبه تأخیر یونسفری و حذف آن از مشاهدات گیرنده‌های تک فرکانسه GPS اشاره نمود (عامریان و همکاران، ۲۰۱۳). در مطالعه یونسفر به کمک مشاهدات GPS، کمیتی موسوم به محتوای الکترون کلی به بیان دیگر انتگرال خطی چگالی الکترونی یونسفر از ماهواره تا گیرنده در سطحی به مساحت یک مترمربع بوده که موجب تأخیر در مشاهدات کد و تقدم در مشاهدات فاز می‌شود. با استفاده از مشاهدات حاصل از گیرنده‌های دو فرکانسه می‌توان این اثر را از مشاهدات حذف نمود.

با استفاده از مشاهدات حاصل از ایستگاه‌های GPS و پردازش آن‌ها، سری زمانی یونسفر به دست خواهد آمد و تفسیر تغییرات آن و بررسی علت این تغییرات امکان‌پذیر خواهد شد. در حالت کلی سری زمانی، دنباله‌ای است که شاخص اصلی آن مربوط به زمان‌های متوالی بوده که با یک فاصله زمانی واحد جدا شده‌اند. برای تجزیه و تحلیل‌های یک سری زمانی آماری، باید فرض کرد که ساختار فرآیند آماری یا تصادفی که مشاهدات را ایجاد می‌کند اساساً در طول زمان ثابت نیست، همان‌طور که سری زمانی یونسفر نیز در طول زمان ثابت نبوده و ممکن است دارای بی‌هنجاری‌هایی باشد. به موجب کشف بی‌هنجاری‌های موجود در سری زمانی یونسفر می‌توان از روش‌های مختلف و متفاوتی استفاده کرد. کشف تغییرات ناگهانی در مطالعات بسیاری از جمله مطالعه رفتار یونسفر و کاربردهای آن در سیستم‌های ماهواره‌ای ناوبری جهانی و نیز تغییرات آن

شناخت بهتری از پیش‌نشانگرها و امکان استفاده از آنها در پیش‌نشانگری زمین‌لرزه به وقوع پیوند. به همین دلیل طی سال‌های اخیر پارامترهای مختلف یونسفری و تغییرات آنها در زمین‌لرزه‌های بزرگ مورد توجه محققین قرار گرفته و به یکی از روش‌های مهم در مطالعات پیش‌نشانگری زمین‌لرزه تبدیل شده است (لیو و همکاران، ۲۰۱۰).

اولین مورد مربوط به زمین‌لرزه آلاسکا (۱۹۶۴) با بزرگای گشتاوری ۹/۳ و عمق ۲۵ کیلومتری است که تغییرات یونسفری طی آن مورد توجه محققین قرار گرفت، در این بین بررسی داده‌های چگالی الکترونی سهم بسزایی در کشف تغییرات یونسفری مرتبط با زمین‌لرزه داشته است که امروزه با پیشرفت هرچه بیشتر در قدرت تفکیک مکانی و زمانی داده‌های TEC، مطالعات لرزه‌ای یونسفر به سرعت در حال توسعه است (مور، ۱۹۷۴). کالای و مینستر (۱۹۹۴) با بررسی تغییرات TEC حاصل از مشاهدات GPS، تغییرات لرزه‌ای زمین‌لرزه نورسریچ، با بزرگای گشتاوری ۶/۷ و عمق ۱۸ کیلومتری را تحلیل کردند. لیو و همکاران (۲۰۰۱) با بررسی بی‌هنجاری لرزه‌ای یونسفری طی زمین‌لرزه چی چی، متوجه وابستگی بالای فرکانس بحرانی لایه F2 به دست آمده از ایستگاه یونسوند و TEC شدند. در ادامه بسیاری از محققان از نقشه‌های جهانی یونسفر برای بررسی تغییرات ناهنجار TEC پیش از وقوع زمین‌لرزه در سراسر جهان استفاده کردند. از جمله مهم‌ترین مطالعات، می‌توان به بررسی زمین‌لرزه سوماترا (۲۰۰۴) با بزرگای ۹/۳ (لیو و همکاران، ۲۰۱۰)، مطالعه زمین‌لرزه ونچون با بزرگای ۸ و زمین‌لرزه هائیتی با بزرگای ۷ اشاره نمود (لیو و همکاران، ۲۰۱۵). همچنین قدسی و مشهدی حسینی (۱۳۹۳) با استفاده از داده‌های TEC حاصل از شبکه جهانی IGS، بی‌هنجاری‌های یونسفری را برای زمین‌لرزه فیلیپین و ژاپن بررسی نمودند. معاریان و جمور (۱۳۹۴) نیز با استفاده از آنالیز تبدیل موجک قبل از زمین‌لرزه اهر-ورزقان به بررسی محتوای الکترون کلی پرداختند. نتایج نشان داد که آنالیز تبدیل موجک تغییرات غیر عادی TEC را در محدوده روزهای

در مسائلی چون ناوبری، پیش‌بینی وضعیت آب و هوایی، ارتباطات و سیستم‌های تعیین موقعیت جهانی، سنجش از دور و نیز مطالعات لرزه‌ای حائز اهمیت بوده و تجزیه و تحلیل سیگنال، نقش بسیار مهمی در بسیاری از برنامه‌های مهندسی ایفا می‌کند. برای تجزیه و تحلیل دقیق سیگنال‌ها، روش‌های متفاوتی از جمله تبدیل فوریه، تبدیل فوریه زمان کوتاه (STFT)، تبدیل موجک وجود دارد. این سیگنال‌های تجزیه و تحلیل شده در بسیاری از موارد نیز کارآمد هستند. تا به امروز دانشمندان بر اساس فرآیندهای ژئوفیزیکی و ژئوشیمیایی، تئوری‌های بسیاری برای توضیح چگونگی پیدایش بی‌هنجاری‌های یونسفر طی زمین‌لرزه ارائه داده‌اند. به‌طور کلی می‌توان عوامل اصلی ظهور بی‌هنجاری یونسفر را فشرده شدن سنگ‌های نزدیک به کانون زمین‌لرزه که باعث ایجاد موج مستقیم در یک طیف وسیع می‌شود و این موج می‌تواند منجر به ایجاد جریاهای الکتریکی شود (پاروت، ۱۹۹۵)، ظهور گازهای گرم در اثر بالا آمدن سطح مایعات موجود در زیر زمین (فرند، ۲۰۰۲) و تشعشعات یون‌های فلزی یا گازی مانند رادون که پتانسیل الکتریکی جو را در نزدیکی سطح زمین افزایش می‌دهند، (پولیتس و همکاران، ۲۰۰۳) دانست.

در دهه‌های اخیر مطالعات لرزه‌نگاری و پیش‌بینی زمین‌لرزه یکی از چالش‌های بزرگ دانشمندان شده است. البته با وجود پیشرفت‌های فراوان دانش لرزه‌شناسی در سال‌های اخیر، همچنان نمی‌توان راهکار قطعی و مؤثری برای پیش‌بینی زمین‌لرزه ارائه داد (آخوندزاده و سراجیان، ۲۰۱۱)؛ از سویی وقوع زمین‌لرزه عمدتاً با مجموعه‌ای از بی‌هنجاری‌ها در ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی محیط همراه است. دانشمندان نیز با ارائه و استفاده از مدل‌های مختلفی که وقوع این بی‌هنجاری‌ها را توجیه می‌کند، سعی در بررسی تغییرات ژئوفیزیکی، ژئوشیمیایی و زیست‌شناختی مناطق مستعد زمین‌لرزه دارند. اگرچه این مشاهدات تاکنون نشانه‌های قطعی از رویداد زمین‌لرزه در اختیار قرار نداده‌اند، اما این امکان را فراهم می‌کنند تا با بررسی داده‌های مربوطه

دوگانه اهر-ورزقان و همچنین زمین لرزه سرپل ذهاب است. برای رسیدن به این هدف، از مشاهدات شش ایستگاه GPS در زمین لرزه اهر-ورزقان و مشاهدات پنج ایستگاه شبکه جهانی IGS در زمین لرزه سرپل ذهاب استفاده می‌شود. برای آنالیز سری زمانی TEC یونسفر، شاخص‌های آماری میانگین و انحراف معیار و همچنین تبدیل فوریه زمان کوتاه به کار گرفته می‌شوند.

۲- محاسبه TEC با استفاده از داده‌های GNSS

گیرنده‌های دو فرکانسه GPS مشاهدات کد و فاز موج حامل (P_i, Φ_i) ($i=1,2$) را در باند L و با فرکانس‌های $L_1(1575.42\text{MHz})$ و $L_2(1227.60\text{MHz})$ در اختیار می‌گذارند. با استفاده از مقادیر مشاهدات کد و فاز در هر دو فرکانس خواهیم داشت (کیرالو و همکاران، ۲۰۰۷):

$$P_{1,u}^m = P_u^m + c(\delta t_u - \delta t^m) + d_{trop,u}^m + d_{ion1,u}^m + c(\varepsilon_1^m + \varepsilon_{1,u}) \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$P_{2,u}^m = P_u^m + c(\delta t_u - \delta t^m) + d_{trop,u}^m + d_{ion2,u}^m + c(\varepsilon_2^m + \varepsilon_{2,u}) \quad \text{رابطه (۲)}$$

در روابط (۱) و (۲)، $P_{(1,2),u}^m$ فاصله دقیق مابین ماهواره و گیرنده برای دو فرکانس L_1 و L_2 اشاره به نام ایستگاه زمینی، m اشاره به شماره ماهواره، C سرعت نور در خلاء، $d_{trop,u}^m$ تأخیر تروپوسفری، $d_{ion,u}^m$ تأخیر یونسفری بر روی دو فرکانس، δt_u خطای ساعت گیرنده، δt^m خطای ساعت ماهواره، $\varepsilon_{1,u}, \varepsilon_{2,u}$ بایاس داخل فرکانسی گیرنده و $\varepsilon_1^m, \varepsilon_2^m$ بایاس داخل فرکانسی برای ماهواره‌ها هستند. با تفاضل مقادیر P_1 و P_2 خطاهایی باقی می‌ماند که وابسته به فرکانس هستند. در نتیجه خواهیم داشت:

$$P_{4,u}^m = P_{2,u}^m - P_{1,u}^m = d_{ion2,u}^m - d_{ion1,u}^m + c(\varepsilon_2^m - \varepsilon_1^m) + c(\varepsilon_{2,u} - \varepsilon_{1,u}) \quad \text{رابطه (۳)}$$

همانطور که در رابطه (۳) ملاحظه می‌شود، پارامتر $P_{4,u}^m$ عاری از خطاهای تروپوسفری و آنتن است. می‌توان برای

زمین لرزه به خوبی مشخص کرده و ابزار ریاضی مناسبی برای آشکارسازی تغییرات ناگهانی و لرزه‌ای یونسفر است، همچنین فعالیت بالای خورشیدی، طوفان‌های مغناطیسی و موجود نبودن مدار دقیق ماهواره در همان لحظه، از جمله محدودیت‌هایی هستند که در این روش باید در نظر گرفته شوند. در سال‌های اخیر، در ادامه مطالعه و کشف تغییرات ناگهانی موجود در سری زمانی TEC، آنالیز طیفی این بی‌هنجاری‌ها با استفاده از روش تبدیل فوریه زمان کوتاه و کاربرد آن در پیش‌نشانگری زمین لرزه رواج پیدا کرده است. به عنوان نمونه سترک و همکاران (۲۰۲۰) به طور جامع بی‌هنجاری‌های یونسفر را برای زمین لرزه وان-ترکیه در ۲۳ اکتبر ۲۰۱۱ با روش‌های زمانی-مکانی و تجزیه طیفی انجام دادند. نتایج نشان داد که در سری زمانی TEC حاصل از ۲۸ ایستگاه GNSS و نقشه‌های GIM مورد استفاده، در روزهای خاصی قبل از زمین لرزه، بی‌هنجاری‌هایی به اندازه ۲ تا ۸ TECU وجود داشته است. طارق و همکاران (۲۰۱۹) نیز با همین روش و با استفاده از داده‌های TEC مبتنی بر GNSS برای تشخیص بی‌هنجاری‌های لرزه‌ای سه زمین لرزه بزرگ (بزرگای بیش از ۷) در نپال و مرز ایران و عراق (ازگله طی سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۷ استفاده کردند. آزمون‌های آماری زمانی- مکانی نشان داد که تغییرات غیرطبیعی مثبت TEC، ۹ روز قبل از زمین لرزه ایران و عراق شناسایی شده است. به همین دلیل این نتیجه ثابت شد که روش‌های طیفی می‌توانند ابزار مفید و قابل اعتماد در تجزیه و تحلیل‌های بعدی باشند و روش STFT را می‌توان به عنوان روشی موفق برای تشخیص بی‌هنجاری‌های یونسفر ارزیابی کرد که با روش‌های کلاسیک نیز سازگار است. از طرفی STFT ابزاری قدرتمند برای پردازش یک سری زمانی بدون نیاز به مقادیر میانگین و میانه است، بنابراین می‌تواند برای سایر مطالعات نظیر ناوبری، ژئوفیزیک، زمین‌شناسی و اقلیم‌شناسی نیز قابل بهره‌برداری باشد (ستورک و همکاران، ۲۰۲۰).

