

# تشخیص آنامولی‌های TEC قبل از وقوع زلزله‌های بزرگ با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی

منیره شمشیری<sup>۱\*</sup>، مهدی آخوندزاده هنزائی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد ژئودزی (هیدروگرافی) - دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی - پردیس

دانشکده‌های فنی - دانشگاه تهران

m.shamshiri@ut.ac.ir

<sup>۲</sup> استادیار دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی - پردیس دانشکده‌های فنی - دانشگاه تهران

makhonz@ut.ac.ir

(تاریخ دریافت خرداد ۱۳۹۴، تاریخ تصویب اردیبهشت ۱۳۹۵)

## چکیده

وقوع زلزله علاوه بر تغییر در هندسه و فیزیک پوسته زمین تأثیرات دیگری را نیز به همراه دارد. از آن جمله، تأثیر بر لایه یونسفر می‌باشد که خود را به صورت تغییر در میزان الکترون، چگالی یون‌ها، میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی این لایه نشان می‌دهد. هر پارامتر ژئوفیزیکی و ژئوشیمیایی در لایه‌های لیتوسفر، اتمسفر و یونسفر زمین که قبل از وقوع زلزله تغییراتی در آن پدید آید به‌عنوان پیش‌نشانگر شناخته می‌شود.

با پردازش داده‌های GPS می‌توان به میزان محتوای کل الکترون (Total Electron Content) لایه یونسفر دست‌یافت. در سیستم‌های پیچیده و غیرخطی استفاده از روش‌های کلاسیک مانند میانگین، برای بازشناسی الگو و پیش‌بینی سری‌های زمانی بسیار دشوار است، به همین دلیل در این مقاله سعی گردیده است از روش‌های هوش مصنوعی همچون شبکه عصبی مصنوعی برای تشخیص و بازسازی الگوی تغییرات TEC استفاده گردد. در همین راستا زلزله اهر آذربایجان شرقی (۲۱ مرداد ۱۳۹۱) و زلزله کاکلی بوشهر (۲۰ فروردین ماه ۱۳۹۲) مورد بررسی قرار گرفته است. ابتدا با استفاده از نرم‌افزار Bernese و به روش PPP (Precise Point Positioning) مختصات ایستگاه‌ها محاسبه گردید و سپس با استفاده از مدل جهانی مقادیر TEC به دست آمد. نتایج حاصل، ناهنجاری‌هایی را چند روز قبل و بعد از زلزله نشان می‌دهد که بیانگر آن است که الگوریتم شبکه عصبی مصنوعی به‌خوبی توانسته آنامولی‌های موجود را آشکارسازی نماید. همچنین مقایسه مقادیر TEC به‌دست‌آمده از ایستگاه‌های زمینی با مدل استاندارد جهانی از همبستگی بالایی برخوردار می‌باشند.

**واژگان کلیدی:** زلزله، یونسفر، آنومالی، TEC، شبکه عصبی مصنوعی

\* نویسنده رابط

## ۱- مقدمه

یونسفر بخشی از لایه فوقانی جو است که در ارتفاع ۶۰ تا ۸۰۰ کیلومتری زمین قرار گرفته است. این لایه از الکترون‌ها، اتم‌ها و مولکول‌های یونیزه شده ناشی از تشعشعات خورشیدی تشکیل شده است [۱]. امواج الکترومغناطیس در گذر از این لایه دچار پدیده تفرق می‌گردند و بسته به فرکانسشان تغییر سرعت پیدا می‌کنند. منبع اصلی تفرق "مجموع کل الکترون‌های مسیر" می‌باشد. بیشترین دانسیته الکترون در ارتفاع ۳۵۰ تا ۴۵۰ کیلومتری از سطح زمین قرار دارد [۲].

تغییرات یونسفر تحت تأثیر فصول، موقعیت جغرافیایی، بادهای ترموسفری، سونامی، انفجارهای آتش فشانی و انفجارهای هسته‌ای و طوفان‌های بزرگ است. بیشترین تغییرات در لایه یونسفر در اواسط روز و کمترین مربوط به شب است [۳].

بررسی‌ها نشان داده است که فعالیت‌های خورشیدی و ژئومغناطیسی مانند بادهای خورشیدی و طوفان‌های مغناطیسی باعث ایجاد اغتشاشاتی در این لایه می‌گردد. زمین‌لرزه نیز همچون فعالیت‌های ذکر شده بر لایه یونسفر مؤثر بوده که خود را به صورت تغییر در میزان الکترون‌ها نمایان می‌سازد. البته لازم است تغییرات فعالیت‌های خورشیدی و فعالیت‌های ژئومغناطیسی از مقادیر TEC حذف گردد تا ایجاد خطا ننماید.

ایستگاه‌های یونسوند از ابزارهای زمینی مؤثر در تعیین چگالی الکترون می‌باشند ولی اندازه‌گیری‌های حاصل از آن از نظر زمانی و مکانی دارای محدودیت می‌باشد. TEC حاصل از اندازه‌گیری‌های ماهواره‌های GPS گسترده‌تری قابل توجهی برای درک تغییرات یونسفری ناشی از زمین لرزه دارد [۴].

در این مقاله با بررسی اثر زلزله بر لایه یونسفر مشخص گردید که در بازه زمانی کوتاهی (در حدود یک تا پنج روز) قبل از وقوع زلزله‌های قدرتمند، ناهنجاری‌های قابل ملاحظه‌ای در میزان الکترون‌ها مشاهده می‌گردد. در این مقاله سعی بر آن است که با روشی بهینه و بروز مانند شبکه عصبی مصنوعی که قابلیت بالایی در بازشناسی الگو و پیش‌بینی سری‌های زمانی دارد، الگوی رفتاری تغییرات TEC قبل از وقوع زلزله مورد بررسی قرار گیرد [۵ و ۶].

