



ISSN 2345 - 4997

The Comparison of Local and Global Ionosphere Modeling Techniques for Analyzing The Precursors of Earthquakes in the Gulf of Moro (Philippine) and the Bonin islands (Japan)

Masoud Mashhadi Hoseinali¹, Mona Ghodsi^{2*}¹ Department of Geodesy, Khaje Nasir Toosi University, Tehran, Iran.² Department of Geodesy, Khaje Nasir Toosi University, Tehran, Iran.

*Corresponding Author (ghodsi.mona@gmail.com)

Article History:	Received: Apr 01, 2014	Reviewed: Apr 07, 2014
Revised: Apr 11, 2014	Accepted: Apr 12, 2014	Published: Apr 14, 2014

ABSTRACT

In this article, the existing global and local techniques of modeling the Ionosphere are introduced. The efficiency of these techniques in analyzing the precursors of earthquakes are analyzed and compared together. Two earthquakes in the Gulf of Moro (Philippine) and the Bonin islands (Japan) are used for this purpose. The one month average of TECs which are computed in a regular grid and its standard deviation is used as a benchmark here. The obtained results emphasize on a significant correlation between ionospheric anomalies and the time of earthquakes whose magnitudes are larger than 7 in the so-called Richter measurement scale. High solar activities as well as geomagnetic storms don't disturb the analysis process when local Ionosphere models are used, but the separation of the earthquake precursors from the other sources of perturbation is impossible when the global models are used.

Keywords: Precursors of Earthquake, GPS, TEC, Global Ionosphere Modeling, Local Ionosphere Modeling.

مقایسه روش‌های مدل‌سازی محلی و جهانی یونوسفر در بررسی پیش‌نشانگرهای زمین‌لرزه در بندر مورو (فیلیپین) و جزایر بنین (ژاپن)

مسعود مشهدی حسینعلی^۱، منا قدسی^۲^۱ استادیار دانشکده نقشه‌برداری دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران (hossainali@kntu.ac.ir)^۲ کارشناس ارشد ژئودزی دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، نگارنده رابط (ghodsi.mona@gmail.com)

تاریخ داوری: ۱۳۹۳/۱/۱۸	تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۱/۱۲	تاریخچه انتشار مقاله
تاریخ انتشار: ۱۳۹۳/۱/۲۵	تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۱/۲۳	تاریخ اصلاحات: ۱۳۹۳/۱/۲۲

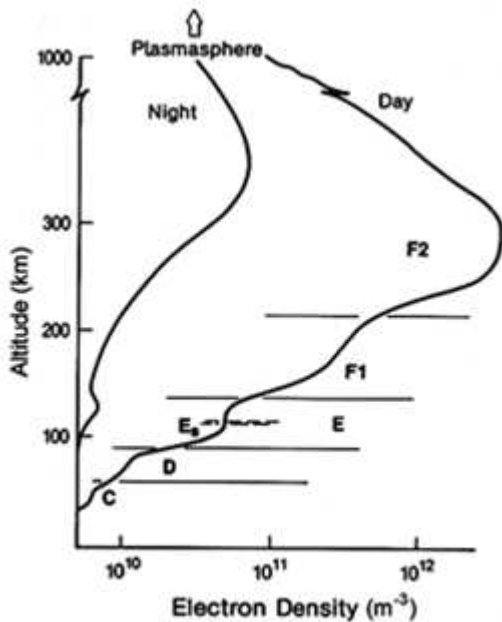
چکیده

در این مقاله دو روش متفاوت مدل‌سازی یونوسفر، یعنی مدل‌سازی به روش محلی و مدل‌سازی به روش جهانی معرفی و کارایی هر یک از آن‌ها به عنوان پیش‌نشانگر زمین‌لرزه در یونوسفر بررسی و با یکدیگر مقایسه شده است. برای این منظور، تغییرات ایجاد شده در یونوسفر قبل از وقوع دو زمین‌لرزه بندر مورو در کشور فیلیپین و جزایر بنین در ژاپن مورد بررسی قرار گرفته و پتانسیل این تغییرات به عنوان یکی از پیش‌نشانگرهای زمین‌لرزه مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد. از میانگین یک ماهه مقادیر انتگرال خطی چگالی الکترونی (TEC) در مدل تک لایه و در نقاط یک گرید منظم به همراه انحراف معیار آن‌ها به ترتیب به عنوان معیار مقایسه و حدود تغییرات آن استفاده شده است. بررسی‌های انجام شده در این مقاله وجود ارتباطی معنادار بین این تغییرات و محل و زمان وقوع زمین‌لرزه‌های با بزرگای بیش از ۷ در مقیاس اندازه‌گیری ریشتر را در هر دو روش مدل‌سازی محلی و جهانی تایید می‌کند. لازم به ذکر است که در مدل‌سازی محلی فعالیت‌های خورشیدی بالا و طوفان‌های مغناطیسی در مطالعات مربوطه خللی وارد نمی‌کنند اما در مدل‌سازی جهانی تفکیک پیش‌نشانگرهای زمین‌لرزه از فعالیت‌های خورشیدی بالا امکان‌پذیر نیست.

واژه‌های کلیدی: پیش‌نشانگر زمین‌لرزه، GPS، TEC، مدل‌سازی محلی یونوسفر، مدل‌سازی جهانی یونوسفر.

۱. مقدمه

الکترون‌ها می‌انجامد. بنابراین با تقریب خوبی می‌توان گفت که تنها الکترون‌ها نسبت به امواج مذکور واکنش نشان می‌دهند.



شکل ۱. ساختار یونوسفر در روز و شب تابستان (Pulinets, Boyarchuk, 2005a)

اگر فرکانس موج یک الکترومغناطیس کمتر از فرکانس پلاسما باشد، یونوسفر مانند یک آینه فلزی عمل می‌کند درحالی‌که اگر فرکانس این موج بیشتر از فرکانس پلاسما باشد، موج بدون اینکه منعکس شود به داخل یونوسفر نفوذ می‌کند. حداکثر فرکانسی را که در برای آن یک موج الکترومغناطیس از هر یک از نواحی یونوسفر منعکس می‌شود فرکانس بحرانی آن ناحیه نامیده می‌شود.

معمولاً یک ناحیه یونوسفری (E، F1 و F2) با فرکانس بحرانی (foE، foF1 و foF2) و ارتفاع بحرانی (hmE، hmF1 و hmF2) که در دو طرف آن چگالی الکترون با ارتفاع کاهش می‌یابد، معرفی می‌گردد (شکل ۲).

پیش از وقوع زمین‌لرزه‌های بزرگ، می‌توان تغییراتی را در خصوصیات فیزیکی و شیمیایی جو زمین مشاهده کرد. در این ارتباط می‌توان به میزان رسانایی الکتریکی جو (Gokhberg et al., 1995; Rulenko, 2000 Pulinets & Pulinets, 1997)، میزان دانسیته الکترونی (Boyarchuk, 2005) و ارتفاع لایه‌های مختلف یونوسفر (Depuev & Zelenova, 1996) اشاره کرد. در این مقاله تغییرات دانسیته یا تراکم الکترون‌های آزاد در لایه یونوسفر از جو زمین مورد بررسی قرار می‌گیرد.

هنگامی که مولکول‌ها و اتم‌های موجود در اتمسفر به اندازه کافی انرژی خارجی دریافت می‌کنند، یک یا دو الکترون از مولکول یا اتم جدا می‌شود. این فرآیند یونیزاسیون نامیده می‌شود. میزان یونیزاسیون در یونوسفر بستگی به شدت و نوع تابش‌های مختلف خورشیدی و همچنین، مواد تشکیل‌دهنده یونوسفر دارد. منبع اصلی یونیزاسیون در یونوسفر، اشعه ماوراء بنفش خورشید بوده و دیگر منابع یونیزاسیون عبارتند از: اشعه X خورشیدی، اشعه کیهانی و ذرات شتابدار.

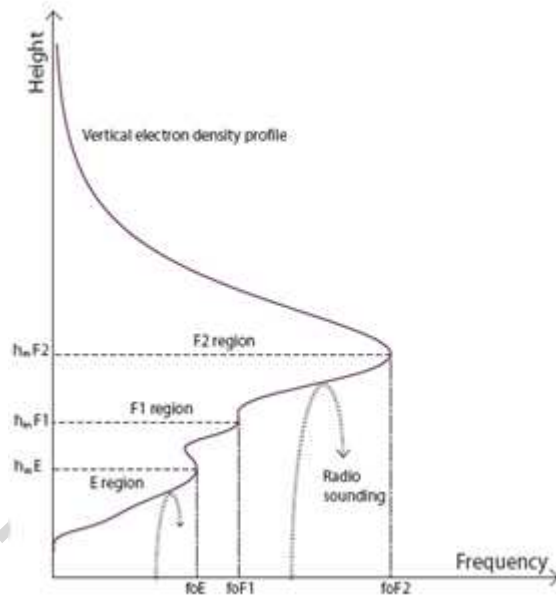
سهم این منابع در مقایسه با اشعه ماوراء بنفش به میزان فعالیت خورشیدی بستگی دارد. بر اساس میزان یونیزاسیون، در ارتفاعات مختلف یونوسفر به لایه‌های متفاوتی به نام‌های E، D و F تقسیم می‌شود.

شکل (۱) این لایه‌ها را در طول مقطع قائمی از این لایه از اتمسفر نمایش می‌دهد. به طوری که ملاحظه می‌شود، در طول شب و با کاهش تشعشعات خورشیدی برخی از لایه‌های فوق از بین رفته و در طول روز و با تابش مجدد تشعشعات خورشیدی این لایه‌ها مجدداً تشکیل می‌شوند.

مسیر انتشار، دامنه و سرعت امواج الکترومغناطیس در عبور از یونوسفر دستخوش تغییراتی می‌گردد. برخورد این امواج با یونوسفر موجب نوسان ذرات باردار می‌شود. بزرگتر بودن جرم یون‌ها در مقابل جرم الکترون‌ها به کاهش قابل ملاحظه‌ای در دامنه نوسان یون‌ها نسبت به دامنه نوسان

تغییر در فرکانس بحرانی در لایه E (f_0E) اشاره نمود. آنتسلیوچ به بررسی این تغییرات در رابطه با زمین‌لرزه سال ۱۹۶۶ تاشکنت پرداخت. این تحقیقات وجود تغییراتی نسبی در فرکانس بحرانی لایه E یونوسفر را پیش از وقوع زمین‌لرزه تأیید کرد (Antselevich 1971). تغییرات ایجاد شده در لایه D ابتدا توسط روس‌ها و سپس ژاپنی‌ها مورد مطالعه قرار گرفت. اولین تغییری که به صورت تجربی در لایه D تحت تاثیر زمین‌لرزه مشاهده می‌شود، تغییر در پارامترهای سیگنال‌های VLF است که توسط گیرنده‌های زمینی دریافت می‌شود (Gokhberg et al. 1987, 1989; Gufeld et al. 1992). از این تغییرات به عنوان پیش‌نشانگرهای زمین‌لرزه یاد شده است (Gufeld et al. 1994). برآوردهای آماری نشان می‌دهند که قبل از وقوع زمین‌لرزه تغییراتی در فاز حرکت سیگنال‌های الکترومغناطیس در این لایه از جو زمین مشاهده می‌شود (Molchanov et al., 1998a, 1998b).

