

بررسی تأثیر حذف پریودهای شناخته شده از سری زمانی داده‌های TEC در شناسایی آنامولی لرزه‌ای یونسفری

زهرا صادقی^{۱*}، مسعود مشهدی حسینی^۲

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد ژئودزی، دانشکده مهندسی نقشه برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
۲- دانشیار گروه ژئودزی، دانشکده مهندسی نقشه برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۰۱/۱۶ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۸/۲۶

چکیده

ایران بر روی یکی از دو کمربند بزرگ لرزه‌خیز جهان، موسوم به آلیا قرار دارد. وقوع زمین‌لرزه‌های مخرب در تمام نقاط کشور، سالانه خسارت‌های جانی و مالی فراوانی به مردم وارد می‌کند. پیش‌بینی این پدیده می‌تواند تأثیر بسزایی در کاهش مخاطرات ناشی از آن داشته باشد. از جمله پیش‌نشانگرهای زمین‌لرزه که امروزه مورد توجه بسیاری از دانشمندان می‌باشد، می‌توان به وقوع تغییرات ناهنجار در پارامترهای یونسفری اشاره نمود. پارامتر یونسفری مورد بررسی در این مقاله محتوای چگالی الکترون کل (TEC) حاصل از نقشه‌های جهانی یونسفری (GIM) است. سری زمانی داده‌های TEC شامل فرکانس‌های شناخته شده‌ای می‌باشد که منشأ لرزه‌ای ندارند. به نظر می‌رسد با حذف تأثیر این عوامل تا حد امکان، شناسایی آنامولی لرزه‌ای یونسفر به نحو مؤثرتری صورت پذیرد. در این مطالعه تغییرات TEC پیش از وقوع دو زمین‌لرزه در ایران با استفاده از روش میانگین، یکبار پیش از حذف فرکانس‌های شناخته شده و یکبار پس از آن بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد حذف پریودهای شناخته شده از داده‌های TEC در شناسایی آنامولی لرزه‌ای یونسفر مفید می‌باشد. در واقع پس از حذف فرکانس‌های شناخته شده، برای زمین‌لرزه‌های خوزستان و سمنان در محدوده شناسایی آنامولی لرزه‌ای یونسفر، در اغلب نقاط به ترتیب بهبود بیش از ۵۰ درصد و بیش از ۱۰ درصد وجود دارد.

کلیدواژه‌ها: یونسفر، زمین‌لرزه، TEC ، سری زمانی، آنالیز هارمونیک.

* نویسنده مکاتبه کننده: تهران - خیابان ولیعصر - تقاطع میرداماد - روبروی ساختمان اسکان - دانشکده مهندسی نقشه برداری.

تلفن: ۰۹۱۸۶۰۹۵۳۸۹

۱- مقدمه

ایران کشوری لرزه‌خیز است و گاه‌گاه زمین‌لرزه‌های بزرگی در آن به وقوع می‌پیوندد. با توجه به پتانسیل بالای ایران در زمینه وقوع زمین‌لرزه، نیازی اساسی به بررسی و تحقیق در مورد این پدیده مخاطره‌انگیز در کشور احساس می‌شود. پیش‌گویی زمین‌لرزه یکی از چالش‌های بزرگ دانشمندان در دهه‌های اخیر می‌باشد. با وجود پیشرفت‌های فراوان دانش زلزله‌شناسی در سال‌های اخیر، همچنان راهکار مؤثری برای پیش‌بینی پارامترهای زلزله وجود ندارد [۱]. از طرفی وقوع زمین‌لرزه‌ها در اغلب موارد همراه با مجموعه‌ای از ناهنجاری‌ها در ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی محیط می‌باشند. دانشمندان با توجه به مدل‌های مختلفی که پدید آمدن این گونه بی‌هنجاری‌ها را توجیه می‌کنند، سعی در بررسی تغییرات ژئوفیزیکی، ژئوشیمیایی و زیست‌شناختی در مناطق لرزه‌خیز دارند. اگرچه این مشاهدات تاکنون نتوانسته‌اند نشانه‌هایی قطعی از رویداد زمین‌لرزه‌ها در اختیار قرار دهند، ولی این امکان را فراهم آورده‌اند تا پس از وقوع رویداد اصلی، با بازبینی داده‌های مربوطه شناخت بهتری از پیش‌نشانگرها و امکان استفاده از آن‌ها در امر پیش‌بینی زمین‌لرزه‌ها بدست آید. هدف اصلی در این مطالعه نیز همین مسئله است. تغییرات ناهنجار یونسفری از جمله پیش‌نشانگرهای لرزه‌ای هستند [۲]. تا به امروز، دانشمندان براساس فرآیندهای ژئوفیزیکی و ژئوشیمیایی تئوری‌های بسیاری برای توضیح چگونگی پیدایش ناهنجاری‌های یونسفری طی زمین‌لرزه‌ها ارائه داده‌اند. به طور کلی می‌توان فرآیندهای زیر را عوامل اصلی ظهور ناهنجاری لرزه‌ای یونسفر دانست:

- فشرده شدن سنگ‌های نزدیک به مرکز زلزله باعث تولید موج مستقیم در یک طیف وسیع می‌شود که این موج می‌تواند منجر به ایجاد جریان‌های الکتریکی گردد [۳].
- سطوح مایعات موجود در زیر زمین بالا آمده و منجر به ظهور گازهای گرم می‌شوند [۴].

- حفره‌های مثبت^۱ (از نقطه نظر فیزیک نیمه‌هادی‌ها، یک O^- در قالب O^{-2} یک حفره مثبت است. بنابراین یک O^{-2} ، یک زوج حفره مثبت (PHP) می‌باشد که در حالت عادی غیرفعال است) توسط امواج آکوستیک^۲ فعال شده و به سطح زمین می‌رسند [۵].
- تشعشعات یون‌های فلزی^۳ یا گازی مانند رادون که پتانسیل الکتریکی اتمسفر را در نزدیکی سطح زمین افزایش می‌دهند [۷و۶].

زمین‌لرزه آلاسکا^۴ با بزرگای گشتاوری ۹/۳ و عمق ۲۵ کیلومتر که در تاریخ ۲۸ مارچ سال ۱۹۶۴ رخ داده، نخستین زلزله‌ای بود که تغییرات یونسفری طی آن مورد توجه محققین قرار گرفت [۸و۱۰]. به دنبال آن، در مطالعات بسیاری تغییرات پارامترهای مختلف یونسفری، طی زمین‌لرزه‌ها بررسی شده است. در این میان بررسی داده‌های چگالی الکترون کل (TEC^5) سهم بسزایی در کشف تغییرات یونسفری مرتبط با زمین‌لرزه داشته و در تحقیقات بسیاری مورد استفاده قرار گرفته است. امروزه با پیشرفت رزولوشن مکانی و زمانی داده‌های TEC مطالعات لرزه‌ای یونسفری به سرعت در حال توسعه است. نخستین بار کالای^۶ و مینستر^۷ با بررسی تغییرات TEC حاصل از مشاهدات سیستم تعیین موقعیت جهانی (GPS^8)، آنامولی لرزه‌ای یونسفری را طی زمین‌لرزه نورسریج^۹ شناسایی کردند. این زمین‌لرزه در تاریخ ۱۷ ژانویه سال ۱۹۹۴ رخ داده، بزرگای گشتاوری آن ۶/۷ و عمق آن ۱۸/۲۰ کیلومتر

^۱ Positive Holes^۲ Acoustic^۳ Metallic ions^۴ Alaska^۵ Total Electron Content^۶ Calais^۷ Minster^۸ Global Positioning System^۹ Northridge

ایجاد تغییرات زمانی و مکانی چگالی الکترونی یونسفر می شود [۲۰]. تغییرات زمانی یونسفر را می توان به تغییرات منظم و نامنظم طبقه بندی نمود. بررسی تغییرات نامنظم دشوار و گاهی غیرممکن است، در حالیکه تغییرات منظم عموماً قابل مدل کردن و پیش بینی می باشند. طوفان های یونسفری^۹، اغتشاشات یونسفری ناگهانی^{۱۰} (*SID*)، اغتشاشات یونسفری سیرکننده^{۱۱} (*TID*) و زیر طوفان شفق قطبی^{۱۲} را می توان از تغییرات زمانی نامنظم در یونسفر دانست. تغییرات روزانه، سالانه و تغییرات ناشی از فعالیت های لکه های خورشیدی (۲۷ روزه و ۱۱ ساله) از جمله تغییرات زمانی منظم یونسفر هستند. بنابراین در نظر گرفتن تأثیر تغییرات منظم در مطالعات لرزه ای یونسفر ضروری به نظر می رسد. این مقاله در نظر دارد تا به بررسی این موضوع بپردازد.

برای این منظور در بخش اول، آنالیز هارمونیک سری های زمانی *TEC* و همچنین روش میانگین و انحراف معیار معرفی شده است. داده های مورد استفاده در این مطالعه در بخش دوم معرفی شده و نهایتاً در بخش سوم نتایج بررسی ها برای دو زمین لرزه در ایران شرح داده می شود. در بخش پایانی نتیجه کلی حاصل از این مطالعه بیان شده است.