## ۱-۱- داده‌های TEC

TEC تعداد الکترون‌های موجود در لایه یونسفر در مسیر گیرنده و ماهواره می‌باشد. شبکه گسترده ایستگاه‌های GPS و سیگنال ارسالی آن به ایستگاه‌های زمینی شامل بسیاری از اثرات مانند تأخیر یونسفری، تأخیر تروپوسفری و خطاهای تصادفی و سخت‌افزاری می‌باشد [۷ و ۸]. یونسفر برخلاف تروپوسفر یک محیط پراکنده‌کننده است و اثر آن با اندازه‌گیری‌های مدولاسیون فاز موج حامل که توسط گیرنده‌های دوفراکانسه انجام می‌گیرد، قابل محاسبه می‌باشد [۹].

در این مطالعه داده‌های TEC از پردازش داده‌های GPS با نرم‌افزار Bernese برای ایستگاه‌های مورد نظر به دست آمد. در پردازش مورد نظر مقادیر TEC با فاصله زمانی یک‌ساعته و ابعاد شبکه ۰٫۵ درجه محاسبه گردید. همچنین از داده‌های ایستگاه‌های جهانی IGS برای مقایسه نتایج حاصل از پردازش Bernese نیز استفاده شد که توان تفکیک مکانی آن ۵ درجه طول جغرافیایی، ۲٫۵ درجه عرض جغرافیایی در فواصل زمانی دوساعته می‌باشد.

## ۱-۲- داده‌های ژئومغناطیسی

پارامترهای یونسفری تحت تأثیر فعالیت‌های خورشیدی می‌باشند. شاخص‌های ژئومغناطیسی از جمله KP، DST و F10.7 معیاری برای بیان میزان فعالیت‌های خورشیدی می‌باشند [۱۰ و ۱۱]. دانشمندان برای اندازه‌گیری قدرت یک طوفان ژئومغناطیسی، پارامتری به نام شاخص KP را اندازه‌گیری می‌کنند که نشانگر آهنگ تغییرات میدان‌های مغناطیسی نزدیک زمین است. این شاخص اختلال کمی در مؤلفه افقی میدان مغناطیسی زمین را نشان می‌دهد که از مشاهدات مگنتومتر با فاصله زمانی سه‌ساعته حاصل می‌شود [۱۲].

شاخص DST (Disturbance Storm Time) اطلاعاتی در مورد قدرت جریان‌های حلقوی در اطراف زمین که ناشی از پروتون و الکترون‌های خورشیدی است ارائه می‌دهد. شاخص F10.7 شار رادیویی خورشید را در طول موج 10.7cm و در واحد فرکانس اندازه‌گیری می‌کند [۱۳].

$$(1SFU = 10^{-22} \frac{W}{m^2 Hz})$$

از رابطه  $VTEC = \frac{TEC}{F}$  تعیین می‌گردد که در آن  $F = \frac{1}{\cos(Z)}$  تابع تبدیل است ( $Z'$  زاویه زینتی ماهواره).

$\beta$ : عرض جغرافیایی نقطه تقاطع لایه یونسفر با امتداد گیرنده - ماهواره

$s$ : طول خورشید ثابت نقطه تقاطع لایه یونسفر با امتداد گیرنده - ماهواره

$m_{max}$  و  $n_{max}$ : بزرگ‌ترین درجه بسط سری تیلور دوبعدی در عرض  $\beta$  و طول  $s$

$E_{nm}$ : ضریب TEC سری تیلور یا به عبارت دیگر مجهول مدل محلی یونسفر

$s_0$  و  $\beta_0$ : مختصات نقطه مبدأ

مدل جهانی (TEC(GMT): که ممکن است برای برنامه‌های کاربردی منطقه‌ای نیز استفاده شود و با رابطه (۲) بیان می‌گردد:

$$TEC(\beta, s) = \sum_{n=0}^{n_{max}} \sum_{m=0}^n \bar{P}_{nm}(\sin\beta)(a_{nm} \cos(ms) + b_{nm} \sin(ms)) \quad (2)$$

$n_{max}$ : حداکثر درجه بسط هارمونیک کروی

$\bar{P}_{nm} = N_{nm} P_{nm}$ : توابع لژاندر نرمالایز شده از درجه  $n$  و مرتبه  $m$

$N_{nm} = \sqrt{\frac{(n-m)!(2n+1)}{(n+m)!}}$ : تابع نرمالایز کننده  $P_{nm}$ : تابع لژاندر نرمالایز نشده

$a_{nm}$  و  $b_{nm}$ : ضرایب هارمونیک کروی که مجهول هستند و بایستی برآورد شوند.

مدل ایستگاهی: در این مدل مجموعه‌ای از پارامترهای یونسفری با توجه به هر ایستگاه تعیین می‌گردد.

## ۲-۲- تشخیص ناهنجاری با استفاده از روش میانه

از آنجا که نوسانات یونسفری معمولاً دارای توزیع نرمال نمی‌باشند و از منحنی گاوسی پیروی نمی‌کنند [۱۷] به منظور تشخیص ناهنجاری‌های لرزه‌ای، از میانه و دامنه بین چارکی برای تعیین مرزهای بالا و پایین استفاده می‌گردد (رابطه (۳)):

$$\begin{aligned} x_{low} &= M - k * IQR \\ x_{high} &= M + k * IQR \\ x_{low} < x < x_{high} &\rightarrow -k < \frac{x - M}{IQR} < k \quad (3) \\ D_x &= \frac{x - M}{IQR} \end{aligned}$$

این شاخص‌ها از سایت‌های <http://spidr.ngdc.noaa.gov> و <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac> قابل دسترسی می‌باشند.

## ۲- روش تحقیق

در این بخش مدل‌های یونسفری مورد استفاده در نرم‌افزار Bernese و عملکرد شبکه عصبی در تشخیص آنامولی‌های TEC قبل از وقوع زمین‌لرزه‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرند.

