

بررسی تغییرات TEC پیش از وقوع تعدادی از زمین‌لرزه‌های بزرگ رخ داده در سال ۲۰۱۰، با استفاده از آزمون آماری تی-دو-هتلینگ

زهرا صادقی*^۱، مسعود مشهدی حسینعلی^۲

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد ژئودزی - دانشکده مهندسی نقشه‌برداری - دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی
z.sadeghi@mail.kntu.ac.ir

^۲ دانشیار دانشکده مهندسی نقشه‌برداری - دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی
hossainali@kntu.ac.ir

(تاریخ دریافت بهمن ۱۳۹۵، تاریخ تصویب مهر ۱۳۹۷)

چکیده

زمین‌لرزه‌ها سالانه خسارت‌های جانی و مالی عظیمی به مردم جهان وارد می‌کنند. از اینرو دانشمندان همواره به دنبال یافتن راهکاری برای شناسایی زمان و مکان این پدیده، پیش از وقوع آن هستند. این در حالی است که فعالیت‌های لرزه‌ای زمین باعث ایجاد تغییرات ناهنجاری در پارامترهای یونسفری، پیش از رخداد زمین‌لرزه‌های بزرگ می‌شوند. همین امر سبب شده است که امروزه بررسی تغییرات یونسفری به یکی از روش‌های مهم پیش‌بینی زمین‌لرزه تبدیل شود. در این مقاله برای شناسایی تغییرات یونسفری-لرزه‌ای از داده‌های TEC حاصل از نقشه‌های جهانی یونسفر (GIM) استفاده شده است. روش آماری مورد استفاده برای کشف تغییرات ناهنجار یونسفری، آزمون تی-دو-هتلینگ چندمتغیره می‌باشد. در این مقاله برای اولین بار از این روش به منظور بررسی ارتباط تغییرات یونسفری و زمین‌لرزه استفاده شده است. جهت بررسی کارایی این آزمون در کشف تغییرات ناهنجار یونسفری-لرزه‌ای ۱۲ زمین‌لرزه با بزرگای گشتاوری بزرگتر و یا مساوی ۶ که در سال ۲۰۱۰ رخ داده، مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. مطابق با نتایج حاصل، این آزمون آماری موفق به شناسایی آنامولی یونسفری-لرزه‌ای در ۹ مورد از زمین‌لرزه‌های مورد مطالعه شده است. این آنامولی‌ها عموماً در اطراف مرکز زمین‌لرزه‌ها مشاهده شده و اغلب یک هفته پیش از زلزله‌ها قابل شناسایی هستند. همچنین به طور کلی نتایج نشان می‌دهد انجام آزمون تی-دو-هتلینگ در سطح اطمینان ۹۹٪ نسبت به سطح اطمینان ۹۵٪ در این مطالعه کارآمدتر بوده است.

واژگان کلیدی: زمین‌لرزه، یونسفر، آنامولی، TEC، تی-دو-هتلینگ

* نویسنده رابط

۱- مقدمه

پیش از وقوع زمین‌لرزه‌های بزرگ، به صورت افزایشی و یا کاهششی شناسایی شده است. محل این تغییرات عمدتاً در منطقه‌ای نزدیک مرکز زمین‌لرزه و گاهاً در منطقه مزدوج مغناطیسی آن می‌باشد، به عنوان مثال [۵-۱۲].

در بخش اول این مقاله روش مورد استفاده در این تحقیق، یعنی آزمون آماری تی-دو-هتلینگ^۸ چندمتغیره دو نمونه‌ای به عنوان روشی جدید برای شناسایی تغییرات ناهنجار یونسفری پیش از زمین‌لرزه معرفی شده است. این روش را می‌توان توسعه روش استفاده شده در مقاله [۱۳] از رویکرد تک متغیره به رویکرد چند متغیره دانست. از دیدگاه آمار ریاضی و در مقایسه با روش‌های تک‌متغیره، استفاده از روش‌های چندمتغیره به دلایل مختلفی به روش‌های تک‌متغیره ترجیح داده می‌شود [۱۴]. در بخش دوم، داده‌ها و زمین‌لرزه‌های مورد بررسی شرح داده می‌شود. در نهایت نتایج پیاده‌سازی این آزمون برای زمین‌لرزه‌های مذکور، مورد بحث و بررسی قرار گرفته و نتایج کلی این تحقیق بیان شده است.

۲- آزمون تی-دو-هتلینگ چندمتغیره دو نمونه‌ای

در تمام مطالعات یونسفری-لرزه‌ای هدف یافتن تغییرات ناهنجار و یا به اصطلاح آنامولی در یک پارامتر یونسفری می‌باشد. به طور کلی در این نوع تحقیقات به منظور شناسایی آنامولی، ابتدا یک مقدار مرجع برای پارامتر مدنظر تعریف می‌گردد، به عنوان مثال میانگین و یا میانه چند روزه (اغلب ۱۵ و یا ۳۰ روزه). سپس مقدار پارامتر در هر مقطع زمانی با مقدار مرجع مقایسه می‌گردد. چنانچه مقدار پارامتر نسبت به مقدار مرجع تغییرات قابل ملاحظه‌ای داشته باشد به عنوان آنامولی شناخته می‌شود. این آنامولی اگر از نظر زمانی و مکانی با زمین‌لرزه در ارتباط باشد، به زلزله نسبت داده می‌شود [۵، ۶، ۸، ۱۵-۲۶]. با توجه به این مطلب به نظر می‌رسد آزمون تی-دو-هتلینگ چندمتغیره که یکی از روش‌های بسیار قوی مقایسه میانگین‌ها می‌باشد، کارایی مناسبی در شناسایی ناهنجاری‌های یونسفری-لرزه‌ای داشته باشد. از مزایای اصلی این روش بررسی تغییرات مجموعه‌ای از نقاط به طور همزمان است.

از گذشته تاکنون بلایای طبیعی همچون سیل، آتشفشان، زمین‌لرزه و ... همواره زندگی بشر را با خطر مواجه ساخته است. از اینرو پیش‌بینی این رخدادها نقش بسزایی در جلوگیری از آسیب‌ها و تلفات ناشی از آن‌ها خواهد داشت. در این میان پدیده زمین‌لرزه سالانه خسارت‌های جبران‌ناپذیری بر زندگی انسان وارد می‌کند. همین امر سبب شده است تا محققان بسیاری سعی در پیش‌بینی این رخداد داشته باشند. تأثیر فعالیت‌های لرزه‌ای زمین بر ساختار و تغییرات یونسفری، امروزه امری شناخته شده است. زمین‌لرزه آلاسکا^۱ با بزرگای گشتاوری ۹/۳ و عمق ۲۵ کیلومتر که در تاریخ ۲۸ مارچ سال ۱۹۶۴ رخ داده، نخستین زلزله‌ای بود که تغییرات یونسفری پیش از آن مورد توجه محققین قرار گرفت [۱، ۲]. به دنبال آن، در مطالعات بسیاری تغییرات پارامترهای یونسفری پیش از زمین‌لرزه‌ها بررسی شد. امروزه با پیشرفت رزولوشن مکانی و زمانی داده‌های TEC حاصل از GPS و دیگر ماهواره‌ها مطالعات یونسفری-لرزه‌ای به سرعت در حال توسعه است. نخستین بار کالای^۲ و مینستر^۳ آنامولی یونسفری-لرزه‌ای را طی زمین‌لرزه نورسریج^۴، با بررسی تغییرات TEC^۵ حاصل از مشاهدات GPS شناسایی کردند. این زمین‌لرزه در تاریخ ۱۷ ژانویه سال ۱۹۹۴ رخ داده، بزرگای گشتاوری آن ۶/۷ و عمق آن ۱۸/۲۰ کیلومتر بوده است [۳]. لیو^۶ و همکارانش در سال ۲۰۰۱ از TEC حاصل از مشاهدات GPS برای مطالعه تغییرات یونسفری در طول زلزله چی-چی^۷ با بزرگای گشتاوری ۷/۷ و عمق ۳۳ کیلومتر استفاده کردند. براساس نتایج این تحقیق، TEC پیرامون مرکز زمین‌لرزه، یک، سه و چهار روز پیش از آن به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. همچنین آن‌ها متوجه وابستگی بالای فرکانس بحرانی لایه F2 بدست آمده از ایستگاه یونوسوند و TEC شدند [۴]. بدین ترتیب پارامتر TEC به یک پارامتر کلیدی و مهم در مطالعات یونسفری-لرزه‌ای تبدیل شده است. در مطالعات بسیاری تغییرات ناهنجار TEC چند روز