در این مقاله هدف مطالعه و کشف بی‌هنجاری‌های احتمالی موجود در سری زمانی یونسفر قبل از زمین لرزه‌های

$$STEC_u^m(n) = \frac{I}{A} \left(\frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \right) [B + L_{4,u}^m(n) + c(DCB^m + DCB_u)]$$

رابطه (۱۱)

در رابطه (۱۱) مقدار B مقداری است که با استفاده از اندازه‌گیری‌های فاز موج حامل در کمان‌های پیوسته محاسبه می‌شود. پس از محاسبه مقدار STEC با استفاده از تابع تصویر می‌توان مقدار VTEC را به صورت رابطه (۱۲) محاسبه نمود.

$$VTEC_u^m(n) = \frac{STEC_u^m(n)}{M(\varepsilon_m(n))}$$

رابطه (۱۲)

در رابطه (۱۲)، M تابع تصویر است که با رابطه (۱۳) می‌توان آن را به دست آورد:

$$M(\varepsilon_m(n)) = \left[1 - \left(\frac{R \cos \varepsilon_m(n)}{R + h} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

رابطه (۱۳)

در روابط (۱۲) و (۱۳)، M تابع تصویر، ε زاویه ارتفاعی ماهواره، R شعاع کره زمین و h ارتفاع مدل تک‌لایه یونسفری (۴۵۰ کیلومتر) است. بایاس داخل فرکانسی مربوط به ماهواره معمولاً از فایل IONEX محاسبه می‌شود که از محصولات IGS است. زاویه ارتفاعی نیز با استفاده از فاصله هندسی ماهواره و گیرنده و با داده‌های افمریز ماهواره محاسبه می‌شود.

۳. کشف بی‌هنجاری سری زمانی یونسفر با استفاده از

پارامترهای میانگین و انحراف معیار

روش کلاسیک برای کشف بی‌هنجاری‌های موجود در سری زمانی یونسفر، استفاده از پارامترهای آماری میانگین و انحراف معیار است. در این روش، مرز پایین و مرز بالا برای تعیین حدود تشخیص بی‌هنجاری به فرم رابطه (۱۴) تعریف می‌شوند (ستورک و همکاران، ۲۰۲۰):

$$\begin{cases} LB = M - K\sigma \\ UB = M + K\sigma \end{cases}$$

رابطه (۱۴)

در رابطه (۱۴)، LB و UB به ترتیب مرز پایین و مرز بالا، σ نشان‌دهنده انحراف معیار در بازه زمانی و M مقدار میانگین

مشاهدات فاز موج حامل نیز روابط (۴) و (۵) را نوشت.

$$L_{1,u}^m = \lambda_1 \phi_{1,u}^m = P_u^m + c(\delta_u^m - \delta^m) + \lambda_1 \phi_{ion1,u}^m + \lambda_1 \phi_{trop,u}^m - c(\varepsilon_1^m + \varepsilon_{1,u}^m) + \lambda_1 N_1^m$$

رابطه (۴)

$$L_{2,u}^m = \lambda_2 \phi_{2,u}^m = P_u^m + c(\delta_u^m - \delta^m) + \lambda_2 \phi_{ion2,u}^m + \lambda_2 \phi_{trop,u}^m - c(\varepsilon_2^m + \varepsilon_{2,u}^m) + \lambda_2 N_2^m$$

رابطه (۵)

در روابط (۴) و (۵)، λ_1, λ_2 طول موج فرکانس‌های f_1 و f_2 ، $\phi_{1,u}^m, \phi_{2,u}^m$ تأخیر فاز ضبط شده برای فرکانس‌های f_1 و f_2 ، $\phi_{ion2,u}^m, \phi_{ion1,u}^m$ تأخیرات فاز یونسفریک فرکانس‌های f_1 و f_2 ، N_1^m, N_2^m مربوط به ابهامات فاز اولیه و $\phi_{trop,u}^m$ تغییرات فاز مربوط به تروپوسفر هستند. با تفاضل دو معادله (۴) و (۵) خواهیم داشت:

$$L_{4,u}^m = \lambda_2 \phi_{2,u}^m - \lambda_1 \phi_{1,u}^m = \lambda_2 \phi_{ion2,u}^m - \lambda_1 \phi_{ion1,u}^m + c(DCB^m) + c(DCB_u) + \Delta N^m$$

رابطه (۶)

با استفاده از تقریب داده شده توسط لیانو و کومجاتی خواهیم داشت (لیانو، ۲۰۰۱ و کومجاتی ۱۹۹۷):

$$d_{ion,u}^m = -\phi_{ion,u}^m \frac{c}{f} \approx A \frac{STEC_u^m}{f^2}$$

رابطه (۷)

در رابطه (۷) مقدار A برابر با $40/3$ است. با جای‌گذاری $d_{ion,u}^m$ در معادلات $P_{4,u}^m$ و $L_{4,u}^m$ نتیجه به صورت روابط (۸) و (۹) خواهد شد:

$$P_{4,u}^m = A \left(\frac{f_1^2 - f_2^2}{f_1^2 f_2^2} \right) STEC_u^m - c(DCB^m + DCB_u)$$

رابطه (۸)

$$L_{4,u}^m = A \left(\frac{f_1^2 - f_2^2}{f_1^2 f_2^2} \right) STEC_u^m - c(DCB^m + DCB_u) + \Delta N^m$$

رابطه (۹)

با استفاده از روابط (۸) و (۹) مقادیر STEC به صورت روابط (۱۰) و (۱۱) حاصل خواهند شد.

$$STEC_u^m(n) = \frac{I}{A} \left(\frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \right) [P_{4,u}^m(n) + c(DCB^m + DCB_u)]$$

رابطه (۱۰)

TEC برای زمان‌های مشخصی قبل از وقوع زمین‌لرزه هستند. در شرایط طبیعی که مشاهدات از توزیع نرمال پیروی کنند، هر مشاهده با احتمال 67% در فاصله اطمینان $(M \pm \sigma)$ ، با احتمال 95% در فاصله اطمینان $(M \pm 2\sigma)$ و با احتمال 99% در فاصله اطمینان $(M \pm 3\sigma)$ قرار خواهد گرفت (پولیت و بویارچاک، ۲۰۰۴). براساس رابطه (۱۴) هنگامی که TEC مشاهده شده برای هر روز از مقدار UB یا LB تجاوز کند، به ترتیب بیانگر بی‌هنجاری مثبت یا منفی خواهد بود و چنانچه مقدار سری زمانی TEC بین این مرز باشد، بی‌هنجاری وجود نخواهد داشت. مقدار پارامتر k نیز متناسب با بزرگای زمین‌لرزه است، به این صورت که برای زمین‌لرزه‌های با بزرگای بیش از ۷ مقدار این پارامتر می‌تواند بزرگ‌تر از ۲ انتخاب شود (هنزایی، ۲۰۱۱).

$$STFT(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t).g(t-\tau).e^{-i\omega\tau} dt$$

رابطه (۱۶)

در رابطه (۱۶)، $f(t)$ سیگنال اصلی، $g(t)$ تابع پنجره، τ شیفت زمان (مقدار جابجایی پنجره در هر گام) و w فرکانس زاویه‌ای است. همان‌طور که مشاهده می‌شود این معادله در واقع تبدیل فوریه سیگنال $f(t)$ بوده که در تبدیل فوریه تابع پنجره $g(t)$ ضرب شده است. تابع پنجره‌ای که در این مطالعه استفاده شده، تابع پنجره گاوسی با رابطه (۱۷) است (هریس، ۱۹۷۸):

$$g(t) = e^{-0.5 \left(\alpha \left(\frac{t}{N \frac{I}{2}} \right) \right)^2}$$

رابطه (۱۷)

در این رابطه N طول پنجره و α پارامتر فرکانس (که رزولوشن فرکانس را کنترل می‌کند) است. پارامتر α با طول پنجره رابطه عکس داشته و هرچه قدر بزرگ‌تر باشد پهنای پنجره باریک‌تر خواهد بود؛ بنابراین انتخاب این پارامتر وضوح نسبتاً دقیقی در حوزه فرکانس به ما ارائه خواهد داد (هریس، ۱۹۷۸). در این مطالعه پارامتر α مقدار 0.005 انتخاب شده است.

درصد درجه واگرایی (DTEC (TEC)، با انحراف از مقادیر میانگین به‌دست آمده از سری زمانی TEC محاسبه می‌شود. از آنجایی که DTEC مقدار TEC را به‌صورت نسبی بیان می‌کند، برای کشف تغییرات ناگهانی موجود در سری زمانی یونسفر، در حالتی که مقدار این تغییرات کم باشد، بهتر عمل می‌کند. در نتیجه می‌توان نوشت (ستتورک و همکاران، ۲۰۲۰):

$$DTEC = \frac{[TEC_{obs} - TEC_{mean}] \times 100}{TEC_{mean}}$$

رابطه (۱۵)

در این رابطه TEC_{obs} مقدار TEC محاسبه شده برای هر ایستگاه و TEC_{mean} مقدار میانگین TEC برای هر ساعت است.

۳-۱- تبدیل فوریه زمان کوتاه در آنالیز طیفی سری

زمانی یونسفر

تبدیل فوریه زمان کوتاه (STFT) در سال‌های اخیر به‌عنوان نسخه اصلاح‌شده از تبدیل فوریه کلاسیک، برای به‌دست آوردن اطلاعات فرکانس یک سیگنال در حوزه زمان مورد استفاده قرار گرفته است (گابور، ۱۹۴۶). این روش، آنالیز بخش کوچکی از سیگنال را در زمان خاص از طریق پنجره کردن سیگنال ارائه می‌دهد (برز، ۱۹۹۵). در STFT سیگنال با یک رزولوشن زمان-فرکانس ثابت و با طول پنجره یکسان

۴- منطقه مطالعاتی و داده‌های مورد استفاده

برای انجام آنالیز سری زمانی یونسفر و کشف بی‌هنجاری‌های احتمالی موجود به دلیل زمین‌لرزه، دو زمین‌لرزه سرپل ذهاب و همچنین اهر-ورزقان مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. علت انتخاب این دو زمین‌لرزه، بزرگای گشتاوری زمین‌لرزه‌ها و در دسترس بودن مشاهدات ایستگاه‌های GPS و IGS اطراف منطقه مورد مطالعه بوده است.