### ۲-۱- مدل‌های یونسفری در نرم‌افزار Bernese

به منظور به دست آوردن میزان الکترون‌های یونسفر در مکان و زمان مشخص، نیاز به پردازش داده‌های GPS می‌باشد. از مدل‌های جهانی می‌توان به مدل‌های CODE، ESAG، JPL و EMRG اشاره کرد [۱۴ و ۱۵ و ۱۶]. برای مثال در مدل CODE نقشه یونسفر جهانی به صورت روزانه توسط مرکز تعیین مدار در اروپا (CODE)، دانشگاه برن سوئیس تولید می‌شود. TEC با گسترش هارمونیک کروی تا درجه ۱۲ و مرتبه هشت، در یک چارچوب خورشید ثابت (solar-geographical reference frame) مدل شده است. مجموعه‌ای از ۱۴۹ پارامتر یونسفری به صورت روزانه از داده‌های GPS شبکه جهانی IGS (سرویس بین‌المللی GPS) استخراج می‌شوند. نرم‌افزار Bernese از سه مدل یونسفر استفاده می‌کند:

۱. مدل محلی (Local TEC Model): بر اساس بسط دوبعدی سری تیلور

۲. مدل جهانی (Global TEC Model): بر اساس بسط هارمونیک‌های کروی

۳. مدل ایستگاهی (Station-Specific TEC Model)

مدل محلی TEC: قابل اجرا در اطراف و مجاورت یک یا چند ایستگاه دوفرکانسه می‌باشد و بر اساس رابطه (۱) بیان می‌گردد:

$$TEC(\beta, s) = \sum_{n=0}^{n_{max}} \sum_{m=0}^{m_{max}} E_{nm} (\beta - \beta_0)^n (s - s_0)^m \quad (1)$$

$E(\beta, s)$ : تابعی جهت برآورد TEC که تابعی از موقعیت گیرنده، ماهواره و خورشید است.

مقدار TEC که در زوایای زینتی مختلف محاسبه می‌گردد، در امتداد زینت با VTEC نمایش داده می‌شود و

تشخیص داده شده اگر مقادیر خطا از حد آستانه تجاوز نمایند بیانگر ناهنجاری ناشی از زلزله خواهد بود [۲۳].

### ۳- پیاده‌سازی و تحلیل نتایج

در این مقاله دو زمین‌لرزه مورد بررسی قرار گرفته است. زلزله اول در استان آذربایجان شرقی با بزرگای گشتاوری ۶٫۴ در ساعت ۱۷:۵۳:۱۶ به وقت محلی (UTC=12:23:17) در روز ۲۱ مرداد ۱۳۹۱ در ۲۰ کیلومتری اهر رخ داد. کانون زمین‌لرزه در عمق حدود ۲۰ کیلومتری زمین بوده است.

زمین‌لرزه دوم در استان بوشهر با بزرگای گشتاوری ۶٫۴ در ساعت ۵۰:۲۲:۱۶ به وقت محلی (UTC=11:52:50) در روز ۲۰ فروردین ۱۳۹۲، در عمق ۱۰ کیلومتری زمین در شهرستان دشتی رخ داد. کانون این زمین‌لرزه در ۱۶ کیلومتری شهر کاکلی بوده است.

اطلاعات زمین‌لرزه‌ها از سایت زیر استخراج گردیده است: <http://earthquake.usgs.gov>

#### ۳-۱- زلزله اهر آذربایجان شرقی

##### ۳-۱-۱- بررسی داده‌های ایستگاه‌های زمینی

شکل ۱ (الف) نحوه فعالیت شاخص شار رادیویی خورشیدی را در بازه زمانی ۱۰ تیرماه تا نه شهریورماه ۱۳۹۱ نشان می‌دهد. محور X نشان‌دهنده روز نسبت به روز زلزله و محور Y نشان‌دهنده زمان جهانی است. بیشترین فعالیت این شاخص مربوط به ۲۶ تا ۴۰ روز قبل از وقوع زلزله بوده است و همچنین ۱۰ روز قبل از وقوع زلزله فعالیت غیرعادی داشته است. شکل ۱ (ب) رفتار شاخص ژئومغناطیسی KP را در بازه زمانی دوماهه از ۱۰ تیرماه تا نه شهریورماه ۱۳۹۱ نشان می‌دهد. بیشترین فعالیت این شاخص ژئومغناطیسی در بازه نه تا ۱۴ و ۲۵ تا ۴۰ روز قبل از وقوع زلزله روی داده است و در ۲۶ روز قبل از روز زلزله به بیشترین مقدار خود یعنی فراتر از مقدار ۶ رسیده است. شکل ۱ (ج) تغییرات شاخص DST را در بازه زمانی ۱۰ تیرماه تا نه شهریورماه ۱۳۹۱ نشان می‌دهد. بیشترین فعالیت غیرعادی این شاخص ۲۵ تا ۲۷ و ۳۲ تا ۳۳ روز قبل از وقوع زلزله بوده و بیان‌کننده این است که تغییرات TEC در روزهای نزدیک به زلزله مربوط به فعالیت این شاخص نبوده است. شکل ۱ (د) تغییرات TEC را که از

که  $D_x$  و IQR، M،  $x_{high}$  و  $x_{low}$  به ترتیب مرز بالایی، مرز پایینی، میانه، دامنه بین چارکی و دیفرانسیل  $x$  می‌باشند.  $k$  مقداری تجربی است و با استفاده از روابط بالا چنانچه  $|D_x| > k$ ، در این صورت رفتار پارامتر  $X$  به عنوان ناهنجاری در نظر گرفته می‌شود [۱۸ و ۱۹].

#### ۳-۲- شبکه عصبی مصنوعی

شبکه عصبی مصنوعی در واقع مدلی ریاضی برای پردازش سریع و دقیق اطلاعات می‌باشد. در این الگوریتم نمونه‌های اولیه به شبکه اعمال می‌شود و شبکه پارامترها (وزن اولیه) را بر اساس این نمونه‌ها تنظیم می‌کند. اگر نمونه‌های جدید به این شبکه که به این طریق آموزش دیده، اعمال شود، خروجی مناسب به دست می‌آید. همچنین با آموزشی که شبکه در ابتدا می‌بیند می‌توان داده‌های آموزش داده نشده یعنی ورودی‌های جدید را به شبکه معرفی کرد و خروجی مناسب را ایجاد نمود [۲۰].

الگوی ورودی داده‌ها در شبکه عصبی مصنوعی طبق روابط (۴) است:

$$\begin{aligned} X_4 &= f(X_1, X_2, X_3) \\ X_5 &= f(X_2, X_3, X_4) \\ &\vdots \\ &\vdots \\ &\vdots \\ X_N &= f(X_{N-3}, X_{N-2}, X_{N-1}) \end{aligned} \quad (4)$$

بعد از مرحله آموزش مقداری از داده‌ها برای اعتبارسنجی استفاده می‌گردد و در انتها مرحله آزمون داده‌ها صورت می‌گیرد [۲۱].