۱ Alaska
 ۲ Calais
 ۳ Minster
 ۴ Northridge
 ۵ Total Electron Content
 ۶ Liu
 ۷ Chi-Chi

۸ T2-Hotelling

فرض H_0 رد می‌شود اگر:

$$\left(\frac{f-p+1}{fp}\right)T^2 \geq F_{p,f-p+1,\alpha} \quad (7)$$

در این رابطه $F_{p,f-p+1,\alpha}$ مقدار بحرانی توزیع فیشر در سطح اعتبار α و با درجه آزادی‌های p و $f-p+1$ می‌باشد. با برقراری رابطه (۷) فرض صفر رد می‌شود [۲۸]. در واقع با توجه به سطح اطمینان مدنظر و درجه آزادی، مقدار بحرانی $F_{p,f-p+1,\alpha}$ از جدول مربوط به توزیع فیشر استخراج شده و مقدار آماره (سمت چپ رابطه (۷)) با این مقدار مقایسه می‌شود. اگر آماره مقداری بیش از مقدار بحرانی داشته، تست رد می‌شود و این یعنی تفاوت معناداری بین میانگین دو نمونه وجود دارد. رد نشدن فرض صفر به این معنی است که دلایل کافی برای رد آن وجود ندارد.

جهت تشخیص آنامولی‌های یونسفری-لرزه‌ای با استفاده از داده‌های TEC، چهار نقطه شبکه که مرکز زمین‌لرزه در میان آن‌ها واقع شده، به عنوان گرید معیار برای بررسی انتخاب شده است. این نقاط همان متغیرهایی هستند که تغییرات میانگین آن‌ها از یک اپک زمانی به اپک زمانی دیگر مورد بررسی قرار می‌گیرد. از داده‌های TEC ۴۴ روز پیش از زمین‌لرزه و خود روز زلزله (در مجموع ۴۵ روز) در نقاط این گرید استفاده شده است. محاسبات برای تمام طول روز و در بازه‌های زمانی دو ساعته (به صورت جداگانه) انجام شده است.

دو نمونه مورد نظر به صورت زیر تشکیل شده است. نمونه اول یا نمونه مرجع شامل داده‌های ۴۴ الی ۱۵ روز مقادیر TEC پیش از زمین‌لرزه است. داده‌های مربوط به روزهای ناآرام از نظر فعالیت‌های خورشیدی و ژئومغناطیسی ($Kp \geq 4$ یا $Dst \leq -40$) از این نمونه حذف شده است. طول نمونه دوم چهار روز است. این نمونه از داده‌های TEC مربوط به ۱۴ روز قبل از وقوع زمین‌لرزه و روز وقوع زلزله تشکیل می‌شود. به عنوان مثال در نخستین مرحله بررسی آنامولی‌های لرزه‌ای نمونه دوم از داده‌های روزهای ۱۳، ۱۲، ۱۱، ۱۰ ام قبل روز وقوع زمین‌لرزه تشکیل می‌شود. هر بار این نمونه چهارتایی یک روز جلو رفته به طوریکه دومین نمونه چهارتایی شامل روزهای ۱۳، ۱۲، ۱۱ و ۱۰ ام پیش از زلزله و آخرین نمونه شامل روزهای ۳، ۲، ۱ ام پیش از زلزله و روز زمین‌لرزه

آزمون تی-دو-هتلینگ نخستین بار در سال ۱۹۳۱ توسط هارولد هتلینگ^۱ در جلسه انجمن ریاضی آمریکا مطرح شد [۲۷]. برای مقایسه میانگین‌های دو جمعیت فرض می‌شود $x_1 \sim N_p(\mu_1, \Sigma)$ و $x_2 \sim N_p(\mu_2, \Sigma)$ توزیع دو جمعیت را نشان دهند، p تعداد متغیرهای مورد بررسی است. بر مبنای نمونه‌های مستقل $x_{11}, x_{12}, \dots, x_{1N_1}$ از جامعه اول و $x_{21}, x_{22}, \dots, x_{2N_2}$ از جامعه دوم (x_{ij} بردار متناظر با عضو j ام از جمعیت i)، فرض $H_0: \mu_1 = \mu_2$ در مقابل فرض $H_1: \mu_1 \neq \mu_2$ سنجیده می‌شود. در واقع فرض‌های این آزمون به صورت زیر می‌باشد:

$$H_0: \begin{bmatrix} \mu_{11} \\ \mu_{12} \\ \vdots \\ \mu_{1p} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mu_{21} \\ \mu_{22} \\ \vdots \\ \mu_{2p} \end{bmatrix} \quad H_1: \begin{bmatrix} \mu_{11} \\ \mu_{12} \\ \vdots \\ \mu_{1p} \end{bmatrix} \neq \begin{bmatrix} \mu_{21} \\ \mu_{22} \\ \vdots \\ \mu_{2p} \end{bmatrix} \quad (1)$$

به عبارت دیگر:

$$H_0: \mu_{11} = \mu_{21} \ \& \ \mu_{12} = \mu_{22} \ \& \ \dots \ \& \ \mu_{1p} = \mu_{2p} \quad (2)$$

$$H_1: \mu_{1k} \neq \mu_{2k} \quad k \in \{1, 2, \dots, p\}$$

فرض صفر تنها زمانی که برای تمام متغیرها تساوی برقرار باشد پذیرفته می‌شود. برای انجام این تست ابتدا میانگین (\bar{x}_i) و انحراف معیار (S_i) هر نمونه با استفاده از روابط زیر محاسبه می‌شود:

$$\bar{x}_i = \frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} x_{ij} \quad i = 1, 2 \quad (3)$$

$$S_i^2 = \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{N_i} (x_{ij} - \bar{x}_i)(x_{ij} - \bar{x}_i)' \quad i = 1, 2 \quad (4)$$

در این رابطه (N_i) تعداد اعضای نمونه و $n_i = N_i - 1$ است. واریانس ادغام شده^۲ (روی هم) عبارت است از:

$$S_p^2 = \frac{n_1 S_1^2 + n_2 S_2^2}{f} \quad (5)$$

که در آن $f = n_1 + n_2 = N_1 + N_2 - 2$ (درجه آزادی) می‌باشد. آماره این آزمون به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$T^2 = \left(\frac{1}{N_1} + \frac{1}{N_2}\right)^{-1} (\bar{x}_1 - \bar{x}_2)' S_p^{-1} (\bar{x}_1 - \bar{x}_2) \quad (6)$$

$$= \frac{N_1 N_2}{N_1 + N_2} (\bar{x}_1 - \bar{x}_2)' S_p^{-1} (\bar{x}_1 - \bar{x}_2)$$

^۱ Harold Hotelling

^۲ Pooled variance

شامل $71 \times 73 = 5183$ نقطه شبکه است). این داده‌ها در سایت UNIBE (<ftp://ftp.unibe.ch/aiub/CODE>) در اختیار کاربران قرار دارد. در این مطالعه به منظور ارزیابی شرایط محیطی مؤثر بر تغییرات یونسفری، شاخص‌های ژئومغناطیسی 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^۳ (<http://spidr.ngdc.noaa.gov/spidr>) و شاخص Dst از طریق سایت ISGI^۴ (<http://isgi.unistra.fr/>) در دسترس می‌باشند.