با توسعه سیستم‌های تعیین موقعیت و ناوبری ماهواره‌ای (به ویژه GPS) و راه‌اندازی شبکه‌های منطقه‌ای و بین‌المللی به ویژه شبکه IGS، این سیستم‌ها به ابزار جدیدی برای مطالعه و بررسی یونوسفر تبدیل شده‌اند. امروزه با توسعه روش‌های محلی و جهانی، مدل‌سازی تک لایه TEC یکی از فعالیت‌های روزمره مراکز محاسبه شبکه‌هایی از این نوع محسوب می‌شود. با توسعه این مدل‌ها ایده استفاده از آنها در مطالعه اثر زمین‌لرزه‌های بزرگ بر یونوسفر شکل گرفت. لیو و همکارانش در سال ۲۰۰۱ متوجه شدند بین فرکانس اصلی لایه f2 به دست آمده از یونوسوندها و TEC به دست آمده از گیرنده‌های GPS کورولیشن بالایی وجود دارد (Liu et al., 2001). در نتیجه از این پارامتر نیز می‌توان به عنوان پیش‌نشانگر زمین‌لرزه استفاده کرد. این مطالعه تحقیقات زیادی در این زمینه به دنبال داشت. در این ارتباط به عنوان مثال می‌توان به (Pulinets, Liu et al. 2002, 2003, 2004) و (Zakharenkova et al., 2007a,b) و (et al. 2004, 2005a,b) اشاره کرد. بررسی‌های انجام شده توسط عبدالله و همکاران نشان داده است که در نتایج حاصل از مدل‌سازی



شکل ۲. نمایش فرکانس بحرانی و ارتفاع بحرانی هر لایه از یونوسفر (Pulinets & Boyarchuk, 2005a)

اولین بار در زمین‌لرزه سال ۱۹۶۴ آلاسکا به پیش‌نشانگرهای زمین‌لرزه در یونوسفر توجه شد. بزرگای این زمین‌لرزه ۹.۲ در مقیاس ریشتر برآورد شده است.

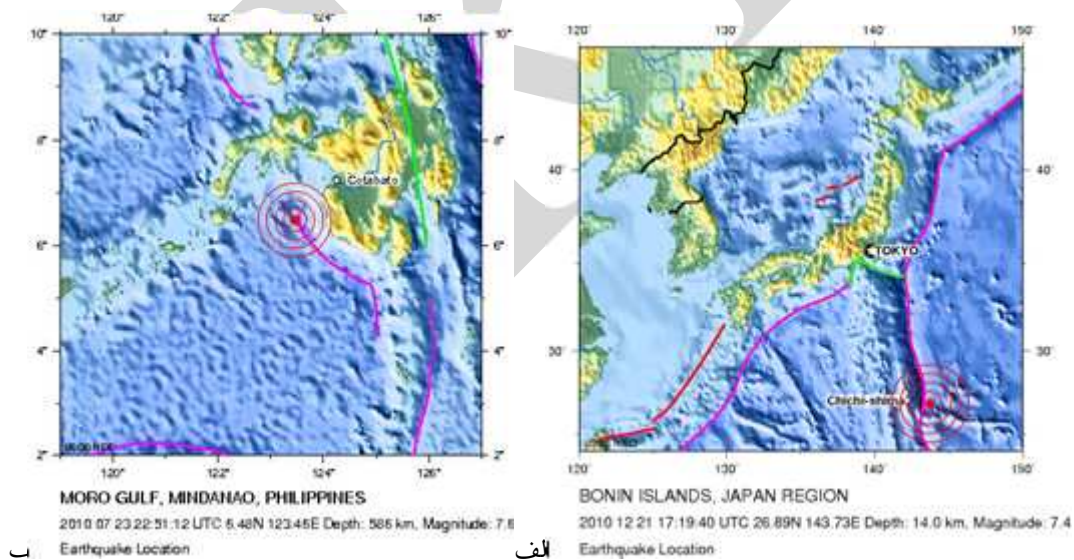
قبل از این رویداد از یونوسوندها برای مطالعه و بررسی تغییرات این لایه از جو زمین پس از زمین‌لرزه‌های با بزرگای مختلف استفاده می‌شد. آنالیز اندازه‌گیری‌های انجام شده در ایستگاه‌های یونوسوند نشان می‌دهد که ساعت‌ها قبل از وقوع زمین‌لرزه، علائم یا بی‌نظمی‌هایی در یونوسفر قابل مشاهده است (Leonard & Barnes 1965). به عنوان مثال، مطالعات انجام شده روی داده‌های رادیوسوندی قبل و پس از وقوع زمین‌لرزه آلاسکا طی دو سال پیاپی نشان داده است که مقادیر فرکانس بحرانی در لایه F2 (f_0F_2) در روز وقوع زمین‌لرزه و در نزدیکی مرکز آن تغییراتی محلی را پارامتر نشان می‌دهد. این تحقیق منشأ بررسی‌های بیشتر در سال‌های آتی گشت (به عنوان مثال: Bolt 1964; Dohnand & Posmetier, 1964). بعد از زمین‌لرزه آلاسکا مطالعات اولیه بر روی پارامترهای مختلف یونوسفر در لایه‌های مختلفی از آن، که دستخوش تغییر می‌شوند صورت گرفت. در میان آنها می‌توان به بررسی

پیش‌نشانگرهای زمین‌لرزه‌ها استفاده گردد. در اینجا به بررسی تغییرات ایجاد شده در میزان TEC در اثر زمین‌لرزه بندر مورو در کشور فیلیپین که در عرض‌های استوایی قرار دارد و موقعیت مرکز آن در مختصات ۱۲۳.۵۳ شرقی و ۶.۴۷ شمالی است، پرداخته شده است. بزرگای این زمین‌لرزه ۷.۶ در مقیاس ریشتر بوده و در تاریخ ۲۳ جولای ۲۰۱۰ اتفاق افتاده است. به علت وجود انامولی استوایی چگالی الکترونی در عرض‌های استوایی استفاده از تغییرات این پارامتر برای بررسی پیش‌نشانگرهای زمین‌لرزه با پیچیدگی‌های زیادی همراه است. علاوه بر این زمین‌لرزه، در این مقاله تغییرات TEC در اثر زمین‌لرزه جزایر بنین در کشور ژاپن نیز مورد بررسی قرار می‌گیرد. این زمین‌لرزه با بزرگای ۷/۴ در مقیاس ریشتر به مرکز ۱۴۳.۷۲۶ شرقی و ۲۶.۸۹۲ شمالی و در تاریخ ۲۱ دسامبر ۲۰۱۰ اتفاق افتاده است. شکل ۶ کانون سطحی هر یک از این دو زمین‌لرزه در نمایش می‌دهد.

یونوسفر به روش تک لایه به خوبی می‌توان پیش‌نشانگرهای زمین‌لرزه را در زمین‌لرزه‌های با بزرگای بیش از ۶ در مقیاس اندازه‌گیری ریشتر مشاهده کرد (Abdullah et al., 2009). در این مقاله تأثیر زمین‌لرزه‌های بزرگ بر میزان TEC به دست آمده از مدل جهانی و مدل محلی یونوسفر مورد بررسی و مقایسه قرار می‌گیرد. مدل‌های جهانی به کمک داده‌های اختلاف فاز گیرنده‌های سیستم‌های تعیین موقعیت و ناوبری ماهواره‌ای شبکه ردیابی بین‌المللی IGS، در مراکز محاسبه این شبکه و در قالب فرمتی قراردادی موسوم به IONEX تولید و در اختیار کاربران این سیستم‌ها قرار می‌گیرند. علاوه بر این، مدل‌های محلی مورد نیاز در این تحقیق از طریق پردازش داده‌های سیستم‌های مذکور در فرمت RINEX با استفاده از نرم‌افزار Bernese محاسبه شده است.

۲. منطقه مورد مطالعه

با گسترش شبکه GPS در اقصی نقاط جهان این امکان فراهم آمده است تا از داده‌های GPS برای مطالعه مکانیزم و



شکل ۳. الف) زمین‌لرزه بندر مورو در فیلیپین، ب) زمین‌لرزه جزایر بنین در ژاپن

پیاپی قبل از تاریخ وقوع زمین‌لرزه و یک روز بعد از آن از یکی از پایگاه‌های اطلاعات سرویس مذکور دریافت شده است. علاوه بر این، برای بررسی و مقایسه کارایی مدل محلی با مدل‌های جهانی تغییرات ایجاد شده در یونوسفر با استفاده از

برای بررسی و مطالعه تغییرات ایجاد شده در یونوسفر در اثر هر یک از زمین‌لرزه‌های فوق از مدل‌های جهانی یا نقشه‌های TEC پایگاه داده IGS استفاده شده است. برای این منظور این نقشه‌ها در قالب فایل‌هایی با فرمت IONEX برای ۳۰ روز

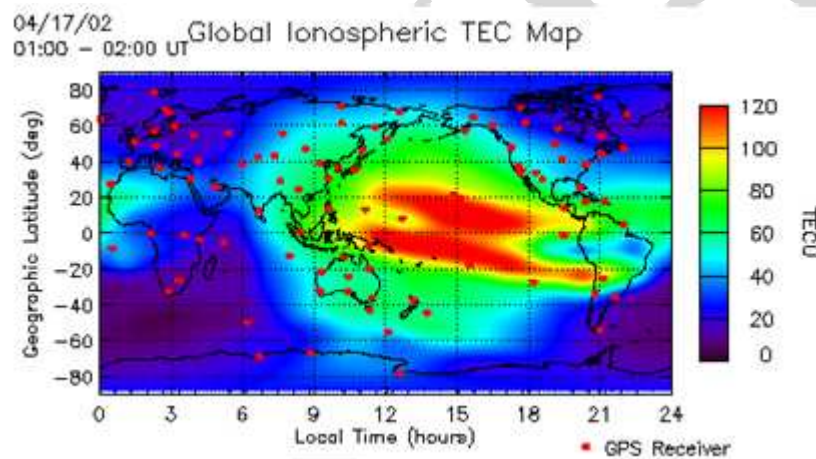
می‌شود. میزان یونیزاسیون در یونوسفر بستگی به شدت و نوع تابش‌های مختلف خورشیدی و همچنین مواد تشکیل‌دهنده یونوسفر دارد. ساختار یونوسفر از هر دو دسته تغییرات زمانی و مکانی برخوردار است. تفاوت در میزان دانسیته الکترون‌های آزاد در عرض‌های مختلف تغییرات مکانی چگالی الکترونی را نشان می‌دهد. این تغییرات برای ساعت ۲۲ به زمان جهانی در شکل (۳) نمایش داده شده است. برای این منظور از مدل‌های جهانی تک لایه (محصولات سرویس IGS) استفاده شده است. بر این اساس یونوسفر را می‌توان به یونوسفر قطبی، یونوسفر عرض‌های متوسط، یونوسفر استوایی تقسیم‌بندی کرد.

