

# آنالیز تبدیل موجک تغییرات محتوی الکترونی یونسفر قبل از زمین لرزه‌های بزرگ

امید معماریان سرخابی<sup>۱\*</sup>، یحیی جمور<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> کارشناس ارشد ژئودزی - دانشگاه آزاد اسلامی - واحد اهر - آذربایجان شرقی  
omidmaryan@gmail.com

<sup>۲</sup> دانشیار آموزشکده نقشه‌برداری - سازمان نقشه برداری کشور  
djamour@ncc.org.ir

(تاریخ دریافت تیر ۱۳۹۳، تاریخ تصویب اسفند ۱۳۹۳)

## چکیده

زمین لرزه یکی از تلخ‌ترین و مخرب‌ترین حوادثی است که زندگی بشر را به خطر انداخته است. بدین جهت این حادثه طبیعی، ذهن محققین و دانشمندان را به خود مشغول ساخته است تا بتوانند نشانه‌هایی قبل از وقوع زمین لرزه پیدا و سعی در پیش بینی آن نمایند. بر اساس پژوهش‌های انجام گرفته یکی از پیش نشانگرهای زمین لرزه، تغییرات غیرعادی محتوی الکترونی قبل از وقوع زمین لرزه‌های بزرگ (بزرگتر از ۶ ریشتر) است. در این پژوهش، تغییرات TEC در زمین لرزه‌های ۲۱ مرداد ۱۳۹۱ با بزرگای ۶٫۵ و ۶٫۳ اهر-ورزقان و زمین لرزه‌ی ۲۷ فروردین ۱۳۹۲ سراوان با بزرگای ۷٫۵، در دوره‌های ۳۶ روزه و ۳۲ روزه تعیین و بررسی شده است. بدین منظور یونسفر به صورت مدل تک لایه با استفاده از داده‌های GPS ایستگاه‌های ژئودینامیک شمال غرب و جنوب شرق کشور به صورت محلی مدلسازی شد. در این پژوهش برای آشکار سازی رابطه‌ی بین آنومالی تغییرات محتوی الکترونی و زمین لرزه‌های بزرگ آنالیز تبدیل موجک پیشنهاد شده است. همچنین از موجک متقاطع در بازه‌ی مشاهداتی یکسان برای آشکار سازی ارتباط بین آنومالی تغییرات محتوی الکترونی و فعالیت‌های خورشیدی استفاده شد. نتایج حاصل نشان می‌دهد آنالیز تبدیل موجک تغییرات غیر عادی محتوی الکترونی را در محدوده‌ی روزهای زمین لرزه به خوبی مشخص کرده و ابزار ریاضی مناسبی برای آشکار سازی ارتباط یاد شده است. همچنین فعالیت‌های بالای خورشیدی، طوفان‌های مغناطیسی و موجود نبودن مدار نهایی ماهواره در همان لحظه، از جمله محدودیت‌هایی هستند که در این روش باید در نظر گرفته شوند. برای مطالعه‌ی بیشتر با نصب ایستگاه‌های GPS در محدوده گسل‌های فعال و استفاده از داده‌های یونوسند و داده‌های ماهواره‌ی DEMETER می‌توان سری زمانی این تغییرات را با دقت بهتری ثبت و وابستگی آن‌ها را مشاهده و بررسی کرد.

**واژگان کلیدی:** موجک، محتوی الکترونی، GPS، زمین لرزه

\* نویسنده رابط

## ۱- مقدمه

مشهدی حسینی و قدسی در سال ۹۳ با بررسی دو زمین لرزه در جهان و با استفاده از مدلسازی محلی، جهانی یونسفر و میانگین گیری مقدار TEC محل زمین لرزه تغییرات غیر عادی در دو زمین لرزه را نشان دادند. از نتایج این تحقیق تاکید بر استفاده از مدل سازی محلی برای بررسی این تغییرات غیر عادی است که این مدل‌ها جزئیات بیشتری از خصوصیات محلی را ارائه می‌دهند [۹]. در این پژوهش تغییرات محتوی الکترونی با استفاده از داده‌های ایستگاه‌های دائم GPS واقع در منطقه‌ی آذربایجان و منطقه‌ی سیستان و بلوچستان در دوره‌های ۳۶ روزه و ۳۲ روزه زمین‌لرزه‌های هر-ورزقان و زمین‌لرزه-ی سراوان تعیین و با ابزار تبدیل موجک بررسی شده است.

## ۲- علل تغییر محتوی الکترونی

مهم‌ترین خصوصیت فیزیکی یونسفر، وجود الکترون‌های آزاد در آن است. TEC تعداد الکترون‌های موجود در واحد سطح در مسیر سیگنال از ماهواره تا گیرنده است و با واحد TECU بیان می‌شود. هر TECU،  $10^{16}$  الکترون بر متر مربع می‌باشد. میزان یا نرخ تولید یون‌ها بستگی به زاویه‌ی زینتی خورشید و شدت تابش یونیزاسیون دارد. به دلیل تغییرات زمانی، تعداد الکترون‌ها بر واحد حجم در یک نقطه‌ی معین در یونسفر وابسته به زمان است. همچنین تغییرات زمانی موقعیت هندسی زمین-خورشید مربوط به دوران روزانه‌ی زمین و تغییرات سالیانه است که با توجه به پارامترهای یونوسوند در منطقه‌ی اتمسفری با طول، عرض، ارتفاع، زمان جهانی فصل‌ها، چرخه خورشیدی و فعالیت‌های ژئومغناطیسی تغییر می‌کند. تهیه‌ی مشاهدات TEC به وسیله‌ی روش‌های مشاهداتی مختلف انجام می‌شود که رایج‌ترین این روش‌ها، یونوسوند، رادارهای جدا از هم، و داده‌های گیرنده‌های GPS دوفرکانسه می‌باشد. در اکثر روش‌های مدلسازی یونسفر که بر پایه اندازه‌گیری داده‌های سامانه‌ی GPS انجام می‌شود، مقدار TEC به عنوان یک مشاهده در داده‌های موجود برای مدلسازی به شمار می‌آید [۱]. در اینجا به صورت خلاصه به بررسی علل فیزیکی تغییر در پارامترهای مختلف اتمسفر قبل از وقوع زمین‌لرزه‌های بزرگ می‌پردازیم. محدوده اطراف رومرکز زمین‌لرزه قبل از زمین‌لرزه