در این تحقیق تعدادی زمین‌لرزه رخ داده در سال ۲۰۱۰ مورد مطالعه قرار گرفته است. علت انتخاب سال ۲۰۱۰ پایین بودن سطح فعالیت‌های خورشیدی و همچنین وقوع چند زمین‌لرزه مهم در این سال است. در انتخاب زمین‌لرزه‌ها از معیارهای زیر استفاده شده است: ۱- همانطور که گفته شد رزولوشن مکانی داده‌های مورد استفاده $2/5$ درجه در عرض و 5 درجه در طول جغرافیایی می‌باشد. هر درجه در طول و عرض تقریباً معادل 111 کیلومتر است. بنابراین رزولوشن مکانی داده‌ها حدوداً 278 کیلومتر در عرض و 556 کیلومتر در طول می‌باشد. از طرفی شعاع تقریبی منطقه تحت تأثیر زمین‌لرزه برابر $R = 10^{0.43M}$ است، که در این رابطه R شعاع منطقه برحسب کیلومتر و M بزرگای زلزله می‌باشد [۳۰]. با توجه به این رابطه و چنین رزولوشن مکانی، چنانچه کانون زمین‌لرزه در وسط گرید واقع شده باشد، اگر بزرگای آن بزرگتر یا مساوی 6 باشد توسط نقاط شبکه احساس می‌شود. بدین جهت زمین‌لرزه‌هایی با بزرگای گشتاوری بزرگتر یا مساوی 6 مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. این معیار در مطالعات دیگری نیز (که از داده‌های GIM استفاده کرده‌اند) در نظر گرفته شده است به عنوان مثال [۵، ۸، ۳۱-۳۳] ۲- با توجه به اینکه رفتار یونسفر در عرض‌های جغرافیایی مختلف، متفاوت است زمین‌لرزه‌ها از عرض‌های مختلف انتخاب شده‌اند. ۳- در محدوده زمانی بررسی هر زمین‌لرزه (بازه ۴۵ روزه)، زلزله‌ی دیگری با بزرگای $Mw \geq 6$ در منطقه مورد نظر رخ نداده باشد، تا نتایج قابل استناد باشند. ۴- مقادیر TEC در نقشه‌های جهانی

می‌باشد. بنابراین نمونه دوم در دوازده حالت ($12-3=15$) مختلف تشکیل می‌شود. پس از انجام تست برای تمام دوازده بازه زمانی دو ساعته در طول روز و تمام دوازده حالت انتخاب نمونه چهار عضوی، $144(12 \times 12)$ آماره از داده‌های گرید مورد مطالعه محاسبه شده، که براساس آن-ها فرض صفر این آزمون پذیرفته یا رد می‌شود. رد شدن فرض صفر در این‌جا به این مفهوم است که میانگین نمونه چهار روزه حداقل در یکی از نقاط نسبت به میانگین نمونه مرجع تغییرات ناهنجاری دارد.

پس از یافتن توزیع آنامولی‌ها در گرید معیار، ارتباط مکانی این آنامولی‌ها با مرکز زمین‌لرزه بررسی شده است. در واقع به منظور تشخیص آنامولی ایجاد شده به وسیله تأثیرات محلی زمین‌لرزه از آنامولی ناشی از طوفان‌های جهانی، انجام تجزیه و تحلیل مکانی در مقیاس جهانی ضروری است [۲۹]. بدین جهت برای شناسایی آنامولی‌های لرزه‌ای تمام نقاط شبکه به گریدهای چهارتایی تقسیم شده است. سپس مراحل گفته شده در بالا به صورت جداگانه برای هر گرید اجرا و مورد بررسی قرار گرفته است. در نهایت توزیع مکانی آنامولی‌های یافت شده در گرید معیار بررسی می‌شود.

در این مطالعه آزمون تی-دو-هتلینگ در دو سطح اطمینان 99% و 95% انجام شده است. با توجه به اینکه با افزایش سطح اطمینان مقدار بحرانی افزایش می‌یابد، بدیهی است که آنامولی‌های شناسایی شده در سطح اطمینان 99% شدیدتر هستند.

۳- داده‌ها و زمین‌لرزه‌های مورد مطالعه

در این مقاله از نقشه‌های جهانی یونسفری (GIM)^۱ مرکز CODE^۲ که به صورت روزانه و در بازه‌های دو ساعته در اختیار کاربران قرار می‌گیرد استفاده شده است. در این نقشه‌ها، VTEC در یک چارچوب مرجع خورشیدی-ژئومغناطیسی با استفاده از بسط هارمونیک‌های 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 (بنابراین هر نقشه

^۳ Space Physics Interactive Data Resource
^۴ International Service of Geomagnetic Indices

^۱ Global Ionospheric Map
^۲ Center for Orbit Determination in Europe

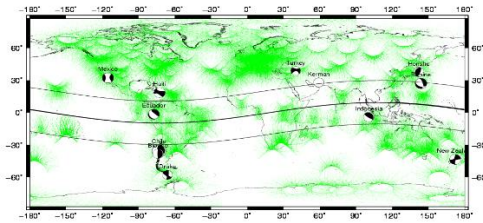
مربوط به این گروه، گریدهایی که آنامولی با یک چنین توزیعی دارند مشخص شده‌اند. هدف ارتباط مکانی این نقاط با مکان زمین‌لرزه می‌باشد. همچنین در این شکل‌ها استوای مغناطیسی و دو نوار غنی چگالی الکترون به مرکزیت حدود $\pm 20^\circ$ از آن رسم شده است. مرکز زمین-لرزه و نقطه مزدوج مغناطیسی آن به ترتیب با علامت ستاره و مثلث نشان داده شده‌اند.

لازم به ذکر است در بسیاری از نقاط، گاهی در برخی بازه‌ها مقدار RMS از مقدار TEC بیشتر است. در شکل-های ۲ تا ۹ نتایج مربوط به نقاطی که مقدار RMS آن‌ها حداقل در یکی از بازه‌های شناسایی آنامولی در گرید معیار، بیش از مقدار TEC بوده نمایش داده نشده است. همچنین نتایج مربوط به نواحی که توزیع IPP ها مناسب نبوده نادیده گرفته شده است. در ادامه نتایج ارزیابی برای هر یک از زمین‌لرزه‌های مورد بررسی به طور جداگانه بیان شده است.