در هر مرحله با استفاده از داده‌های آموزشی الگوریتم اجرا می‌شود، وزن اولیه بهینه می‌گردد تا خروجی هر مرحله از تکرار به هدف نزدیک‌تر شود [۲۲].

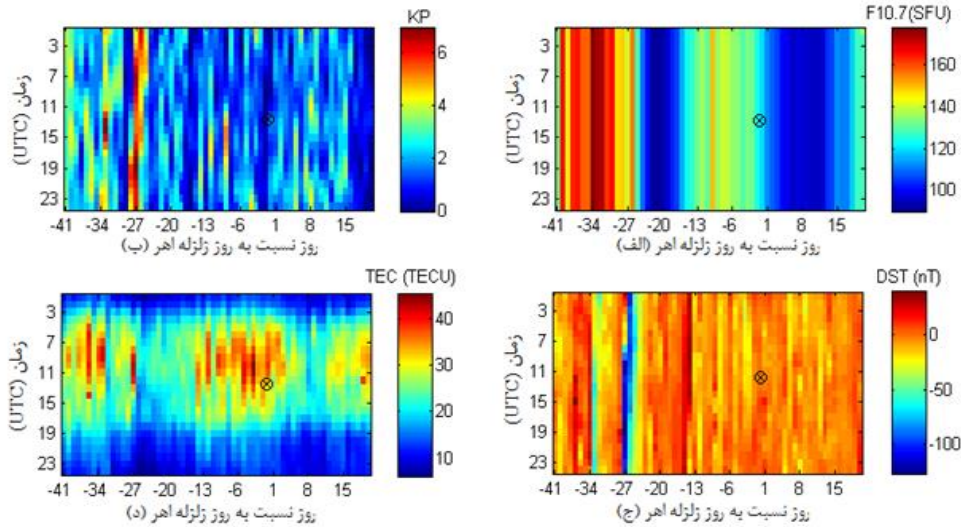
در انتها خطای تشخیص داده شده با استفاده از رابطه (۵) محاسبه می‌گردد:

$$PE = \sum_{i=4}^N (x_i - \hat{x}_i) \quad (5)$$

که در آن  $x_i$  مقدار واقعی و  $\hat{x}_i$  مقدار خروجی شبکه عصبی می‌باشد. در واقع در تفاضل مقدار واقعی و مقدار

تجزیه و تحلیل) تغییرات غیرعادی TEC را در چند روز قبل از وقوع زلزله نشان می‌دهد.

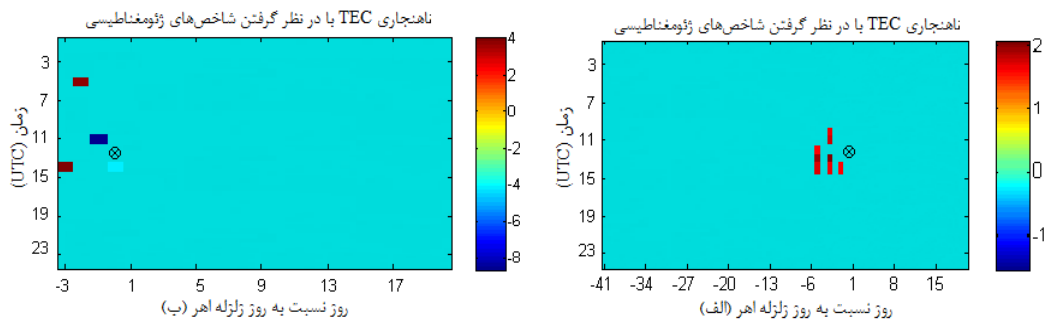
پردازش داده‌های ایستگاه GPS اهر (نزدیک به مرکز زلزله) به دست آمده نشان می‌دهد. بررسی شکل (بدون انجام



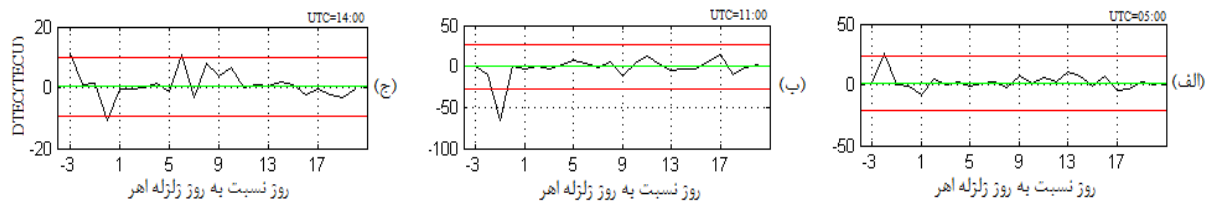
شکل ۱- (الف) تغییرات شاخص ژئومغناطیسی F10.7، (ب) شاخص KP، (ج) شاخص DST و (د) تغییرات TEC در بازه زمانی دوماهه

در روز زلزله ساعت UTC=14:00، یک روز قبل از زلزله در ساعت UTC=11:00، دو روز قبل از زلزله در ساعت UTC=05:00 و سه روز قبل از زلزله در ساعت UTC=14:00 نشان دهد. شکل ۳ خطای تشخیص یعنی تفاضل بین خروجی شبکه عصبی و مقدار مشاهداتی را نشان می‌دهد. مرز بالایی برابر با  $M + 3.6IQR$  و مرز پایینی برابر با  $M - 3.6IQR$  است.