از گذشته تاکنون بلاای طبیعی نظیر سیل، زمین‌لرزه، رانش و ... همواره زندگی بشر را با خطر مواجه ساخته است. بشر همیشه از اینگونه سوانح طبیعی هراس داشته و همیشه سعی بر پیدا کردن راهی برای مقابله با آن، نظیر ایمن‌تر ساختن محیط زندگی خویش و حتی پس از آن در فکر یافتن نشانه‌های وقوع آن‌ها و پیش بینی این گونه حوادث بوده است. زمین‌لرزه یکی از تلخ‌ترین و مخرب‌ترین حوادثی است که زندگی بشر را به خطر انداخته است. از اینرو این حادثه طبیعی، ذهن محققین و دانشمندان را به خود مشغول ساخته است تا اینکه این افراد تلاش کنند و بتوانند نشانه‌هایی قبل از وقوع زمین لرزه پیدا و سعی در پیش بینی آن نمایند.

اولین تحقیق بر پایه اندازه‌گیری‌های یونوسوند در سال ۱۹۶۴ بر روی زمین‌لرزه آلاسکا با بزرگای ۹٫۲ انجام شد، که پیش از زمین‌لرزه تغییراتی در یونسفر را نشان داد [۴]. این تحقیق باعث گسترش این روش و مطالعات بیشتر در زمینه‌ی یونسفر و تغییرات آن پیش از زمین‌لرزه گردید. با توسعه‌ی سامانه‌های تعیین موقعیت و ناوبری جهانی GNSS<sup>۱</sup> و ایجاد سرویس‌های بین‌المللی از قبیل IGS<sup>۲</sup>، حرکت عظیمی جهت مطالعه و بررسی یونسفر به وجود آمد تا حدی که مدلسازی یونسفر به روش‌های محلی و جهانی در زمره فعالیت‌ها و خدمات روزانه سرویس بین‌المللی IGS قرار گرفته است.

برای اولین بار در زمین لرزه‌ی نورسریچ ۱۹۹۴ با بزرگای ۶٫۷، میزان TEC<sup>۳</sup> با استفاده از داده‌های سامانه‌ی GPS<sup>۴</sup> اندازه‌گیری شد و تغییرات قابل ملاحظه‌ای در میزان TEC قبل از وقوع زمین لرزه مشاهده گردی [۲]. پس از آن در سال ۲۰۰۱ لیو و همکارانش متوجه وابستگی بالای فرکانس بحرانی لایه F2 بدست آمده از ایستگاه یونوسوند و TEC بدست آمده از گیرنده‌های GPS شدند. بنابراین پارامتر TEC به یک پارامتر کلیدی و مهم در مطالعه و بررسی پیش نشانگرهای زمین‌لرزه تبدیل شد [۵].

۱ Global Navigation Satellite Systems

۲ International GNSS Service

۳ Total Electron Content

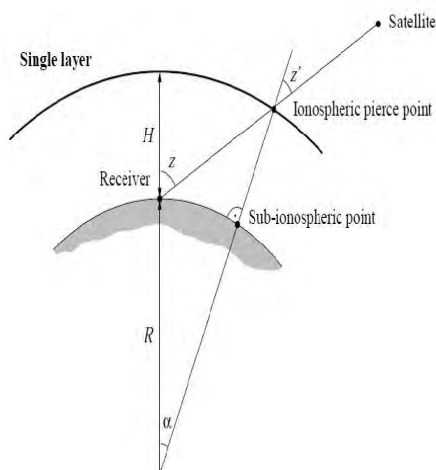
۴ Global Position System

است که تمام الکترون‌های آزاد را در یک لایه نازک به فاصله‌ی حدود ۴۵۰ کیلومتری سطح زمین در نظر می‌گیرد. این مدل به مدل تک لایه SLM<sup>۱</sup> شناخته می‌شود. تابع نگاشت این مدل (FI) به صورت رابطه‌ی ۱ و ۲ نوشته می‌شود:

$$F_1(Z) = \frac{E}{E_V} = \frac{1}{\cos Z'} \quad (1)$$

$$\sin Z' = \frac{R}{R+H} \sin Z \quad (2)$$

که در آن  $Z'$  و  $Z$  به ترتیب فاصله‌ی زینتی در ارتفاع ایستگاه و تک لایه،  $R$  شعاع متوسط زمین و  $H$  ارتفاع تک لایه بالای سطح زمین است. همانگونه که در شکل ۲ مشخص است، زاویه‌ی ژئوسنتریک  $\alpha$  برابر با  $Z' - Z$  می‌باشد.