اولین زمین‌لرزه مورد بررسی زلزله هایتی^۱ است. توزیع مکانی آنامولی‌های مورد انتظار برای این زمین‌لرزه در شکل (۲) ارائه شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود آنامولی‌های گروه ۲ و ۳ در سطح اطمینان ۹۵٪ و گروه-های ۴، ۵، ۶، ۷، ۸، ۱۰، ۱۱ و ۱۲ در هر دو سطح اطمینان به طور چشمگیری در اطراف مرکز زمین‌لرزه رخ داده‌اند، بنابراین زمین‌لرزه هایتی در وقوع این آنامولی‌ها در اطراف مرکز زمین‌لرزه نقشی اساسی داشته است.

دومین زمین‌لرزه مورد بررسی زلزله دریک^۲ است. با بررسی توزیع مکانی آنامولی‌های رخ داده در گرید معیار، به نظر می‌رسد آنامولی‌های گروه‌های ۶ و ۷ در هر دو سطح اطمینان و گروه‌های ۸ و ۹ در سطح اطمینان ۹۹٪ می‌تواند به دلیل وقوع این زمین‌لرزه باشد. در ادامه با انجام بررسی‌ها برای زمین‌لرزه شیلی و اندونزی آنامولی یونسفری-لرزه‌ای یافت نشد.

یونسفر (GIM)، با استفاده از درونیایی محاسبه می‌شوند بدین جهت با افزایش فاصله از نقاط یونسفری (IPP) خطای درونیایی افزایش یافته و داده‌ها چندان معتبر نمی‌باشند. لذا حتی الامکان زلزله‌ها از مناطقی با پوشش مناسب IPP انتخاب شده‌اند. در نهایت با توجه به این موارد، ۱۲ زمین‌لرزه مطابق شکل (۱) انتخاب شده و مورد بررسی قرار گرفت. اطلاعات مربوط به این زمین‌لرزه‌ها نیز از سایت USGS (<http://earthquake.usgs.gov/earthquake>) استخراج شده و در جدول (۱) آورده شده است.



شکل ۱- توزیع زلزله‌های مورد بررسی و نقاط IPP مورد استفاده مرکز محاسبه CODE

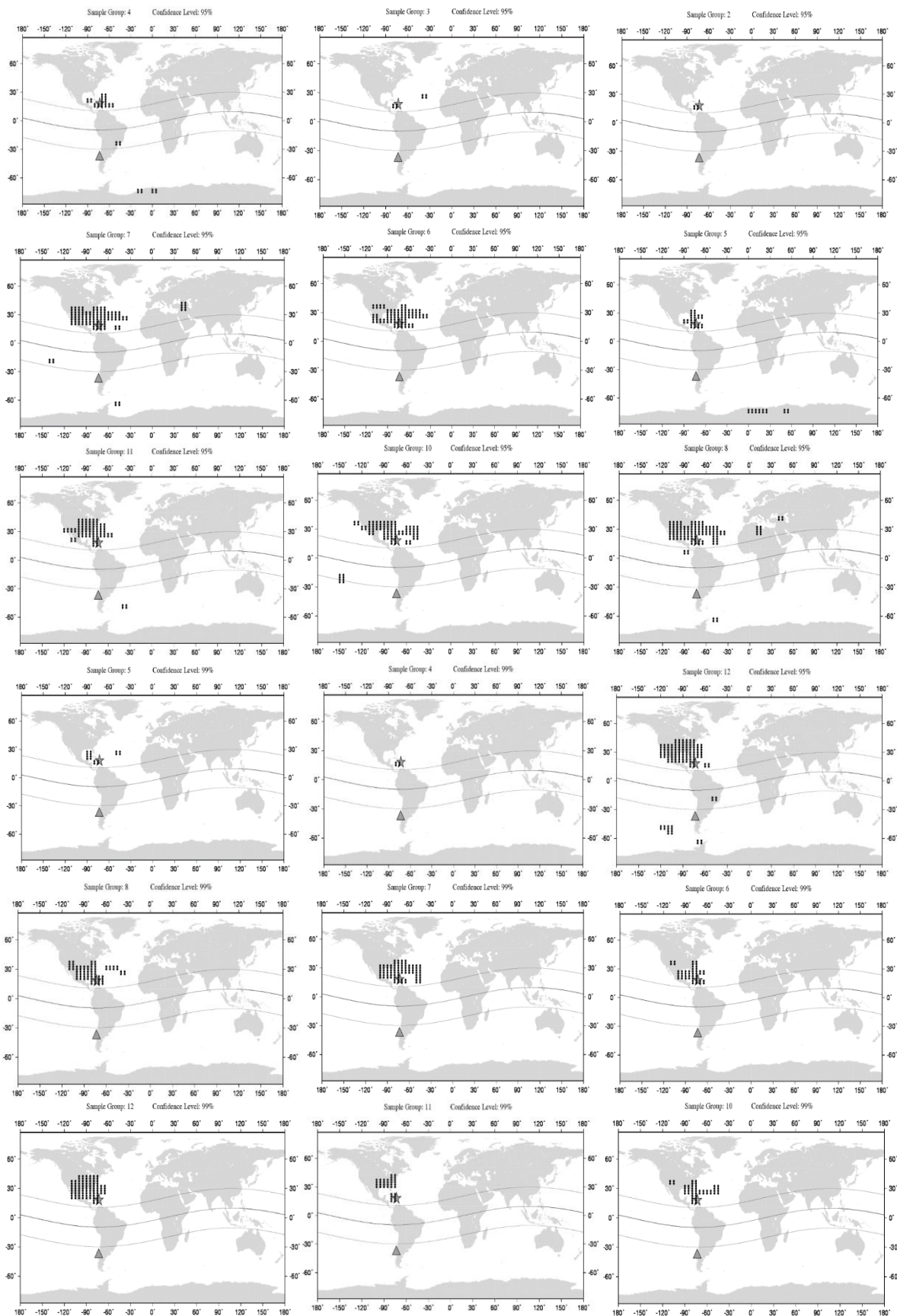
جدول ۱- زمین‌لرزه‌های مورد مطالعه و مشخصاتشان

زمین‌لرزه	تاریخ وقوع	بزرگا (Mw)	عمق (Km)
هایتی	۱۲ ژانویه	۷/۰	۱۳
دریک	۱۷ ژانویه	۶/۳	۵
شیلی	۲۷ فوریه	۸/۸	۲۲/۹
اندونزی	۵ مارچ	۶/۸	۲۶
ترکیه	۸ مارچ	۶/۱	۱۲
هانشو	۱۴ مارچ	۶/۵	۳۲
مکزیک	۴ اپریل	۷/۲	۱۰
بیویویو	۱۴ جولای	۶/۶	۲۲
اکوادور	۱۲ اگوست	۷/۱	۲۰۶/۷
نیوزلند	۳ سپتامبر	۷/۰	۱۲
کرمان	۲۰ دسامبر	۶/۷	۱۲
بونین	۲۱ دسامبر	۷/۴	۱۴