به منظور پیاده‌سازی شبکه عصبی مصنوعی ۵۰٪ از داده‌ها برای آموزش، ۱۰٪ برای اعتبارسنجی و ۴۰٪ برای آزمایش کردن اختصاص داده شده است. در شکل ۲ (الف) رفتار غیرعادی در میزان TEC با در نظر گرفتن شاخص‌های ژئومغناطیسی یک تا پنج روز قبل از وقوع زلزله در ساعات ۱۰ تا ۱۴ نمایان است. در شکل ۲ (ب) شبکه عصبی مصنوعی به خوبی توانسته ناهنجاری TEC را



شکل ۲- (الف) آنامولی TEC و شکل (ب) تشخیص آنامولی TEC با استفاده از شبکه عصبی با در نظر گرفتن شاخص‌های ژئومغناطیسی

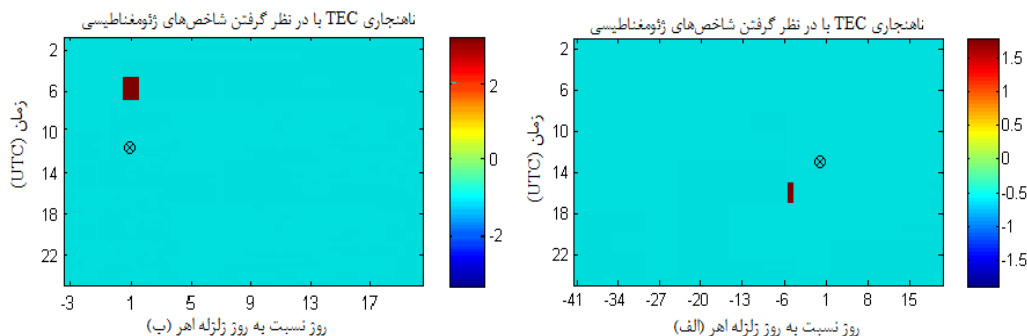


شکل ۳- تغییرات تفاضل مقدار مشاهده شده TEC با مقدار تشخیص داده شده توسط شبکه عصبی برای روزهای آزمایش شده در ایستگاه اهر. نمودار سبزرنگ میانه خطای حاصل از تشخیص شبکه عصبی، دو نمودار قرمز رنگ حد آستانه بالا و پایین برای تشخیص ناهنجاری و نمودار سیاه رنگ خطای خروجی حاصل از شبکه عصبی برای داده‌های TEC می‌باشد

### ۳-۱-۲- بررسی داده‌های ایستگاه‌های جهانی

در مورد این داده‌ها می‌باشد. در شکل ۴ (الف) آنامولی پنج روز قبل از زلزله در ساعت UTC=16:00 و در شکل ۴ (ب) تشخیص آنامولی در روز زلزله در ساعت UTC=06:00 قابل‌رؤیت است.

شکل ۴ آنامولی TEC را با در نظر گرفتن شاخص‌های ژئومغناطیسی نشان می‌دهد. شکل ۴ (الف) مربوط به بررسی داده‌های دوماهه برگرفته از ایستگاه‌های جهانی IGS و شکل ۴ (ب) خروجی شبکه عصبی و تشخیص آن



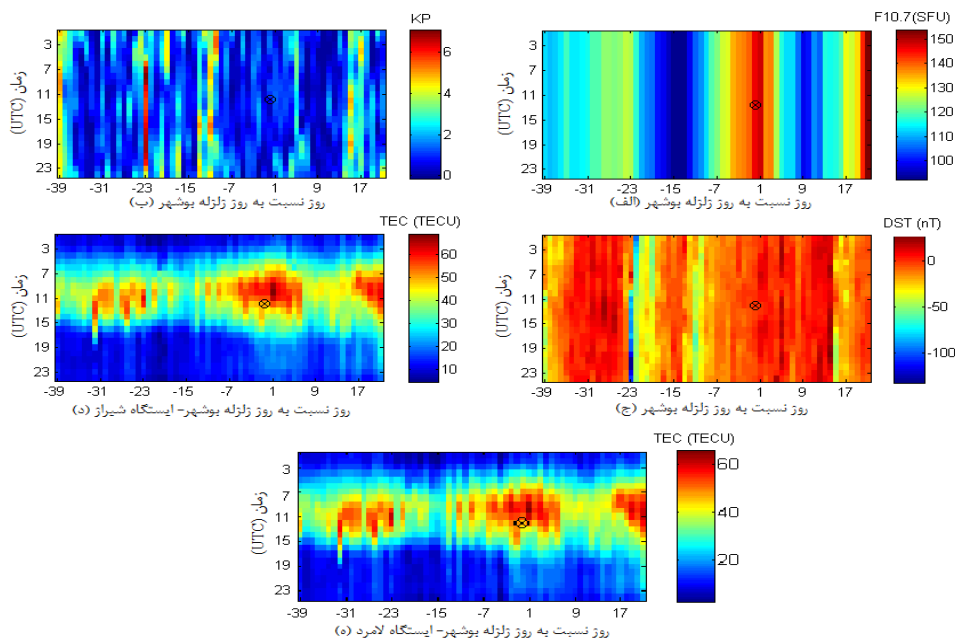
شکل ۴- (الف) آنامولی TEC با استفاده از داده‌های ایستگاه‌های جهانی و شکل (ب) تشخیص آنامولی TEC با استفاده از شبکه عصبی با در نظر گرفتن شاخص‌های ژئومغناطیسی

### ۳-۲- زلزله کاکي بوشهر

شاخص DST در شکل ۵ (ج) در بازه زمانی نه روز قبل از زلزله تا ۴ روز بعد از آن رفتاری عادی داشته‌اند و می‌توان نتیجه گرفت که تغییرات مشاهده شده در TEC در محدوده زمانی نزدیک به زلزله تحت تأثیر این دو شاخص نبوده است. داده‌های پردازش شده ایستگاه شیراز و ایستگاه لامرد در شکل ۵ (د) و (ه) نشان می‌دهند که میزان TEC در روزهای نزدیک به زلزله و روزهای بعد از آن رفتاری غیرعادی داشته است.