مدل محلی نیز مطالعه شده است. برای این منظور، فایل‌های مشاهداتی در فرمت RINEX برای ۳۰ روز قبل از تاریخ وقوع زمین‌لرزه و یک روز بعد از آن از یکی از مراکز داده سرویس IGS دریافت و مدل‌های محلی مورد نیاز با استفاده از این مشاهدات توسعه یافته است.

۳. مواد و روش‌ها

۳.۱. یونوسفر

هنگامی که مولکول‌ها و اتم‌های موجود در اتمسفر به اندازه کافی انرژی خارجی دریافت می‌کنند یک یا دو الکترون از مولکول یا اتم جدا می‌شود. این فرآیند یونیزاسیون نامیده



شکل ۴. ساختار جهانی یونوسفر

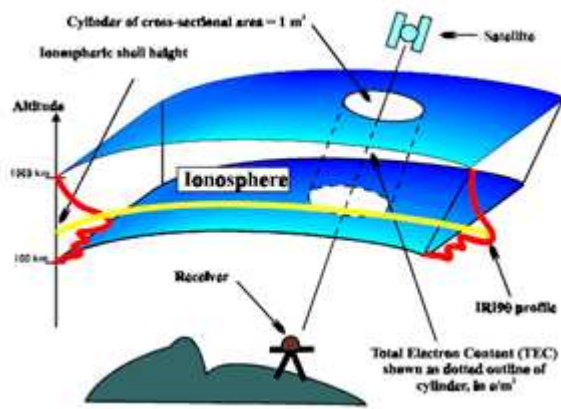
جغرافیایی مختلف متفاوت است. تغییرات زمانی یونوسفر را می‌توان به دو دسته کلی تقسیم‌بندی کرد: تغییرات منظم و تغییرات نامنظم. بلندمدت‌ترین تغییرات منظم یونوسفر دوره فعالیت‌های خورشیدی است. این دوره با توجه به مکان لکه‌های خورشیدی تعیین می‌شود و باعث ایجاد و یا تشدید فعالیت‌های خورشیدی دیگری نظیر انفجارهای خورشیدی و بادهای خورشیدی و غیره می‌گردد. علاوه بر این، فعالیت‌های خورشیدی بر تغییرات فصلی و تغییرات روزانه نیز تأثیرگذار است به طوری که با کاهش فعالیت‌های خورشیدی دامنه تغییرات فصلی و تغییرات روزانه کاهش می‌یابد. دوره فعالیت‌های خورشیدی معمولاً ۱۱ سال است. یکی دیگر از تغییرات زمانی در یونوسفر، تغییرات فصلی آن است. هنگامی

همان گونه که در شکل (۳) مشاهده می‌شود یونوسفر در مقیاس جهانی از بی‌نظمی‌های ویژه‌ای برخوردار است. در کمربندی در نزدیکی استوای مغناطیسی زمین، یونوسفر دارای میزان TEC متمایزی است که تشکیل آنامولی استوایی را می‌دهد. در این منطقه (در حدود عرض جغرافیایی ۱۵ درجه) با حداکثر چگالی الکترونی مواجهیم. از سوی دیگر، در نزدیکی عرض جغرافیایی ۶۰ درجه با کاهش یونیزاسیون و در نتیجه با مینیمم چگالی الکترون روبه‌رو هستیم. این پدیده به پدیده نشیب اصلی یونوسفر (MIT) شناخته می‌شود. آنامولی استوایی و نشیب اصلی یونوسفر از جمله عواملی هستند که مطالعه یونوسفر را با پیچیدگی‌هایی همراه می‌سازند. تحت تأثیر دو پدیده مذکور، ساختار جهانی یونوسفر در عرض‌های

نظیر جزرو مد اتمسفر، بادهای اتمسفری و دیگر تغییرات منظم و نامنظمی که باعث جابه‌جایی هوا می‌شوند در این گروه قرار می‌گیرند. علاوه بر عوامل ذکر شده باید میدان الکتریکی زمین و میزان فعالیت‌های رادیواکتیو زمین را هم به عنوان عوامل تغییرات روزانه نام برد.

۳.۲. مدل‌سازی تک لایه چگالی الکترونی

با وجود تغییر غلظت یا دانسیته الکترون‌های آزاد یونوسفر با ارتفاع، برای محاسبه TEC در این روابط از مدل تک لایه استفاده می‌شود. در مدل‌سازی تک لایه، ضمن صرف نظر کردن از ضخامت لایه یونوسفر، الکترون‌های آزاد این لایه در پوسته‌ای به ضخامت بی‌نهایت کم و در ارتفاعی که برابر ارتفاع حداکثر تراکم الکترون‌های آزاد در این لایه است، متمرکز فرض می‌شود. شکل (۴) ضمن نمایش تغییرات ارتفاعی دانسیته الکترونی چگونگی جایگزینی این لایه از جو زمین را با پوسته‌ای کروی در این روش نمایش می‌دهد.



شکل ۵. مدل تک لایه (Dach et al. 2007)

TEC مجموع تعداد الکترون‌هایی است که در ستونی با سطح مقطع یک متر مربع، در امتداد مسیر بین ماهواره تا گیرنده وجود دارد. واحد TEC، TECU است. بنا به تعریف هر TECU برابر است.

$$TEC = \int_S^R n_e(s) ds \quad (1)$$

در این رابطه n_e دانسیته الکترونی و ds المان طول در مسیر حرکت سیگنال از ماهواره تا گیرنده است. میزان دانسیته

که زمین در نزدیکی نقاط اعتدالین قرار می‌گیرد، چگالی الکترونی به بیشینه مقدار خود می‌رسد. میزان چگالی الکترونی در لایه یونوسفر در در تابستان به کمترین میزان آن کاهش می‌یابد. کوتاه مدت‌ترین تغییرات منظم شناخته شده در یونوسفر، تغییرات روزانه آن است. میزان تغییرات TEC در نقاط مختلف زمین می‌تواند با هم مقاداری تفاوت داشته باشد ولی در یک منطقه دارای الگوی خاص خود است. دوره فعالیت‌های خورشیدی و تغییرات فصلی بر دامنه این تغییرات اثر گذار است. علاوه بر عوامل شناخته شده تأثیرگذار بر تغییرات روزانه چگالی الکترونی یونوسفر نظیر فعالیت‌های خورشیدی، فعالیت‌های مغناطیسی زمین، فصل، طول و عرض جغرافیایی، همچنان عوامل ناشناخته وجود دارند که بر این تغییرات مؤثرند. مهمترین عامل نامنظم تأثیرگذار بر یونوسفر طوفان‌های مغناطیسی هستند. طوفان‌های مغناطیسی یک عامل اغتشاش موقتی مگنتوسفر زمین هستند و منبع اصلی آنها بادهای خورشیدی است. طوفان‌های مغناطیسی بر روی میدان مغناطیسی زمین اثر می‌گذارند و میزان این اثر معمولاً ۲۴ تا ۳۶ ساعت به طول می‌انجامد. در بعضی مواقع اثر این طوفان‌ها تا چندین روز باقی می‌ماند. میزان نیرویی که بادهای خورشیدی بر مگنتوسفر وارد می‌کنند با توجه به میزان فعالیت‌های خورشیدی متفاوت می‌کند.

دیگر عوامل تأثیرگذار بر یونوسفر که پیش‌بینی قطعی آنها امکان‌پذیر نیست را معمولاً به دو دسته کلی تقسیم بندی می‌شوند. گروه اول عواملی هستند که از بالای یونوسفر بر آن تأثیر می‌گذارند. گروه دوم از مجموعه عواملی تشکیل می‌شود که از پایین یونوسفر بر آن تأثیر می‌گذارند. مهمترین عامل تأثیرگذار از بالا فعالیت‌های خورشیدی است. انفجارهای خورشیدی باعث گسیل شدن امواج UV و اشعه X شده و بدین وسیله موجب افزایش دانسیته الکترونی در یونوسفر می‌شوند. این افزایش ناگهانی و کوتاه‌مدت دانسیته الکترونی در یونوسفر به اختلال ناگهانی یونوسفر، معروف می‌باشد. عواملی که از پایین یونوسفر بر آن تأثیر می‌گذارند دارای بیشترین سهم در تغییرات روز به روز اتمسفر بوده و مواردی

علامت مخالف این روابط معرف تأخیر در اندازه‌گیری شبه فواصل کد و تقدم در اندازه‌گیری شبه فواصل فاز بین گیرنده و ماهواره‌های یک سیستم GNSS است. علاوه بر این، این روابط میزان تأخیر کد و تقدم فاز را برای زاویه زینتی صفر (در زینت ایستگاه اندازه‌گیری) به دست می‌دهند. برای محاسبه بزرگی این اثر در زاویه زینتی دلخواه از تابع تصویر به صورت زیر استفاده می‌شود:

$$\Delta_{ion}(ph) = -\frac{1}{\cos z'} \times \frac{40.3}{f^2} TEC \quad (6)$$

$$\Delta_{ion}(gr) = +\frac{1}{\cos z'} \times \frac{40.3}{f^2} TEC \quad (7)$$

از آنجا که ترکیب خطی مستقل از هندسه بین ماهواره و گیرنده که معمولاً به L_4 برای مشاهدات فاز و P_4 برای مشاهدات کد نمایش داده می‌شود دارای بیشترین حساسیت به تأخیر یونوسفری است از این ترکیب برای مدل‌سازی اثر یونوسفر استفاده می‌شود. این ترکیب در سطح تفاضلی صفر و سطح تفاضلی دو برای مدل‌سازی یونوسفر کاربرد دارد. ترکیب تفاضلی صفر، سیگنال‌های یونوسفر را بهتر حفظ نموده و به شکل زیر بیان می‌شود:

$$L_4 = L_2 - L_1 = -a \left(\frac{1}{f_1^2} - \frac{1}{f_2^2} \right) F(Z_1) E(\beta, s) + B_4 \quad (8)$$

$$P_4 = P_2 - P_1 = +a \left(\frac{1}{f_1^2} - \frac{1}{f_2^2} \right) F(Z_1) E(\beta, s) + b_4 \quad (9)$$