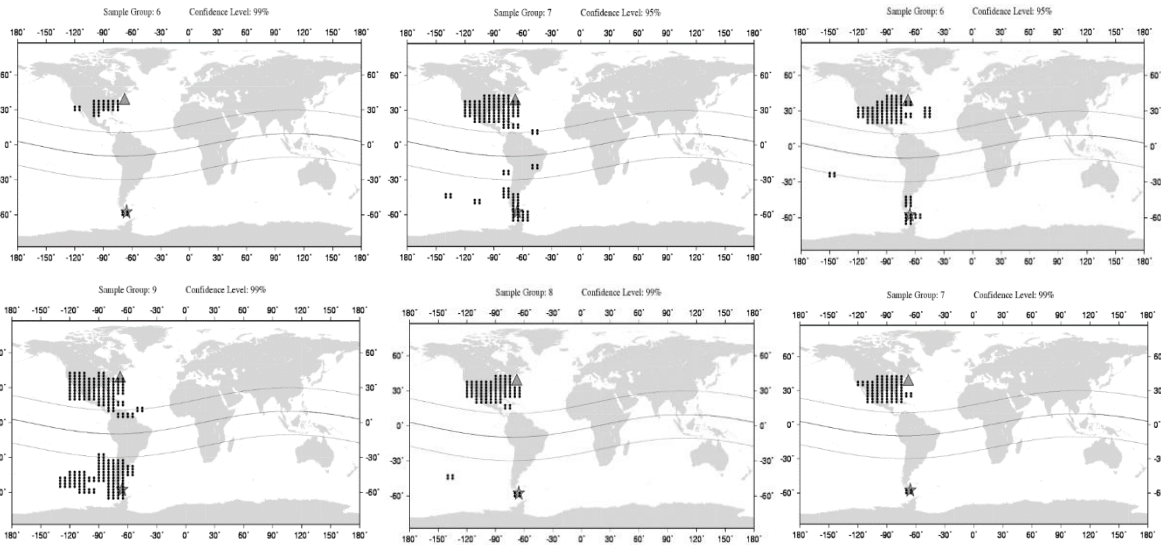
۴ - بحث و بررسی نتایج

به دنبال بررسی زمانی، بررسی مکانی انجام شده است. نتایج مربوط به تمام زمین‌لرزه‌ها و تنها برای گروه‌هایی که آنامولی یونسفری-لرزه‌ای شناسایی شده، در شکل‌های ۲ الی ۹ ارائه شده است. در این شکل‌ها گریدهایی که توزیع زمانی آنامولی آن‌ها مشابه آنامولی گرید معیار است با دایره‌هایی توپر به رنگ مشکی مشخص شده‌اند. به عنوان مثال در گرید معیار برای گروه اول در ساعات ۰ الی ۲ (UT) و ۱۸ الی ۲۲ (UT) آنامولی شناسایی شده، در شکل

^۱ Haiti
^۲ Drake



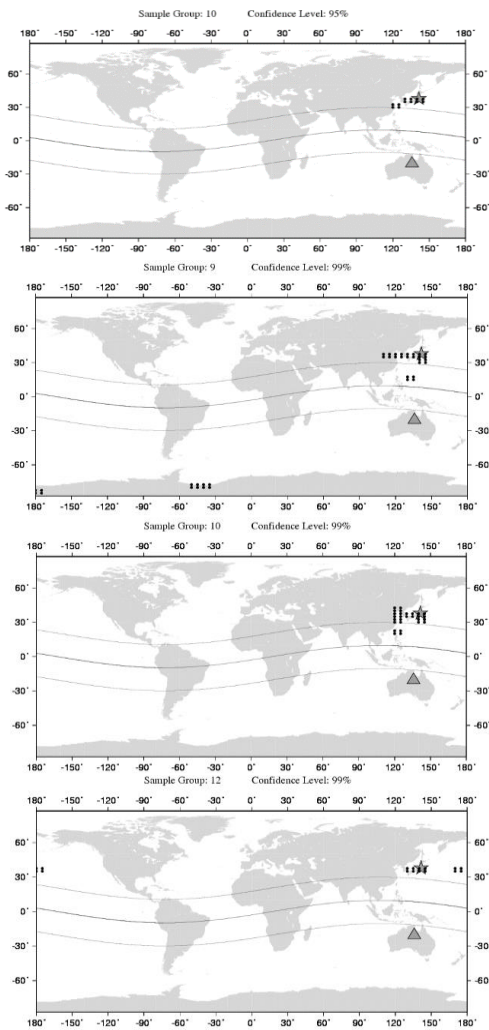
شکل ۲- به ترتیب از بالا سمت راست گروه‌های ۲، ۳، ۴، ۵، ۶، ۷، ۸، ۱۰، ۱۱ و ۱۲ در سطح اطمینان ۹۵٪ و گروه‌های ۴، ۵، ۶، ۷، ۸، ۱۰، ۱۱ و ۱۲ در سطح اطمینان ۹۹٪ برای زمین‌لرزه‌هایی



شکل ۳- به ترتیب از بالا سمت راست نتایج گروه‌های ۶ و ۷ در سطح اطمینان ۹۵٪ و گروه‌های ۶، ۷، ۸ و ۹ در سطح اطمینان ۹۹٪ زلزله در یک

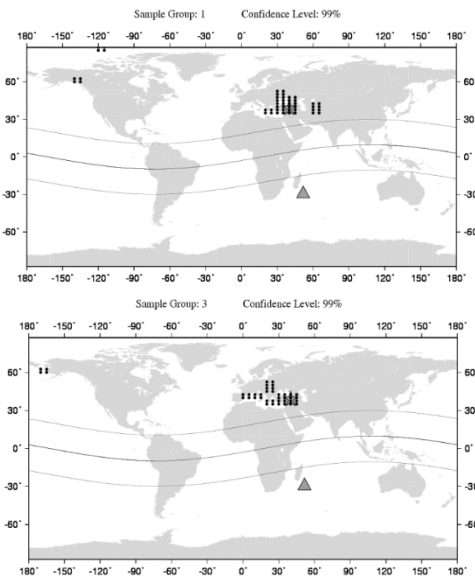
در اطراف مرکز زمین‌لرزه مشاهده شده است. بنابراین ممکن است مربوط به این زمین‌لرزه باشند.

بر اساس نتایج حاصل از بررسی زمین‌لرزه ترکیه، مطابق شکل (۴) عموماً آنامولی گروه‌های اول و سوم در سطح اطمینان ۹۹٪ در اطراف مرکز زمین‌لرزه رخ داده‌اند. این ویژگی بیانگر این موضوع است که پدیده زمین‌لرزه در وقوع این آنامولی‌ها با این توزیع نقشی اساسی دارد.