### ۳-۲-۱- بررسی داده‌های ایستگاه‌های زمینی

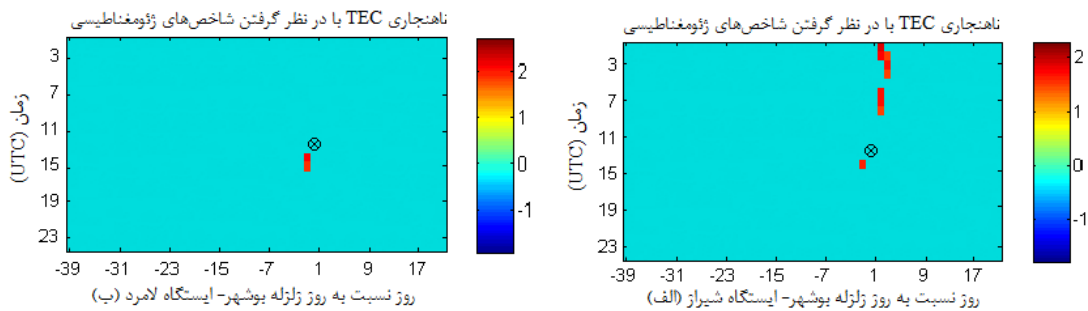
شکل ۵ تغییرات شاخص‌های ژئومغناطیسی را در بازه زمانی دوماهه از تاریخ ۲۱ اسفندماه تا ۱۰ اردیبهشت‌ماه ۱۳۹۲ نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۵ (الف) شاخص F10.7، پنج روز قبل از زلزله و سه روز بعد از زلزله فعالیت غیرعادی داشته است. شاخص KP در شکل ۵ (ب) و



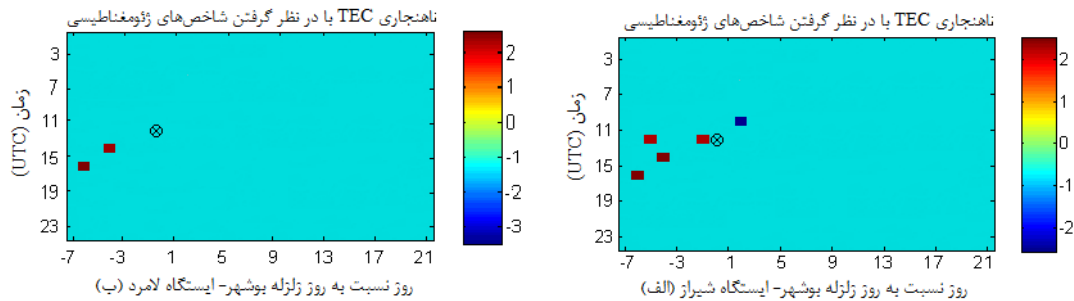
شکل ۵- (الف) تغییرات شاخص ژئومغناطیسی F10.7، (ب) شاخص KP، (ج) شاخص DST و تغییرات TEC در بازه زمانی دوماهه برای دو ایستگاه شیراز (د) و ایستگاه لامرد (ه)

شکل ۶ آنامولی TEC را با اعمال شاخص‌های ژئومغناطیسی برای دو ایستگاه شیراز و لامرد نشان می‌دهد. در ایستگاه شیراز آنامولی یک روز قبل از زلزله در ساعت 14:00 UTC و یک تا دو روز بعد از زلزله قابل‌رؤیت است (شکل الف). در ایستگاه لامرد نیز آنامولی یک روز قبل از زلزله در ساعت 15:00 UTC مشاهده می‌گردد (شکل ب). به‌منظور پیاده‌سازی شبکه عصبی مصنوعی ۴۰٪ از داده‌ها برای آموزش، ۱۰٪ برای اعتبارسنجی و ۵۰٪ برای آزمایش کردن اختصاص داده شده است. نتایج حاصل از شبکه عصبی در مورد ایستگاه شیراز (شکل ۷ الف) آنامولی را یک روز قبل از زلزله در ساعت 12:00 UTC، چهار روز قبل در ساعت 14:00 UTC، پنج روز قبل در ساعت 12:00 UTC، شش روز قبل در ساعت 16:00 UTC و دو روز بعد از آن در ساعت 10:00 UTC توانسته است نشان دهد. در مورد ایستگاه لامرد (شکل ۷ ب) آنامولی چهار روز قبل از زلزله در ساعت 14:00 UTC و شش روز قبل از آن در ساعت 16:00 UTC قابل‌رؤیت است. شکل ۸ خطای تشخیص (تفاضل خروجی شبکه عصبی و مقدار مشاهداتی) را نشان می‌دهد. مرز بالایی برای داده‌های ایستگاه شیراز و لامرد برابر با  $M + 2.2IQR$  و مرز پایینی برابر با  $M - 2.2IQR$  است ( $K=2.2$ ).

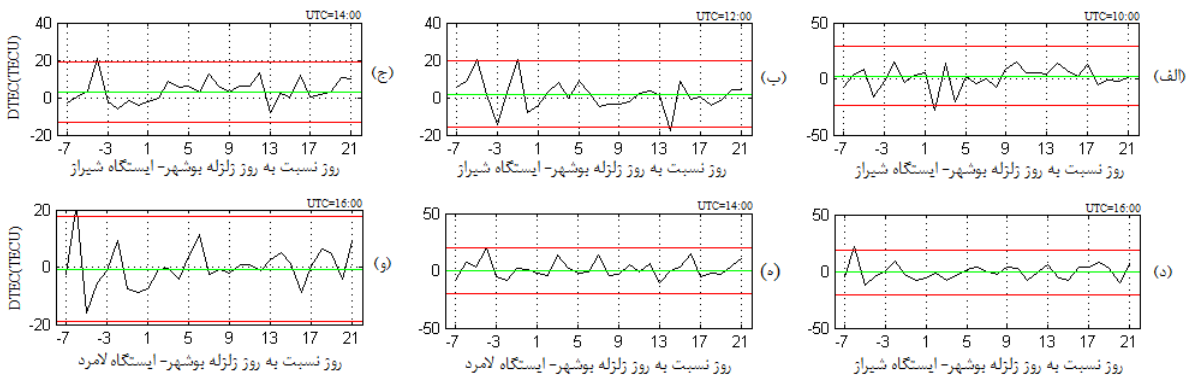
شکل ۶- آنامولی TEC برای دو ایستگاه شیراز (الف) و لامرد (ب) با در نظر گرفتن شاخص‌های ژئومغناطیسی. هر دو نمودار دارای محور عمودی زمان (UTC) از ۳ تا ۲۳ و محور افقی روز نسبت به روز زلزله بوشهر-ایستگاه لامرد (ب) یا شیراز (الف) از -۳۹ تا ۱۷ است. یک دایره متقاطع در مرکز هر نمودار نشان‌دهنده زمان و مکان زلزله است. در نمودار الف، یک نوار قرمز عمودی در روز ۱ و ساعت ۱۴:۰۰ دیده می‌شود. در نمودار ب، یک نوار قرمز عمودی در روز ۱ و ساعت ۱۵:۰۰ دیده می‌شود.