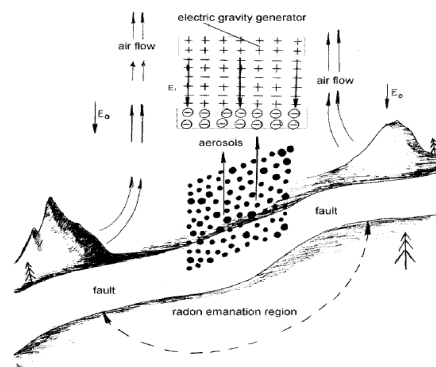


شکل ۲- هندسه‌ی مدل تک لایه یونسفر [۷]

انتظار می‌رود که بیشترین محتوی الکترونی در ارتفاع این لایه‌ی ایده‌آل وجود داشته باشد. علاوه بر آن محتوی الکترونی  $E$  در این سطح تابعی از عرض جغرافیایی یا عرض ژئومغناطیسی  $\beta$  و طول ثابت خورشیدی  $S$  می‌باشد. برای تهیه‌ی نقشه‌ی TEC، ترکیبات خطی مستقل از هندسه<sup>۲</sup> موسوم به L4 که شامل اطلاعات یونسفری است، استفاده می‌شود. معادلات مشاهدات غیر تفاضلی فاز و کد به صورت روابط ۳ و بسط سری تیلور به صورت رابطه ۴ نوشته می‌شوند:

دستخوش تغییراتی می‌گردد که شعاع این منطقه با بزرگای زمین‌لرزه ارتباط دارد. در این محدوده علاوه بر جابجایی‌های مکانیکی، فعالیت‌های شیمیایی نظیر افزایش سطح رادون، گازهای گلخانه‌ای و تخلیه‌ی این گازها اتفاق می‌افتد (شکل ۱).

با توجه به تحقیقات انجام گرفته در زمینه‌ی اندازه‌گیری سطح رادون صفحات زمین‌ساخت فعال در غرب کشور ترکیه که با آشکار ساز LR-115 هسته‌ای انجام گرفته است، می‌توان گفت قبل از وقوع زمین لرزه‌های بزرگ افزایش سطح گاز رادون در محدوده‌ی خط گسل‌ها مشهود می‌باشد. با توجه به این تحقیق که در راستای خط گسل TUZLA انجام شده است، رابطه‌ی خطی بین فعالیت‌های لرزه‌ای و گاز رادون مشاهده می‌شود [۶].



شکل ۱- توجیه افزایش سطح رادون در روزهای قبل از زمین لرزه [۸]

همچنین به سبب ذخیره شدن انرژی در محل زمین‌لرزه و اوج انرژی ذخیره شده در ساعات و روزهای قبل از زمین لرزه، این انرژی باعث ایجاد میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی در منطقه‌ی زمین‌لرزه شده و باعث تغییر محتوی الکترونی یونسفر می‌گردد.

### ۳- مدل سازی یونسفر به روش محلی

مدلسازی یونسفر در برگیرنده مراحل مختلفی مانند جمع‌آوری اندازه‌گیری‌هایی درباره یونسفر، پردازش داده‌ها، آنالیز و در نهایت اعتبارسنجی و تأیید نتایج است. مدل‌های متفاوتی برای مدلسازی یونسفر وجود دارد، ولی مدلی که در این پژوهش برای مدلسازی یونسفر در منطقه‌ی آذربایجان و منطقه‌ی سیستان و بلوچستان به کار گرفته شده، مدل محلی است. ساز و کار این مدل به این گونه

۱ Single Layer Model  
۲ Geometry Free

#### ۴- روش آنالیز موجک یکپارچه

در این بخش، اولین ترکیب‌های آنالیز تبدیل موجک<sup>۱</sup> و آنالیز تبدیل موجک متقاطع<sup>۲</sup> برای پردازش داده‌های TEC ارائه داده می‌شود. با توجه به اینکه سیگنال‌های یونسفر دارای اختلال است، نیاز به استخراج و پردازش مولفه‌های لحظه‌ای سیگنال نایستا در فضای زمان-فرکانس است. از مزایای برجسته این دو روش آشکار سازی سیگنال‌های لحظه‌ای است که در اینجا از AWT برای تشخیص اختلالات TEC و از XWT (موجک متقاطع) برای تشخیص همبستگی مابین اختلالات TEC با زمین لرزه‌های بزرگ استفاده شده است [۳].

#### ۴-۱- تشخیص اختلالات یونسفر با AWT

از کاربردهای موجک، این است که تبدیل موجک پیوسته می‌تواند در دو دسته تعمیم یابد: موجک تحلیلی و موجک واقعی. یکی از ویژگی‌های قابل توجه آنالیز موجک تحلیلی مختلط توانایی وافر آن‌ها در پردازش سیگنال‌های لحظه‌ای است. با استفاده از AWT در طول بازه مشاهداتی، می‌توانیم ارزیابی همزمان از تغییرات فرکانس و زمانی آنومالی محلی TEC یونسفر را انجام دهیم. تبدیل موجک سیگنال اختلالات یونسفر  $f(t)$ ، به صورت رابطه‌ی ۵ بیان می‌شود.

$$W(u, s) = \frac{1}{\sqrt{s}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi \left( \frac{t-u}{s} \right) dt \quad (5)$$

$$= W_R(u, s) + i W_I(u, s)$$

که در اینجا  $s$  و  $u$  به ترتیب پارامتر اتساع و انتقال است.  $W_I$  و  $W_R$  را می‌توان به صورت رابطه‌ی ۶ نوشت.

$$\begin{cases} W_R(u, s) = \frac{1}{\sqrt{s}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi_R \left( \frac{t-u}{s} \right) dt \\ W_I(u, s) = -\frac{1}{\sqrt{s}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi_I \left( \frac{t-u}{s} \right) dt \end{cases} \quad (6)$$

پارامتر لحظه‌ای مطابق با مقیاس‌های مختلف از  $s$  مقادیر واقعی سیگنال  $f(t)$  را به صورت رابطه‌ی ۷ ارائه می‌دهد.