شکل ۵- از بالا به ترتیب گروه دهم در سطح اطمینان ۹۵٪ و گروه-

های ۹، ۱۰ و ۱۲ در سطح اطمینان ۹۹٪



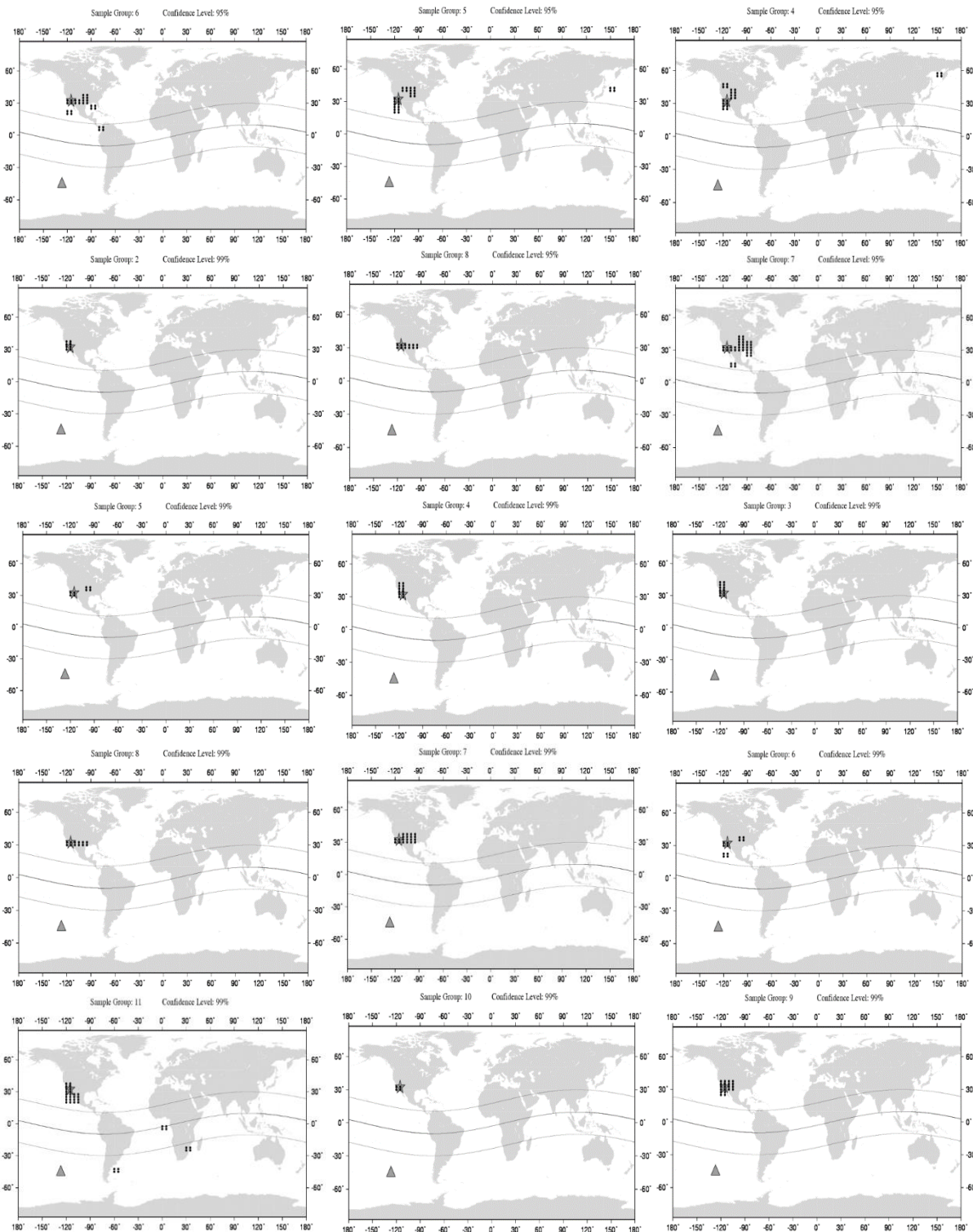
شکل ۴- بالا گروه اول و پایین گروه سوم در سطح اطمینان ۹۹٪

زمین‌لرزه مورد مطالعه بعدی زلزله هانشو^۱ می‌باشد. با بررسی توزیع مکانی آنامولی‌ها و با توجه به شکل (۵)، آنامولی گروه دهم در هر دو سطح اطمینان و گروه‌های نهم و دوازدهم در سطح اطمینان ۹۹٪ به طور چشمگیری

^۱ Honshu

گروه‌های ۴، ۵، ۶، ۷ و ۸ در هر دو سطح اطمینان در اطراف مرکز زمین‌لرزه تمرکز داشته است. بنابراین این آنامولی‌ها می‌توانند مربوط به زمین‌لرزه رخ داده در مکزیک باشند.

هفتمین زمین‌لرزه مورد بررسی زلزله مکزیک است. با بررسی توزیع مکانی آنامولی‌های رخ داده در گرید معیار، چنانچه در شکل (۶) مشاهده می‌شود، آنامولی گروه‌های ۲، ۳، ۹، ۱۰ و ۱۱ در سطح اطمینان ۹۹٪ و آنامولی‌های

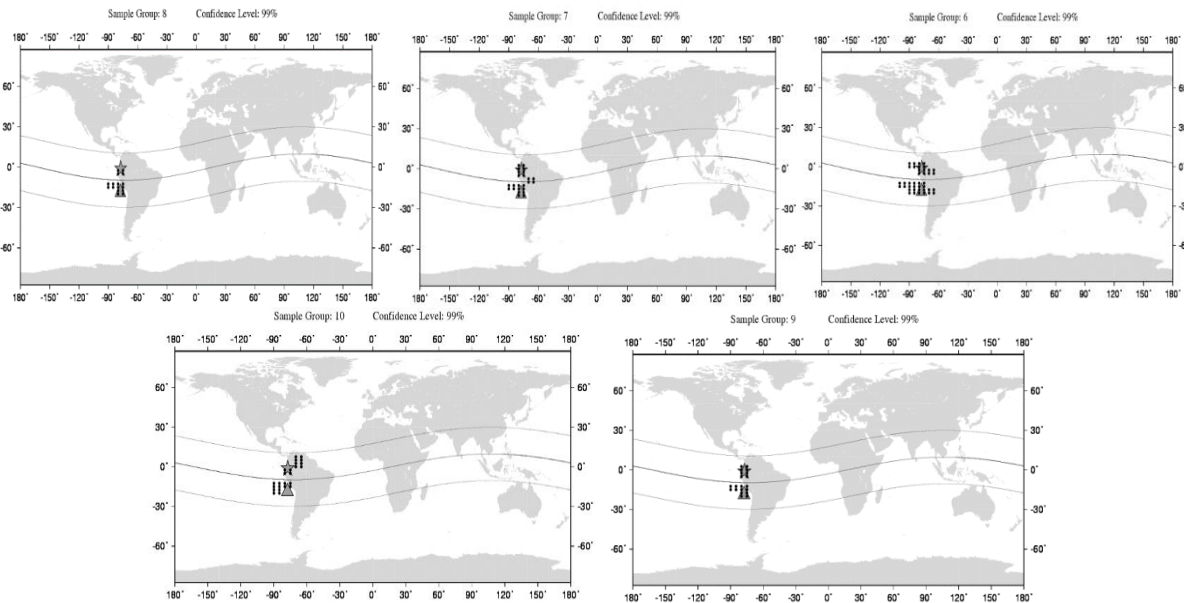


شکل ۶- به ترتیب از بالا سمت راست گروه‌های ۴، ۵، ۶، ۷ و ۸ در سطح اطمینان ۹۵٪ و گروه‌های ۲، ۳، ۴، ۵، ۶، ۷، ۸، ۹، ۱۰ و ۱۱ در سطح اطمینان ۹۹٪

اطمینان ۹۹٪. آنامولی به طور چشمگیری در منطقه‌ای میان مرکز زمین‌لرزه و نقطه مزدوج آن رخ داده است. بنابراین به نظر می‌رسد آنامولی‌های این گروه‌ها مربوط به زمین‌لرزه اکوادور هستند.

و اما با بررسی زمین‌لرزه بیویو نیز هیچ آنامولی یونسفری-لرزه‌ای یافت نشد.

نهمین زمین‌لرزه مورد مطالعه زلزله اکوادور می‌باشد. با توجه به شکل (۷) بررسی توزیع مکانی آنامولی‌ها نشان می‌دهد که در گروه‌های ۶، ۷، ۸، ۹ و ۱۰ در سطح

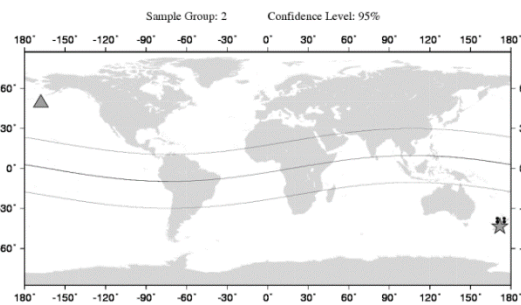


شکل ۷- به ترتیب از بالا سمت راست گروه‌های ۶، ۷، ۸، ۹ و ۱۰ در سطح اطمینان ۹۹٪.