شکل ۶- آنامولی TEC برای دو ایستگاه شیراز (شکل الف) و لامرد (شکل ب) با در نظر گرفتن شاخص‌های ژئومغناطیسی



شکل ۷- تشخیص آنامولی TEC با استفاده از شبکه عصبی با اعمال شاخص‌های ژئومغناطیسی برای دو ایستگاه شیراز (شکل الف) و لامرد (شکل ب)

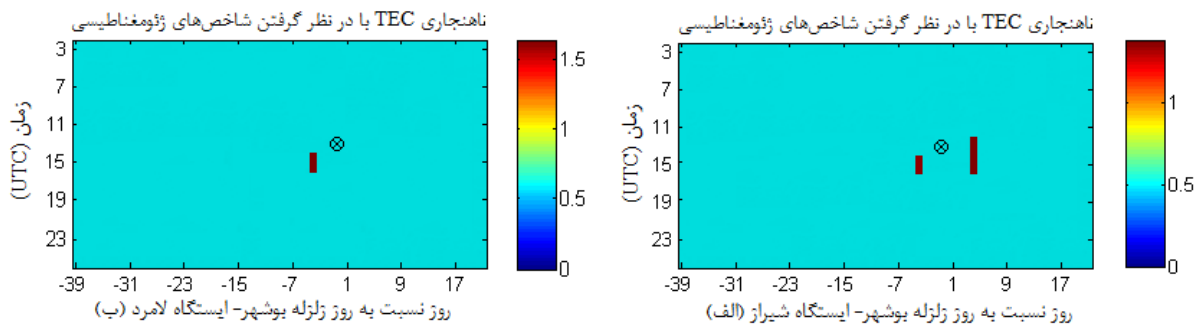


شکل ۸- تغییرات تفاضل مقدار مشاهده‌شده TEC با مقدار تشخیص داده شده توسط شبکه عصبی برای روزهای آزمایش‌شده در دو ایستگاه شیراز و لامرد. نمودار سبز رنگ میانه خطای حاصل از تشخیص شبکه عصبی، دو نمودار قرمز رنگ حد آستانه بالا و پایین برای تشخیص ناهنجاری و نمودار سیاه رنگ خطای خروجی حاصل از شبکه عصبی برای داده‌های TEC می‌باشد

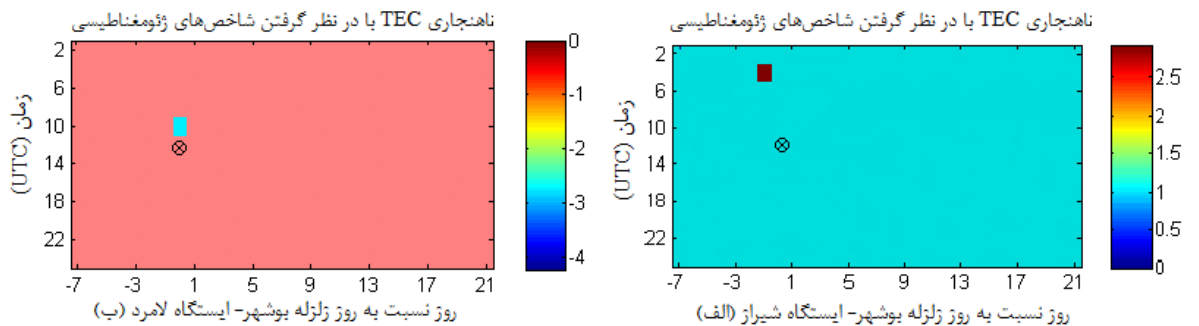
### ۳-۲-۲- بررسی داده‌های ایستگاه‌های جهانی

شکل ۹ آناملی TEC را با در نظر گرفتن شاخص‌های ژئومغناطیسی نشان می‌دهد. شکل ۹ (الف) مربوط به بررسی داده‌های دو ماهه برگرفته از ایستگاه‌های جهانی IGS برای ایستگاه شیراز و شکل ۹ (ب) مربوط به ایستگاه لامرد است. نتایج هر دو ایستگاه آناملی را پنج روز قبل از وقوع زلزله در ساعت UTC=15:00 نشان می‌دهد. در مورد ایستگاه شیراز تغییر رفتار TEC سه روز بعد از وقوع زلزله در ساعات UTC=14:00 و UTC=15:00 قابل‌رؤیت است.

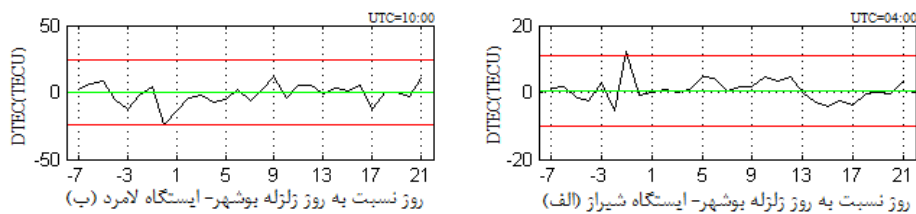
به‌کارگیری شبکه عصبی در مورد داده‌های ایستگاه‌های جهانی برای دو منطقه شیراز و لامرد در شکل ۱۰ نشان داده شده است. در شکل ۱۰ (الف) آناملی یک روز قبل از زلزله در ساعت UTC=04:00 و در شکل ۱۰ (ب) در روز زلزله و در ساعت UTC=10:00 مشاهده می‌گردد شکل ۱۱ خطای تشخیص (تفاضل بین خروجی شبکه عصبی و مقدار مشاهداتی) را نشان می‌دهد. مرز بالایی برای داده‌های ایستگاه شیراز و لامرد برابر با  $M + 2.7IQR$  و مرز پایینی برابر با  $M - 2.7IQR$  است ( $K=2.7$ ).