۲- روش ها

در ادامه روش ها تشریح شده است.

۲-۱- آنالیز هارمونیک تک متغیره

نخستین بار امیری سیمکوئی و همکارانش در سال ۲۰۰۷ روش برآورد کمترین مربعات هارمونیک (*LS-HE*)^{۱۳} را توسعه داده و برای آنالیز سری های زمانی

بوده است [۱۱]. لیو^۱ و همکارانش در سال ۲۰۰۱ با بررسی آنامولی لرزه ای یونسفری طی زمین لرزه چی-چی^۲، متوجه وابستگی بالای فرکانس بحرانی لایه *F2* بدست آمده از ایستگاه یونوسوند و *TEC* شدند [۱۲]. به دنبال این مطالعه تعداد زیادی از محققین از نقشه های جهانی یونسفر برای بررسی تغییرات ناهنجار *TEC* پیش از وقوع زمین لرزه ها در سراسر جهان استفاده کردند. از جمله مهمترین این مطالعات می توان به بررسی زمین لرزه سال ۲۰۰۴ سوماترا^۳ با بزرگای ۹/۳ [۱۳]، مطالعه زمین لرزه ونچون^۴ با بزرگای ۸ که در سال ۲۰۰۸ رخ داده [۱۶ و ۱۵، ۱۴] و زمین لرزه سال ۲۰۱۰ هائیتی^۵ با بزرگای هفت اشاره کرد [۱۷]. همچنین مشهدی حسینی و قدسی در سال ۱۳۹۳ با استفاده از داده های *TEC* حاصل از نقشه های *GIM*^۶، ناهنجاری های یونسفری را پیش از زمین لرزه هایی در فیلیپین و ژاپن بررسی نمودند [۱۸]. با توجه به پوشش جهانی نقشه های *GIM* علاوه بر توزیع زمانی می توان توزیع مکانی این آنامولی ها را نیز مورد بررسی قرار داد. بدین ترتیب تأثیرات محلی زمین لرزه ها از اثرات جهانی طوفان های مغناطیسی قابل تشخیص خواهد بود.

از طرفی علت اصلی پدیده یونیزاسیون در لایه یونسفر تابش شدید (پرانرژی) فرابنفش^۷ (*EUV*) و همچنین تابش پرتو *X* نرم^۸ (پرتو *X* با فرکانس های پایین تر) خورشید می باشد [۱۹]. در نتیجه هرگونه تغییر در تابش خورشیدی و موقعیت آن نسبت به زمین موجب

^۱ Liu

^۲ Chi-Chi

^۳ Sumatra

^۴ Wenchuan

^۵ Haiti

^۶ Global Ionospheric Map

^۷ Extreme Ultra Violet

^۸ Soft X-ray

^۹ Ionospheric storm

^{۱۰} Sudden Ionospheric Disturbances

^{۱۱} Travelling Ionospheric disturbance

^{۱۲} Auroral substorm

^{۱۳} Least-Squares Harmonic Estimation

رابطه (۱) به صورت رابطه (۲) بسط داده می شود:

$$E(y) = Ax + A_k x_k, D(y) = Q_y \quad \text{رابطه (۲)}$$

در رابطه (۲) A_k از دو ستون متشکل از تابع سینوسی وابسته به فرکانس ω_k ، به صورت رابطه (۳) تشکیل می شود:

رابطه (۳)

$$A_k = \begin{bmatrix} \cos \omega_k t_1 & \sin \omega_k t_1 \\ \cos \omega_k t_2 & \sin \omega_k t_2 \\ \vdots & \vdots \\ \cos \omega_k t_3 & \sin \omega_k t_3 \end{bmatrix} \quad x_k = \begin{bmatrix} a_k^1 \\ a_k^2 \end{bmatrix}$$

در رابطه (۳)، ω_k و x_k مجهولات می باشند. فرکانس مجهول ω_k در این ماتریس در سال ۲۰۱۲ توسط امیری سیمکویی و عسگری با استفاده از HE برآورد شده است. برای این منظور دو فرض صفر H_0 (عدم وجود تأثیرات پریودیک) و فرض مخالف H_1 مطابق رابطه (۴) در نظر گرفته می شود:

$$H_0: E(y) = Ax \quad \text{رابطه (۴)}$$

$$H_1: E(y) = Ax + A_k x_k$$

آزمون آماری در رابطه (۴) به صورت تکراری برای فرکانس های مختلف انجام می شود و رد فرض صفر در آن معادل وجود فرکانس ω_k در سری زمانی مورد بررسی است. با قبول هر ω_k ترم سینوسی و کسینوسی مربوط به آن را ($A_k x_k$) به فرض صفر اضافه کرده و تست برای فرکانس های بعدی تکرار می شود. ω_k مربوط به هر مرحله از یک رابطه بیشینه سازی به صورت رابطه (۵) محاسبه می شود:

$$\omega_k = \arg \max_{\omega_j} P(\omega_j) \quad \text{رابطه (۵)}$$

در رابطه (۵)، $P(\omega_j)$ توان طیفی فرکانس ω_j بوده و از رابطه (۶) بدست می آید:

رابطه (۶) $P(\omega_j) = e_0^T Q_y^{-1} A_j (A_j^T Q_y^{-1} p_A^\perp A_j)^{-1} A_j^T Q_y^{-1} e_0$ ساختار ماتریس A_j همانند ماتریس A_k است با این تفاوت که ω_j جایگزین ω_k می شود. e_0 باقیمانده های کمترین مربعات و p_A^\perp تصویرگر قائم می باشند و تحت فرض صفر به صورت رابطه (۷) تعریف می گردند:

مختصات GPS استفاده کردند [۲۱ و ۲۲]. سپس در سال ۲۰۱۲ امیری سیمکویی و عسگری با آنالیز داده های TEC حاصل از GIM پریودهای موجود در سری زمانی این داده ها را شناسایی نمودند.

در این روش، قسمت تابعی مدل با شناخت و در نظر گرفتن توابع هارمونیک بهبود داده می شود. مدل خطی معادلات مشاهدات را طبق رابطه (۱) در نظر گرفته:

$$E(y) = Ax, D(y) = Q_y \quad \text{رابطه (۱)}$$

در رابطه (۱)، A ماتریس ضرایب به ابعاد $m \times n$ ، Q_y ماتریس کواریانس با ابعاد $m \times m$ بردار مجهولات با n درایه، y بردار مشاهدات با m درایه و D و E به ترتیب اپراتور کواریانس و امید می باشند. در صورت معلوم بودن برخی الگوهای پریودیک در مشاهدات، مدل ریاضی در رابطه (۱) را می توان بهبود داد. در کمترین مربعات هارمونیک این الگوهای پریودیک به وسیله سیگنال های سینوسی بیان می شوند. در واقع آنالیز هارمونیک تعمیمی از روش فوریه است، با این تفاوت که در آنالیز هارمونیک محدودیت هایی از جمله داده هایی با میانگین صفر، هم فاصله و با نویز سفید وجود ندارد. غالباً در سری های زمانی گپ وجود دارد به علاوه این داده ها وابسته به زمان هستند که این به معنای وجود نویز رنگی در مشاهدات است. نکته حائز اهمیت دیگر اینکه آنالیز طیفی فوریه به فرکانس های صحیح محدود می باشد. با توجه به این نکات می توان گفت آنالیز هارمونیک روش بسیار جامع تری نسبت به روش فوریه به منظور بررسی داده های TEC است [۲۳ و ۲۴].

برآورد هارمونیک (HE^1) برای شناسایی اثرات پریودیک مدل نشده مورد استفاده قرار می گیرد. ساده ترین ساختار سری ها را می توان به صورت یک ترم مثلثاتی مانند $y(t) = a_k^1 \cos \omega_k t + a_k^2 \sin \omega_k t$ ، که یک موج سینوسی با یک فاز اولیه می باشد بیان کرد. بنابراین

¹ Harmonic Estimation

۲-۲- تشخیص آنامولی لرزه‌ای یونسفر با استفاده

از پارامترهای میانگین و انحراف معیار

با فرض نرمال بودن توزیع داده‌ها، میانگین و انحراف معیار داده‌ها برای تعیین حدود آستانه بالا و پایین مورد نیاز جهت شناسایی آنامولی‌های لرزه‌ای از سایر تغییرات به کار می‌روند. حدود آستانه بالا و پایین مطابق روابط (۱۱) و (۱۲) بدست می‌آیند:

$$x_{high} = \mu + k \times \sigma \quad \text{رابطه (۱۱)}$$

$$x_{low} = \mu - k \times \sigma \quad \text{رابطه (۱۲)}$$

رابطه (۱۳)

$$x_{low} < x < x_{high} \Rightarrow -k < \frac{x - \mu}{\sigma} < k; \quad Dx = \frac{x - \mu}{\sigma}$$

در روابط بالا x ، x_{low} ، x_{high} ، μ و σ و Dx به ترتیب مقدار پارامتر، حد آستانه بالایی، حد آستانه پایینی، مقدار میانگین، انحراف معیار و انحراف استاندارد شده x از میانگین می‌باشند. در شرایط طبیعی، اگر مشاهدات از توزیع نرمال پیروی کنند هر مشاهده به احتمال $۶۸/۳\%$ در فاصله اطمینان $(\mu \pm \sigma)$ ، به احتمال $۹۵/۴\%$ در فاصله اطمینان $(\mu \pm 2\sigma)$ و به احتمال $۹۹/۷\%$ در فاصله اطمینان $(\mu \pm 3\sigma)$ قرار خواهد گرفت [۲۶]. براساس رابطه (۱۳) اگر قدرمطلق پارامتر Dx بزرگتر از k ($|Dx| > k$) باشد، رفتار پارامتر x ناهنجار تشخیص داده می‌شود [۲۷]. همچنین براساس این روابط، درصد میزان انحراف پارامتر از وضعیت عادی با $p = \pm 100 \times (|Dx| - k) / k$ قابل محاسبه است. مقدار پارامتر k متناسب با بزرگای زمین‌لرزه انتخاب می‌شود. به عبارت دیگر برای زلزله‌های با بزرگای بیشتر از ۷ مقدار پارامتر k می‌تواند بزرگتر از ۲ انتخاب شود [۲۸].