اطمینان می‌تواند مربوط به این زمین‌لرزه باشد. آنامولی این گروه به طور عمده در اطراف مرکز زلزله رخ داده است. البته چند نقطه در اقیانوس آرام مشاهده می‌شود اما با توجه به شکل (۱) پوشش IPP ها در این ناحیه مناسب نبوده و نتایج قابل استناد نمی‌باشد.

آنامولی یونسفری-لرزه‌ای مورد انتظار برای زمین‌لرزه بونین^۲ در شکل (۱۰) ارائه شده است. با بررسی آنامولی‌ها به نظر می‌رسد آنامولی گروه سوم در هر دو سطح اطمینان به طور قابل ملاحظه‌ای در اطراف مرکز زمین‌لرزه رخ داده است. بنابراین می‌توان گفت زلزله بونین در وقوع این آنامولی‌ها شرکت داشته است.

نتایج بررسی‌ها برای زمین‌لرزه نیوزلند^۱ در شکل (۸) ارائه شده است. با توجه به این شکل می‌توان دریافت که آنامولی گروه دوم در سطح اطمینان ۹۵٪ به طور آشکاری تنها در محدوده مرکز زمین‌لرزه وجود دارد. قطعاً پدیده زمین‌لرزه در وقوع یک چنین آنامولی نقشی اساسی داشته است.

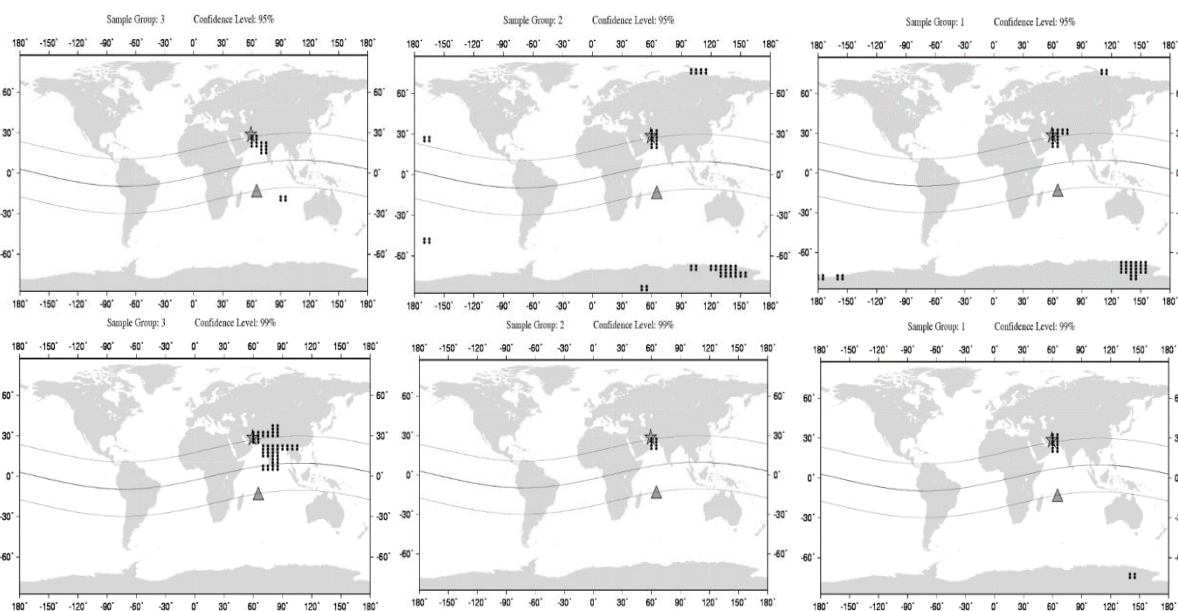


شکل ۸- گروه دوم در سطح اطمینان ۹۵٪.

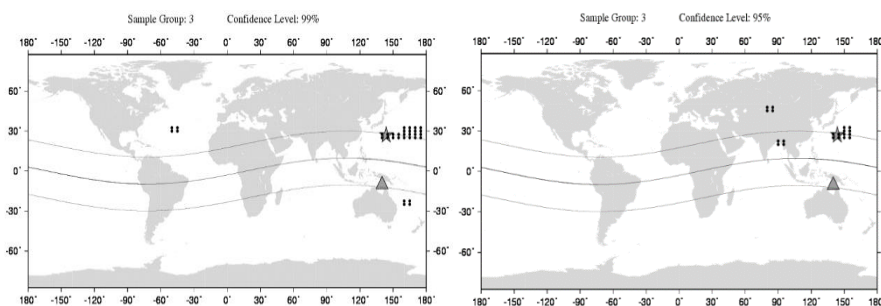
پس از بررسی توزیع مکانی آنامولی‌های رخ داده در اطراف مرکز زلزله کرمان، چنانچه در شکل (۹) مشاهده می‌شود، آنامولی گروه‌های ۱، ۲ و ۳ در هر دو سطح

^۲ Bonine

^۱ New Zealand



شکل ۹- به ترتیب از بالا سمت راست گروه‌های ۱، ۲ و ۳ در سطح اطمینان ۹۵٪ و پایین در سطح اطمینان ۹۹٪.



شکل ۱۰- به ترتیب از سمت راست گروه سوم در سطح اطمینان ۹۵٪ و ۹۹٪.

۵- نتیجه‌گیری

زمین‌لرزه‌هایی با شدت بیشتر و عمق کمتر احتمال وقوع آنامولی یونسفری بیشتر است نیازمند بررسی و مطالعه بیشتری می‌باشد.

نکته دیگر اینکه آنامولی‌های یونسفری-لرزه‌ای شناسایی شده به صورت عمده در اطراف مرکز زمین‌لرزه رخ داده است. در حوالی نقطه مزدوج مغناطیسی مرکز زلزله تنها برای زمین‌لرزه‌های دریک و اکوادور آنامولی مشاهده شده است. بنابراین می‌توان گفت احتمال وقوع آنامولی در منطقه‌ی مزدوج مغناطیسی به نسبت کمتر از منطقه نزدیک مرکز زمین‌لرزه می‌باشد.

در ۵ مورد از زمین‌لرزه‌های شناسایی شده (هایتی، دریک، هانشو، مکزیک و اکودور) آنامولی یونسفری-لرزه‌ای از گروه هشتم به بعد قابل تشخیص بوده است. در واقع می‌توان گفت در بیش از ۵۰٪ موارد ممکن است آنامولی یک هفته پیش از زمین‌لرزه ظاهر شود.

با توجه به نتایج ارائه شده، در ۹ مورد از ۱۲ زمین‌لرزه مورد بررسی، آنامولی یونسفری مربوط به زلزله مشاهده شد. با توجه به این مطلب می‌توان گفت روش پیشنهادی در شناسایی آنامولی یونسفری-لرزه‌ای پیش از زمین‌لرزه‌های بزرگ ($M_w \geq 6$) کارآمد می‌باشد. به جز زمین‌لرزه نیوزلند انجام آزمون در سطح اطمینان ۹۹٪ به نسبت کارآمدتر از سطح اطمینان ۹۵٪ بوده است.