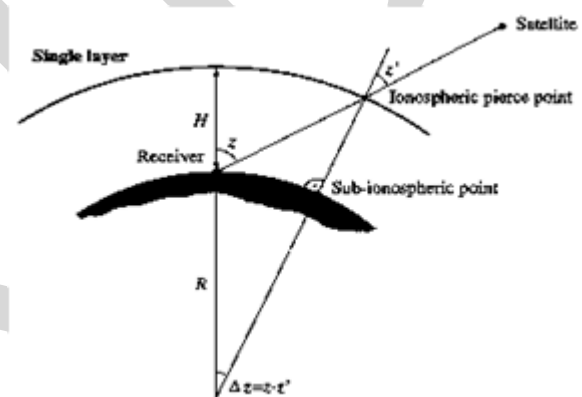
در این روابط $a = 40.3 \times 10^{16} \text{ms}^{-2} \text{TECU}^{-1}$ و f_1 و f_2 فرکانس‌های مربوط به امواج حامل L_1 و L_2 و $E(\beta, s)$ تابعی جهت برآورد مقادیر TEC در زاویه زینتی صفر درجه که تابعی از موقعیت گیرنده نسبت به ماهواره و خورشید می‌باشد. تابع $F = 1/\cos z'$ تابع تصویر و Z' زاویه زینتی ماهواره در ارتفاع مدل تک لایه و b_4 بایاس سخت افزاری و B_4 مجموعه‌ای از بایاس سخت افزاری و $\lambda_1 B_1 + \lambda_2 B_2$ است که λ_1 و λ_2 طول موج‌های L_1 و L_2 و B_1 و B_2 بایاس‌های مشاهدات فاز می‌باشند. ترکیب دو تفاضلی از یک طرف باعث از بین رفتن بخشی از سیگنال‌های

الکترونی در راستای قائم را VTEC نامیده و بر اساس رابطه (۲) محاسبه می‌شود:

$$VTEC = \frac{1}{F} TEC \quad (2)$$

که در آن $F = 1/\cos z'$ است. چنان که در شکل (۵) ملاحظه می‌شود، h_i زاویه زینتی ماهواره بر روی تک لایه در ارتفاع h_i از سطح زمین در نظر گرفته می‌شود، که از طریق معادله (۳) محاسبه می‌شود. در این رابطه، r_E شعاع متوسط زمین و Z زاویه زینتی ماهواره در سطح زمین است (Seeber 2003).

$$z' = \arcsin \left(\frac{r_E}{r_E + h_i} \sin z \right) \quad (3)$$



شکل ۶. زاویه زینتی بین ماهواره و گیرنده (Dach et al. 2007)

در تعیین موقعیت با GPS مشاهدات از دو بخش مشاهدات فاز و مشاهدات کد تشکیل می‌شود. لایه یونوسفر بر هر دو گروه مشاهدات فاز و کد تأثیرگذار است. مقدار تأخیر یا تقدم ایجاد شده روی امواج الکترومغناطیس تابعی از فرکانس و مقدار الکترون‌های آزاد در طول مسیر حرکت سیگنال ارسال شده از این سیستم‌ها است. رابطه زیر تقریبی قابل قبول از بزرگی تأخیر در مشاهدات کد و تقدم در مشاهدات فاز بر روی سیستم GPS ارائه می‌کند.

$$\Delta_{ion}(ph) = -\frac{40.3}{f^2} \int N_e ds_0 = -\frac{40.3}{f^2} TEC \quad (4)$$

$$\Delta_{ion}(gr) = +\frac{40.3}{f^2} \int N_e ds_0 = +\frac{40.3}{f^2} TEC \quad (5)$$

n_{\max} و m_{\max} حداکثر درجه بسط به سری تیلور دو بعدی بر حسب عرض β و طول s پارامترهای مجهول مدل محلی یونوسفر می‌باشند. سایر پارامترهای این مدل مشابه رابطه (۱۲) است. مدل‌های جهانی و منطقه‌ای به علت تفاوت در مدل، رزولوشن و ایستگاه‌های برداشت نقاط دارای اختلاف‌هایی می‌باشد. مدل‌های منطقه‌ای دقیقتر هستند و جزئیات بیشتری را در بر می‌گیرند. به عبارت دیگر، مدل‌های جهانی مدل‌های نرمتری نسبت به مدل‌های محلی یونوسفر هستند. در این مقاله از مدل‌های فوق برای بررسی پیش‌نشانگرهای زمین‌لرزه استفاده می‌شود علاوه بر این، تفاوت‌های این مدل‌ها در نمایش پیش‌نشانگرهای زمین‌لرزه با هم مقایسه خواهد شد.

۳.۳. مقایسه نقشه‌های جهانی یونوسفر شبکه ردیابی بین‌المللی IGS و نقشه‌های محلی تولید شده از پردازش داده‌های RINEX توسط نرم‌افزار Bernese

IGS یک شبکه جهانی و جامع از ایستگاه‌های تعیین موقعیت ماهواره‌ای است. این شبکه یا سرویس جهانی از مجموعه‌ای از مراکز جمع‌آوری و ذخیره‌سازی داده مراکز آنالیز داده‌های مذکور تشکیل می‌شود. مشاهدات ایستگاه‌های اندازه‌گیری این سرویس جهانی از طریق اینترنت در اختیار کاربران قرار می‌دهد. علاوه بر این، مراکز محاسبه این سرویس محصولات مختلفی نظیر اطلاعات مداری با دقت‌های مختلف را تولید و در اختیار کاربران این سیستم‌ها قرار می‌دهند (Dach R., Hugentobler U., Fridez P., Meindl M. 2007). نقشه‌های یونوسفری یکی دیگر از محصولات این سرویس است. از سال ۱۹۹۶ مرکز پردازش داده IGS نقشه‌های جهانی یونوسفر را در قالب فایل‌هایی با فرمت قراردادی IONEX ارائه می‌کنند. در این سرویس از روش تک‌لایه برای مدل‌سازی یونوسفر استفاده می‌شود. ارتفاع این لایه در حدود 450 km از سطح زمین (ارتفاع حداکثر چگالی الکترونی در لایه یونوسفر) در نظر گرفته می‌شود. همچنین از ترکیب دوتفاضلی یا ترکیب تفاضلی دوگانه مشاهدات فاز، در ترکیب خطی مستقل از هندسه بین ماهواره و گیرنده به نام برای مدل‌سازی یونوسفر

یونوسفر شده و از طرف دیگر محاسبات را ساده‌تر کرده و بایاس‌هایی از گیرنده و ماهواره را حذف می‌کند. ترکیب عاری از هندسه در این سطح تفاضلی به صورت زیر است:

$$ddL_4 = dd(L_2 - L_1) = +a\left(\frac{1}{f_1^2} - \frac{1}{f_2^2}\right) \times \times dd(F(Z_1)E(\beta, s)) + b_4 \quad (10)$$

$$ddP_4 = dd(P_2 - P_1) = +a\left(\frac{1}{f_1^2} - \frac{1}{f_2^2}\right) \times \times dd(F(Z_1)E(\beta, s)) \quad (11)$$

تفاوت این معادلات با معادلات مشاهدات در سطح تفاضلی صفر در حذف شدن جملات b_4 و در B_4 ، $\lambda_1 N_1 + \lambda_2 N_2$ حضور دارد که λ_1 و λ_2 طول موج‌های L_1 و L_2 و N_1 و N_2 پارامترهای ابهام‌فازند که اعدادی صحیحند.

مدل‌سازی یونوسفر در معادلات (۸) و (۹) و (۱۰) و (۱۱) بر اساس برآورد ضرایب تابع $E(\beta, s)$ صورت می‌پذیرد. لذا با توجه به در نظر گرفتن مدل جهانی یا محلی یونوسفر این تابع دارای فرم‌های متفاوتی خواهد بود. در مدل‌سازی جهانی یونوسفر ایجاد کنیم این تابع به صورت زیر است (Schaefer, 1999; Schaefer et al., 1995).

$$E(\beta, s) = \sum_{n=0}^{n_{\max}} \sum_{m=0}^m \tilde{P}_{nm}(\sin \beta) (\tilde{C}_{nm} \cos(ms) + \tilde{S}_{nm} \sin(ms)) \quad (12)$$

در این رابطه β عرض جغرافیایی نقطه تقاطع خط سیر موج با لایه یونوسفر، $s = \lambda - \lambda_0$ طول جغرافیایی این نقطه به مرجع خورشید، λ طول جغرافیایی نقطه تقاطع خط سیر موج با لایه یونوسفر و λ_0 طول جغرافیایی نقطه مرجع، n_{\max} حداکثر درجه بسط هارمونیک کروی، \tilde{P}_{nm} توابع لژاندر نرمالیزه شده از درجه n و مرتبه m ، \tilde{C}_{nm} و \tilde{S}_{nm} ضرایب هارمونیک‌های کروی (مجهولات مدل ریاضی ۱۲) می‌باشند. در مدل‌سازی محلی یونوسفر تابع $E(\beta, s)$ به صورت زیر فرموله می‌شوند (Schaefer, 1999; Schaefer et al., 1995):

$$E(\beta, s) = \sum_{n=0}^{n_{\max}} \sum_{m=0}^m E_{nm} (\beta - \beta_0)^n (s - s_0)^m \quad (13)$$

در نتیجه میزان فعالیت‌های خورشیدی در آن‌ها بالا است؛ همچنین از مقادیری TEC روزهای قبل و بعد از این روزها حذف و از TEC روزانه روزهای باقی مانده میانگین‌گیری می‌شود.

به این ترتیب میانگین ماهانه‌ای از TEC که تنها شامل تغییرات یا آنامولی نرمی از آن است به عنوان مقدار پایه تغییرات این کمیت انتخاب می‌شود. مطالعات انجام شده تا کنون نشان داده است که تغییرات ناشی از زمین‌لرزه‌های بزرگ در چگالی الکترونی یونوسفر را می‌توان ۱ تا ۷ روز قبل از وقوع زمین‌لرزه در یونوسفر دنبال کرد. (Pulinets & Boyarchuk 2005; Liu et al. 2001; Zakharenkova et al. 2008).