۳- داده‌ها و زمین‌لرزه‌های مورد بررسی

در این مطالعه دو زمین‌لرزه که در سال ۲۰۱۰ (۱۳۸۸-۱۳۸۹) در ایران رخ داده، مورد بررسی قرار گرفته است. علت انتخاب سال ۲۰۱۰ پایین بودن

$$\hat{e}_0 = p_A^\perp y \quad \text{رابطه (۷)}$$

$$p_A^\perp = I - A(A^T Q_y^{-1} A)^{-1} A^T Q_y^{-1}$$

برآورد تحلیلی فرکانس‌ها براساس روابط ذکر شده پیچیده بوده و در عمل روش‌های عددی مورد استفاده قرار می‌گیرند. بدین منظور، به ازای فرکانس‌های مختلف مقادیر طیفی محاسبه شده و فرکانسی که مقدار طیفی متناظرش ماکزیمم باشد در تشکیل A_k مورد استفاده قرار می‌گیرد. با توجه به اینکه بایستی تمامی ω_j ها در نظر گرفته شود از رابطه بازگشتی زیر (رابطه (۸)) برای تشکیل ω_j استفاده می‌شود:

رابطه (۸)

$$T_j = (1 + \alpha \frac{T_{j-1}}{T}) T_{j-1}, \quad \omega_j = \frac{2\pi}{T_j} \quad j = 1, 2, \dots$$

در رابطه (۸) به منظور در نظر گرفتن تمامی فرکانس‌ها، α یک ضریب کوچک می‌باشد (به عنوان مثال $\alpha = 0.1$). همچنین در این رابطه T_1 زمان مربوط به فرکانس نایکویست و T طول بازه سری زمانی است. پس از یافتن ω_k فرض‌های آماری مدنظر تست می‌شود. آماره این آزمون مطابق رابطه (۹) است:

رابطه (۹)

$$T_2 = e_0^T Q_y^{-1} A_k (A_k^T Q_y^{-1} p_A^\perp A_k)^{-1} A_k^T Q_y^{-1} \hat{e}_0$$

در صورت معلوم بودن Q_y ، آماره دارای توزیع کای اسکور با دو درجه آزادی است. چنانچه $Q_y = I$ (یعنی ماتریس یکه)، در این صورت طبق رابطه (۱۰) خواهیم داشت:

$$P(\omega_j) = e_0^T A_j (A_j^T A_j)^{-1} A_j^T \hat{e}_0 \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

به طور کلی نتایج امیری سیمکویی و عسگری، بیانگر وجود دو الگوی پریودیک روزانه با پریودهای $24h/n$ ، $n = 1, 2, \dots, 6$ و سالانه با پریودهای $365.25 days/n$ ، $n = 1, \dots, 4$ در سری زمانی داده‌های TEC است. همچنین در این سری زمانی پریودهای ۲۷ روزه و ۱۱ ساله که به ترتیب مربوط به دوره لکه‌های خورشیدی و دوران خورشید می‌باشند، قابل شناسایی هستند [۲۳ و ۲۵].

سطح فعالیت‌های خورشیدی در این سال می‌باشد. ارائه شده است. مشخصات مربوط به این زلزله‌ها در جدول شماره (۱)

جدول ۱: مشخصات زمین‌لرزه‌های مورد بررسی

زمین‌لرزه	تاریخ وقوع	مختصات مرکز	بزرگای گشتاوری	عمق (km)
خوزستان	۱۳۸۸/۱۲/۰۴ ساعت ۱۳:۵۵	$32.508^{\circ}N, 48.290^{\circ}E$	۵/۲	۳۵
سمنان	۱۳۸۹/۰۶/۰۵ ساعت ۲۰:۵۳	$35.490^{\circ}N, 54.470^{\circ}E$	۵/۸	۷

۴-۱- شناسایی و حذف فرکانس‌ها

برای تمام نقاط گرید، سری زمانی داده‌های TEC از سال ۲۰۰۲ تا سال ۲۰۱۵ (سری با طول بیش از ۱۱ سال، به منظور حذف تمام فرکانس‌های مربوط به فعالیت‌های خورشیدی) تشکیل شده است. با توجه به رابطه (۲) ابتدا ترند خطی و سپس پریود روزانه و هارمونیک‌های آن ($24h/n$, $n=1,2,...,5$),

پریود سالانه و هارمونیک‌هایش ($365.25days/n$, $n=1,...,4$) و همچنین پریودهای ۲۷ روزه و ۱۱ ساله از سری زمانی مربوطه حذف شده است. توان طیفی مربوط به این پریودها در شکل-های (۱) الی (۱۱) ارائه شده است.

براساس این شکل‌ها، به طور کلی برای تمام پریودها توان طیفی در محدوده استوای مغناطیسی بیشینه است. بنابراین می‌توان گفت میدان مغناطیسی زمین یکی از دلایل اصلی وقوع این پریودها است. از طرفی کشور ایران در مجاورت این محدوده قرار دارد و با توجه به شکل‌های (۲)، (۴)، (۶) و (۱۱) توان طیفی به ویژه برای پریودهای یک‌چهارم روزانه، یک‌دوم روزانه، ۲۷ روزه و ۱۱ ساله در ایران نسبت به اغلب نقاط کره‌زمین بیشتر است. این موضوع به نحوی نشانگر ضرورت حذف این فرکانس‌ها در مطالعات لرزه‌ای یونسفر در ایران می‌باشد.

در این مطالعه برای شناسایی ناهنجاری‌های یونسفری پیش از زمین‌لرزه از داده‌های TEC نقشه‌های جهانی یونسفر محصول مرکز $CODE^1$ استفاده شده است. در این نقشه‌ها، $VTEC$ در یک چارچوب مرجع خورشیدی-ژئومغناطیسی با استفاده از بسط هارمونیک-های کروی مدل می‌شود. پوشش مکانی نقشه‌های جهانی یونسفر شامل عرض‌های 87.5° تا -87.5° درجه و طول‌های 180° تا -180° درجه، با رزولوشن مکانی 2.5° درجه در عرض و 5° درجه در طول جغرافیایی می‌باشد. این داده‌ها در سایت $UNIBE$

(<ftp://ftp.unibe.ch/aiub/CODE>) در اختیار کاربران قرار دارد. در این مطالعه به منظور ارزیابی سطح فعالیت‌های خورشیدی و ژئومغناطیسی، شاخص‌های Kp و Dst و همچنین شاخص شار خورشیدی $F10.7$ بررسی و مورد استفاده قرار گرفته است. شاخص Kp و $F10.7$ از طریق سایت $SPIDR^2$ (<http://spidr.ngdc.noaa.gov/spidr>) و شاخص Dst از طریق سایت $ISGI^3$ (<http://isgi.unistra.fr/>) در دسترس می‌باشند.

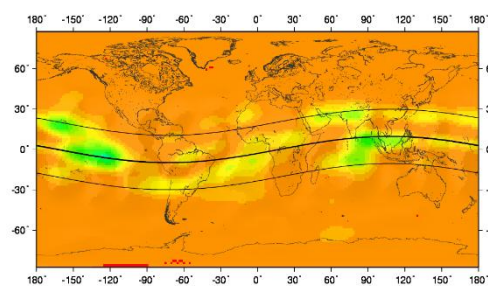
۴-۲- بحث و بررسی نتایج

در ادامه، نتایج بدست آمده بحث و بررسی شده‌اند.