زمین‌لرزه‌های شیلی، اندونزی و بیویو سه زلزله‌ای هستند که آنامولی یونسفری-لرزه‌ای برای آن‌ها شناسایی نشد. بزرگای گشتاوری این زمین‌لرزه‌ها به ترتیب ۸/۸، ۶/۸ و ۶/۶ بوده و عمق آن‌ها به ترتیب ۲۶، ۲۲ و ۲۰/۷ کیلومتر است. این درحالی است که، آنامولی زمین‌لرزه اکوادور با بزرگای گشتاوری ۷/۱ و عمق ۲۰/۶/۷ شناسایی شده است. با توجه به این مطلب می‌توان گفت، ارتباط یونسفر و زمین‌لرزه بسیار پیچیده بوده و این ادعا که برای

- [1] 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, no. 9, pp. 2251-2253, 1965.
- [2] R. S. Leonard and R. Barnes, "Observation of ionospheric disturbances following the Alaska earthquake," *Journal of Geophysical Research*, vol. 70, no. 5, pp. 1250-1253, 1965.
- [3] E. Calais and J. B. Minster, "GPS detection of ionospheric perturbations following," *Geophysical Research Letters*, vol. 22, no. 9, pp. 1045-1048, 1995.
- [4] 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, no. 7, pp. 1383-1386, 2001.
- [5] F. Zhu, Y. Zhou, J. Lin, and F. Su, "A statistical study on the temporal distribution of ionospheric TEC anomalies prior to M7. 0+ earthquakes during 2003–2012," *Astrophysics and Space Science*, vol. 350, no. 2, pp. 449-457, 2014.
- [6] Y.-C. Su, J.-Y. Liu, S.-P. Chen, H.-F. Tsai, and M.-Q. Chen, "Temporal and spatial precursors in ionospheric total electron content of the 16 October 1999 Mw7. 1 Hector Mine earthquake," *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, vol. 118, no. 10, pp. 6511-6517, 2013.
- [7] Y.-Y. Ho, H.-K. Jhuang, Y.-C. Su, and J.-Y. Liu, "Seismo-ionospheric anomalies in total electron content of the GIM and electron density of DEMETER before the 27 February 2010 M8. 8 Chile earthquake," *Advances in Space Research*, vol. 51, no. 12, pp. 2309-2315, 2013.
- [8] J.-Y. Liu 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, no. A4, 2009.
- [9] J. LIU et al., "Electron density perturbation before the 27 February 2010 Chile M8. 8 Earthquake," *Chinese Journal of Geophysics*, vol. 54, no. 6, pp. 737-746, 2011.
- [10] M. Ulukavak and M. Yalcinkaya, "Precursor analysis of ionospheric GPS-TEC variations before the 2010 M 7.2 Baja California earthquake," *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, pp. 1-14, 2016.
- [11] T. Xu et al., "Anomalous enhancement of electric field derived from ionosonde data before the great Wenchuan earthquake," *Advances in Space Research*, vol. 47, no. 6, pp. 1001-1005, 2011.
- [12] B. Zhao et al., "Is an unusual large enhancement of ionospheric electron density linked with the 2008 great Wenchuan earthquake?," *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, vol. 113, no. A11, 2008.
- [13] M. M. Hoseinali and M. Ghodsi, "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)."
- [14] R. E. Schumacker, *Using R with Multivariate Statistics: a Primer*. SAGE, 2016.
- [15] M. Akhoondzadeh, "Support vector machines for TEC seismo-ionospheric anomalies detection," in *Annales Geophysicae*, 2013, vol. 31, no. 2, pp. 173-186: Copernicus GmbH.
- [16] S. Alcay, "ANALYSIS OF IONOSPHERIC TEC VARIATIONS RESPONSE TO THE Mw 7.2 VAN EARTHQUAKE," *ACTA GEODYNAMICA ET GEOMATERIALIA*, vol. 13, no. 3, pp. 257-262, 2016.
- [17] W. Li, J. Guo, J. Yue, Y. Shen, and Y. Yang, "Total electron content anomalies associated with global VEI4+ volcanic eruptions during 2002–2015," *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, vol. 32, pp. 98-109, 2016.
- [18] J.-Y. Liu, Y. Chen, Y. Chuo, and C.-S. Chen, "A statistical investigation of preearthquake ionospheric anomaly," *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, vol. 111, no. A5, 2006.
- [19] J. Liu, Y. Chen, S. Pulinets, Y. Tsai, and Y. Chuo, "Seismo-ionospheric signatures prior to M≥ 6.0 Taiwan earthquakes," *Geophysical research letters*, vol. 27, no. 19, pp. 3113-3116, 2000.
- [20] P. Nenovski, M. Pezzopane, L. Ciraolo, M. Vellante, U. Villante, and M. De Lauretis, "Local changes in the total electron content immediately before the 2009 Abruzzo earthquake," *Advances in Space Research*, vol. 55, no. 1, pp. 243-258, 2015.
- [21] C. Oikonomou, H. Haralambous, and B. Muslim, "Investigation of ionospheric TEC precursors related to the M7. 1 Nepal and M8. 3 Chile earthquakes in 2015 based on spectral and statistical analysis," *Natural Hazards*, pp. 1-20.
- [22] Y. Yao, P. Chen, H. Wu, S. Zhang, and W. Peng, "Analysis of ionospheric anomalies before the 2011 M w 9.0 Japan earthquake," *Chinese Science Bulletin*, vol. 57, no. 5, pp. 500-510, 2012.

- [23] Z. Yiyan, W. Yun, Q. Xuejun, and Z. Xunxie, "Ionospheric anomalies detected by ground-based GPS before the Mw7. 9 Wenchuan earthquake of May 12, 2008, China," *Journal of atmospheric and solar-terrestrial physics*, vol. 71, no. 8, pp. 959-966, 2009.
- [24] F. Zhu, Y. Wu, Y. Zhou, and Y. Gao, "Temporal and spatial distribution of GPS-TEC anomalies prior to the strong earthquakes," *Astrophysics and Space Science*, vol. 345, no. 2, pp. 239-246, 2013.
- [25] S .Pulinets and K. Boyarchuk, *Ionospheric precursors of earthquakes*. Springer Science & Business Media, 2004.
- [26] J. Y. Liu et al., "Pre-earthquake ionospheric anomalies registered by continuous GPS TEC measurements," in *Annales Geophysicae*, 2004, vol. 22 ,no. 5, pp. 1585-1593.
- [27] H. Hotelling, "The generalization of Student's ratio," in *Breakthroughs in Statistics*: Springer, 1992, pp. 54-65.
- [28] M. S. Srivastava and E. M. Carter, *An introduction to applied multivariate statistics*. North-holland, 1983.
- [29] Y. Su and J. Liu, "Reply to comment by F. Masci and JN Thomas on "Temporal and spatial precursors in ionospheric total electron content of the 16 October 1999 Mw7. 1 Hector Mine earthquake", " *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, vol. 119 ,no. 8, pp. 6998-7004, 2014.
- [30] I. Dobrovolsky, S. Zubkov, and V. Miachkin, "Estimation of the size of earthquake preparation zones," *Pure and Applied Geophysics*, vol. 117, no. 5, pp. 1025-1044, 1979.
- [31] Y. Yao, P. Chen, S. Zhang, J. Chen, F. Yan, and W. Peng, "Analysis of pre-earthquake ionospheric anomalies before the global M= 7.0+ earthquakes in 2010," *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 12, no. 3, p. 575, 2012.
- [32] H. Le, J.-Y. Liu, and L. Liu, "A statistical analysis of ionospheric anomalies before 736 M6. 0+ earthquakes during 2002–2010," *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, vol. 116, no. A2, 2011.
- [33] 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, no. A9, 2010.