شکل ۹- آناملی TEC برای دو ایستگاه شیراز (شکل الف) و لامرد (شکل ب) با در نظر گرفتن شاخص‌های ژئومغناطیسی



شکل ۱۰- تشخیص آناملی TEC با استفاده از شبکه عصبی با اعمال شاخص‌های ژئومغناطیسی، ایستگاه شیراز (الف) و لامرد (ب)



شکل ۱۱- تغییرات تفاضل مقدار مشاهده شده TEC با مقدار تشخیص داده شده توسط شبکه عصبی برای روزهای آزمایش شده در دو ایستگاه شیراز و لامرد. نمودار سبزرنگ میانه خطای حاصل از تشخیص شبکه عصبی، دو نمودار قرمز رنگ حد آستانه بالا و پایین برای تشخیص ناهنجاری و نمودار سیاه‌رنگ خطای خروجی حاصل از شبکه عصبی برای داده‌های TEC می‌باشند



## ۴- نتیجه گیری

گردید که نتایج حاصل با نتایج ایستگاه‌های جهانی همبستگی مناسبی داشتند. همچنین الگوریتم شبکه عصبی در تشخیص سری زمانی TEC نتایج قابل قبولی را ارائه داد که با نتایج حاصل می‌توان بیان داشت که این الگوریتم از ابزارهای مفید برای بازشناسی الگو و پیش‌بینی سری‌های زمانی می‌باشد.

تشخیص رفتارهای غیرعادی TEC قبل از وقوع زلزله از اهمیت زیادی به‌عنوان پیش‌نشانگر زلزله برخوردار است. در این مقاله به‌منظور دستیابی به تعداد الکترون‌های لایه یونسفر از پردازش داده‌های GPS به‌وسیله نرم‌افزار Bernese برای ایستگاه‌های اهر، شیراز و لامرد استفاده

## مراجع

- [1] E Stoupelet et al., "Clinical Cosmobiology Sudden cardiac death and daily/ monthly geomagnetic, cosmic ray and solar activity – the Baku study (2003-2005) Sun and Geosphere, Vol. 1, No. 2, 13-16, 2006
- [2] J. Y. Liu et al., "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, vol.115, 2010
- [3] C.de Jager, "Solar activity and its influence on climate". Netherlands journal of geoscience, 207-213, 2008
- [4] A DasGupta, et al., "Ionospheric total electron content (TEC) studies with GPS in the equatorial region", Indian Journal of radio & Space Physics, Vol. 63, 278-292, 2007
- [5] M. Akhoondzadeh, "A MLP neural network as an investigator of TEC time series to detect seismo-ionospheric anomalies", Advances in Space Research 51, 2048-2057, 2013
- [6] M Sheikhan, N Mohammadi, "Time series prediction using PSO-optimized neural network and hybrid feature selection algorithm for IEEE load data", Neural Comput and Applic, 23: 1185-1194, 2013
- [7] Y. B. Yao et al., "Analysis of pre earthquake ionospheric anomalies before the global M= 7.0+ earthquakes in 2010", Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 12, 575-585, 2012
- [8] M. Akhoondzadeh. "A comparison of classical and intelligent methods to detect potential thermal anomalies before the 11 August 2012 Varzeghan, Iran, earthquake (Mw = 6.4)", Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 13, 1077-1083, 2013
- [9] M. Akhoondzadeh, M.R. Saradjian, " TEC variations analysis concerning Haiti (January 12, 2010) and Samoa (September 29, 2009) earthquakes", Advances in Space Research 47, 94-104, 2011
- [10] A.V. Riswadkar, B Dobbins. "Solar Storms: Protecting Your Operations Against the Sun's 'Dark Side". Zurich Services Corporation Risk Engineering, 2010
- [11] N. M. Perez et al., "Searching and detecting earthquake geochemical precursors in CO2 rich ground waters from Galicia, Spain", Geochemical Journal, Vol. 42, 75-83, 2008
- [12] G. K. Rangarajan, T. Iyemori, "Time variations of geomagnetic activity indices Kp and Ap: an update", Ann. Geophysicae, 15, 1271-1290, 1997
- [13] E Stoupelet et al., "Clinical Cosmobiology –Sudden cardiac death and daily/monthly geomagnetic, cosmic ray and solar activity – the Baku study (2003-2005) ", Sun and Geosphere, Vol. 1, No. 2, 13-16, 2006
- [14] M. Akhoondzadeh, "Anomalous TEC variations associated with the powerful Tohoku earthquake of 11 March 2011". Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 12, 1453-1462, 2012
- [15] M. Akhoondzadeh, "Novelty detection in time series of ULF magnetic and electric components obtained from DEMETER satellite experiments above Samoa (29 September 2009) earthquake region", Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 13, 15-25, 2013
- [16] I Horvath, E. A Essex, "Using observations from the GPS and TOPEX satellites to investigate night-time TEC enhancement at mid-latitudes in the southern hemisphere during a low sunspot number period", Journal of Atmospheric and solar Terrestrial-Physics, Vol. 62, No.5, 371-391, 2000
- [17] M. Akhoondzadeh et al., "Electron and ion density variations before strong earthquakes (M>6.0) using DEMETER and GPS data", Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 10, 7-18, 2010
- [18] M. R. Saradjian, M. Akhoondzadeh, "Prediction of the date, magnitude and affected area of impending strong earthquakes using integration of multi precursors earthquake parameters", Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 11, 1109-1119, 2011

- [19] M. Akhoondzadeh, "Anomalous TEC variations associated with the powerful Tohoku earthquake of 11 March 2011". Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 12, 1453-1462, 2012
- [20] K Mehrotra et al., "Elements of Artificial Neural Networks", ISBN 0-262-13328-8, 1996
- [21] A Krenker et al., "Introduction to the Artificial Neural Networks, Artificial Neural Networks", Methodological Advances and Biomedical Applications, Prof. Kenji Suzuki (Ed.), ISBN: 978-953-307-243-2, 2011
- [22] Kevin Gurney. "An introduction to neural networks". ISBN 0-203-45151-1 1997
- [23] M. Akhoondzadeh. "Support vector machines for TEC seismo-ionospheric anomalies detection", Ann. Geophys., 31, 173–186, 2013