$$L4 = -a \left( \frac{1}{f_1^2} - \frac{1}{f_2^2} \right) F_I(Z) E(\beta, s) + B_4 \quad (3)$$

$$P4 = +a \left( \frac{1}{f_1^2} - \frac{1}{f_2^2} \right) F_I(Z) E(\beta, s) + b_4$$

$$E_V(\beta, s) = \sum_{n=0}^{m_{\max}} \sum_{m=0}^{m_{\max}} E_{nm} (\beta - \beta_0)^n (s - s_0)^m \quad (4)$$

که در آن:  $L4$  و  $P4$  مشاهدات فاز و کد عاری از هندسه هستند.  $a = 40.3 \times 10^{17} \text{ ms}^{-2} \text{ TECU}^{-1}$  ثابت است.  $F1$  و  $F2$  فرکانس‌های مربوط به فازهای موج حامل  $L1$  و  $L2$  می‌باشند.  $F_I(z)$  تابع نگاشت ارزیابی شده در فاصله‌ی زینتی  $Z'$  می‌باشد.  $E_V(\beta, s)$  TEC در راستای قائم است که تابعی از  $s$  و  $\beta$  می‌باشند.  $s_0$  و  $\beta_0$  طول و عرض جغرافیایی مرجع می‌باشد.  $B_4 = \lambda_1 \beta_1 - \lambda_2 \beta_2$  یک بایاس ثابت (بر حسب متر) است که  $\beta_1$  ناشی از ابهام فاز درونی و  $\beta_2$  مربوط به طول موج‌های  $\lambda_1$  و  $\lambda_2$  است. همچنین  $E_{mn}$  پارامتر مجهول در رابطه‌ی ۵ است [۷].

#### ۳-۱- شاخص نجومی Kp

فعالیت‌های ژئومغناطیسی در حوزه تحقیقات یونسفری، با شاخص نجومی Kp سنجیده می‌شود که بیانگر تابش ذرات خورشیدی است. شاخص نجومی Kp با استفاده از میانگین‌گیری مشاهدات شدت میدان افقی  $H$  از شبکه‌ای با ۱۲ ایستگاه گسترده در سطح جهان بین عرض ژئومغناطیسی  $48^\circ$  تا  $63^\circ$  بدست می‌آید. این ضرایب در فواصل زمانی ۳ ساعته محاسبه می‌شوند که نوعی اندازه‌گیری جهانی انحراف مغناطیسی از تغییرات منظم روزانه در دوره تناوب یک ساعته است. نمودار Kp نمایشگر سطح فعالیت‌های خورشیدی می‌باشد که با استفاده از آن می‌توان روزهای مربوط به طوفان‌های مغناطیسی و خورشیدی را تشخیص داده و آن‌ها را از مشاهدات حذف نمود. این ضرایب به صورت یک کد عددی نیم لگاریتمی تهیه می‌شوند که بین صفر تا ۹ تغییر می‌کنند و مربوط به سطوح فعالیت‌های ژئومغناطیسی مختلف هستند.

<sup>1</sup> Analytic Wavelet Transform (AWT)

<sup>2</sup> Cross-Wavelet Transform (XWT)

انتخاب موجک در این مطالعه برای استخراج و آشکارسازی آنومالی‌های TEC یونسفر، استفاده می‌شود. بنابراین عوامل زیر را در انتخاب موجک مناسب در نظر گرفته شده است:

۱. گشتاور صفر: این عامل تاثیر مهمی در موجک برای استخراج ویژگی‌های آنومالی دارد. در تئوری، با بزرگ شدن گشتاور صفر، توانایی تبدیل موجک در آشکارسازی جزئیات فرکانس‌های بالای سیگنال قوی تر می‌شود. اگرچه مشاهده‌ی درجات بالاتر با مشتق تحمیلی به اوج‌های تیز در مدت زمان بیشتر، بر دقت محلی اختلالات یونسفری تاثیر می‌گذارد. بنابراین موجک‌های با عددهای گشتاور صفر بالاتر منجر به از بین رفتن نتایج می‌شود، پس باید مقدار مناسبی برای نمایش خوب نتایج انتخاب شود. همچنین گشتاورهای صفر زوج از گشتاورهای صفر فرد در آشکارسازی اختلالات یونسفر بهتر عمل می‌کنند.

۲. اندازه‌ی پایه: ویژگی‌های پایه‌ی تابع موجک نرخ تجزیه را نشان می‌دهد. اندازه‌ی پایه در محدوده‌های مختلف مطابق با توانایی محلی زمان-فرکانس است. مطابق با اصل عدم قطعیت، کاهش اختیاری محلی زمان و فرکانس، همزمان غیر ممکن است. بنابراین برای دستیابی به صحت مقدار محلی در حوزه‌ی فرکانس از سیگنال‌های لحظه‌ای، اندازه‌ی پایه در حد امکان کوچک انتخاب شود که به آنالیز حوزه‌ی زمان ضرری وارد نکند. از میان موجک‌های با گشتاور صفر برابر، موجک B-spline دارای اندازه‌ی پایه‌ی کوچک است.

۳. مختلط یا واقعی: تابع مختلط موجک اطلاعاتی هم از دامنه و هم از فاز را می‌دهد و دارای انطباق بهتری برای گرفتن رفتار نوسانی دارد. اگرچه تابع موجک واقعی فقط تک مولفه ارائه می‌دهد و می‌تواند برای نوسانات اوجی یا غیر پیوسته استفاده شود.

۴. منظم بودن: این عامل رابطه‌ی نزدیکی با عدد گشتاور صفر دارد. در دسترسی به نمایش مکان-مقیاسی تبدیل موجک به ویژه از لحاظ مقیاس کاربرد دارد. بعد از تعیین عدد گشتاور صفر، منظم بودن دارای اهمیت کمتری نسبت به دیگر عوامل مثل اندازه‌ی پایه برای آشکارسازی اختلالات یونسفری است.