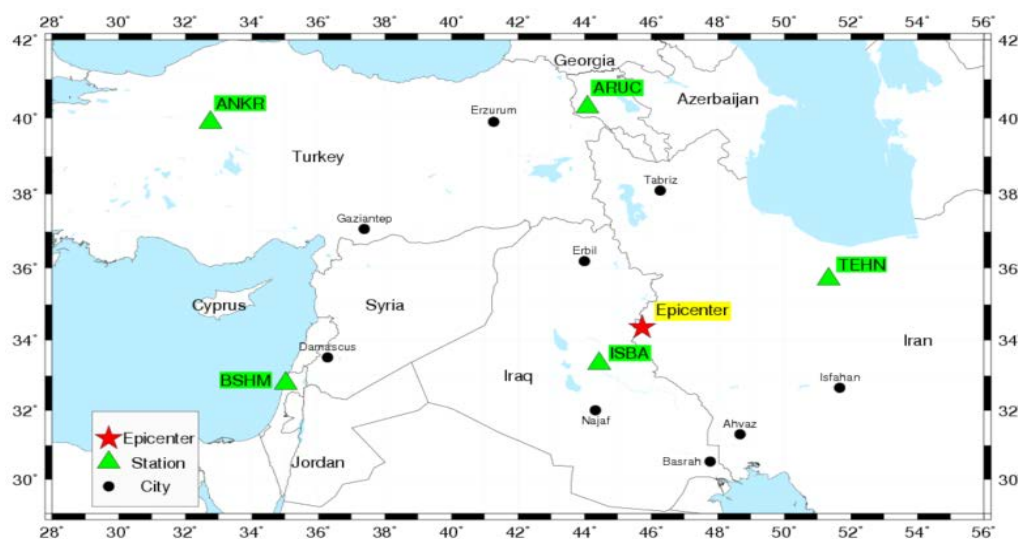
فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (سفر)

تحلیل بی‌هنجاری‌های یونسفری در زمین‌لرزه‌ها با استفاده از شاخص میانگین و ... / ۱۳

جدول ۱: مشخصات زمین‌لرزه سرپل ذهاب به وقوع پیوسته در مورخه ۲۵ نوامبر ۲۰۱۸ (۴ آذر ماه ۱۳۹۷)

(برگرفته شده از وب سایت موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران <https://geophysics.ut.ac.ir>)

زمین‌لرزه	تاریخ وقوع	ساعت وقوع	مختصات مرکز	بزرگای گشتاوری	عمق (Km)
کرمانشاه	۲۰۱۸/۱۱/۲۵	۱۶:۳۷:۳۱	$34.36^{\circ} N, 45.73^{\circ} E$	۶/۳	۸/۹



نگاره ۱: موقعیت ایستگاه‌های GPS (مثلث‌های سبز رنگ) و مرکز زمین‌لرزه (ستاره قرمز رنگ)

۴-۱- زمین‌لرزه سرپل ذهاب

از وب سایت شبکه جهانی IGS تهیه شده است. <ftp://cddis.nasa.gov/gnss/products/>

به‌منظور شناسایی بی‌هنجاری‌های احتمالی موجود در سری زمانی یونسفر، بایستی نمونه‌ای به‌عنوان مرجع برای محاسبه میانگین و انحراف معیار تعریف شود. این نمونه اغلب اوقات بازه زمانی ۱۵ و یا ۳۰ روز پیش از وقوع زمین‌لرزه است. نمونه مرجع در این مطالعه، داده‌های ۲۲ روز قبل و ۳ روز بعد از وقوع زمین‌لرزه است. پردازش این داده‌ها و محاسبه TEC نیز توسط نرم‌افزار IONOLAB انجام گرفته است (اریکان و همکاران، ۲۰۰۸). همچنین به منظور ارزیابی سطح فعالیت‌های خورشیدی و شرایط ژئومغناطیسی، از پارامترهای مختلفی شامل F10.7, Dst, KP, Ey, Vsw استفاده شده است. <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1>

به‌منظور بررسی و کشف بی‌هنجاری قبل از وقوع زمین‌لرزه، زمین‌لرزه سرپل ذهاب کرمانشاه که در ۲۵ نوامبر ۲۰۱۸ (۴ آذر ماه ۱۳۹۷) در استان کرمانشاه به وقوع پیوسته، مورد بررسی قرار گرفته است. اطلاعات مربوط به این زمین‌لرزه در جدول (۱)، موقعیت ایستگاه‌های IGS مورد استفاده و همچنین کانون زمین‌لرزه در نگاره (۱) نمایش داده شده است. زمین‌لرزه ۴ آذرماه ۱۳۹۷ با بزرگای گشتاوری ۶/۳ گستره سرپل‌ذهاب، قصر شیرین و گیلان غرب را لرزاند. این رویداد در عمق ۸/۹ کیلومتر در پوشش رسوبی کمربند زاگرس چین خورده به وقوع پیوست. مشاهدات مورد استفاده برای بررسی و ارزیابی زمین‌لرزه سرپل ذهاب، اندازه‌گیری‌های ۵ ایستگاه از شبکه جهانی IGS موجود در منطقه بوده است. این مشاهدات مربوط به روزهای ۳۰۸ الی ۳۳۳ از سال ۲۰۱۸ است. تمامی مشاهدات

۴-۱-۱- بررسی پارامترهای ژئومغناطیسی

تغییرات زمانی یونسفر شامل تغییرات منظم و تغییرات نامنظم است. بررسی تغییرات نامنظم دشوار و اغلب غیرممکن هستند، این در حالی است که تغییرات منظم عموماً قابل مدل کردن و پیش‌بینی هستند. همواره این پدیده‌های غیرقابل پیش‌بینی در ارتباط با فعالیت خورشیدی وجود داشته و پیش‌بینی تغییرات یونسفر نیازمند بررسی فعالیت خورشیدی به عنوان عامل اصلی یونیزاسیون در این لایه است. برای مثال طوفان‌های ژئومغناطیسی که از برهم نهی بادهای خورشیدی و میدان مغناطیسی زمین به وجود می‌آید، از چند ساعت تا چند روز طول کشیده و لزوماً در مقیاس جهانی اتفاق نمی‌افتد. طوفان‌های ژئومغناطیسی با تغییرات ناگهانی شروع شده و بازگشت به حالت عادی تا چند روز به طول می‌انجامد. ضرایب ژئومغناطیسی متعددی از قبیل KP ، Dst ، $F10.7$ از طرف سرویس بین‌المللی ضرایب ژئومغناطیسی برای بیان تغییرات میدان مغناطیسی زمین با کاربردهای متعدد منتشر می‌شود. این ضرایب برای اطلاع از شرایط مغناطیسی و امکان تأثیر آن‌ها بر بی‌هنجاری‌های سری زمانی TEC نیز مورد بررسی قرار می‌گیرد. پارامتر KP با رزولوشن زمانی ۳ ساعت، برای پیش‌بینی فعالیت‌های میدان مغناطیسی زمین در دوره سه ساعته مورد استفاده قرار می‌گیرد. محدوده پارامتر KP از ۰ تا ۹ است. مقدار کمتر از ۴ بیانگر فعالیت ژئومغناطیسی آرام و مقدار ۹ نشان‌دهنده شرایط ناآرام است. شاخص شار خورشیدی $F10.7$ با واحد sfu به عنوان نشان‌دهنده فعالیت خورشیدی مورد بررسی قرار می‌گیرد. پارامتر Dst نیز با رزولوشن زمانی ۱ ساعت داده‌های زمان اختلال طوفان است. روزهای دارای فعالیت ژئومغناطیسی بالا، روزهایی است که در آن، پارامتر $KP \geq 4$ ، $Dst \leq -20$ ، $F10.7 \geq 100$ باشد. مقادیر این پارامترها برای زمین‌لرزه سرپل ذهاب در نگاره (۲) نمایش داده شده است.

مطابق با نگاره (۲) در پارامترهای $IMFBz$ و Ey در روزهای ۳۰۹، ۳۱۰، ۳۱۳ و ۳۱۴ نوساناتی مشاهده می‌شود،

اما در سایر روزها رفتار نسبتاً یکنواختی دارند. در نگاره (۲) تغییرات پارامتر Vsw ، با افزایش از مقدار ۳۴۹ تا ۶۰۰ کیلومتر بر ثانیه طی روزهای نخست مطالعاتی، و تغییرات جزئی‌تر طی روزهای بعد را نشان می‌دهد. پارامتر Dst نیز در روزهای ۳۰۸ تا ۳۱۴ و ۳۱۶ به کمتر از مقدار مجاز خود یعنی ۲۰- نانوتسلا رسیده است. از طرف دیگر همانطور که در نگاره (۲) مشخص است، مقدار پارامتر KP نیز در روزهای ۳۰۹ و ۳۱۴ بیش از ۴ و در سایر روزها کمتر از این مقدار است، حال آنکه در تمام روزها، مقدار پارامتر $F10.7$ کمتر از ۱۰۰ است. مقادیر پارامترها نشان دهنده فعالیت آرام خورشیدی و ژئومغناطیسی طی روزهای مورد مطالعه است، تنها در روزها نخست مطالعاتی، نوسانات و ناآرامی‌هایی در برخی از این پارامترها مشاهده می‌شود و می‌توان گفت که شرایط نسبتاً آرامی در روزهای مطالعاتی (به جز روزهای نخست) حاکم است.