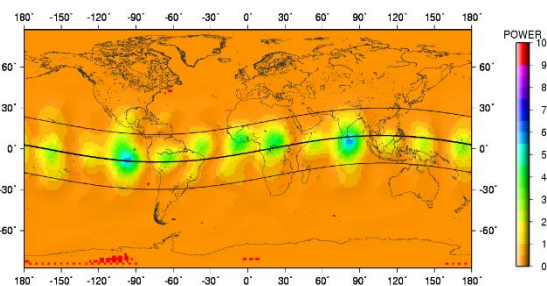
¹ Center for Orbit Determination in Europe

² Space Physics Interactive Data Resource

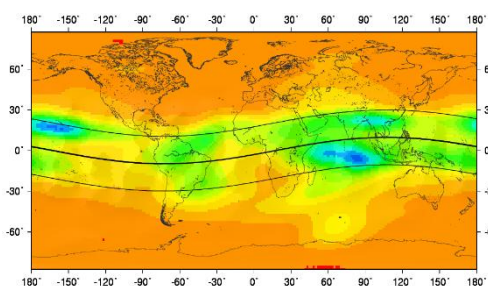
³ International Service of Geomagnetic Indices



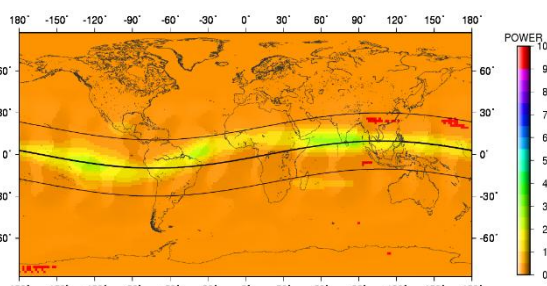
شکل ۲: مقدار توان طیفی پریود یک چهارم روزانه با ضریب 10^{-4}



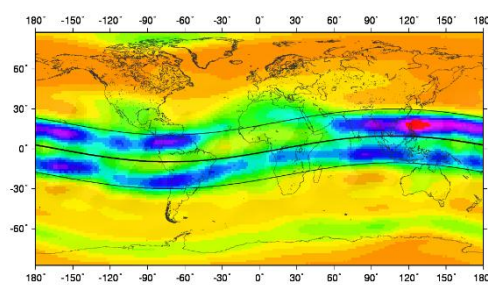
شکل ۱: مقدار توان طیفی پریود یک پنجم روزانه با ضریب 10^{-4}



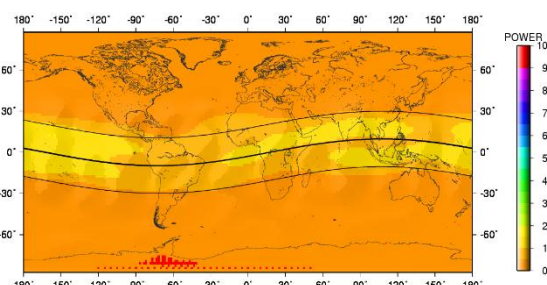
شکل ۴: مقدار توان طیفی پریود یک دوم روزانه با ضریب 10^{-5}



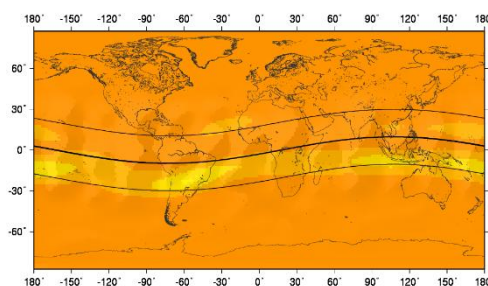
شکل ۳: مقدار توان طیفی پریود یک سوم روزانه با ضریب 10^{-5}



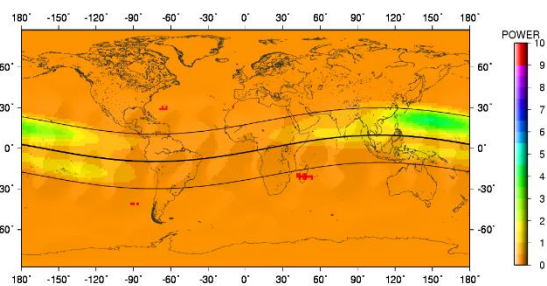
شکل ۶: مقدار توان طیفی پریود ۲۷ روزه با ضریب 10^{-3}



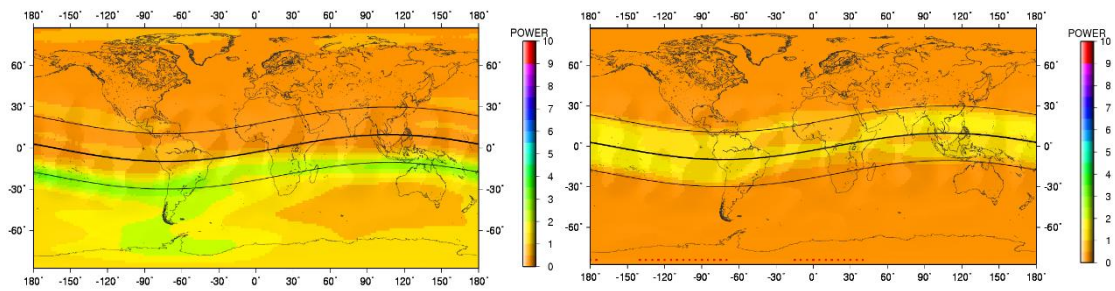
شکل ۵: مقدار توان طیفی پریود روزانه با ضریب 10^{-7}



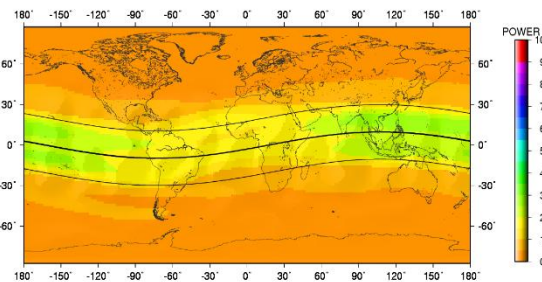
شکل ۸: مقدار توان طیفی پریود $\frac{1}{3}$ سالانه با ضریب 10^{-5}



شکل ۷: مقدار توان طیفی پریود $\frac{1}{4}$ سالانه با ضریب 10^{-4}



شکل ۹: مقدار توان طیفی پریود $\frac{1}{2}$ سالانه با ضریب 10^{-6} شکل ۱۰: مقدار توان طیفی پریود سالانه با ضریب 10^{-6}



شکل ۱۱: مقدار توان طیفی پریود ۱۱ ساله با ضریب 10^{-7}

اینرو، تشخیص آنامولی در سطح اطمینان ۹۵/۴٪ صورت گرفته و در واقع از دو برابر انحراف معیار برای تعیین حدود ناحیه اطمینان استفاده شده است، به طوریکه اگر مقدار TEC در فاصله $(\mu \pm 2\sigma)$ قرار نگیرد به عنوان مقدار ناهنجار شناخته می‌شود.

در مرحله نخست نزدیکترین نقطه شبکه به مرکز زلزله مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور در هر بازه زمانی دو ساعته، میزان انحراف مقادیر TEC از فاصله اطمینان $(\mu \pm 2\sigma)$ محاسبه می‌شود. آنامولی لرزه‌ای یونسفر عموماً ده روز پیش از زمین‌لرزه قابل مشاهده است [۲۷ و ۴]. از اینرو آنامولی‌هایی که ده روز قبل از وقوع زمین‌لرزه شناسایی شده مورد توجه هستند. نهایتاً به منظور بررسی توزیع مکانی آنامولی‌های مشاهده شده در اطراف مرکز زلزله، محاسبات در تمام نقاط گرید انجام شده است. بررسی برای داده‌های حاصل پس از حذف پریودها نیز انجام شده است.

الف- زمین‌لرزه خوزستان

مقادیر اندیس‌های $F10.7$ ، Dst ، Kp سی روز پیش از این زمین‌لرزه (۵ بهمن ۱۳۸۸ الی ۴ اسفند ۱۳۸۸) در

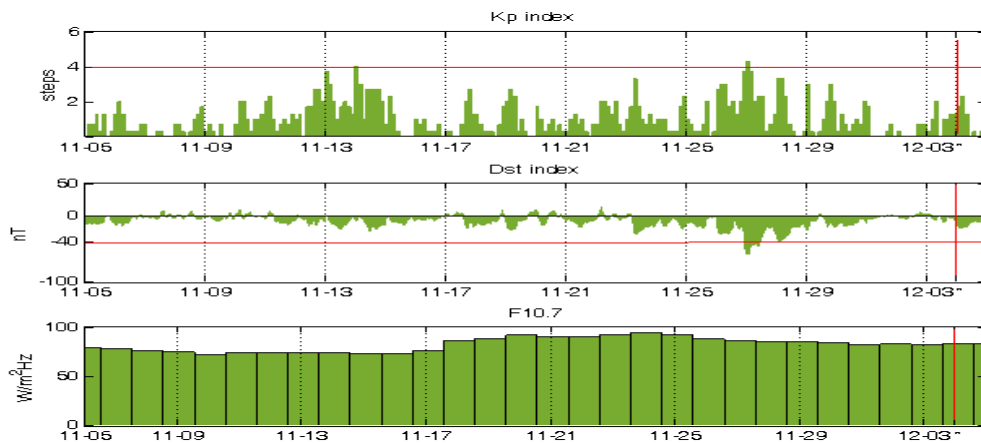
۴-۲- شناسایی ناهنجاری‌های لرزه‌ای یونسفر

به منظور شناسایی آنامولی‌های لرزه‌ای یونسفر، ابتدا بایستی نمونه مرجع برای محاسبه میانگین و انحراف معیار تعریف گردد. این نمونه، غالباً بازه زمانی ۱۵ و یا سی روزه پیش از وقوع زمین‌لرزه می‌باشد. نمونه مرجع در این مطالعه داده‌های TEC سی روز پیش از رخداد زمین‌لرزه است. همچنین این نمونه مرجع بایستی شامل روزهایی با فعالیت‌های آرام مغناطیسی باشد [۲۷]. بنابراین داده‌های مربوط به روزهایی که فعالیت‌های ژئومغناطیسی بالا بوده $(Kp \geq 4, Dst \leq -40)$ و $F10.7 \geq 100$ از سری‌های زمانی مورد استفاده حذف گردیده و مقدار میانگین و انحراف معیار روزهای باقیمانده محاسبه شده است.