در واقعیت، رعایت تمامی عوامل فوق بسیار مشکل است. برای AWT و XWT، انتخاب موجک پایه در هر دو

$$W_A(u, s) = \sqrt{W_R^2(u, s) + W_I^2(u, s)} \quad (7)$$

که در اینجا  $W_A(u, s)$  دامنه‌ی لحظه‌ای از  $f(t)$  است. ما در اینجا مجذور دامنه را  $|W_A(u, s)|^2$ ، چگالی طیفی انرژی موجک تحلیلی تعریف کردیم، که به ما اجازه‌ی استخراج دامنه‌ی لحظه‌ای (مجذور) مولفه‌های سیگنال لحظه‌ای را می‌دهد. بنابراین ترکیب مناسب، که شامل بخش‌های حقیقی و موهومی ضرایب تبدیل موجک مختلط است، توانایی آشکارسازی آنومالی‌های یونسفری-لرزه‌ای و دیگر اختلالات را دارد.

#### ۲-۴- آشکارسازی اختلالات یونسفر بوسیله‌ی XWT

XWT یکی از روش‌های آنالیز سیگنال است، که از تبدیل موجکی که با فراهم کردن رابطه‌ی متقابل دو سری زمانی در فضای فرکانس-زمان روی مقیاس‌های چند فرکانسه با ترکیب آنالیز طیفی-مقاطع عمل می‌کند. بنابراین XWT می‌تواند برای آنالیز رابطه‌ی تغییرات بین سیگنال‌های یونسفر و شاخص‌های ژئوفیزیکی در اطراف رو مرکز زمین لرزه استفاده شود. ما دو سری زمانی  $X$  و  $Y$  با تبدیل موجک به صورت،  $W^X(u, s)$  و  $W^{Y*}(u, s)$  داریم. تبدیل موجک-مقاطع به صورت رابطه‌ی ۸ تعریف می‌شود.

$$W^{XY}(u, s) = W^X(u, s)W^{Y*}(u, s) \quad (8)$$

که در اینجا  $W^{Y*}(u, s)$  مزدوج مختلط از  $W^Y(u, s)$  است. توان طیفی موجک-مقاطع به صورت  $|W^{XY}(u, s)|$  است. اگر دو سری زمانی دارای همبستگی محلی باشند توان طیفی موجک-مقاطع این همبستگی را با ناحیه‌ی مشترک انرژی بالا مشخص می‌کند. موجک-مقاطع طیفی علاوه بر ویژگی‌های فرکانس مشترک شاخص‌های ژئوفیزیکی و TEC یونسفر، تغییرات زمانی این روابط را نیز آشکار می‌کند.

#### ۳-۴- انتخاب موجک اصلی بهینه

با توجه به ویژگی‌های مختلف مسئله، موجک‌های متفاوت برای کاربردهای مختلف می‌تواند انتخاب شود.

حوزه زمان و فرکانس، ویژگی‌های گشتاور صفر و اندازه‌ی پایه دارای اهمیت ویژه‌ای است. در این پژوهش، مناسب-ترین موجک اصلی، موجک B-spline با فرکانس مختلط انتخاب شده است.

## ۵- بررسی گسل‌های مسبب زمین لرزه

زمین لرزه‌های ورزقان و اهر در ایالت لرزه زمین ساختی البرز- آذربایجان رخ داده است. رشته کوه‌های البرز حاصل برخورد خرد قاره ایران مرکزی در جنوب و بلوک جنوب خزر در شمال است. استان آذربایجان شرقی در شمال غرب ایران به سبب قرار گرفتن در رشته کوه‌های البرز- آذربایجان ناحیه‌ای لرزه خیز به شمار می‌آید. زمین لرزه‌های ۲۱ مرداد ۱۳۹۱ (11 AUG 2012) اهر و ورزقان در ساختارهای البرز- آذربایجان روی داده است که روند شرقی غربی دارند. روند عمومی گسل‌های این منطقه نیز شرقی- غربی است. از گسل‌های مهمی که در این ناحیه وجود دارد، می‌توان به گسل اهر در ۶ کیلومتری و گسل شمال تبریز در ۴۵ کیلومتری جنوب رو مرکز زمین لرزه‌ی اهر و ورزقان اشاره کرد.