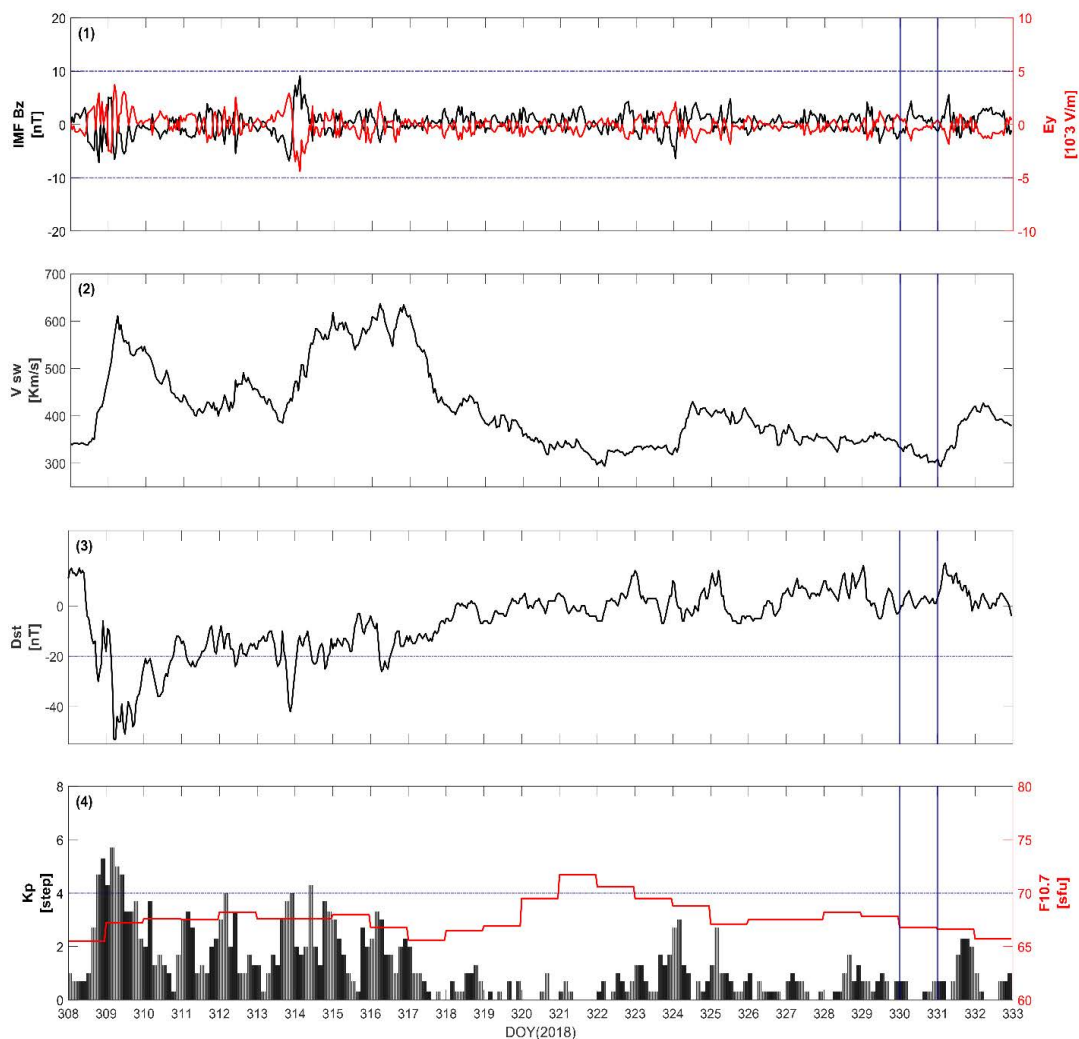
۴-۱-۲- شناسایی بی‌هنجاری‌های موجود در سری

زمانی یونسفر

در ادامه بررسی‌ها، پنج ایستگاه از شبکه جهانی IGS در نزدیکی و اطراف زمین‌لرزه مورد مطالعه، به منظور کشف بی‌هنجاری‌ها و بررسی نوسانات سری زمانی TEC انتخاب شده‌اند. این ایستگاه‌ها شامل ایستگاه‌های $TEHN$ ، $ISBA$ ، $BSHM$ ، $ARUC$ و $ANKR$ هستند. این ایستگاه‌ها به طور پراکنده و با فاصله‌های متفاوت نسبت به مرکز زمین‌لرزه انتخاب شده‌اند تا تغییرات TEC بهتر قابل مشاهده باشد. فاصله هریک از این ایستگاه‌ها تا کانون زمین‌لرزه در جدول (۲) نمایش داده شده است. در انتخاب ایستگاه‌ها برای آنالیز بی‌هنجاری، از رابطه ارائه شده توسط دوبروولسکای و همکاران (۱۹۷۹) استفاده شده است.

فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (سمر)

تحلیل بی‌هنجاری‌های یونسفری در زمین‌لرزه‌ها با استفاده از شاخص میانگین و ... / ۱۵



نگاره ۲: مقادیر پارامترهای ژئومغناطیسی در بازه زمانی ۲۲ روز قبل و ۳ روز بعد از زمین‌لرزه سرپل ذهاب، محور افقی

نشان‌دهنده روز از سال و محور عمودی هریک از پارامترهای IMF Bz، Ey، Vsw، Dst، F10.7 و Kp

است که واحد هر یک در کنار آن مشخص شده است

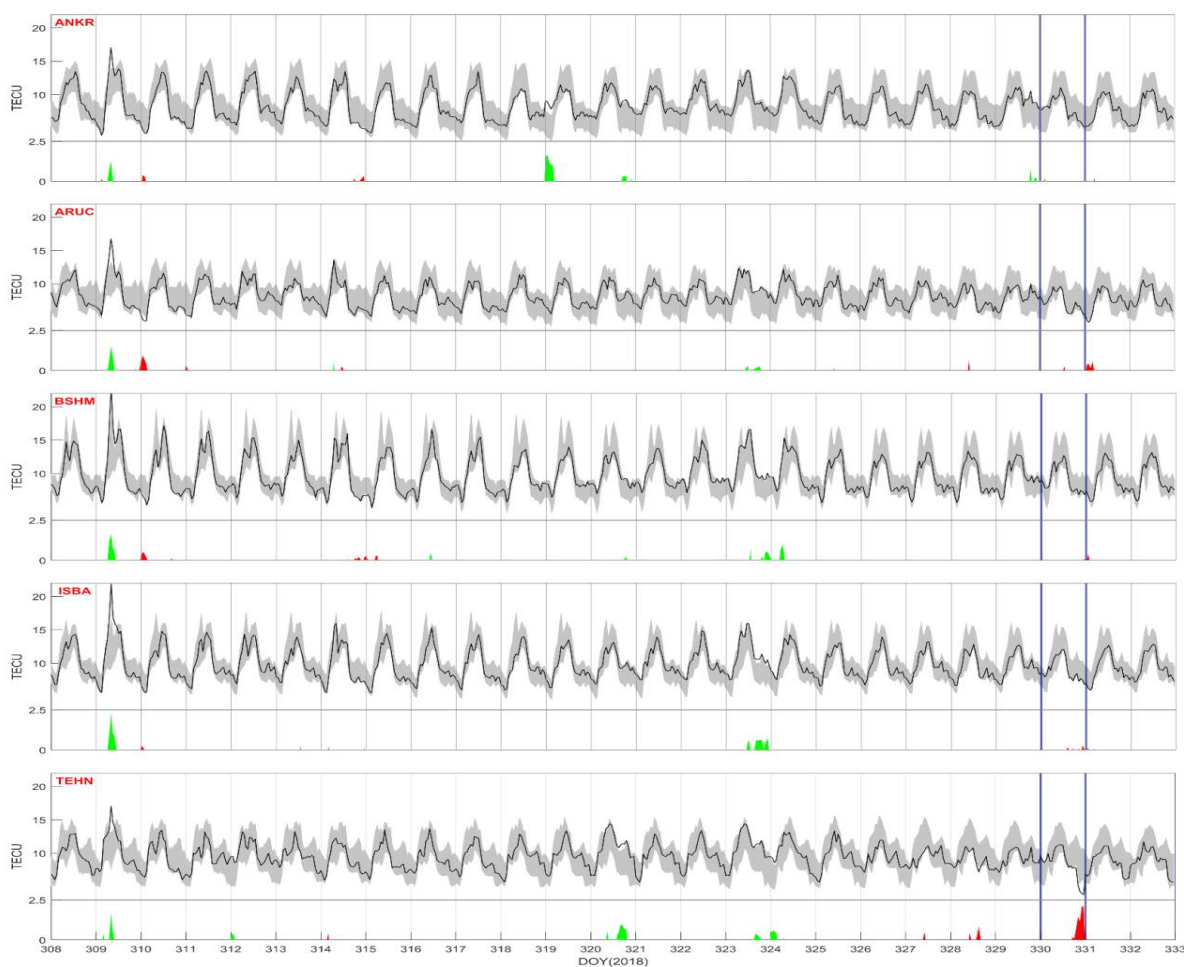
جدول ۲: اطلاعات ایستگاه‌های IGS انتخاب شده و فاصله آن‌ها تا کانون زمین‌لرزه سرپل ذهاب

ایستگاه	شبکه	موقعیت مکانی ایستگاه	عرض جغرافیایی (درجه)	طول جغرافیایی (درجه)	فاصله از مرکز زمین‌لرزه (km)
TEHN	IGS	ایران	۳۵/۶۹	۵۱/۳۳	۵۳۱/۳۸۷
ISBA	IGS	عراق	۳۳/۳۴	۴۴/۴۴	۱۶۴/۴۸۷
BSHM	IGS	اسرائیل	۳۲/۷۷	۳۵/۰۲	۱۰۰۷/۲۲۲
ARUC	IGS	ارمنستان	۴۰/۲۸	۴۴/۰۸	۶۷۴/۷۱۲
ANKR	IGS	ترکیه	۳۹/۸۸	۳۲/۷۶	۱۳۰۲/۱۳۸

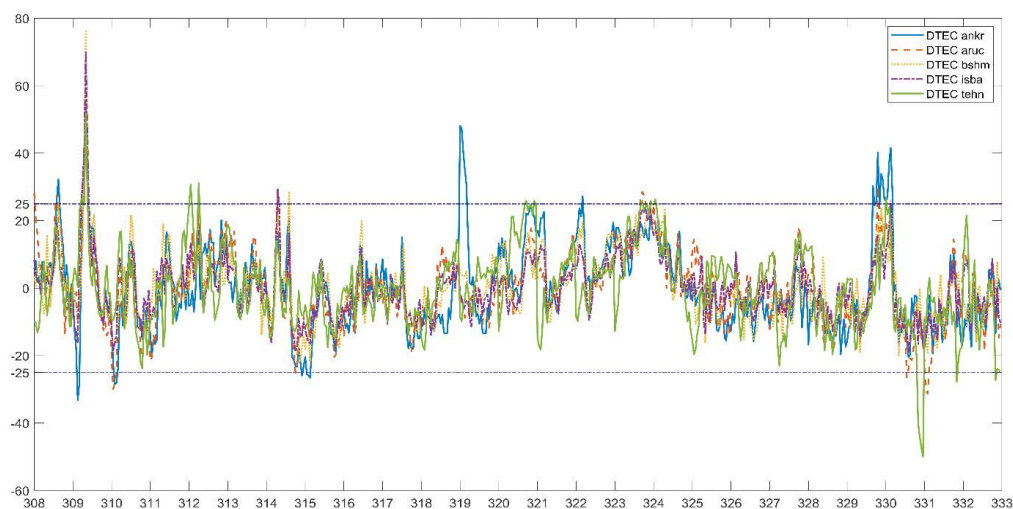
سری زمانی یونسفر از مقدار مرز بالا فراتر باشد، بی‌هنجاری مثبت شناسایی و با رنگ سبز نشان داده شده است (برای بی‌هنجاری منفی نیز از رنگ قرمز استفاده شده است). روز وقوع زمین‌لرزه نیز با دو خط عمود مشخص شده است.

براساس نتایج حاصل از نگاره (۳) در ایستگاه ANKR (دورترین ایستگاه نسبت به کانون زمین‌لرزه)، بی‌هنجاری‌های مثبت در روزهای ۳۰۹، ۳۱۹، ۳۲۰، ۳۲۳ و ۳۲۴ با بیشترین مقدار ۳/۰۰۳ TECU و کمترین مقدار ۰/۰۸۶ TECU، بی‌هنجاری منفی در روزهای ۳۰۹، ۳۱۰، ۳۱۴، ۳۱۸ و ۳۳۱ با بیشترین مقدار ۰/۳۹ TECU و کمترین مقدار ۰/۰۵۸ TECU دیده می‌شود. در ایستگاه ISBA

مطابق با رابطه (۱۴)، مقدار مرز بالا و پایین برای تعیین حدود مجاز سری زمانی یونسفر، محاسبه می‌شود. اگر مقدار سری زمانی TEC در محدوده تعریف شده قرار نگیرد، به عنوان بی‌هنجاری مثبت یا منفی شناسایی خواهد شد. در این تحقیق با توجه به بزرگای زمین‌لرزه مورد مطالعه، مقدار پارامتر k بیش از ۲ انتخاب نشده، از طرفی اگر مقدار این پارامتر کمتر از ۲ در نظر گرفته شود، هر نوع تغییر کوچکی به عنوان بی‌هنجاری شناسایی می‌شود؛ بنابراین در تشخیص بی‌هنجاری از سطح اطمینان ۹۵/۴٪ در فاصله اطمینان $(M \pm 2\sigma)$ استفاده شده است. در نگاره (۳)، حدود مرز بالا و پایین به رنگ خاکستری، همچنین، در حالتی که مقدار



نگاره ۳: سری زمانی یونسفر حاصل از پنج ایستگاه IGS در نزدیکی منطقه مطالعاتی (سرپل ذهاب). خط مشکی رنگ نشان‌دهنده مقدار سری زمانی TEC و نواحی خاکستری رنگ، محدوده $M \pm 2\sigma$ است.