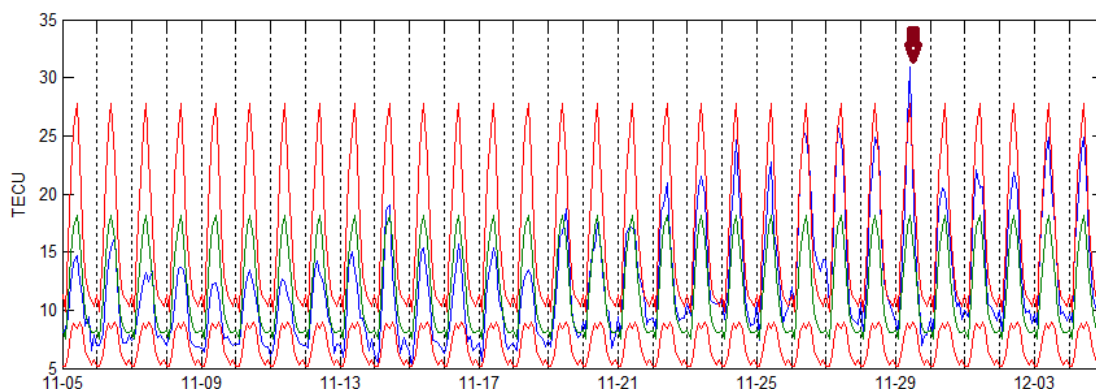
در این تحقیق با توجه به بزرگای زمین‌لرزه‌های مورد مطالعه $(M < 7)$ ، پارامتر k بیش از ۲ انتخاب نشده است. از طرفی اگر مقدار پارامتر k کمتر از ۲ باشد (انجام آزمون آماری در سطوح اطمینان پایین‌تر)، هر نوع تغییر کوچکی به عنوان آنامولی شناسایی شده و در واقع خطای نوع اول در انجام آزمون افزایش می‌یابد. از

دارای مختصات $32/5$ درجه شمالی و 50 درجه شرقی است. نتایج بررسی آنامولی در این نقطه در شکل (۱۳) نمایش داده شده است. در این شکل نمودارهای آبی، سبز و دو نمودار قرمز به ترتیب نشان‌دهنده مقادیر TEC ، مقدار میانگین و حدود آستانه بالایی و پایینی می‌باشد. با توجه به این شکل در تاریخ ۲۹ بهمن در این نقطه، TEC افزایش ناهنجاری دارد. به همین جهت در این روز توزیع مکانی آنامولی مورد بررسی قرار گرفته است.

شکل (۱۲) گزارش شده است. مطابق با این شکل، اندیس Kp در روزهای ۱۳ و ۲۶ بهمن و اندیس Dst در روزهای ۲۶ الی ۲۸ بهمن مقادیر نامتعارفی دارند. با توجه به شکل (۱۲) میزان $F10.7$ در این بازه زمانی همواره مناسب بوده و ماکزیمم مقدار آن ۹۳ می‌باشد. بدین ترتیب، روزهای ۱۳ بهمن و ۲۶ الی ۲۸ بهمن را از سی روز داده مورد بررسی حذف و مقدار میانگین و انحراف معیار ۲۶ روز باقیمانده محاسبه شده است. نزدیکترین نقطه شبکه به مرکز زمین لرزه خوزستان



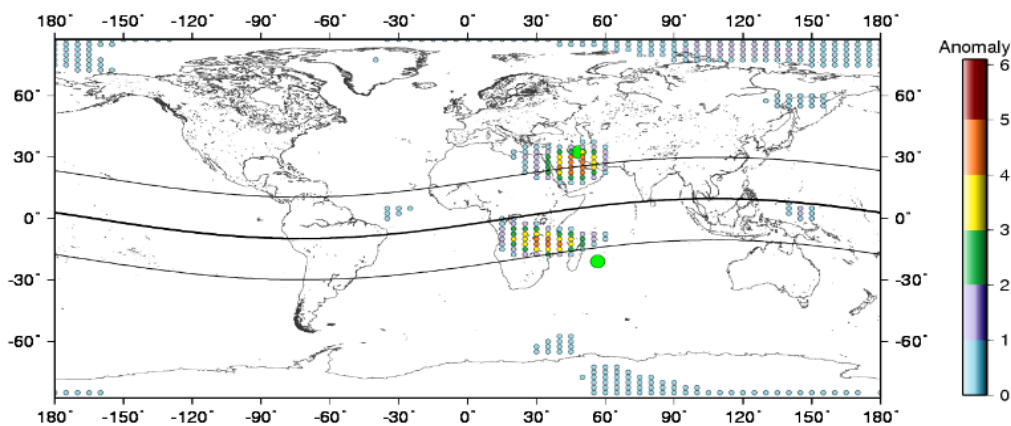
شکل ۱۲: مقادیر اندیس‌های ژئومغناطیسی در بازه زمانی ۵ بهمن الی ۴ اسفند سال ۱۳۸۸، محورهای افقی نشان دهنده تاریخ و محورهای عمودی مقادیر اندیس‌های Kp ، Dst و $F10.7$ است که واحد آن‌ها در کنار محور مشخص شده است.



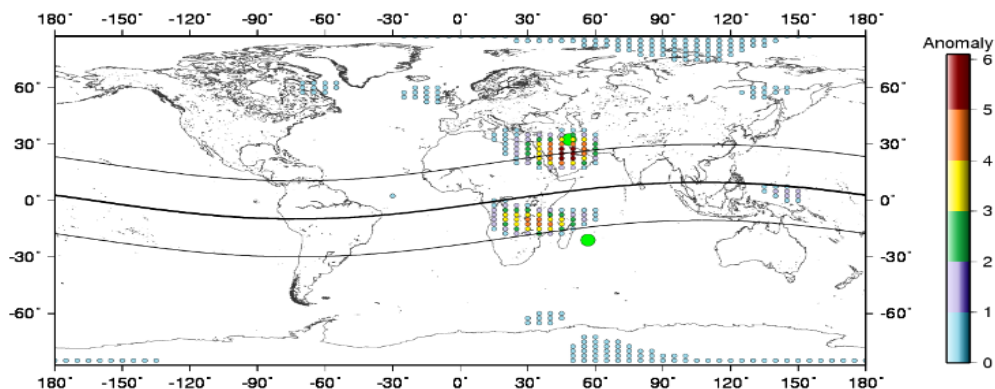
شکل ۱۳: نتایج بررسی تغییرات TEC نقطه‌ای از شبکه با مختصات $32/5$ درجه شمالی و 50 درجه شرقی، محور افقی نشان دهنده تاریخ و محور عمودی مقادیر TEC بر حسب $TECU$ است.

در اکثر نقاط در نزدیکی مرکز زمین لرزه با حذف پریودها، میزان آنامولی افزایش می‌یابد. بنابراین می‌توان گفت با حذف پریودهای شناخته شده آنامولی‌های لرزه-ای با وضوح بیشتری قابل شناسایی هستند. برای زمین لرزه خوزستان این آنامولی‌ها ۵ روز پیش از زلزله قابل تشخیص است. به عبارتی، حذف فرکانس‌ها منجر به افزایش آنامولی لرزه‌ای یونسفر در مجاورت مرکز زمین لرزه می‌شود. در حالیکه برای مناطق غیر منطبق بر محدوده وقوع زمین لرزه و مزدوج مغناطیسی آن حذف فرکانس‌ها باعث حذف سیگنال آنامولی یونسفری شده است.