تغییرات منظم یونوسفر از قبیل تغییرات ناشی از دوره فعالیت خورشیدی، تغییرات فصلی و تغییرات روزانه در هر دو مقدار TEC پایه و TEC روزانه یکسان است. در نتیجه تفاوت‌های موجود، ناشی از عوامل نامنظم تأثیرگذار بر یونوسفر است تأثیر زمین‌لرزه یکی از آن‌ها است.

۴. بحث و نتایج

فایل‌های IONEX و اندیس kp برای ۳۰ روز پیاپی قبل از تاریخ وقوع زمین‌لرزه و یک روز پس از آن برای هر یک از دو زمین‌لرزه مورد مطالعه جمع‌آوری گردید. مقادیر اندیس kp بررسی شده و داده‌های روزهایی که در آن‌ها طوفان‌های خورشیدی رخ داده است (سطح kp در آن‌ها بالاتر از ۴ است)، همچنین روزهای قبل و بعد از آنها شناسایی و مشاهدات TEC آن‌ها از فرآیند محاسبات حذف شده است.

در ادامه از بقیه مشاهدات TEC میانگین‌گیری (Mean TEC محاسبه) شده است.

همان‌گونه که توضیح داده شد از میانگین TEC روزهای آرام ۳۰ روز قبل از وقوع زمین‌لرزه به عنوان مرجع و از انحراف معیار آنها (σ) به عنوان حدود آستانه شناسایی تغییرات استفاده شده است. جزئیات مربوط به این محاسبات در ادامه مورد بررسی قرار می‌گیرد.

استفاده می‌شود. این پایگاه نقشه‌های جهانی یونوسفر، در قالب فایل‌های با فرمت قراردادی *ION را که حاوی ضرایب هارمونیک‌های کروی برای محاسبه TEC هستند با استفاده از نرم‌افزار Bernese تهیه نموده و در سایت ftp.unibe.ch در اختیار علاقه‌مندان قرار می‌دهد. از طرف دیگر IGS نقشه‌های جهانی TEC را به صورت روزانه در قالب فایل‌های IONEX که این هم یک فرمت قراردادی با رزولیشن مکانی 5° در طول جغرافیایی و $2/5^\circ$ در عرض جغرافیایی و با رزولیشن زمانی ۲ ساعت ارائه می‌دهد. روش دیگر برای مدل‌سازی یونوسفر استفاده از مدل‌های محلی یونوسفر است. در این مقاله با استفاده از نرم‌افزار Bernese، از روش تک‌لایه برای مدل‌سازی یونوسفر استفاده شده است. مانند مدل‌سازی جهانی، ارتفاع لایه F_2 کیلومتر در نظر گرفته شده است. همچنین از ترکیب خطی مستقل از هندسه بین ماهواره و گیرنده یا در سطح تفاضلی صفر از مشاهدات فاز برای مدل‌سازی یونوسفر استفاده می‌شود. مدل محلی یونوسفر در روزهای مختلف در قالب فایل‌هایی با فرمت قراردادی *ION شامل ضرایب تیلوری قبلاً معرفی شده ذخیره سازی می‌شوند. این اطلاعات با استفاده از کدی که به زبان MATLAB تهیه شده است به نقشه‌های محلی TEC تبدیل می‌شوند.

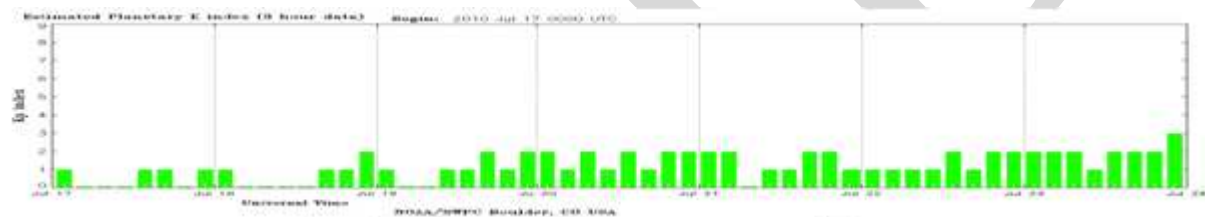
۳.۴. تغییرات زمانی و مکانی TEC و بازشناسی زمین‌لرزه

برای بررسی تغییرات زمانی چگالی الکترونی، مقادیر TEC مشاهده شده در بازه‌های زمانی مختلف را با مقادیری که به عنوان مقادیر پایه در نظر گرفته شده است، مقایسه و تغییرات زمانی دانسیته الکترونی استخراج شده است. مسئله حائز اهمیت شناسایی عوامل تأثیرگذار متعدد بر TEC، مثل فعالیت‌های خورشیدی و تغییرات روز به روز یونوسفر و دیگر عوامل نظیر از تغییرات ایجاد شده در اثر زمین‌لرزه است. به این ترتیب جداسازی تغییرات ناشی از زلزله یا پیش‌نشانگرهای زمین‌لرزه یک روش تشخیص سیگنال از نویز محسوب می‌شود. مقدار پایه مذکور معمولاً متوسط مقادیر TEC در روزهای مختلف انتخاب می‌شود. برای این منظور، داده‌های روزهایی که مقارن با طوفان‌های خورشیدی بوده و

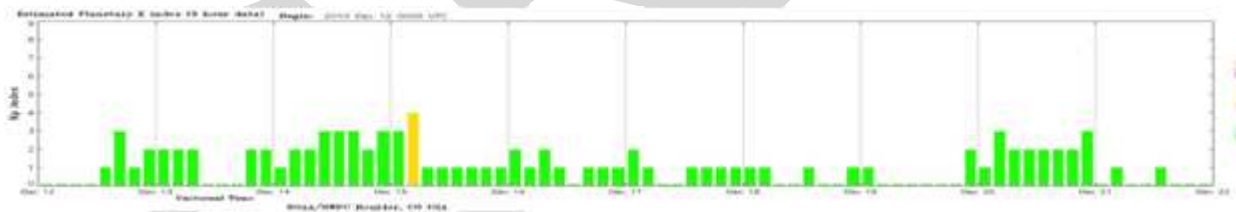
۱.۴. بررسی اثر طوفان‌های مغناطیسی

مورد بحث به لحاظ فعالیت‌های خورشیدی روزهای آرامی محسوب می‌شوند. این شرایط حالتی ایده آل را برای بررسی تغییرات ایجاد شده در اثر زمین‌لرزه فراهم می‌کند. بررسی اندیس kp بین روزهای ۲۴ ژوئن تا ۱۷ جولای نشان می‌دهد که در روزهای ۲۹، ۲۷، ۲۶ و ۳۰ ژوئن و ۱، ۱۴ و ۱۵ جولای سطح kp بالا است. با توجه به تاریخ وقوع زمین‌لرزه دوم مورد بررسی در این مقاله، داده‌های IONEX و اندیس kp برای روزهای ۲۲ نوامبر تا ۲۲ دسامبر نیز جمع‌آوری شده است. تغییرات اندیس kp در بازه زمانی مذکور در شکل (۸) نمایش داده شده است. چنانکه این شکل نشان می‌دهد، در روزهای ۱۵ و ۲۷ دسامبر ناآرامی‌هایی در فعالیت‌های خورشیدی دیده می‌شود.

تشعشعات خورشید از عوامل تأثیرگذار بر یونوسفر است و بررسی تغییرات ایجاد شده در اثر زمین‌لرزه در یونوسفر را با پیچیدگی‌هایی مواجه می‌سازد. طوفان‌های مغناطیسی می‌توانند سبب تشدید و یا کاهش تغییرات ایجاد شده در یونوسفر به واسطه زمین‌لرزه گردند. زمین‌لرزه بندر مورو در کشور فیلیپین در تاریخ ۲۳ جولای ۲۰۱۰ اتفاق افتاده است. در نتیجه نمودارهای kp برای ۳۰ روز پیاپی قبل از تاریخ وقوع زمین‌لرزه و یک روز پس از آن را مورد بررسی قرار گرفته است. شکل (۷) تغییرات اندیس kp را در ۱۷ تا ۲۴ جولای ۲۰۱۰ نمایش می‌دهد. چنانکه در این شکل ملاحظه می‌شود، در روزهای مورد نظر مقدار اندیس kp کمتر از ۴ و میزان فعالیت‌های خورشیدی بسیار پایین است. در نتیجه روزهای



شکل ۷. بررسی تغییرات اندیس kp در ۱۷ تا ۲۳ جولای ۲۰۱۰



شکل ۸. بررسی تغییرات اندیس kp از ۱۲ تا ۲۱ دسامبر ۲۰۱۰

و یا بیشتر از مرز باشد تغییرات ایجاد شده یک آنامولی تغییری نامتعارف در TEC محسوب می‌گردد. برای بررسی آنامولی‌های ناشی از زمین‌لرزه بندر مورو در یونوسفر مشاهدات مورد نیاز در فرمت RINEX از مرکز محاسبات SOPAC از سرویس IGS و نقشه‌های جهانی TEC به فرمت IONEX از مرکز CODE از این سرویس دریافت شده است. محدوده منطقه دستخوش تغییر ناشی از این زمین‌لرزه در شکل ۹ با دایره نقطه‌چین نمایش داده شده است.