نگاره ۴: مقادیر DTEC برای پنج ایستگاه IGS مورد بررسی در زمین‌لرزه سرپل ذهاب

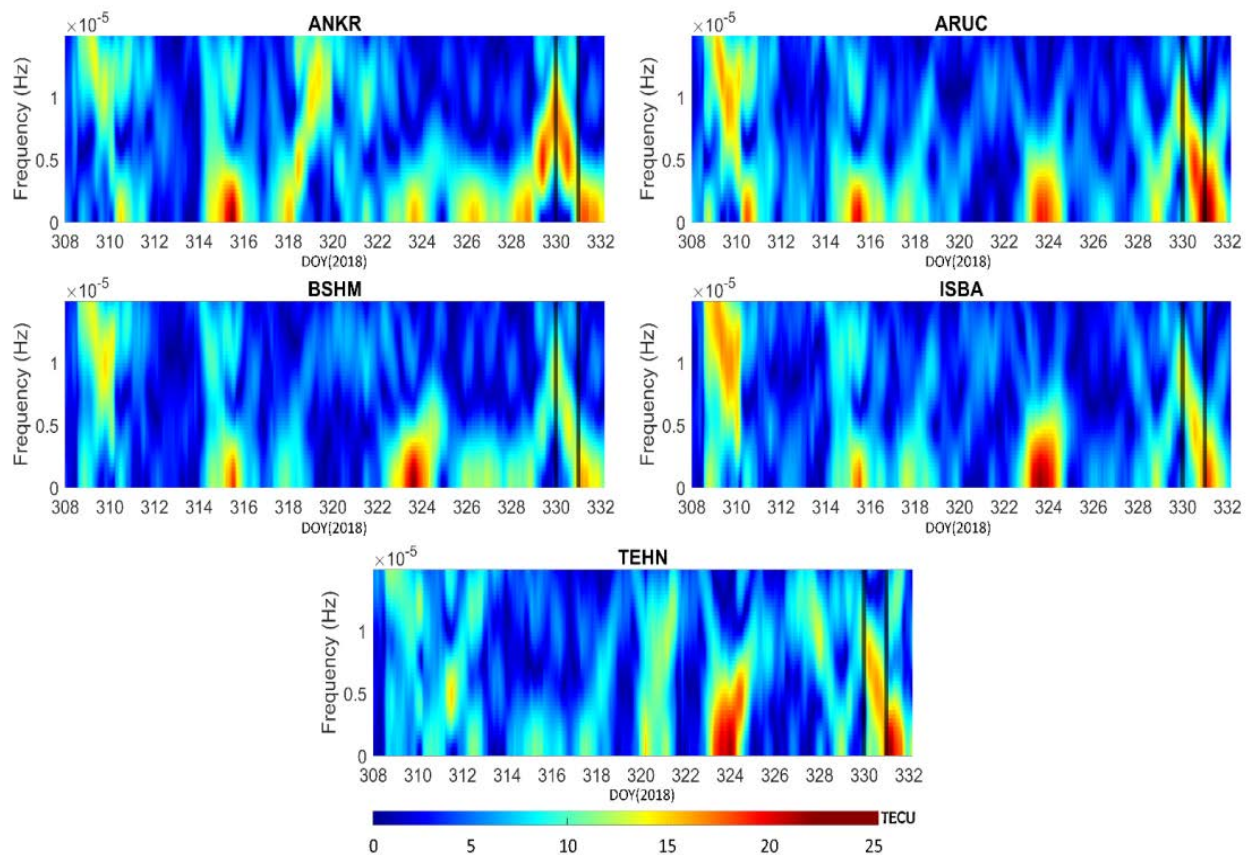
با توجه به بیشینه مقدار تغییرات TEC در سری زمانی، مقدار TEC از ± 25 TECU تجاوز نخواهد کرد و مقادیر DTEC مابین این محدوده، تغییرات روزانه TEC خواهد بود. این محدوده با دو خط افقی در نگاره (۴) نمایش داده شده است. چنانچه مقدار DTEC از این دو محدوده تجاوز کند، نشان‌دهنده وجود بی‌هنجاری خواهد بود. با توجه به نگاره (۴)، مقدار DTEC در روزهای ۳۰۹، ۳۱۲، ۳۱۴، ۳۲۰، ۳۲۱، ۳۲۲، ۳۲۳، ۳۲۴ و ۳۳۰ در جهت مثبت برای بعضی ایستگاه‌ها و در روزهای ۳۰۹، ۳۱۰، ۳۱۵، ۳۳۰، ۳۳۲ و ۳۳۳ در جهت منفی برای برخی دیگر از ایستگاه‌ها فراتر رفته است. گفتنی است که کمترین مقدار DTEC برای ایستگاه TEHN به اندازه ۵۰٪ و بیشترین مقدار آن برای ایستگاه BSHM با مقدار ۷۶/۵٪ است.

۴-۱-۳- آنالیز سری زمانی یونسفر با استفاده از تبدیل

فوریه زمان کوتاه در زمین‌لرزه سرپل ذهاب

در این مقاله روش STFT برای تجزیه و تحلیل طیفی داده‌های TEC با نرخ نمونه‌برداری ۱ ساعته، مورد استفاده قرار گرفته و بی‌هنجاری‌های TEC را در حوزه زمان و فرکانس ارائه می‌دهد. نگاره (۵) تجزیه طیفی مقادیر TEC حاصل از پنج ایستگاه IGS را در روزهای مورد مطالعه نشان می‌دهد. حسن استفاده از روش STFT در این است

(نزدیک‌ترین ایستگاه به کانون زمین‌لرزه)، بی‌هنجاری مثبت در روزهای ۳۰۹، ۳۱۴ و ۳۲۳ در حدود ۵/۴۴۳ TECU و کمترین مقدار ۰/۰۵۷ TECU و نیز بی‌هنجاری منفی در روزهای ۳۱۰، ۳۱۳، ۳۱۴، ۳۳۰ و ۳۳۱ با بیشترین مقدار ۰/۲۷۸ TECU و کمترین مقدار ۰/۰۵۸ TECU دیده می‌شود. در سایر ایستگاه‌های مورد بررسی نیز، بی‌هنجاری‌هایی در حدود ۳/۹۱۰ TECU، در روزهای قبل از زمین‌لرزه مشاهده می‌شود. نکته جالب در این بررسی‌ها کشف بی‌هنجاری بیشتر در ایستگاه نزدیک‌تر به کانون زمین‌لرزه است. نکته قابل توجه بعدی استخراج بی‌هنجاری‌های منفی برای تمام ایستگاه‌ها، ۵، ۱۲، ۱۶، ۲۰ و ۲۱ روز قبل از زمین‌لرزه و نیز ۱ روز بعد از آن است. همچنین بی‌هنجاری مثبت برای تمام ایستگاه‌ها در ۲۱، ۱۰، ۷ و ۶ روز قبل از زمین‌لرزه و نیز در برخی ایستگاه‌ها در ۱۸، ۱۶، ۱۴، ۸ و ۷ روز قبل از زمین‌لرزه مشاهده شده است. نتایج حاکی از آن است که در ۷، ۱۰، ۱۶، ۲۰ و ۲۱ روز قبل از زمین‌لرزه بی‌هنجاری‌هایی مشاهده شده است، که با توجه به آرام بودن شرایط ژئومغناطیسی در ۱۹ روز قبل از زمین‌لرزه، می‌توان این بی‌هنجاری‌های کشف شده را به زمین‌لرزه نسبت داد. با استفاده از رابطه (۱۵) مقدار DTEC برای هر یک از پنج ایستگاه محاسبه و در نگاره (۴) نمایش داده شده است.



نگاره ۵: آنالیز STFT بر روی داده‌های TEC پنج ایستگاه IGS نزدیک به منطقه مطالعاتی (سر پل ذهاب). محور x روزهای قبل از وقوع زمین‌لرزه را نشان می‌دهد

که بیشترین مقدار آن مربوط به روز ۳۲۴ و ۳۳۱ است. در تمام ایستگاه‌ها بیشترین تغییرات بی‌هنجاری TEC فرکانس‌های پایین (کمتر از 0.5×10^{-5} هرتز) و حداکثر دامنه بین ۲۳ تا ۲۵ TECU است. با مقایسه روزهای کشف شده دارای بی‌هنجاری در روش تبدیل فوریه زمان کوتاه و روش بر مبنای پارامترهای آماری میانگین و انحراف معیار، مشاهده می‌شود که روزهای دارای بی‌هنجاری در هر دو روش تقریباً یکسان و بسیار نزدیک به یکدیگر هستند. گرچه بی‌هنجاری‌های روزهای نخست ممکن است مربوط به فعالیت ژئومغناطیسی نسبتاً بالای آن‌ها باشد، اما بی‌هنجاری کشف شده در ۳ تا ۵ روز قبل و نیز ۱ تا ۲ روز بعد از وقوع زمین‌لرزه در شرایط آرام ژئومغناطیسی بوده و می‌تواند منشاء لرزه‌ای داشته باشد.

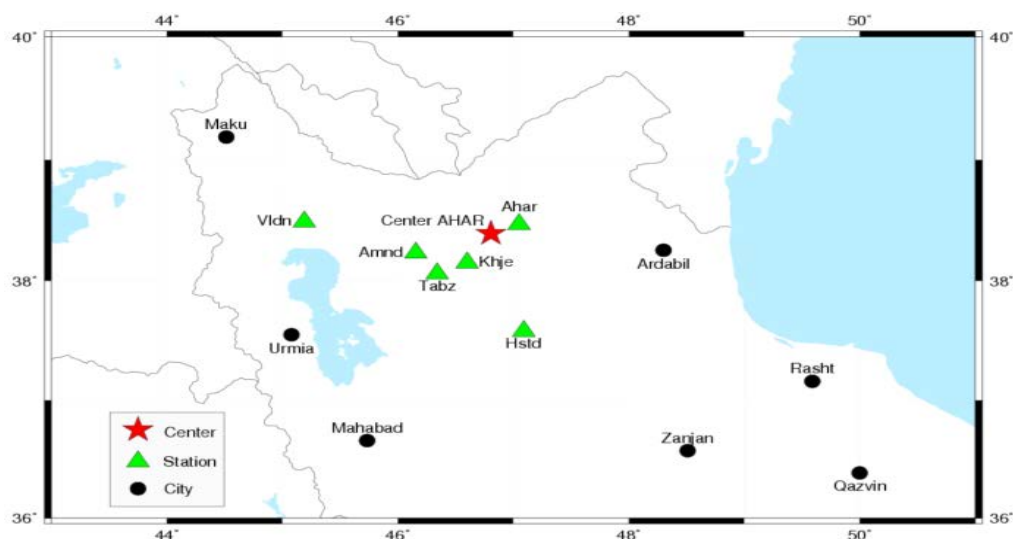
که مستقیماً می‌توان بی‌هنجاری‌های احتمالی موجود را در تجزیه طیفی مشاهده و بررسی نمود.