مطابق شکل‌های (۱۴) و (۱۵)، نتایج نشان می‌دهد، که در این روز و در بازه زمانی ۱۳:۳۰ الی ۱۵:۳۰ به وقت محلی (۱۰ الی ۱۲ UT))، هم برای داده‌ها پیش از حذف پریودهای مورد بحث و هم پس از حذف در نزدیکی مرکز زمین لرزه و نقطه مزدوج مغناطیسی آن آنامولی چشمگیری مشاهده می‌شود. اگرچه در هر دو حالت این آنامولی در نواحی دیگر نیز مشاهده می‌شود، اما میزان آن در اطراف مرکز زمین لرزه و نقطه مزدوج آن به طور قابل ملاحظه‌ای بیش از سایر نقاط است. با توجه به این شکل‌ها، در نیم کره شمالی و در عرض‌های جغرافیایی بالا در اکثر نقاط میزان آنامولی‌ها پس از حذف پریودهای موردنظر کاهش یافته است. در حالیکه



شکل ۱۴: میزان انحراف مقادیر TEC از حدود اطمینان ($\mu \pm 2\sigma$) در تاریخ ۲۹ بهمن ساعت ۱۳:۳۰ الی ۱۵:۳۰ به وقت محلی، پیش از حذف پریودها



شکل ۱۵: میزان انحراف مقادیر TEC از حدود اطمینان ($\mu \pm 2\sigma$) در تاریخ ۲۹ بهمن ساعت ۱۳:۳۰ الی ۱۵:۳۰ به وقت محلی، پس از حذف پریودها

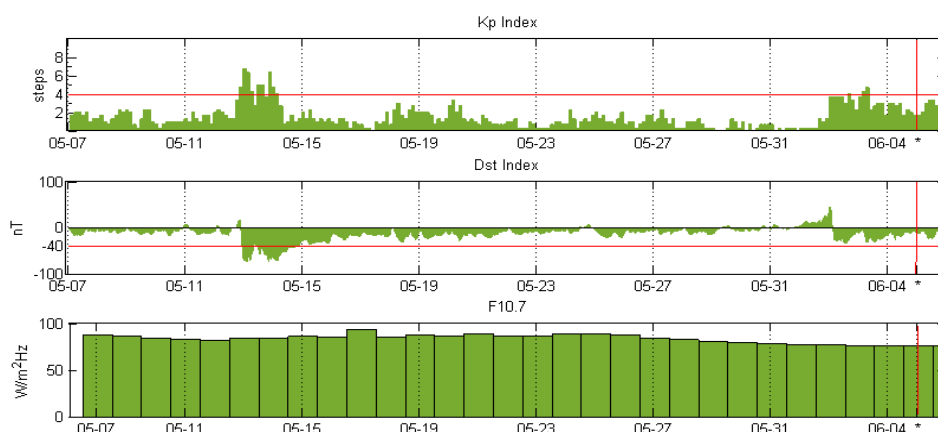
به این شکل اندیس Kp در روزهای ۱۲ الی ۱۴ مرداد و ۲ شهریور مقداری بیش از ۴ داشته و اندیس Dst در روزهای ۱۲ الی ۱۴ مرداد مقداری کمتر از ۴۰- دارد. در این بازه زمانی نیز $F10.7$ همواره مقدار مناسبی داشته که علت این امر می‌تواند پایین بودن سطح فعالیت‌های خورشیدی در سال ۲۰۱۰ باشد. در نتیجه به منظور محاسبه میانگین و انحراف معیار ۴ روز ذکر شده از بازه زمانی ۷ مرداد الی ۵ شهریور کنار گذاشته شده و سپس میانگین و انحراف معیار محاسبه شده است.

نقطه‌ای از شبکه با مختصات ۳۵ درجه شمالی و ۵۵ درجه شرقی، نزدیکترین نقطه گرید به مرکز زمین‌لرزه سمنان می‌باشد. از اینرو ابتدا داده‌های TEC در این نقطه مورد بررسی قرار گرفته که نتایج آن در شکل (۱۷) ارائه شده است. در این شکل نیز نمودارهای آبی، سبز و دو نمودار قرمز به ترتیب نشان‌دهنده مقادیر TEC ، مقدار میانگین و حدود آستانه بالایی و پایینی می‌باشد. با توجه به این شکل در بازه زمانی ده روز پیش از وقوع زلزله در روزهای ۵ و ۲ شهریور TEC افزایش ناهنجاری داشته است.

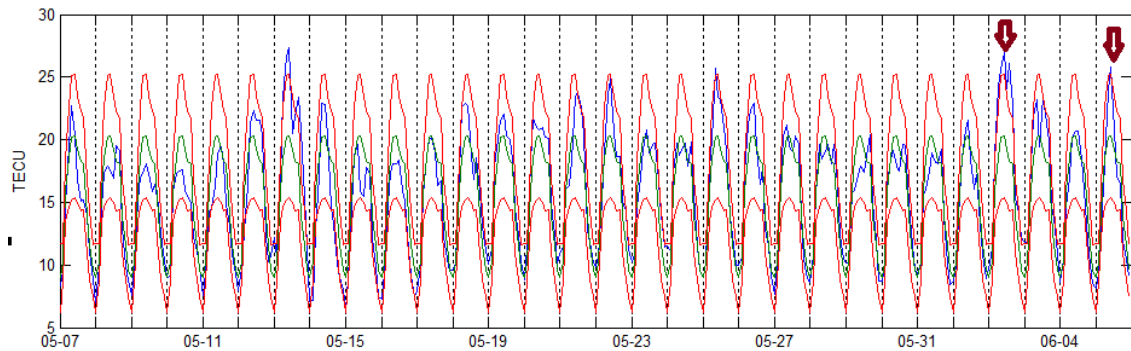
به‌منظور بررسی میزان بهبود نتایج، درصد میزان انحراف TEC از وضعیت عادی ($p = \pm 100 \times (|Dx| - k) / k$ پیش و پس از حذف فرکانس‌ها محاسبه شده است. نتایج مربوط به محدوده-ای واقع در اطراف مرکز زمین‌لرزه شامل طول جغرافیایی ۳۵ الی ۶۰ درجه شرقی و عرض ۱۷/۵ الی ۳۵ درجه شمالی، در جدول (۱) در بخش ضمیمه (۱) ارائه شده است. ستون سوم این جدول بیانگر میزان بهبود نتایج می‌باشد. با توجه به این جدول در برخی نقاط درصد میزان انحراف از وضعیت عادی تا سه برابر افزایش داشته که این موضوع به معنای بهبود ۲۰۰ درصدی نتایج است. به طور کلی می‌توان گفت از میان ۴۸ نقطه شبکه، ۳۸ نقطه بالای ۵۰ درصد، ۲۷ نقطه بالای ۶۰ درصد، ۱۹ نقطه بالای ۷۰ درصد، ۱۳ نقطه بالای ۸۰ درصد، ۱۱ نقطه بالای ۹۰ درصد و ۱۰ نقطه بالای ۱۰۰ درصد بهبود نتیجه دارند. این نتایج و میزان بهبود بسیار حائز اهمیت می‌باشد.

ب- زمین‌لرزه سمنان

شرایط فعالیت‌های ژئومغناطیسی در بازه زمانی بررسی زمین‌لرزه سمنان مطابق شکل (۱۶) می‌باشد. با توجه



شکل ۱۶: مقادیر اندیس‌های ژئومغناطیسی در بازه زمانی ۷ مرداد الی ۵ شهریور، محورهای افقی نشان دهنده تاریخ و محورهای عمودی مقادیر اندیس‌های Kp ، Dst و $F10.7$ است که واحد آن‌ها در کنار محور مشخص شده است.



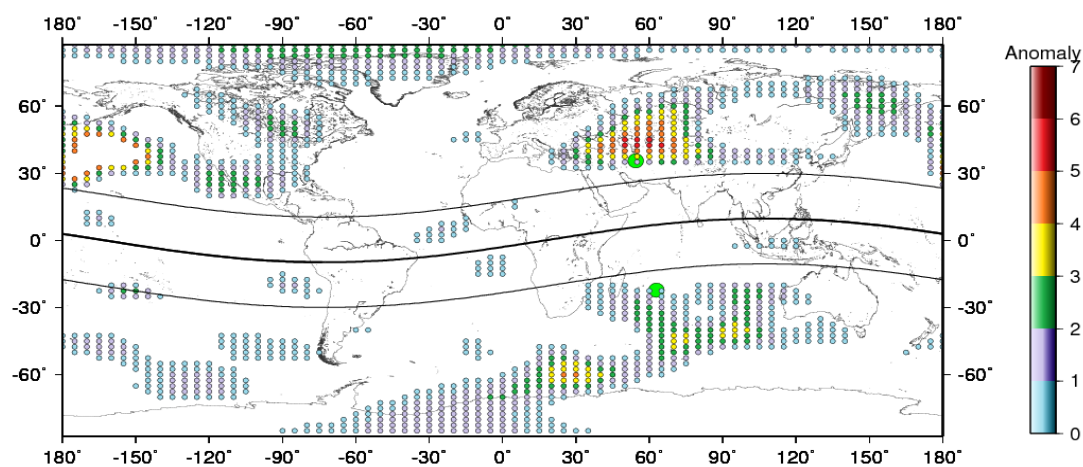
شکل ۱۷: نتایج بررسی تغییرات TEC نقطه‌ای از شبکه با مختصات ۳۵ درجه شمالی و ۵۵ درجه شرقی، محور افقی نشان دهنده تاریخ و محور عمودی مقادیر TEC بر حسب TECU است.

جدول مشخص هستند. همچنین برای ۳۴ نقطه بالای ۱۰ درصد، برای ۱۵ نقطه بالای ۲۰ درصد و برای ۵ نقطه بالای ۳۰ درصد بهبود نتایج وجود دارد.