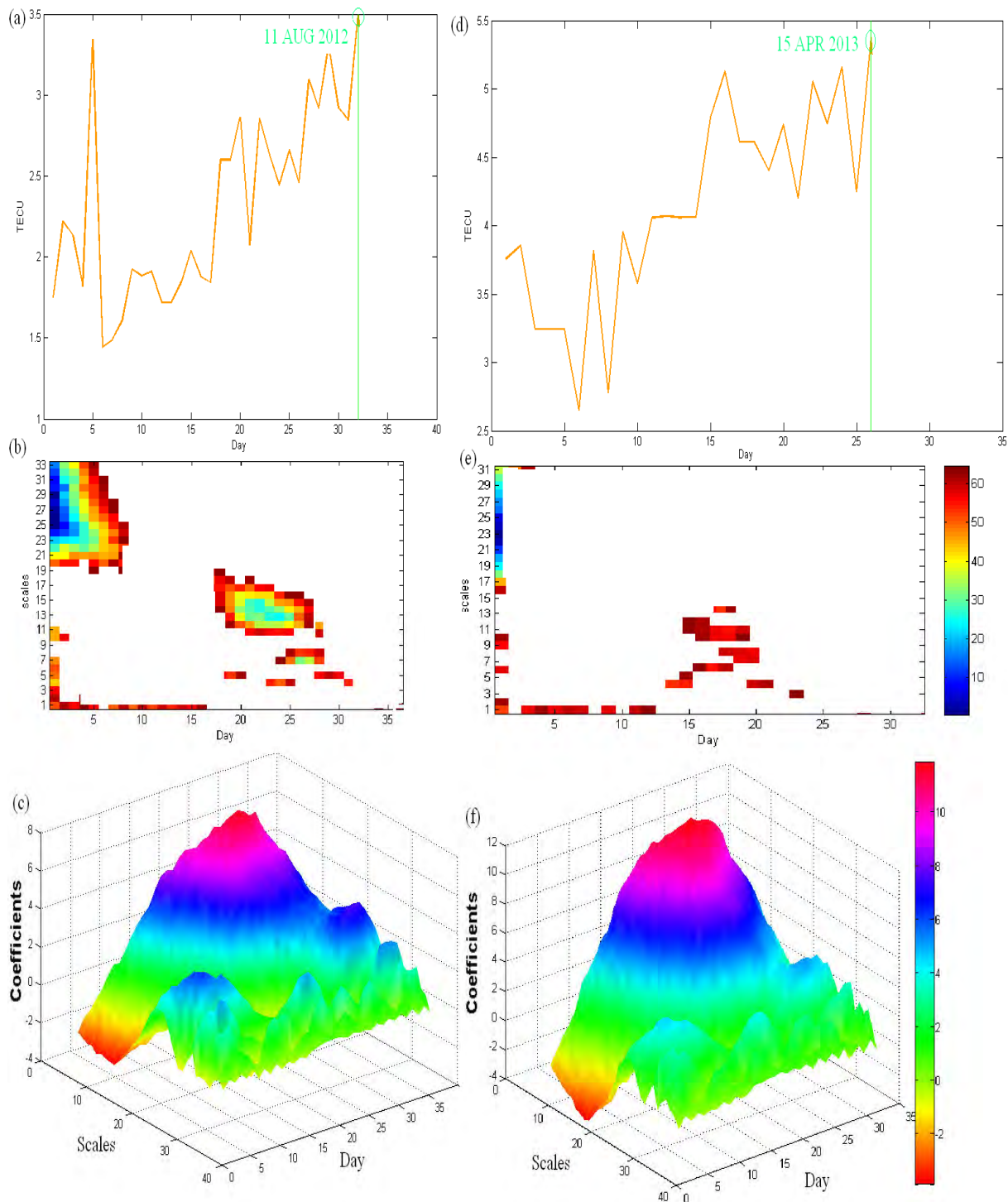
ناحیه مکران به عنوان یک ناحیه فعال لرزه‌ای شناخته می‌شود. بخش‌های باختری و خاوری این ناحیه به ترتیب در کشورهای ایران و پاکستان قرار گرفته است. بررسی سازوکار زمین لرزه‌های رخ داده در این ناحیه می‌تواند نشانگر دو گونه مختلف از رویدادهای معکوس کم عمق (در بخش ساحلی، مکران جنوبی) و رویدادهای کششی عمیق (در بخش شمالی، مکران شمالی) باشد. روز ۲۷ فروردین ماه ۱۳۹۲ (15 APR 2013) زمین لرزه- ای به بزرگای ۷٫۵ در ۶۴ کیلومتری شمال باختری سراوان و ۱۲ کیلومتری شهر گشت استان سیستان و بلوچستان به وقوع پیوست. سازو کار کانونی این زمین لرزه، نرمال می باشد.

## ۶- نتایج

ایستگاه‌های دائم GPS کشور موسوم به شبکه ژئودینامیک سراسری با حدود ۱۱۵ ایستگاه به منظور پایش حرکات پوسته‌ی زمین از سال ۱۳۸۳ توسط سازمان نقشه‌برداری کشور طراحی و پیاده‌سازی شده‌اند. در این پژوهش از ایستگاه‌های GPS منطقه‌ی آذربایجان

و سیستان و بلوچستان استفاده شده است. داده‌های GPS با یک فرآیند استاندارد و استفاده از نرم افزار BERNESE پردازش شده اند. در پردازش داده‌ها از مدارهای نهایی ماهواره‌ها و پارامترهای دورانی زمین IGS استفاده شده است. به منظور مدلسازی یونسفر و تخمین وابستگی ارتفاعی TEC، یونسفر مانند یک لایه‌ی نازک در اطراف زمین با یک ارتفاع ثابت از زمین در نظر گرفته می‌شود و فرض می‌شود که تمام الکترون‌های آزاد موجود در یونسفر در این لایه نازک قرار گرفته اند. زمین لرزه‌ی اهر- ورزقان در تاریخ 11 AUG 2012 با بزرگای ۶٫۵ و ۶٫۳ به ترتیب در عرض جغرافیایی ۳۸٫۳۹° و طول جغرافیایی ۴۶٫۸۵° عرض جغرافیایی ۳۸٫۴۲° و طول جغرافیایی ۴۶٫۸۲° و زمین- لرزه‌ی سراوان در 15 APR 2013 با بزرگای ۷٫۵ در عرض جغرافیایی ۲۷٫۲۸° و طول جغرافیایی ۵۸٫۳۲° اتفاق افتاده‌اند. به منظور بررسی تغییرات TEC در این مناطق از داده‌های GPS با دوره‌های ۳۶ روزه برای زمین لرزه‌های اهر- ورزقان و ۳۲ روزه برای زمین لرزه‌ی سراوان از روش مشاهدات کد، در ترکیب خطی مستقل از هندسه بین ماهواره و گیرنده موسوم به L4 استفاده شده است. پس از پردازش داده‌ها و تعیین مختصات دقیق ایستگاه‌ها و مدلسازی محلی یونسفر انجام شده است.