نتایج نشان می‌دهد که در ایستگاه ANKR مقادیر بالای دامنه در روزهای ۳۱۰، ۳۱۵، ۳۱۸، ۳۲۳، ۳۲۶، ۳۲۸، ۳۲۹، ۳۳۰ و ۳۳۱ وجود دارد و بالاترین مقدار دامنه در روز ۳۱۵ و حدود ۲۴ TECU مشاهده می‌شود. در ایستگاه ARUC دامنه بالا در روزهای ۳۱۰، ۳۱۵، ۳۲۳، ۳۳۰ و ۳۳۱ و بیشترین دامنه مربوط به روزهای ۳۲۴ با مقدار ۲۰ TECU، ۳۳۰ و ۳۳۱ با مقدار ۲۵ TECU است. ایستگاه‌های ISBA و BSHM نیز در روزهای ۳۰۹، ۳۱۵، ۳۲۳، ۳۲۴ و ۳۳۱ دارای دامنه بالا هستند. بیشترین مقدار در این ایستگاه نیز مربوط به روز ۳۲۳ است. در ایستگاه TEHN در روزهای ۳۲۳، ۳۲۴ و ۳۳۱ دامنه بالا مشاهده می‌شود

جدول ۳: مشخصات زمین‌لرزه دو گانه اهر-ورزقان

(برگرفته شده از وب سایت موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران <https://geophysics.ut.ac.ir>)

زمین‌لرزه	تاریخ وقوع	ساعت وقوع	مختصات مرکز	بزرگای گشتاوری	عمق (km)
رویداد اول	۲۰۱۲/۰۸/۱۱	۱۲:۲۳:۱۵	$38.43^{\circ} N, 46.81^{\circ} E$	۶/۵	۹
رویداد دوم	۲۰۱۲/۰۸/۱۱	۱۲:۳۴:۳۴	$38.42^{\circ} N, 46.80^{\circ} E$	۶/۳	۴



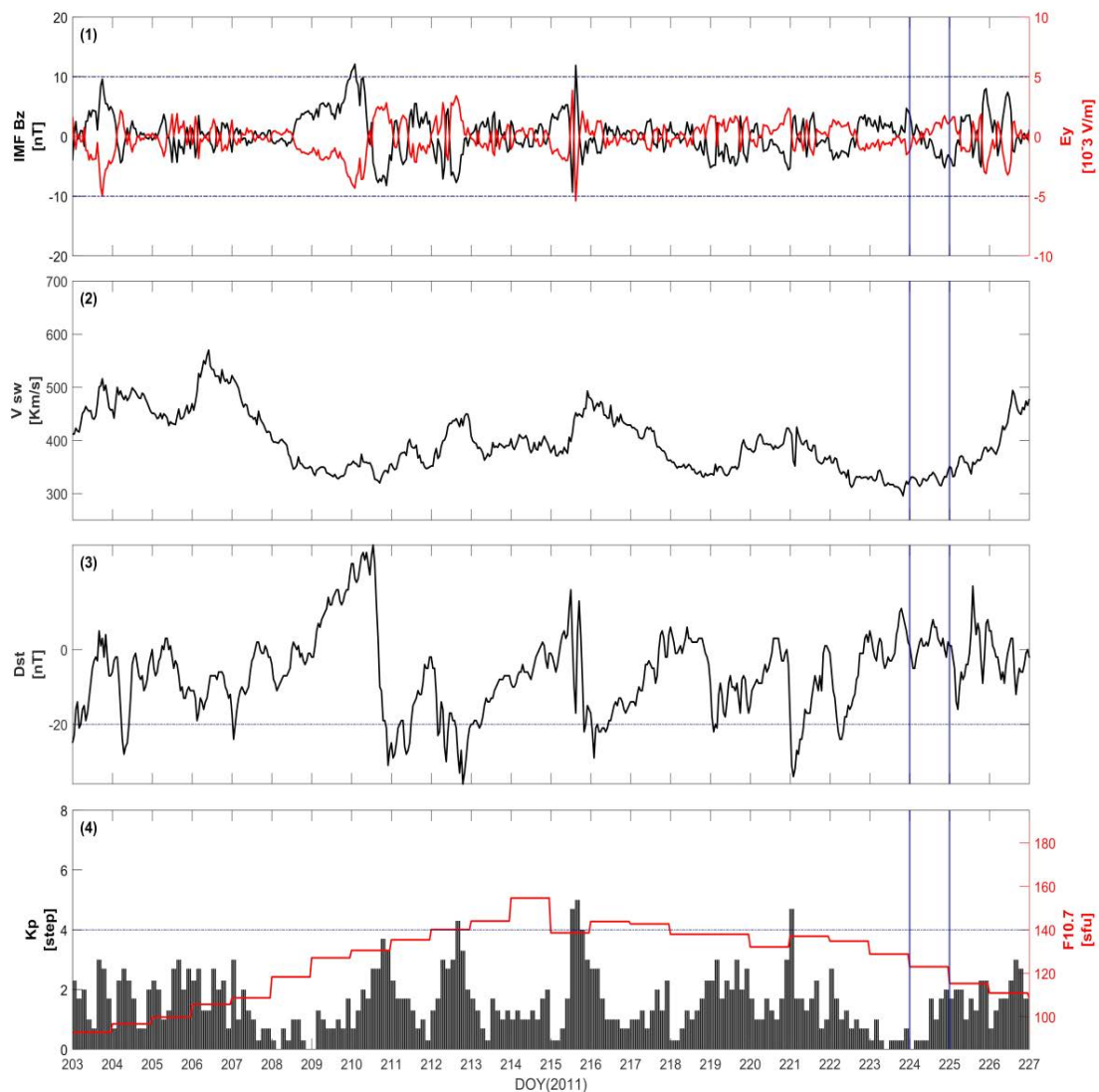
نگاره ۶: موقعیت ایستگاه‌های GPS (مثلث‌های سبز رنگ) و کانون زمین‌لرزه (ستاره قرمز رنگ)

۲-۴- زمین‌لرزه دو گانه اهر-ورزقان

مطالعه موردی دوم در این مقاله، زمین‌لرزه دو گانه اهر-ورزقان است که در ۱۱ آگوست ۲۰۱۱ در استان آذربایجان شرقی به وقوع پیوست. در جدول (۳) اطلاعات مربوط به این زمین‌لرزه، موقعیت ایستگاه‌های GPS مورد استفاده و همچنین کانون زمین‌لرزه در نگاره (۶) نمایش داده شده است. مشاهدات مورد استفاده برای بررسی و ارزیابی زمین‌لرزه دو گانه اهر-ورزقان، اندازه‌گیری‌های شش ایستگاه GPS موجود در منطقه بوده است. این مشاهدات مربوط به روزهای ۲۰۳ الی ۲۲۷ از سال ۲۰۱۲ است. تمامی مشاهدات از سازمان نقشه‌برداری کشور تهیه شده است. نمونه مرجع مورد استفاده در زمین‌لرزه‌های دو گانه اهر-ورزقان، داده‌های ۲۱ روز قبل و ۳ روز بعد از وقوع زمین‌لرزه است.

۴-۲-۱- بررسی پارامترهای ژئومغناطیسی

مطابق با بررسی انجام گرفته در زمین‌لرزه سرپل ذهاب، برای زمین‌لرزه دو گانه اهر-ورزقان نیز، پارامترهای Kp و $F10.7$ ، Dst ، Vsw ، Ey ، $IMFBz$ بعد از زمین‌لرزه مورد بررسی قرار گرفته‌اند. روزهای دارای فعالیت ژئومغناطیسی بالا، روزهایی هستند که در آن‌ها، پارامتر، $F10.7 \geq 100$ ، $KP \geq 4$ ، $Dst \leq -20$ باشد. مقادیر این پارامترها در نگاره (۷) نمایش داده شده است. مطابق با نگاره (۷)، در پارامترهای IMF ، Bz و Ey در روزهای ۲۰۳، ۲۰۸ تا ۲۱۴، ۲۱۵ تا ۲۱۷ و ۲۱۹ تا ۲۲۳ از سال نامنظمی‌هایی مشاهده می‌شود. مقدار پارامتر Vsw نیز از حدود ۵۵۰ کیلومتر بر ثانیه در روز ۲۰۷ به ۳۵۰ تا روز ۲۱۱ کاهش یافته، سپس تا ۴۰۰ کیلومتر بر ثانیه مجدد افزایش و پس از آن نوسانات کمتری دارد. شاخص Dst نیز در روزهای



نگاره ۷: مقادیر پارامترهای ژئومغناطیسی در بازه زمانی ۲۱ روز قبل و ۳ روز بعد از زمین‌لرزه‌های دوگانه اهر-ورزقان، محور افقی نشان‌دهنده روز از سال و محور عمودی هریک از پارامترهای IMF Bz، Ey، Vsw، Dst، F10.7 و Kp است که واحد هر یک در کنار آن مشخص شده است

۲۰۳ و ۲۰۴، ۲۰۷، ۲۱۰ تا ۲۱۳، ۲۱۵ و ۲۱۶، ۲۱۹، ۲۲۱ و ۲۲۲ از فعالیت ژئومغناطیسی و خورشیدی چندان آرامی حاکم نیست. سال کمتر از حد مجاز بوده و اغتشاش مشاهده می‌شود. همچنین، پارامتر KP در روزهای ۲۱۲، ۲۱۵ و ۲۲۱ بیش از ۴ است. از روز ۲۰۷ تا ۳ روز بعد از زمین‌لرزه نیز مقدار پارامتر F10.7 از مقدار مجاز آن بیشتر شده است. این پارامترها در باقی روزها تقریباً آرام هستند. با توجه به مقادیر هریک از شاخص‌های نام‌برده، مشاهده می‌شود که قبل از زمین‌لرزه،

۲-۲-۴- شناسایی بی‌هنجاری‌های موجود در سری زمانی یونسفر

در ادامه بررسی‌ها، شش ایستگاه GPS در نزدیکی و اطراف زمین‌لرزه مورد مطالعه برای کشف بی‌هنجاری‌ها و بررسی نوسانات سری زمانی TEC انتخاب شده‌اند. این ایستگاه‌ها