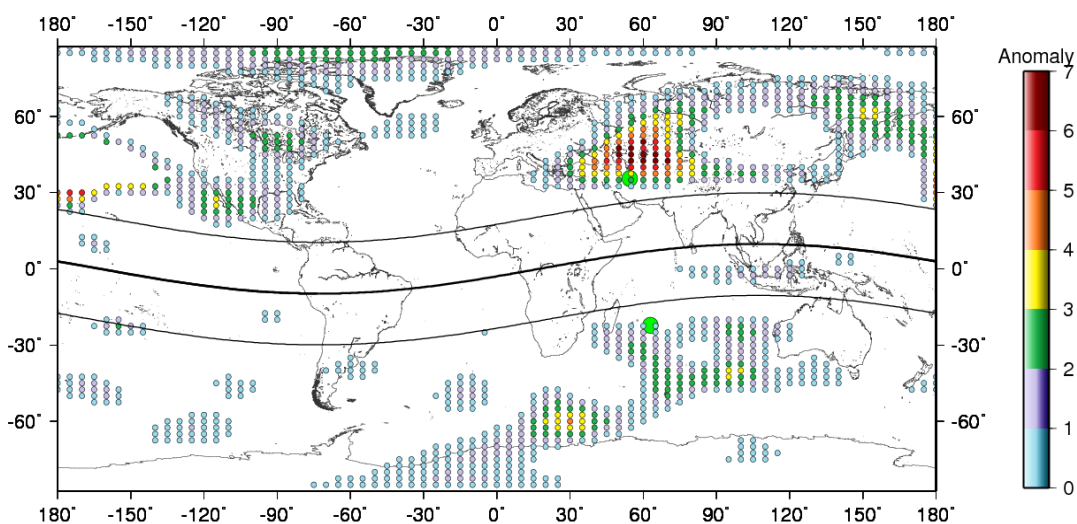
۵- نتیجه‌گیری

چنانچه گفته شد تغییرات یونسفری تحت تأثیر عوامل بسیاری غیر از زمین‌لرزه هستند. با مدل کردن تأثیر این عوامل و حذف آن‌ها، امکان شناسایی آنامولی لرزه-ای افزایش می‌یابد. از طرفی تنها بخشی از این تأثیرات قابل مدل کردن می‌باشند. با توجه به نتایج بدست آمده پس از حذف فرکانس‌های شناخته شده، برای زمین-لرزه‌های خوزستان و سمنان در محدوده شناسایی آنامولی لرزه‌ای یونسفر، در اغلب نقاط به ترتیب بهبود بیش از ۵۰ درصد و بیش از ۱۰ درصد وجود دارد. به علاوه برای زمین‌لرزه سمنان در ۵ نقطه پیش از حذف فرکانس‌ها آنامولی لرزه‌ای یونسفر قابل شناسایی نبوده اما پس از حذف فرکانس‌ها آنامولی تشخیص داده شده است. نکته حائز اهمیت این است که بزرگای این دو زلزله بالا نبوده و این میزان از بهبود نتایج برای زمین-لرزه‌هایی با این بزرگای قابل توجه می‌باشد. به طور کلی می‌توان گفت، برای این دو زلزله حذف پریودها از سری زمانی داده‌های TEC نقش بسزایی در آشکار شدن هرچه بیشتر آنامولی لرزه‌ای یونسفر دارد.

نتایج بررسی توزیع مکانی آنامولی در این دو روز، نشان‌دهنده آن است که آنامولی‌های رخ داده در ۲ شهریور (۳ روز قبل از زلزله) می‌تواند مربوط به این زمین‌لرزه باشد. این نتایج در شکل (۱۸) و (۱۹) ارائه شده است. همانطور که گفته شد در این روز مقدار Kp بالا بوده که نشان‌دهنده فعالیت‌های ناهنجار ژئومغناطیسی می‌باشد. ناهنجاری‌ها با منشأ مغناطیسی دارای پوشش جهانی هستند و با توجه به شکل (۱۸) و (۱۹) این آنامولی‌ها در اکثر نقاط کره‌زمین مشاهده شده، اما مطلب حائز اهمیت بیشتر بودن این آنامولی‌ها در اطراف مرکز زلزله نسبت به سایر نقاط است. بعلاوه با توجه به این دو شکل بنظر می‌رسد با حذف پریودهای شناخته شده آنامولی‌های لرزه‌ای با شدت بیشتری قابل تشخیص هستند. به منظور پی بردن به میزان بهبود نتایج در محدوده‌ای که آنامولی لرزه‌ای یونسفر رخ داده (طول جغرافیایی ۴۵ الی ۷۰ درجه شرقی و عرض ۳۲/۵ الی ۵۰ درجه شمالی)، درصد میزان انحراف TEC از وضعیت عادی ($p = \pm 100 \times (|Dx| - k) / k$) پیش و پس از حذف فرکانس‌ها محاسبه و نتایج در جدول (۲) در بخش ضمیمه (۱) ارائه شده است. براساس این نتایج در ۵ نقطه پیش از حذف فرکانس‌ها آنامولی لرزه‌ای یونسفر قابل شناسایی نبوده اما پس از حذف فرکانس‌ها آنامولی تشخیص داده شده است. این نقاط با رنگ قرمز در



شکل ۱۸: میزان انحراف مقادیر TEC از حدود اطمینان ($\mu \pm 2\sigma$) در تاریخ ۲ شهریور ساعت ۹:۳۰ الی ۱۱:۳۰ به وقت محلی، پیش از حذف پریودها



شکل ۱۹: میزان انحراف مقادیر TEC از حدود اطمینان ($\mu \pm 2\sigma$) در تاریخ ۲ شهریور ساعت ۹:۳۰ الی ۱۱:۳۰ به وقت محلی، پس از حذف پریودها

ضمیمه ۱

جدول ۱: درصد میزان انحراف TEC از وضعیت عادی پیش و پس از حذف فرکانس‌ها برای زمین‌لرزه خوزستان

طول نقطه (درجه شرقی)	عرض نقطه (درجه شمالی)	P پیش از حذف (درصد)	P پس از حذف (درصد)	درصد بهبود نتایج
35	17.5	2.0962	6.8110	1
35	20	9.4224	20.7922	2
35	22.5	16.2144	28.5191	3
35	25	20.1537	33.2444	4
35	27.5	22.2358	36.1922	5
35	30	22.0319	36.7551	6
35	32.5	17.9085	31.8275	7
40	35	7.5804	17.9882	8
40	17.5	3.0758	12.8568	9
40	20	15.4051	27.5199	10
40	22.5	22.3281	35.1805	11
40	25	26.3071	39.7301	12
40	27.5	28.0753	42.2468	13
40	30	28.1864	43.2032	14
40	32.5	23.6641	38.2437	15
40	35	12.4775	23.4026	16
45	17.5	4.5757	14.2838	17
45	20	18.0339	30.1273	18
45	22.5	25.3825	38.1999	19
45	25	29.8309	43.1740	20
45	27.5	32.8164	47.0611	21
45	30	33.7876	49.1481	22
45	32.5	29.9375	45.5353	23
45	35	19.3918	32.1765	24
50	17.5	1.2325	9.9617	25
50	20	15.2073	26.3808	26
50	22.5	23.7592	35.9397	27
50	25	29.2696	42.1749	28
50	27.5	32.7040	46.5775	29
50	30	34.1032	49.3736	30
50	32.5	32.1273	48.3900	31
50	35	23.2367	37.5463	32
55	17.5	6.7206	0.0470	33
55	20	6.9523	16.2271	34
55	22.5	15.7163	26.1734	35
55	25	21.7600	33.2140	36
55	27.5	26.0273	38.7777	37
55	30	28.8355	43.4556	38
55	32.5	28.1380	44.3723	39

71.8694	34.4380	20.0373	35	55	40
-26.8892	11.5494	15.7972	17.5	60	41
-61.3126	1.7692	4.5730	20	60	42
262.2428	10.3754	2.8642	22.5	60	43
105.2946	16.6830	8.1264	25	60	44
81.6465	22.1934	12.2179	27.5	60	45
79.3181	27.2835	15.2151	30	60	46
98.1145	27.9021	14.0838	32.5	60	47
166.9960	18.0298	6.7528	35	60	48

ضمیمه ۲

جدول ۲: درصد میزان انحراف TEC از وضعیت عادی پیش و پس از حذف فرکانس‌ها برای زمین لرزه سمنان