با استفاده از آنالیز موجک B-spline چگالی طیفی انرژی سری‌های زمانی زمین لرزه‌های اهر- ورزقان و زمین لرزه‌ی سراوان تولید شد که در شکل ۳ دیده می‌شوند.



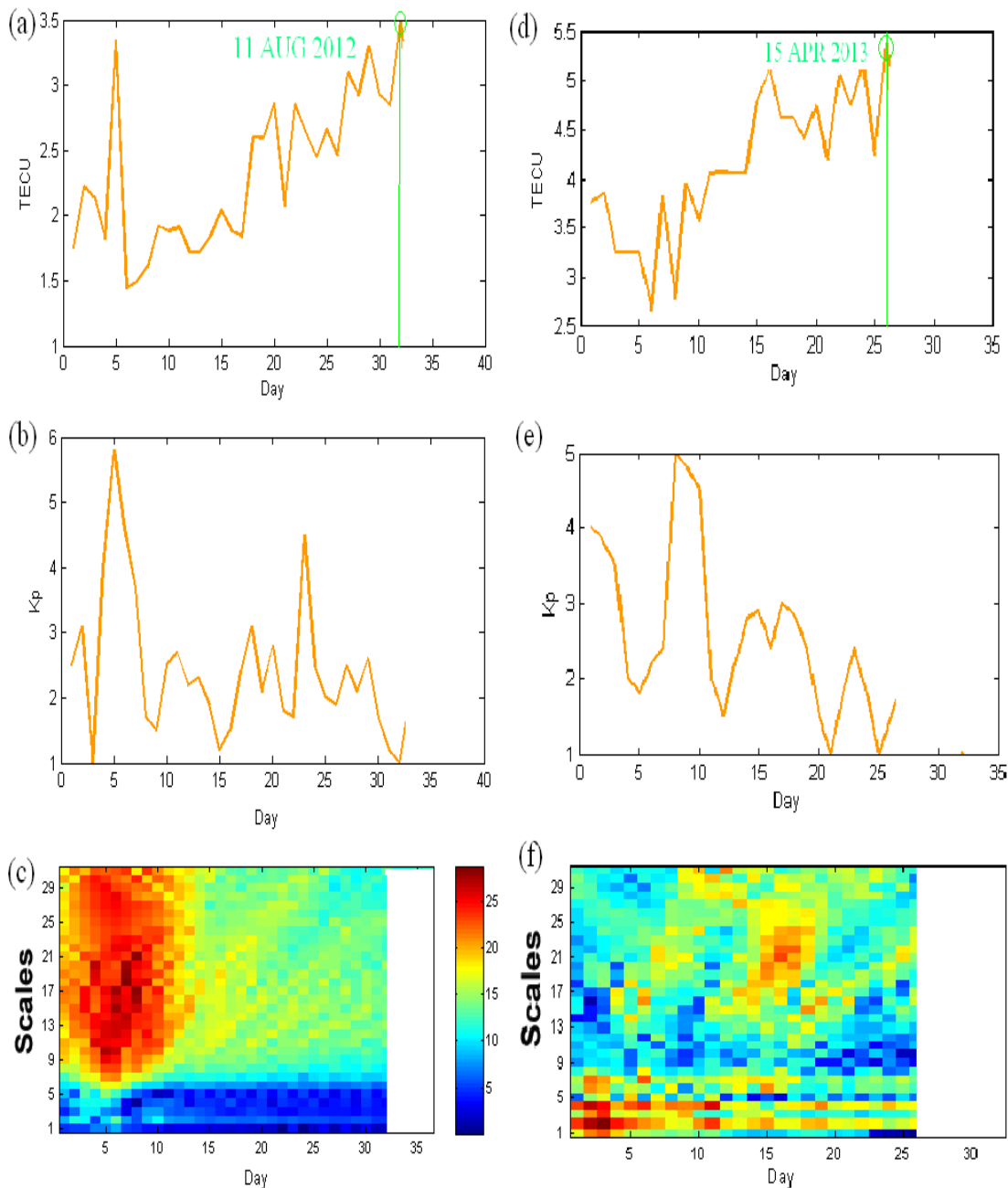
شکل ۳- (a)-تغییرات TEC در طول بازه‌ی ۳۶ روزه در رو مرکز زمین لرزه‌ی اهر-ورزقان (b)-چگالی طیفی انرژی TEC با استفاده از موجک B-spline در رو مرکز زمین لرزه‌ی اهر-ورزقان (c)-چگالی طیفی انرژی موجک TEC با ضرایب به صورت 3D در رو مرکز زمین لرزه‌ی اهر-ورزقان (d)-تغییرات TEC در طول بازه‌ی ۳۲ روزه در رو مرکز زمین لرزه‌ی سراوان (e)-چگالی طیفی انرژی TEC با استفاده از موجک B-spline در رو مرکز زمین لرزه‌ی سراوان (f)-چگالی طیفی انرژی موجک TEC با ضرایب به صورت 3D در رو مرکز زمین لرزه‌ی سراوان

مشاهداتی انرژی بالای طیفی را نشان داد که می‌توان اختلالات TEC را در ۱۰ روز اول وابسته به فعالیت‌های خورشیدی دانست (شکل ۴- (c)) اما در طول بازه‌ی مشاهداتی زمین لرزه‌ی سراوان فعالیت‌های خورشیدی

سپس آنالیز موجک-مقاطع برای تشخیص همبستگی مابین فعالیت‌های خورشیدی و سری زمانی زمین لرزه‌ها انجام شد (شکل ۴). آنالیز موجک-مقاطع در سری زمانی زمین لرزه‌های اهر-ورزقان در ۱۰ روز اول بازه‌ی

است که این مقدار بالا طبق آنالیز XWT وابسته به فعالیتهای خورشیدی نیست (شکل ۴- (c) و (f)).