۲.۴. تغییرات زمانی

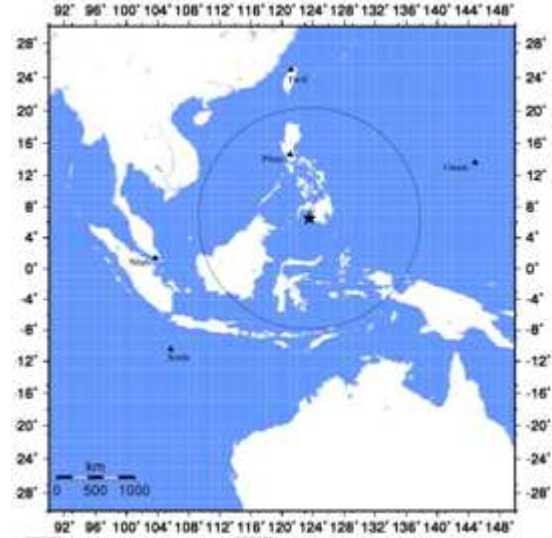
در زمین‌لرزه‌های مورد بررسی برای تحقیق در مورد تغییرات ایجاد شده در یونوسفر و حذف اثرات مختلفی که در بالا بدان اشاره شد، داده‌های نقشه‌های TEC تهیه شده به روش محلی و جهانی روزهایی که دارای طوفان‌های خورشیدی بودند (سطح kp بالا) و روز قبل و بعد از آنها حذف و از بقیه مشاهدات میانگین‌گیری شد و از این مقدار به عنوان مرجع و همچنین از انحراف معیار به عنوان حدود آستانه مطالعه تغییرات زمانی TEC استفاده شده است. اگر مقدار TEC روزانه کمتر از مرز

دایره‌های کوچک نمایش داده شده‌اند. همانگونه که در شکل (۹) ملاحظه می‌شود، در منطقه پیش‌بینی زمین‌لرزه تنها یک ایستگاه GPS با نام Pimo وجود دارد. در نتیجه برای تولید مدل محلی یونوسفر علاوه بر داده‌های این ایستگاه، از داده‌های دیگر ایستگاه‌های اطراف این منطقه نیز استفاده شده است. نام ایستگاه‌های مورد استفاده و موقعیت آنها در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول ۱. موقعیت ایستگاه‌های GPS مورد استفاده در زلزله بندر مورو

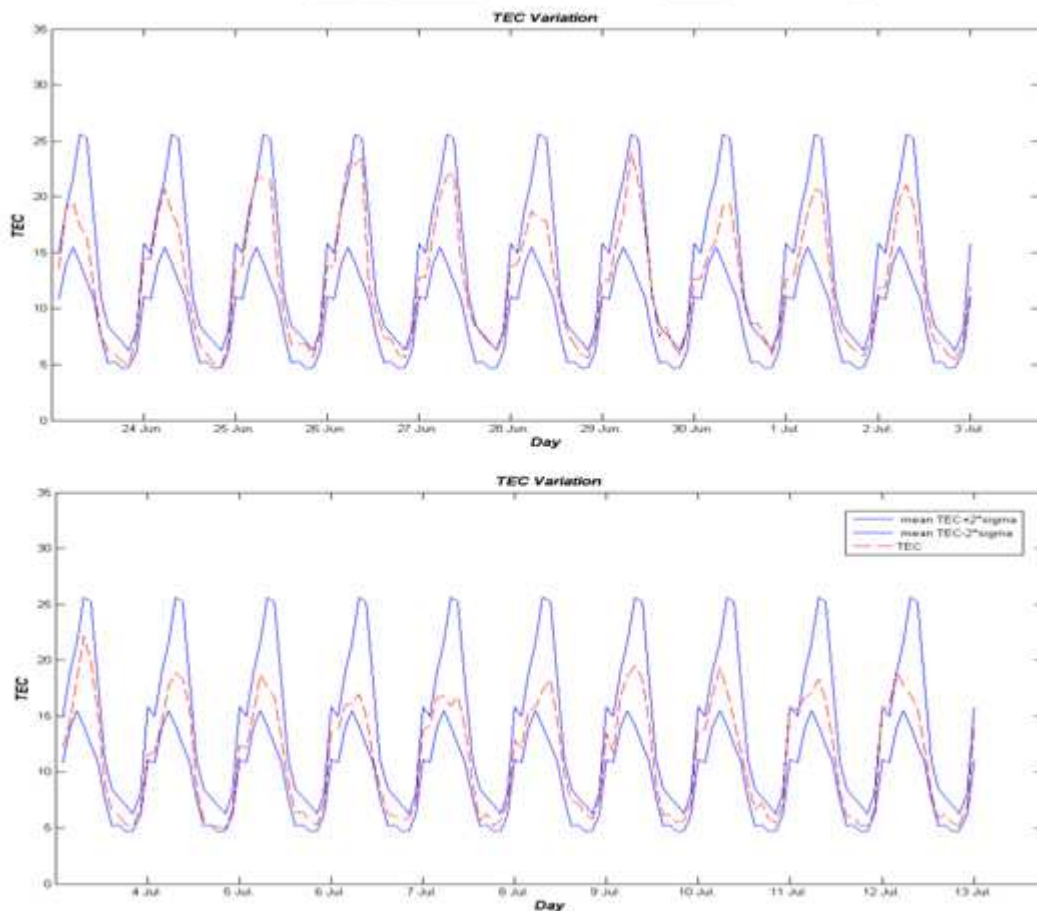
نام ایستگاه	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی
Pimo	14.63555556	121.077583
Ntus	1.34580149	103.67995846
Twtf	24.95356470	121.16450282
Xmis	-10.44972222	105.68833333
Guam	13.58932947	144.86836050

شکل (۱۰) میزان TEC را برای هر دو ساعت و در روزهای ۲۴ ژوئن تا ۲۴ جولای با خطوط ممتد نمایش می‌دهد.

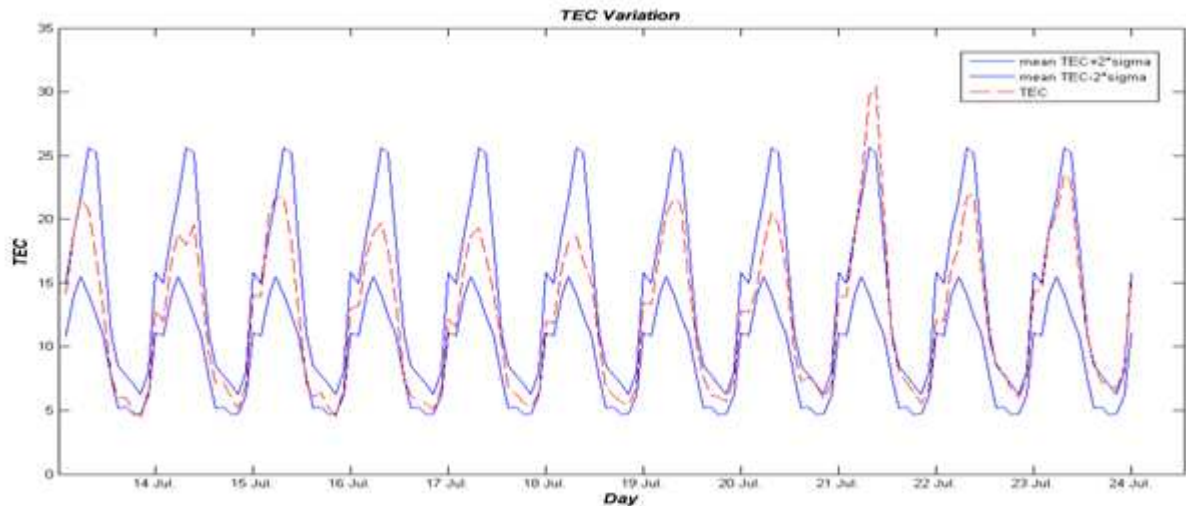


شکل ۹. زمین‌لرزه بندر مورو و ایستگاه‌های GPS موجود

در شکل (۹) کانون سطحی زمین‌لرزه با مربع و منطقه مورد مطالعه برای پیش‌بینی زمین‌لرزه با دایره‌ای به مرکز این نقطه و با شعاع ۱۸۰۰ کیلومتر به صورت نقطه‌چین مشخص شده است. همچنین ایستگاه‌های GPS موجود در منطقه با



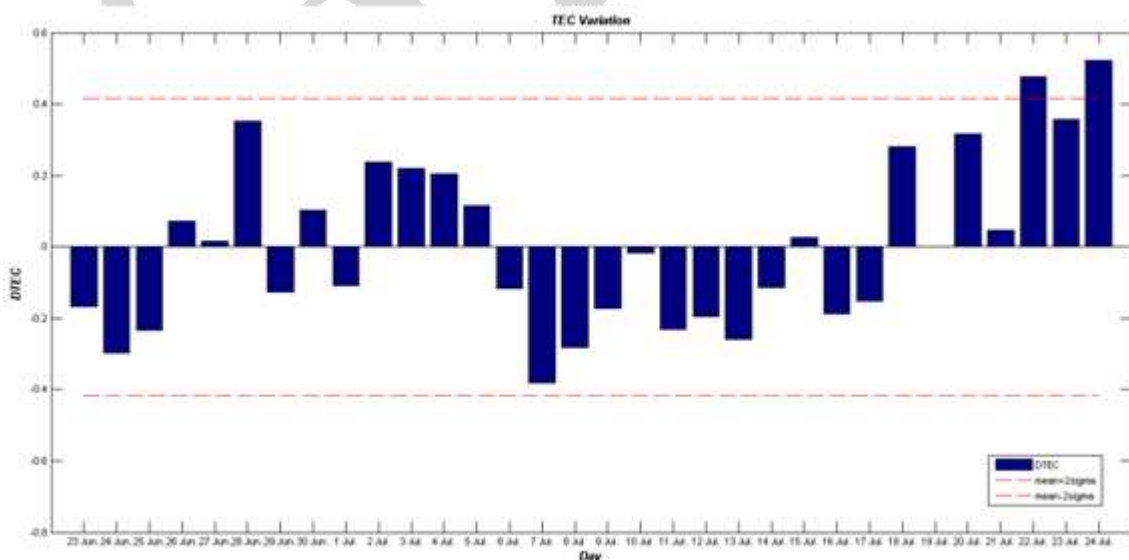
شکل ۱۰. بررسی زلزله مورو با استفاده از مدل‌سازی جهانی یونوسفر. خط چین قرمز رنگ میزان TEC روزانه و خط آبی $\text{Mean TEC} \pm 2\sigma$



ادامه شکل ۱۰. بررسی زلزله مورو با استفاده از مدل سازی جهانی یونوسفر. خط چین قرمز رنگ میزان TEC روزانه و خط آبی $\text{Mean TEC} \pm 2\sigma$

خورشیدی بالا است نیز قابل مشاهده است. مشاهده این آنامولی ها یکی از تفاوت های قابل توجه بین این دو روش محسوب می شود. این موضوع نشان دهنده این است که مدل محلی یونوسفر تغییرات محلی یونوسفر را بهتر مدل کرده و از آنجا که زمین لرزه سبب ایجاد تغییرات محلی می شود، از مدل های محلی حائز به نحو مؤثرتری می توان برای شناسایی پیش نشان گره های زمین لرزه در یونوسفر استفاده کرد. با این وجود عدم دسترسی در داده های خام GPS در بسیاری از مناطق، استفاده از مدل های جهانی را برای این منظور اجتناب ناپذیر می نماید.