طول نقطه (درجه شرقی)	عرض نقطه (درجه شمالی)	P پیش از حذف (درصد)	P پس از حذف (درصد)	درصد بهبود نتایج
45	32.5	4.05	16.5669	409.0593
45	35	43.4858	56.5946	30.1450
45	37.5	79.4000	91.7587	15.5652
45	40	104.8065	115.3829	10.0914
45	42.5	114.6463	123.0964	7.3705
45	45	108.4985	115.3825	6.3448
45	47.5	98.3529	104.0498	5.7924
45	50	83.4785	88.7112	6.2683
50	32.5		8.8654	
50	35	38.7931	52.1515	34.4351
50	37.5	78.5446	91.9189	17.0276
50	40	107.1242	118.9633	11.0518
50	42.5	122.1361	132.0861	8.1466
50	45	125.2624	145.8107	16.4042
50	47.5	117.9746	148.8515	26.1725
50	50	109.5330	115.5364	5.4809
55	32.5		9.3856	
55	35	41.9718	56.1287	33.7296
55	37.5	78.7712	93.1235	18.2203
55	40	111.9674	125.6291	12.2015
55	42.5	129.3484	147.5009	14.0338
55	45	120.4993	148.7192	23.4192
55	47.5	124.9230	152.8671	22.3691
55	50	129.1488	149.6779	15.8956
60	32.5		10.4090	
60	35	48.9735	63.8463	30.3691
60	37.5	89.7531	106.0057	18.1081
60	40	117.1763	132.7744	13.3116
60	42.5	134.3621	154.7299	15.1589

21.9041	153.5357	125.9479	45	60	30
17.7661	147.0601	124.8747	47.5	60	31
22.3447	165.4010	135.1926	50	60	32
	8.7179		32.5	65	33
28.2563	66.2442	51.6499	35	65	34
18.5626	109.5169	92.3706	37.5	65	35
14.0277	135.5074	118.8373	40	65	36
19.7753	161.1525	134.5457	42.5	65	37
26.1696	161.6830	128.1473	45	65	38
12.8816	145.1686	128.6025	47.5	65	39
21.1645	148.4350	122.5070	50	65	40
	1.9514		32.5	70	41
28.8930	60.1901	46.6977	35	70	42
19.3502	100.9133	84.5523	37.5	70	43
14.9169	127.9336	111.3271	40	70	44
35.7431	165.5713	121.9740	42.5	70	45
26.7806	149.1866	117.6730	45	70	46
8.1065	113.7764	105.2448	47.5	70	47
7.2802	100.6375	93.8081	50	70	48

مراجع

- [1] M. Akhoondzadeh and M. Saradjian, "TEC variations analysis concerning Haiti (January 12, 2010) and Samoa (September 29, 2009) earthquakes," *Advances in Space Research*, vol. 47, pp. 94-104, 2011.
- [2] H. Le, J. Liu, B. Zhao, and L. Liu, "Recent progress in ionospheric earthquake precursor study in China: a brief review," *Journal of Asian Earth Sciences*, vol. 114, pp. 420-430, 2015.
- [3] M. Parrot, "Electromagnetic noise due to earthquakes," *Handbook of Atmospheric Electrodynamics*, vol. 2, pp. 95-116, 1995.
- [4] M. Hayakawa and O. A. Molchanov, *Seismo electromagnetics: lithosphere-atmosphere-ionosphere coupling*: Terrapub Tokyo, 2002.
- [5] F. Freund, "Charge generation and propagation in igneous rocks," *Journal of Geodynamics*, vol. 33, pp. 543-570, 2002.
- [6] S. Pulnits, A. Legen'Ka, T. Gaivoronskaya, and V. K. Depuev, "Main phenomenological features of ionospheric precursors of strong earthquakes," *journal of atmospheric and solar-terrestrial physics*, vol. 65, pp. 1337-1347, 2003.
- [7] R. G. Harrison, K. Aplin, and M. Rycroft, "Atmospheric electricity coupling between earthquake regions and the ionosphere," *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, vol. 72, pp. 376-381, 2010.
- [8] K. Davies and D. M. Baker, "Ionospheric effects observed around the time of the Alaskan earthquake of March 28, 1964," *Journal of Geophysical Research*, vol. 70, pp. 2251-2253, 1965.
- [9] R. S. Leonard and R. Barnes, "Observation of ionospheric disturbances following the Alaska earthquake," *Journal of Geophysical Research*, vol. 70, pp. 1250-1253, 1965.
- [10] G. W. Moore, "Magnetic disturbances preceding the 1964 Alaska earthquake," 1964.
- [11] E. Calais and J. B. Minster, "GPS detection of ionospheric perturbations following," *Geophysical Research Letters*, vol. 22, pp. 1045-1048, 1995.

- [12] J. Liu, Y. Chen, Y. Chuo, and H. Tsai, "Variations of ionospheric total electron content during the Chi-Chi earthquake," *Geophysical Research Letters*, vol. 28, pp. 1383-1386, 2001.
- [13] J. Liu, Y. Chen, C. Chen, and K. Hattori, "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*, vol. 115, 2010.
- [14] J.-Y. Liu, Y. Chen, C.-H. Chen, C. Liu, C. Chen, M. Nishihashi, et al., "Seismoionospheric GPS total electron content anomalies observed before the 12 May 2008 Mw7. 9 Wenchuan earthquake," *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, vol. 114, 2009.
- [15] H.-K. Jhuang, Y.-Y. Ho, Y. Kakinami, J.-Y. Liu, K.-I. Oyama, M. Parrot, et al., "Seismo-ionospheric anomalies of the GPS-TEC appear before the 12 May 2008 magnitude 8.0 Wenchuan Earthquake," *International Journal of Remote Sensing*, vol. 31, pp. 3579-3587, 2010.
- [16] Y. Kakinami, J.-Y. Liu, L.-C. Tsai, and K.-I. Oyama, "Ionospheric electron content anomalies detected by a FORMOSAT-3/COSMIC empirical model before and after the Wenchuan earthquake," *International Journal of Remote Sensing*, vol. 31, pp. 3571-3578, 2010.
- [17] J. Liu, H. Le, Y. Chen, C. Chen, L. Liu, W. Wan, et al., "Observations and simulations of seismoionospheric GPS total electron content anomalies before the 12 January 2010 M7 Haiti earthquake," *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, vol. 116, 2011.
- [18] M. Qodsi, M. Mashhadi-Hossaina, "Comparison of Local and Global Modeling Models of the UNESCO in the Study of Earthquake Pre-Marks in Port Moro (Philippines) and Benin Islands (Japan)", *International journal analysis of dynamic land*, Volume, pages, 2014.
- [19] R. Schunk and A. Nagy, *Ionospheres: physics, plasma physics, and chemistry*: Cambridge university press, 2000.
- [20] M. Garcia-Fernández, "Contributions to the 3D ionospheric sounding with GPS data," *PhD thesis. Department of Applied Mathematics IV and Applied Physics, Technical University of Catalonia, Barcelona, Spain*, 2004.
- [21] A. Amiri-Simkooei, *Least-squares variance component estimation: theory and GPS applications*: TU Delft, Delft University of Technology, 2007.
- [22] A. Amiri-Simkooei, C. Tiberius, and s. P. Teunissen, "Assessment of noise in GPS coordinate time series: methodology and results," *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol. 112, 2007.
- [23] A. Amiri-Simkooei and J. Asgari, "Harmonic analysis of total electron contents time series: methodology and results," *GPS solutions*, vol. 16, pp. 77-88, 2012.
- [24] J. Asgari and A. Amiri-Simkooei, "Analysis and Prediction of GNSS Estimated Total Electron Contents," *Journal of the Earth & Space Physics*, vol. 37, pp. 11-24, 2011.
- [25] S. Masoumi, "Investigation of changes of the ionospheric layer in the region of Iran using observations of low altitude satellites", *Master thesis, TehranUniversity*, 2012.
- [26] F. H. Knight, "Risk, uncertainty and profit," *New York: Hart, Schaffner and Marx*, 1921.
- [27] S. Pulinets and K. Boyarchuk, *Ionospheric precursors of earthquakes*: Springer Science & Business Media, 2004.
- [28] M.A. Hanzaei, "Comparative Study of Earthquake Preliminary Indicators from Satellite Data", *Ph.D thesis, Tehran University*, 2011.



Investigating the effect of the removing well-known periods from TEC time series data in identifying seismo-ionospheric anomaly

Zahra Sadeghi^{1*}, Masoud Mashhadi Hosseinali²

1- Graduated in master degree, Department of Geodesy and Geomatics Engineering, K. N. Toosi University of Technology

2- Associate Professor of Faculty of Geodesy and Geomatics Engineering, K. N. Toosi University of Technology

Abstract

Iran is situated on one of the two largest seismic belt of the world which is called Alp. The occurrence of damaging earthquakes all around the country causes a lot of pecuniary losses and casualties. The prediction of this phenomenon can have a profound impact on reducing the risks which are posed by it. Among the earthquake predictors, which are of interest to many scholars today, we can mention the occurrence of abnormal changes in the ionospheric parameters. The studied ionospheric parameter in this paper is the Total Electron density Content (TEC) obtained from the Global Inosphere Map (GIM). The time series of the TEC data comprises well-known periods whose causes are not seismic. It seems that, by eliminating the effect of these factors, as much as possible, the identification of the ionospheric-seismic anomaly could be done much more accurately. In this study, changes in TEC before the occurrence of two earthquakes in Iran have been investigated by using the mean method two times, once before the elimination of the periods and once afterwards. In fact, after the removal of known frequencies for Khuzestan and Semnan earthquakes in the area of identification of seismo-ionospheric anomolysis, the improvement of more than 50% and 10% is seen in most of the places respectively.

Key words: Ionosphere, Earthquake, TEC, Time series, Harmonic Analysis.