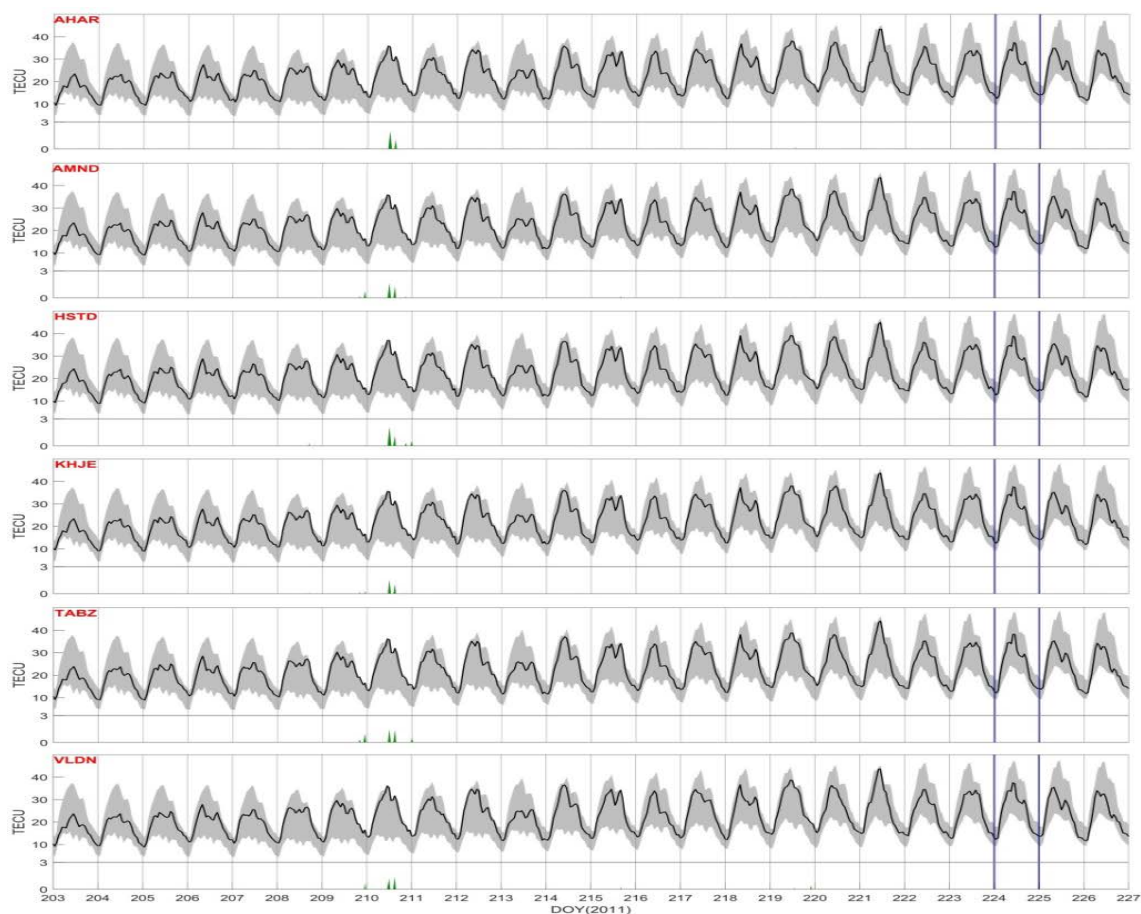
فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (س)

تحلیل بی‌هنجاری‌های یونسفری در زمین‌لرزه‌ها با استفاده از شاخص میانگین و ... / ۲۱

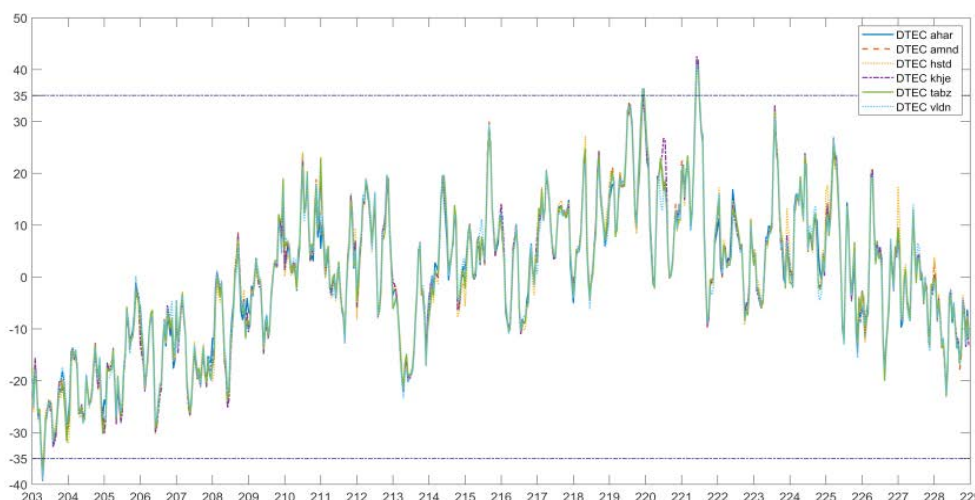
جدول ۴: اطلاعات ایستگاه‌های GPS مورد استفاده در بررسی زمین‌لرزه دوگانه اهر-ورزقان

ایستگاه	شبکه	عرض جغرافیایی (درجه)	طول جغرافیایی (درجه)	فاصله از مرکز زمین‌لرزه (km)
AHAR	GPS	۳۸/۴۷	۴۷/۰۵	۲۲/۱۴
AMND	GPS	۳۸/۲۳	۴۶/۱۶	۶۰/۳۱
HSTD	GPS	۳۷/۵۸	۴۷/۰۹	۹۷/۵۸
KHJE	GPS	۳۸/۱۵	۴۶/۶۰	۳۵/۱۳
TABZ	GPS	۳۸/۰۶	۴۶/۳۴	۵۷/۲۲
VLDN	GPS	۳۸/۴۹	۴۵/۱۹	۱۴۰/۲۸

شامل ایستگاه‌های AHAR, AMND, KHJE, HSTD, TABZ و VLDN هستند. این ایستگاه‌ها تا حد امکان نزدیک به کانون زمین‌لرزه انتخاب شده‌اند تا تغییرات TEC بهتر قابل مشاهده باشند. فاصله هریک از این ایستگاه‌ها تا کانون زمین‌لرزه در جدول (۴) نمایش داده شده است. در نگاره (۸)، حدود مرز بالا و پایین به رنگ خاکستری، همچنین، در حالتی که مقدار سری زمانی یونسفر از مقدار مرز بالا فراتر باشد، بی‌هنجاری مثبت شناسایی و با رنگ سبز نشان داده شده است. روز وقوع زمین‌لرزه نیز با دو خط عمود مشخص شده است.



نگاره ۸: سری زمانی یونسفر حاصل از شش ایستگاه GPS در نزدیکی منطقه مطالعاتی (زمین‌لرزه‌های دوگانه اهر-ورزقان). خط مشکی رنگ نشان‌دهنده مقدار سری زمانی TEC و نواحی خاکستری رنگ، محدوده $M \pm 2\sigma$ است



نگاره ۹: مقادیر DTEC برای شش ایستگاه GPS مورد بررسی در زمین لرزه اهر-ورزقان

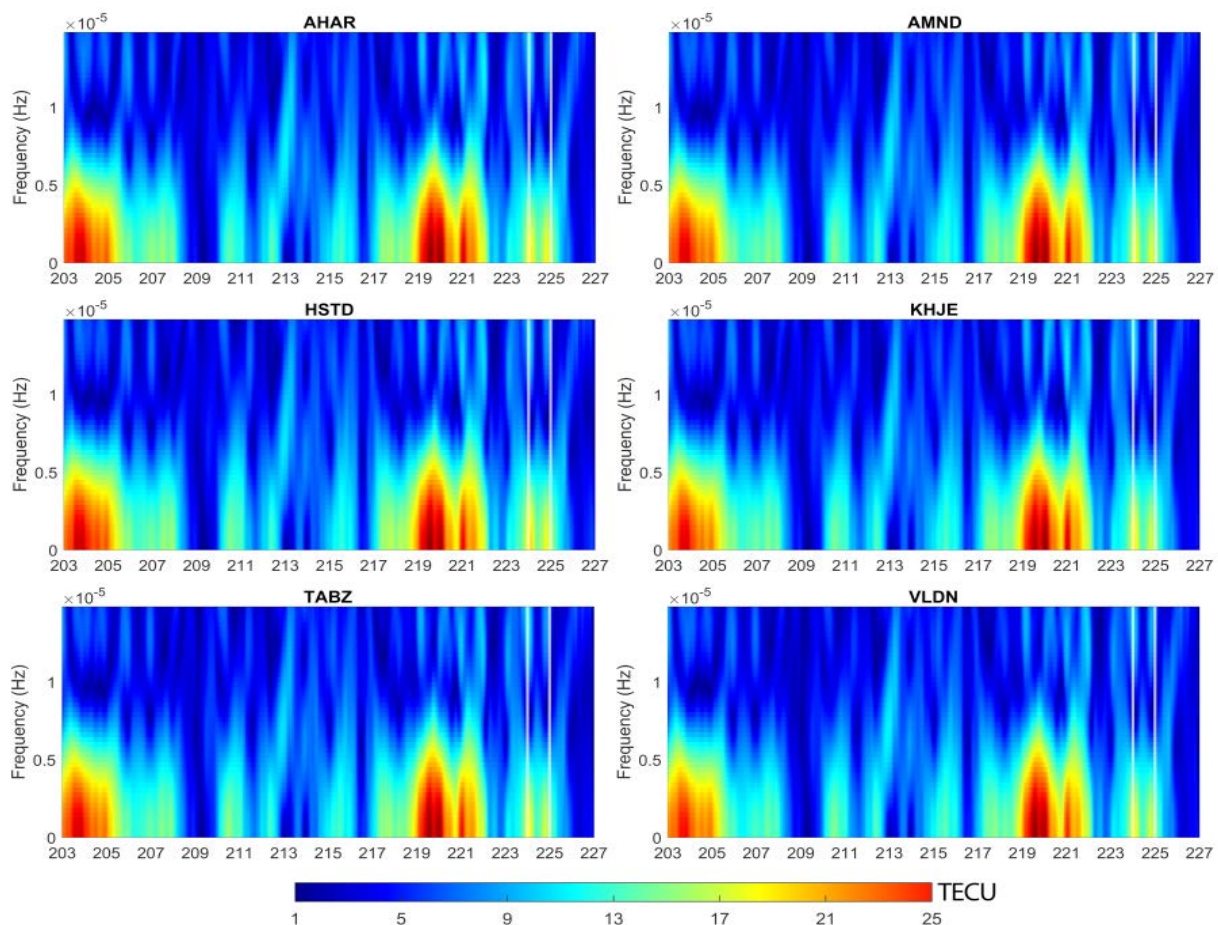
نمایش داده شده است. چنانچه مقدار DTEC از این دو محدوده تجاوز کند، نشان دهنده وجود بی‌هنجاری است. با توجه به نگاره (۹)، مقدار DTEC در روزهای ۲۲۰ و ۲۲۱ در جهت مثبت برای بعضی ایستگاه‌ها و در روز ۲۰۳ در جهت منفی برای برخی دیگر از ایستگاه‌ها فراتر رفته است. گفتنی است که کمترین مقدار DTEC برای ایستگاه TABZ به اندازه ۳۹/۰۵٪ و بیشترین مقدار آن برای ایستگاه KHJE با مقدار ۴۹/۵۰٪ است.

۴-۲-۳- آنالیز سری زمانی یونسفر با استفاده از تبدیل فوریه زمان کوتاه در زمین لرزه‌های دوگانه اهر-ورزقان با استفاده از روش STFT، فرم طیفی مقادیر TEC برای روزهای مختلف و شش ایستگاه مورد بررسی در زمین لرزه‌های اهر-ورزقان، محاسبه و در نگاره (۱۰) نمایش داده شده است.