همچنین، در این شکل حدود آستانه مقایسه با خط نقطه چین نمایش داده شده است. شکل (۱۱) اختلاف مقادیر TEC روزانه را در روزهای ۲۴ ژوئن تا ۲۴ جولای از مقدار میانگین ماهیانه TEC برای یک ماه قبل از زلزله نمایش می دهد. علاوه بر این، در این شکل حدود مقایسه با خط چین نمایش داده شده است. با توجه به نتایج به دست آمده، پیش نشانگرهای زمین لرزه یا تغییراتی ناگهانی در TEC به خوبی در روز قبل از وقوع زمین لرزه یعنی روز ۲۲ جولای در هر دو مدل جهانی و محلی مشاهده می شود. علاوه بر این در مدل جهانی یونوسفر نامنظمی هایی در روزهایی که در آنها سطح فعالیت های



شکل ۱۱. بررسی زمین لرزه مورو با استفاده از مدل سازی جهانی یونوسفر. خط چین قرمز رنگ میزان $\text{TEC} - \text{mean TEC}$ و خط آبی رنگ

شعاع ۱۵۰۰ کیلومتر به صورت نقطه‌چین مشخص شده است. همچنین ایستگاه‌های GPS موجود در منطقه با دایره‌های کوچک مشخص شده‌اند.

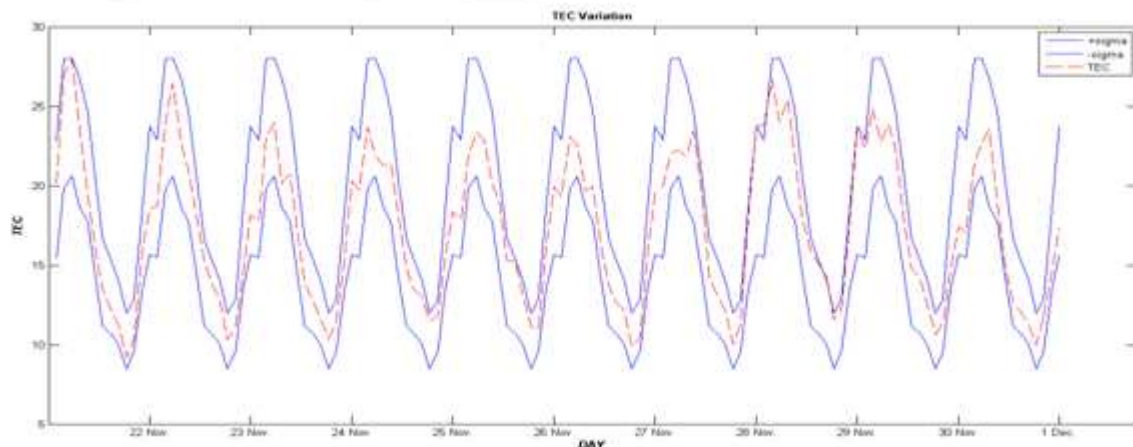
نام ایستگاه‌های مورد استفاده و موقعیت آنها در جدول (۲) ارائه شده است.

جدول ۲. موقعیت ایستگاه‌های GPS مورد استفاده در زمین‌لرزه

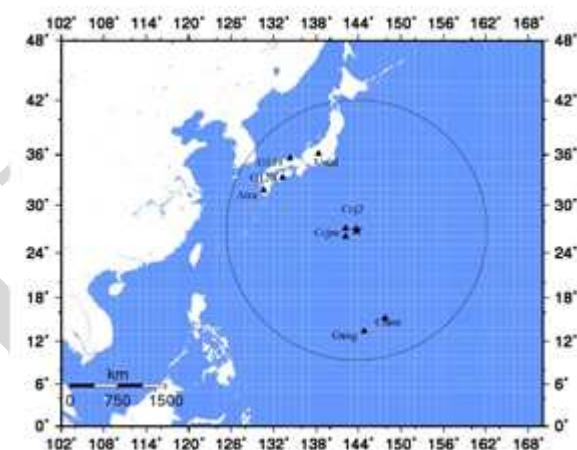
جزیره بنین

نام ایستگاه	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی
Aira	31.82388889	130.59944444
Cejm	27.09555556	142.18444444
Ccj2	27.067511	142.195
Cnmr	15.22969786	145.74309100
G118	35.59361	134.31583
G120	33.333121	133.244231
Guug	13.43320865	144.8027122
Usud	36.13310986	138.36204365

شکل (۱۳) میزان TEC را برای هر دو ساعت و برای روزهای ۲۱ نوامبر تا ۲۲ دسامبر با خطوط ممتد نمایش می‌دهد. همچنین، در این شکل حدود آستانه مقایسه با خط نقطه‌چین نمایش داده شده است.

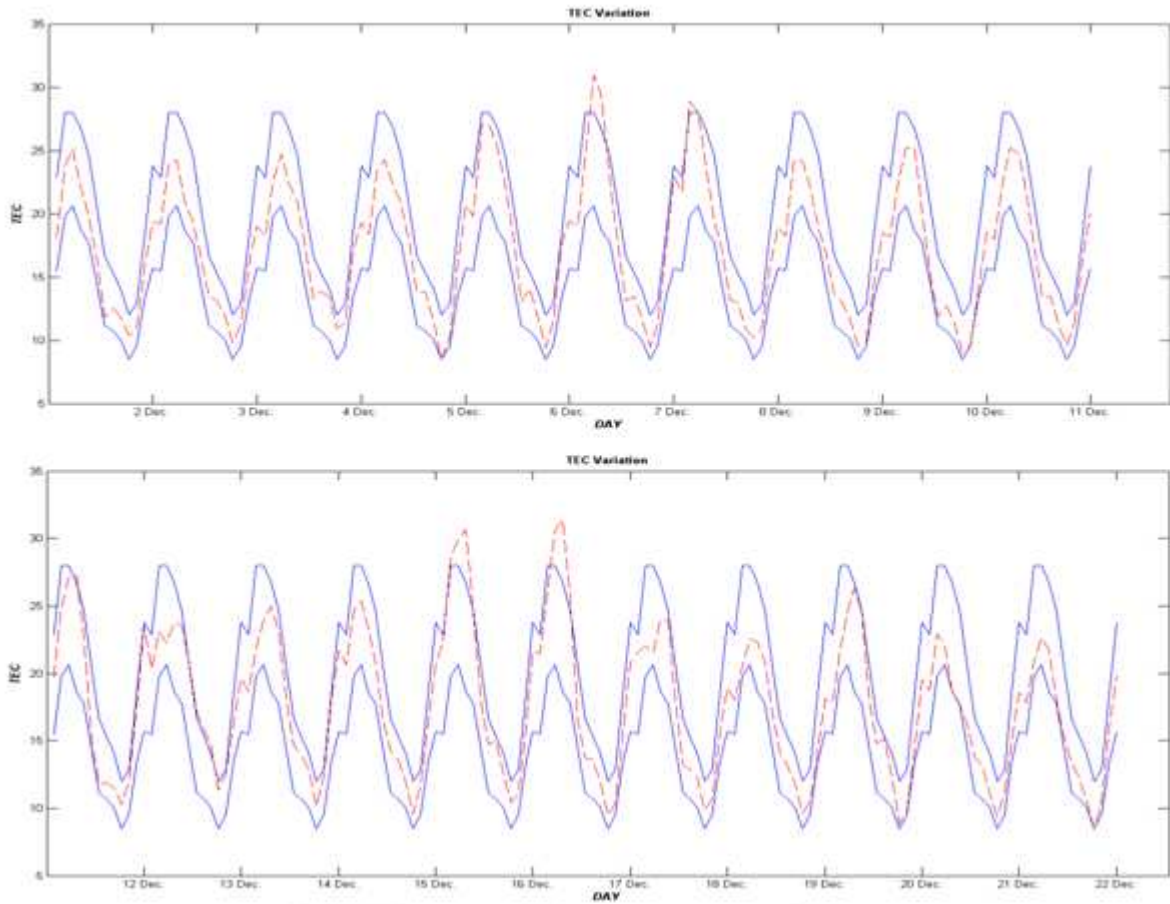


برای بررسی آنامولی‌های ناشی از زمین‌لرزه جزایر بنین در کشور ژاپن در یونوسفر مشاهدات مورد نیاز در فرمت RINEX از مرکز محاسبات SOPAC از سرویس IGS و نقشه‌های جهانی TEC به فرمت IONEX از مرکز CODE از این سرویس دریافت شده است. محدوده منطقه دستخوش تغییر ناشی از این زمین‌لرزه در شکل (۱۲) با دایره نقطه‌چین نمایش داده شده است.



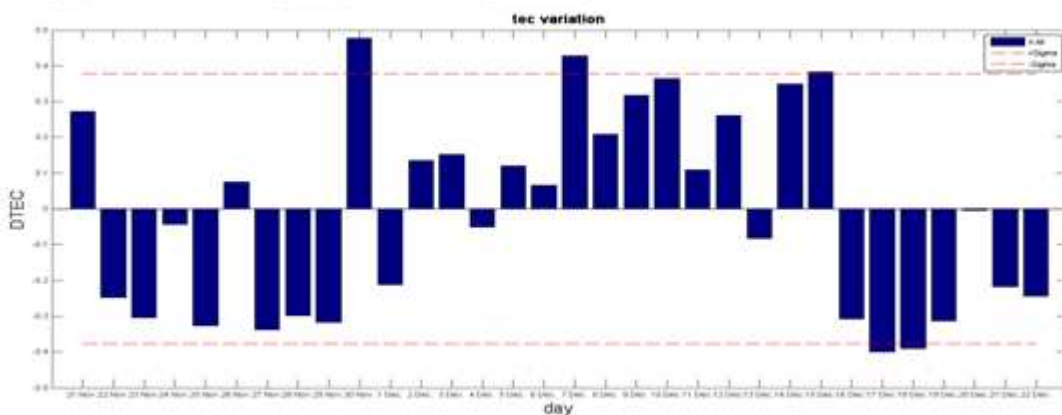
شکل ۱۲. زمین‌لرزه جزیره بنین و ایستگاه‌های GPS موجود

در این شکل کانون سطحی زمین‌لرزه با مربع نشان داده و منطقه پیش‌بینی زمین‌لرزه با دایره‌ای به مرکز این نقطه و با



شکل ۱۳. تغییرات ۳۰ روز TEC برای زمین‌لرزه جزیر بُنِن. خط چین قرمز رنگ میزان TEC روزانه و خط آبی $\text{Mean TEC} \pm 2\sigma$

شکل ۱۴ اختلاف مقادیر TEC روزانه را در روزهای ۲۱ نوامبر تا ۲۲ دسامبر از مقدار میانگین ماهیانه TEC برای یک ماه قبل از زلزله نمایش می‌دهد. علاوه بر این، در این شکل حدود مقایسه با خط چین نمایش داده شده است.