تأثیری در اختلالات TEC نداشته است (شکل ۴- (f)). چگالی طیفی انرژی 3D زمین لرزه‌های اهر-ورزقان و سراوان در چند روز قبل از زمین لرزه‌ها دارای مقدار بالایی



شکل ۴- (a) تغییرات TEC در طول بازه‌ی ۳۶ روزه در رو مرکز زمین لرزه‌ی اهر-ورزقان (b) تغییرات Kp در طول بازه‌ی ۳۶ روزه (c) طیف موجک-مقاطع TEC و Kp با استفاده از موجک B-spline در رو مرکز زمین لرزه‌ی اهر-ورزقان (d) تغییرات TEC در طول بازه‌ی ۳۲ روزه در رو مرکز زمین لرزه‌ی سراوان (e) تغییرات Kp در طول بازه‌ی ۳۲ روزه (f) طیف موجک-مقاطع TEC و Kp با استفاده از موجک B-spline در رو مرکز زمین لرزه‌ی سراوان

توان اختلالات TEC را در ۱۰ روز اول وابسته به فعالیت‌های خورشیدی دانست اما در طول بازه‌ی مشاهداتی زمین لرزه‌ی سراوان فعالیتهای خورشیدی تأثیری در اختلالات TEC نداشته است. همچنین چگالی طیفی انرژی 3D زمین لرزه‌های اهر-ورزقان و سراوان در چند روز قبل از

## ۷- نتیجه گیری

نتایج حاصل نشان می‌دهد آنالیز موجک-مقاطع در سری زمانی زمین لرزه‌های اهر-ورزقان در ۱۰ روز اول بازه‌ی مشاهداتی انرژی بالای طیفی را نشان داد که می-



بررسی نمود. همچنین با آنالیز طیفی کمترین مربعات با داده‌های بیش از ۱۲ ماه در حوزه‌ی فرکانس می‌توان دوره‌های تغییرات یونسفر (روزانه، ماهانه، فصلی، سالانه) را از مشاهدات حذف و این نوسانات غیر عادی قبل از زمین لرزه‌های بزرگ را با دقت بالاتر بررسی نمود.

### سپاسگزاری

بدین وسیله از سازمان نقشه برداری کشور بابت فراهم کردن داده‌های مورد نیاز تشکر و قدردانی می‌شود.

زمین لرزه‌ها دارای مقدار بالایی است که این مقدار بالا طبق آنالیز XWT وابسته به فعالیت‌های خورشیدی نیست. علت این تغییرات را می‌توان ایجاد میدان الکتریکی و الکترومغناطیسی حاصل از استرس یا استرین قبل از وقوع زمین‌لرزه دانست. همچنین فعالیت‌های بالای خورشیدی، طوفان‌های مغناطیسی و موجود نبودن مدار نهایی ماهواره در همان لحظه، محدودیت‌های موجود می‌باشد. برای مطالعه‌ی بیشتر با نصب ایستگاه‌های GPS در خط گسل‌های فعال و استفاده از داده‌های یونوسوند و داده‌های ماهواره‌ی DEMETER<sup>۱</sup> می‌توان سری زمانی این تغییرات را با دقت بهتر ثبت و وابستگی آن‌ها را مشاهده و

### مراجع

- [1] Abdollah, M., Zain, A.F.M., Jusoh, M.H., Misran, N., Mubarak, W.A. (2006). "Ionospheric total electron content response to the December 26, 2004 North Sumatra earthquake." *American Journal of Applied sciences*. 6. 685-690.
- [2] Bolt, B.A. (1964). "Seismic air waves from the great 1964 Alaskan earthquake." *Nature*. 202. 1095-1096.
- [3] He, L.M., Wu, L.X., De Santis, A., Liu, S.J., Yang, Y. (2014). "Is there a one-to-one correspondence between ionospheric anomalies and large earthquakes along Longmenshan faults?." *Annales Geophysicae*. 32. 187-196.
- [4] Leonard, R.S., Barnes, R.A. (1965). "Observation of ionospheric disturbances following the Alaska earthquake." *J. Geophys.* 70. 1250-1253.
- [5] Liu, J.Y., Chen, Y.I., Pulnits, S.A., Tsai, Y.B., Chuo, Y.J. (2000). "Seismo-ionospheric signatures prior to M ≥ 6.0 Taiwan earthquakes." *Geophys Res Lett*. 27. 3113-3116.
- [6] Sac, M.M., Haramansah, C., Camgoz, B., Sozbulir, H., 2011. "Radon Monitoring as the Earthquake Precursor in Fault Line in Western Turkey." *Ekoloji* 20. 79. 93-98.
- [7] Seeber, G. "Satellite geodesy." (2003). Berlin Walter de Gruyter.
- [8] Liperovsky, V.A., Meister, C.V., Liperovskaya, E.V., Davidov, V. F., Bogdanov, V.V. (2005). "On the possible influence of radon and aerosol injection on the atmosphere and ionosphere before earthquakes." *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 5. 783-789.

[۹] مشهدی حسینعلی، م.، قدسی، م.، ۱۳۹۳، مقایسه‌ی روش‌های مدلسازی محلی و جهانی یونسفر در بررسی پیش‌نشانگرهای زمین‌لرزه در بندر ر مورو (فیلیپین) و جزایر بنین (ژاپن)، فصلنامه بین‌المللی پژوهشی تحلیلی زمین‌پویا، سال دوم، شماره ۱، ۱۳۹۳.