براساس نتایج حاصل از نگاره (۱۰)، در تمامی ایستگاه‌های مورد بررسی در زمین لرزه دوگانه اهر-ورزقان، در روزهای ۲۰۳ الی ۲۰۵ و همچنین روزهای ۲۱۹ الی ۲۲۲، مقدار فرکانس، افزایش قابل توجهی نسبت به سایر روزها را نشان می‌دهد. اما با توجه به آنالیز پارامترهای مختلف خورشیدی و ژئومغناطیسی قبل از وقوع زمین لرزه

همان‌طور که در نگاره (۸) مشاهده می‌شود، ۱۳ تا ۱۵ و نیز ۵ روز قبل از وقوع زمین لرزه بی‌هنجاری مثبت وجود دارد. نتایج نشان می‌دهد که بی‌هنجاری‌های مثبت در هر شش ایستگاه در روز ۲۱۰م از سال دیده می‌شود؛ همچنین در ایستگاه HSTD در روز ۲۱۱م، ایستگاه KHJE، ۲۰۹م، ایستگاه TABZ در روزهای ۲۰۹ و ۲۱۱م و ایستگاه VLDN در روزهای ۲۰۹ و ۲۱۹ از سال بی‌هنجاری‌های مثبتی با بیشترین مقدار ۱/۴ TECU و کمترین مقدار ۰/۱۳ قابل مشاهده است. البته با توجه به این مورد که فعالیت ژئومغناطیسی در روزهای قبل از زمین لرزه بالا بوده است، در نتیجه دلیل این بی‌هنجاری‌ها را نمی‌توان تنها وقوع زمین لرزه دانست. البته در حدود ۱۱ روز قبل از زمین لرزه ناآرامی در پارامترهای ژئومغناطیسی دیده شده و بی‌هنجاری‌های مشاهده شده در سری زمانی TEC، در حدود ۱۲ و ۱۳ روز قبل از زمین لرزه است و ممکن است دلیل این بی‌هنجاری‌ها، وقوع زمین لرزه باشد. با استفاده از رابطه (۱۵) مقدار DTEC برای هر یک از شش ایستگاه، محاسبه و در نگاره (۹) نمایش داده شده است.

با توجه به بیشینه مقدار TEC در سری زمانی، مقادیر DTEC مابین محدوده ± 35 TECU، دارای تغییرات روزانه خواهد بود. این محدوده با دو خط افقی در نگاره (۹)



نگاره ۱۰: آنالیز STFT بر روی داده‌های TEC شش ایستگاه GPS نزدیک به منطقه مطالعاتی (زمین‌لرزه‌های دوگانه اهر-ورزقان).

محور x روزهای قبل از وقوع زمین‌لرزه را نشان می‌دهد

در نگاره (۷)، شرایط ناآرامی حاکم بوده و بنابراین، تغییرات فرکانسی بوجود آمده را نمی‌توان گفت که فقط با زمین‌لرزه نسبت دارد.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، هدف آنالیز سری زمانی یونسفر برای کشف بی‌هنجاری‌های موجود و بررسی این بی‌هنجاری‌ها در پیش‌نشاندگی زمین‌لرزه‌ها بود. به همین دلیل، زمین‌لرزه سربل ذهاب با بزرگای گشتاوری ۶/۳ که در تاریخ ۲۰۱۸/۱۱/۲۵ و زمین‌لرزه‌های دوگانه اهر-ورزقان با بزرگای گشتاوری ۶/۵ و ۶/۳ که در تاریخ ۲۰۱۲/۰۸/۱۱ به وقوع پیوسته‌اند، مورد بررسی قرار گرفتند. روش‌های

مورد استفاده برای بررسی و کشف بی‌هنجاری در سری زمانی یونسفر قبل از زمین‌لرزه، روش کلاسیک (پارامترهای آماری میانگین و انحراف معیار) و روش تبدیل فوریه زمان کوتاه (STFT) بود. در زمین‌لرزه سربل ذهاب و در هر دو روش، در روزهای ۳۰۹، ۳۱۴ و ۳۲۳ قبل از زمین‌لرزه، بی‌هنجاری‌هایی مشاهده شدند. مقدار این بی‌هنجاری‌ها در سری زمانی یونسفر در بازه ۰/۰۵۸ تا ۵/۴۴ TECU بودند. پارامترهای مرتبط با فعالیت‌های خورشیدی و ژئومغناطیسی نیز در روزهای قبل از وقوع زمین‌لرزه و پس از آن، بررسی شدند. با توجه به اینکه فعالیت‌های خورشیدی و ژئومغناطیسی (به‌عنوان یک عامل مهم در ایجاد بی‌هنجاری در سری زمانی یونسفر) در روزهای قبل

- 3- Akhoondzadeh, M., Saradjian, M., 2011. TEC variations analysis concerning Haiti (January 12, 2010) and Samoa (September 29, 2009) earthquakes. *Advances in Space Research* 47(1): 94-104.
- 4- Amerian, Y., Hossainali, M.M. and Voosoghi, B., 2013. Regional improvement of IRI extracted ionospheric electron density by compactly supported base functions using GPS observations. *Journal of atmospheric and solar-terrestrial physics*, 92, pp.23-30.
- 5- Arikan, F., et al., 2008. Estimation of single station interfrequency receiver bias using GPS/TEC. *Radio Science* 43(4).
- 6- Burrus, C.S., 1995. Multiband least squares FIR filter design. *IEEE transactions on signal processing*, 43(2), pp.412-421.
- 7- Calais, E. and Minster, J.B., 1995. GPS detection of ionospheric perturbations following the January 17, 1994, Northridge earthquake. *Geophysical Research Letters*, 22(9), pp.1045-1048.
- 8- Ciruolo, L., Azpilicueta, F., Brunini, C., Meza, A. and Radicella, S.M., 2007. Calibration errors on experimental slant total electron content (TEC) determined with GPS. *Journal of Geodesy*, 81(2), pp.111-120.
- 9- Dobrovolsky, I. P., Zubkov, S. I., and Miachkin, V. I., 1979, Estimation of the size of earthquake preparation zones, *Pure Appl. Geophys.*, 117, 1025-1044.
- 10- Freund, F., 2002. Charge generation and propagation in igneous rocks. *Journal of Geodynamics*, vol. 33, pp. 543-570, 2002.
- 11- Gabor, D., 1946. Theory of communication. Part 1: The analysis of information. *Journal of the Institution of Electrical Engineers-Part III: Radio and Communication Engineering*, 93(26), pp.429-441.
- 12- Ghaffari Razinm M.R., 2015. Development and analysis of 3D ionosphere modeling using base functions and GPS data over Iran. *Acta Geod Geophys*, 51(1):95-111.
- 13- Hanzaei .M.A, 2011. Comparative Study of Earthquake Preliminary Indicators from Satellite Data. Ph.D thesis, Tehran University, 2011.
- 14- Harris, F.J., 1978. On the use of windows for harmonic analysis with the discrete Fourier transform. *Proceedings*

از زمین لرزه آرام بود، می توان بی هنجاری های کشف شده را به زمین لرزه نسبت داد. اما در زمین لرزه دو گانه اهر-ورزقان و با استفاده از هر دو روش، در ۵ تا ۱۵ روز قبل از وقوع، بی هنجاری هایی در حدود ۰/۱۳ تا ۱/۴ TECU مشاهده شدند. در روزهای قبل از زمین لرزه دو گانه اهر-ورزقان شرایط تقریباً ناآرامی در اکثر روزها وجود داشت و بنابراین با قطعیت نمی توان گفت که بی هنجاری های مشاهداتی، کاملاً مرتبط با زمین لرزه باشند.

نتایج حاصل از این مقاله نشان داد که روش STFT ابزاری قدرتمند برای تحلیل های طیفی بدون نیاز به مقادیری مانند میانگین و یا میانه است. این ویژگی STFT نقطه قوت آن در مقابل روش های کلاسیک است؛ چرا که استقلال از این مقادیر، منابع خطای وابسته به آن ها (بی هنجاری ها، تغییرات ناگهانی یونسفر مثل تغییرات سالانه، نیم سالانه و فصلی) را به حداقل می رساند. به همین دلیل، می توان گفت که روش های طیفی می توانند ابزار مفید و قابل اعتماد در تجزیه و تحلیل های بعدی باشند و نتایج، قابلیت و کارایی روش STFT را به عنوان روشی موفق برای تشخیص بی هنجاری های یونسفر که با روش های کلاسیک نیز سازگار است، نشان می دهد. البته ذکر این نکته ضروری است که روش STFT در شرایط آرام خورشیدی و ژئومغناطیسی از دقت بالاتری برخوردار بوده و نتایج با صحت بالایی را ارائه می دهد.

منابع و مآخذ

- ۱- قدسی، مشهدی حسینعلی؛ منا، مسعود (۱۳۹۳). بررسی پیش نشانگرهای زمین لرزه و سونامی ۲۰۱۰ ژاپن در یونسفر. اولین کنفرانس ملی مدیریت بحران: زلزله و آسیب پذیری اماکن و شریان های حیاتی.
- ۲- معماریان، جمور؛ امید، یحیی (۱۳۹۴). آنالیز تبدیل موجک تغییرات محتوی الکترونی یونسفر قبل از زمین لرزه های بزرگ. *نشریه علمی علوم و فنون نقشه برداری*، ۴(۴)، ۲۲۳-۲۳۲.

- 24- Pulnits, S. and Boyarchuk, K., 2004. Ionospheric precursors of earthquakes. Springer Science & Business Media.
- 25- Schunk, R.W., Nagy, A.F., 2000, Ionospheres: Physics, Plasma Physics, and Chemistry, Cambridge University Press, 554.
- 26- Seeber, G., 2003. Satellite Geodesy, 2nd completely revised and extended edition. Walter de Gruyter GmbH & Co. KG, 10785, pp.303-304.
- 27- Şentürk, E., Inyurt, S. and Sertçelik, İ., 2020. October. Ionospheric anomalies associated with the M w 7.3 Iran–Iraq border earthquake and a moderate magnetic storm. In *Annales Geophysicae* (Vol. 38, No. 5, pp. 1031-1043). Copernicus GmbH.
- 28- Tariq, M.A., Shah, M., Hernández-Pajares, M. and Iqbal, T., 2019. Pre-earthquake ionospheric anomalies before three major earthquakes by GPS-TEC and GIM-TEC data during 2015–2017. *Advances in Space Research*, 63(7), pp.2088-2099.
- of the IEEE, 66(1), pp.51-83.
- 15- Klobuchar, J.A., 1996. Ionospheric effects on GPS. *Global positioning system: theory and application*.
- 16- Komjathy, A. (1997). “Global ionospheric total electron content mapping using the Global Positioning System.” University of New Brunswick Fredericton, New Brunswick, Canada.
- 17- Le, H., et al., 2015. Recent progress in ionospheric earthquake precursor study in China: A brief review. *Journal of Asian Earth Sciences* 114: 420-430.
- 18- Liao, X., 2001. Carrier phase based ionosphere recovery over a regional area GPS network. University of Calgary.
- 19- Liu, J., et al., 2010. Temporal and spatial precursors in the ionospheric global positioning system (GPS) total electron content observed before the 26 December 2004 M9. 3 Sumatra–Andaman Earthquake. *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 115(A9).
- 20- Liu, J.Y., Chen, Y.I., Chuo, Y.J. and Tsai, H.F., 2001. Variations of ionospheric total electron content during the ChiüChi earthquake. *Geophysical Research Letters*, 28(7), pp.1383-1386.
- 21- Moore, G.W., 1964. Magnetic disturbances preceding the 1964 Alaska earthquake. *Nature*, 203(4944), pp.508-509.
- 22- Parrot, M., 1995. Electromagnetic noise due to earthquakes,” *Handbook of Atmospheric Electrodynamics*, vol. 2, pp. 95-116, 1995.
- 23- Pulnits, S.A., Legen’Ka, A.D., Gaivoronskaya, T.V. and Depuev, V.K., 2003. Main phenomenological features of ionospheric precursors of strong earthquakes. *journal of atmospheric and solar-terrestrial physics*, 65(16-18), pp.1337-1347.

COPYRIGHTS

©2023 by the authors. Published by National Geographical Organization. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons [Attribution-NoDerivs 3.0 Unported \(CC BY-ND 3.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nd/3.0/)