شکل ۱۴. تغییرات روزانه TEC برای زمین‌لرزه جزیر بُنِن.

۴ روز قبل از وقوع زمین‌لرزه به خوبی می‌توان مشاهده کرد. علاوه بر این، در مدل‌های جهانی بی‌منظمی‌هایی را در روزهایی که در آنها سطح فعالیت‌های خورشیدی بالا است نیز

با توجه به نتایج به دست آمده پیش‌نشانگرهای زمین‌لرزه یا تغییرات نامنظم چگالی الکترونی ناشی از زمین‌لرزه جزیره بُنِن را در هر دو مدل جهانی و محلی و در تاریخ ۱۷ دسامبر یعنی

لرزه قابل تشخیص نخواهند بود. بررسی مشابهی با مدل‌های محلی نیز انجام شده است. از آنجا که مدل‌های محلی با داده‌های محلی بازسازی می‌شوند جزئیات بیشتری از خصوصیات محلی را منعکس نموده و تنها تاثیر پیش‌نشانگرهای زمین‌لرزه را منعکس می‌کنند. برخوردار بودن ایران از بیش از ۱۰۷ ایستگاه دائمی GPS (موسوم به شبکه IPGN) از یک طرف و مشارکت تنها یک ایستگاه از این مجموعه در سرویس بین‌المللی IGS بر ضرورت توسعه مدل‌های منطقه‌ای و محلی با استفاده از مشاهدات ایستگاه‌های مذکور و ارزیابی تغییرات آن‌ها در اثر زمین‌لرزه‌های بزرگ تأکید دارد.

منابع

- Abdollah, M., Zain A. (2009) Ionospheric total electron content response to the December 26, 2004 North Sumatra earthquake. *American Journal of Applied Sciences*, 6, 685-690.
- Antsevich, M. (1971) The influence of Tashkent earthquake on the Earth's magnetic field and the ionosphere. In "Tashkent earthquake 26 April 1966". *FAN Publication*, Tashkent 187-188.
- Bolt, B. (1964) Seismic air waves from the great 1964 Alaskan earthquake. *Nature*, 202, 1095-1096.
- Dach, R., Hugentobler, U., Fridez P. and Meindl, M. (eds.), (2007) User manual of the Bernese GPS Software Version 5.0. Bern. Astronomical Institute, *University of Bern*, Bern.
- Depue, V., Zelenova, T. (1996) Electron density profile changes in a per-earthquake period. *Advanced Space Research*, 18 (6): 115-(6)118.
- Donn, W. L., and E. S. Posmentier (1964), Ground-coupled air waves from the Great Alaskan Earthquake. *Journal of Geophysical Research*, 69(24): 5357-5361, doi:10.1029/JZ069i024p05357.
- Gokhberg, M. B.; Gufeld, I.L.; Rozhnoy, A.A.; Marenko, V.F.; Yampolsky, V.S.; Ponomarev, E.A. (1989) Study of seismic influence on the ionosphere by super long wave probing of the Earth-ionosphere waveguide. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 57 (1-2), 64-67.
- Gokhberg MB, G. I. (1987) Studies of Perturbations of Natural and Artificial Electromagnetic Fields by Sources of Seismic Origin. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 23, 102-108.

می‌توان مشاهده کرد. در این مدل‌ها، علاوه بر روزهایی که اندیس k_p در آن‌ها بالا است؛ در روزهای ۶ و ۷ دسامبر و ۲۹ نوامبر هم بی‌منظمی‌هایی را می‌توان دید.

بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که در تاریخ ۹ دسامبر زمین‌لرزه‌ای با بزرگای ۲/۵ در مقیاس اندازه‌گیری ریشتر و به مرکز ۳۹/۱۷ شمالی و ۱۴۳/۳۱ شرقی افتاده است. به این ترتیب می‌توان بی‌منظمی‌هایی را که در روزهای ۶ و ۷ دسامبر در مدل جهانی مشاهده می‌شود به پیش‌نشانگرهای این زمین‌لرزه نسبت داد.

این بی‌منظمی‌ها در روز ۷ دسامبر در مدل محلی قابل مشاهده است. همچنین، بی‌منظمی‌های ناشی از زمین‌لرزه ۳۰ نوامبر با بزرگای ۶/۸ در مقیاس اندازه‌گیری ریشتر که کانون سطحی آن در ۲۸/۳۶ شمالی و ۱۳۹/۱۵ شرقی قرار دارد را می‌توان در هر دو مدل جهانی و محلی مشاهده کرد.

۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله قابلیت مدل‌های تک لایه جهانی تولید شده به کمک داده‌های ترکیب ۲ تفاضلی دو گانه مشاهدات فاز شبکه ردیابی بین‌المللی با قابلیت مدل‌های تک لایه محلی بازسازی شده به کمک داده‌های خام پردازش شده به کمک نرم افزار Bernese در سطح تفاضلی صفر، در تعیین تقریبی زمان و محل وقوع زمین‌لرزه‌های با بزرگای بیش از ۶ در مقیاس اندازه‌گیری ریشتر مورد مقایسه قرار گرفته است. در این مقاله آنامولی ایجاد شده در چگالی الکترونی در اثر زمین‌لرزه‌هایی که در عرض‌های جغرافیایی پایین و متوسط رخ داده‌اند مورد بررسی قرار گرفته است. وجود آنامولی استوایی در تغییرات دانسیته الکترونی یکی از مهمترین موانع موجود در تجزیه و تحلیل تغییرات دانسیته الکترونی و یا به طور معادل انتگرال خطی آن است. با این وجود نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که در صورت پایین بودن میزان فعالیت‌های خورشیدی در مدل جهانی یونوسفر تغییرات معناداری را می‌توان در مقادیر TEC حاصل از مدل‌های تک‌لایه جهانی و در فاصله زمانی روزهای اول تا پنجم قبل از وقوع زمین‌لرزه مشاهده کرد و در صورت بالا بودن میزان فعالیت‌های خورشیدی پیش‌نشانگرهای زمین

- atmosphere and ionosphere modification. *Advanced Space Research*, 20, 2173-2176.
- Rulenko, o. (2000) Operative precursors of earthquakes in the near-ground atmosphere electricity. *Vulcanology and Seismology*, 4, 57-68.
- Schaer, S. (1995) Global and Regional Ionosphere Models Using the GPS Double Difference Phase Observable. *Proceedings of the IGS Workshop on Special Topics on New Directions*, Germany.
- Schear, s. (1999) Mapping and predicting the earth's Ionosphere using the Global Positioning System. *University of Bern*, Bern.
- Seeber, G. (2003) Satellite geodesy. *Walter de Gruyter*, Berlin.
- Zakharenkova, I.E., Shagimuratov, I.I., Tepenitzina, N. Yu. and Krankowski, A. (2008) Anomalous Modification of the Ionospheric Total Electron Content Prior to the 26 September 2005 Peru Earthquake. *Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 70(15), 1919-1928.
- Zakharenkova, I.E., Shagimuratov, I.I., Tepenitzina, N. Yu. and Krankowski, A. (2007-a) Features of the ionosphere behavior before the Kythira 2006 earthquake. *Acta Geophysica, Institute of Geophysics*, Polish Academy of Sciences, 55(4) 524-534.
- Zakharenkova, I.E., Shagimuratov, I.I., Tepenitzina, N. Yu. and Krankowski, A. (2007-b) Precursory phenomena observed in the total electron content measurements before great Hokkaido earthquake of September 25, 2003 (M=8.3). *Studia Geophysica et Geodaetica*, 51(2) 267-278.
- Gokhberg MB, M. V. (1995) Earthquake Prediction. Seismoelectromagnetic phenomena. *Amsterdam: Gordon and Breach Science Publishers*.
- Gufeld, I.L., Rozhnoy, A.A., Tyumentsev, S.N., Sherstyuk, S.V., Yampolsky, V.S. (1992) Radio Wave Field Disturbances Prior to Rudbar and Rachinsk Earthquakes. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 28, 267-270.
- Leonard, R.S. and Barnes, A.R. (1965) Observation of ionospheric disturbances following the Alaska earthquake. *Journal of the Geophysical Research*, 70 (5): 1250-1253.
- Liu, Y.J., Chuo, J.Y., Pulinets, A.S. Tsai, H. and Zeng, F.X. (2002) A study on the TEC perturbations prior to the Rei-Li, Chi-Chi and Chia-Yi earthquakes. In "Seismo-Electromagnetics: Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling", Eds. Hayakawa M and Molchanov. *Terrapub*, pp. 297-301.
- Liu, J.Y., Chuo, Y.J., Pulinets, S.A., Tsai, H.F., Zeng, X. (2003) A Statistical Study of Ionospheric Precursors of M \geq 5.0 Earthquakes in Taiwan Area. *Private communication*.
- Liu, Y.J., Chuo Y.J., Shan S.J., Tsai Y.B., Chen I.Y., Pulinets A.S. and Yu S.B. (2004) Pre-earthquake anomalies registered by continuous GPS TEC measurements. *Annales Geophysicae*, 22, 1585-159, doi:10.5194/angeo-22-1585-2004.
- Liu, J.Y., Chen, Y.I., Chuo, J.Y. and Tsai, F.H. (2001) Variations of ionospheric total electron content during the Chi-Chi earthquake. *Geophysical Research Letters*, 28 (7): 1383-1386.
- Hayakawa, M., Oudoh, T. and Kawai, E. (1998a) Precursory effects in the subionospheric VLF signals for the Kobe earthquake. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 105, 239-248.
- Hayakawa, M., Oudoh, T. and Kawai, E. (1998b) Subionospheric VLF signal perturbations possibly related to earthquakes. *Journal of the Geophysical Research*, 103 (17) 489-17,504.
- Pulinets, A.S., Gaivoronska, B.T., Leyva Contreras, A. and Ciraolo, L. (2004) Correlation analysis technique revealing ionospheric precursors of earthquakes. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 4, 697-702, doi:10.5194/nhess-4-697-2004.
- Pulinets, S.A. and Boyarchuk, K. (2005-a) Ionospheric Precursors of Earthquakes. *Springer*, Berlin.
- Pulinets, A.S., A. Contreras, L., Bisiacchi-Giraldi, G. and Ciraolo, L. (2005-b) Total electron content variations in the ionosphere before the Colima, Mexico, earthquake of 21 January 2003. *Geofisica Internacional*, 44(4) 369-377.
- Pulinets, S.A. (1997) Radon and metallic aerosols emanation before strong earthquakes and their role in