

تشخیص آنامولی‌های TEC قبل از وقوع زلزله‌های بزرگ با تلفیق شبکه عصبی مصنوعی و الگوریتم بهینه‌سازی توده ذرات (PSO)

منیره شمشیری^۱

مهدی آخوندزاده هنزائی^۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۴/۴/۴

تاریخ دریافت مقاله: ۹۴/۱/۱۴

چکیده

بحث پیش‌بینی زمین‌لرزه به‌منظور کاهش تلفات و آسیب‌های آن از اهمیت بالایی برخوردار است؛ به ویژه در منطقه لرزه‌خیزی مانند ایران که سالانه شاهد وقوع این پدیده طبیعی می‌باشد. تشخیص ناهنجاری‌های قبل از زلزله نقش بسزایی در این امر دارد. تغییرات یونسفری که با اندازه‌گیری‌های از راه دور (مانند استفاده از سیستم تعیین موقعیت جهانی) قابل شناسایی هستند به پیش‌نشانگرهای یونسفری زلزله معروف می‌باشند. در این مطالعه دو مجموعه داده از محتوای الکترون‌های یونسفر که حاصل از پردازش داده‌های GPS با نرم افزار Bernese است برای دو مورد مطالعاتی زلزله اهر آذربایجان شرقی (۲۱ مرداد ۱۳۹۱) و زلزله کاکلی بوشهر (۲۰ فروردین ۱۳۹۲) مورد استفاده قرار گرفته و نتایج آن با داده‌های ایستگاه جهانی مقایسه گردیده است. از آنجا که تغییرات TEC³ رفتاری غیرخطی دارد بدین منظور برای پیش‌بینی و تشخیص تغییرات آن از تلفیق شبکه عصبی (با به کارگیری پرسپترون چندلایه (MLP)) و الگوریتم PSO^۵ استفاده گردیده است. الگوریتم PSO با عملکردی مبتنی بر جمعیت می‌تواند در بهبود وزن برآورد شده توسط شبکه عصبی مؤثر واقع شود. با تجزیه و تحلیل علل ناهنجاری‌های یونسفر از جمله میدان‌های ژئومغناطیسی و فعالیت‌های خورشیدی و حذف آن‌ها از پردازش‌های مورد نظر، نتایج حاصل نشان می‌دهد که برخی از این ناهنجاری‌ها ناشی از وقوع زلزله است و به کارگیری الگوریتم‌های هوشمند توانسته است کارایی مناسبی در جهت پیش‌بینی سری‌های زمانی غیر خطی داشته باشد. خروجی حاصل از تلفیق شبکه عصبی و PSO نشان می‌دهد که هر دو ناهنجاری‌های مثبت و منفی رخ می‌دهند. ناهنجاری‌های قبل از زلزله غالباً نزدیک به کانون زلزله رخ می‌دهند و در ۳ روز قبل از زلزله اهر آذربایجان شرقی و ۲ تا ۶ روز قبل از زلزله کاکلی بوشهر قابل رؤیت می‌باشند.

واژه‌های کلیدی: زلزله، الگوریتم بهینه‌سازی توده ذرات، آنومالی، TEC، شبکه عصبی مصنوعی.

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد سنجش از دور دانشگاه تهران m.shamshiri@ut.ac.ir

۲- استادیار گروه سنجش از دور، دانشگاه تهران makhonz@ut.ac.ir

3- Total Electron Content

4-Multi Layer Perceptron

5- Particle Swarm Optimization

۱- مقدمه

با نرم افزار Bernese برای ایستگاه‌های اهر (AHAR) و شیراز (SHRZ) بدست آمد. در پردازش مورد نظر مقادیر TEC با فاصله زمانی ۱ ساعته و ابعاد گرید مکانی 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 و ۲/۵ درجه عرض جغرافیایی در فواصل زمانی ۲ ساعته 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 (Akhoondzadeh, 2009). دانشمندان برای اندازه‌گیری قدرت یک طوفان ژئومغناطیسی، پارامتری به نام شاخص KP را اندازه می‌گیرند 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 سه ساعته حاصل می‌شود. شاخص^۱ DST 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 (Mayaud, 1980).

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

شاخص‌های ژئومغناطیسی اشاره شده از طریق سایت‌های زیر قابل دسترسی می‌باشند:

<http://spidr.ngdc.noaa.gov>

<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac>

چنانچه بخواهیم اشاره‌ای به تحقیقات مشابه داشته باشیم، پیشینه تحقیق به شرح ذیل می‌باشد؛

Otsuka و همکارانش (۲۰۰۰) با استفاده از گیرنده‌های

دوفرکانسه GPS به محاسبه TEC پرداختند. در این تحقیق

پیش‌بینی رخداد‌های طبیعی از جمله زلزله نقش بسزایی در جلوگیری از آسیب‌ها و تلفات آن خواهد داشت. سیستم GPS با ارسال سیگنال از ماهواره به گیرنده اطلاعاتی از نحوه تأثیر یونسفر بر مشاهدات فاز و کد ارائه می‌دهد و از این طریق می‌توان به مدلسازی یونسفر و میزان کل الکترون آن دست یافت. در مقاله حاضر، سعی بر این است که با پردازش داده‌های ایستگاه دائمی GPS به وسیله نرم‌افزار Bernese تغییرات میزان الکترون‌های یونسفر (TEC) بررسی شود و از آن به عنوان پیش‌نشانگر زلزله استفاده گردد (Liu et al, 2004). نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های ماهواره GPS گستردگی قابل توجهی برای درک تغییرات یونسفری ناشی از زمین لرزه دارد. به‌منظور بررسی این تغییرات و پیش‌بینی آن نیاز به روشی هوشمند برای بازشناسی روند تغییرات TEC می‌باشد. شبکه عصبی مصنوعی ابزاری کارآمد است که با مجهولات کم می‌تواند ساختاری را ایجاد کند که به حل مسائل پیچیده پردازش کارایی شبکه عصبی در بازشناسی الگوی سری‌های زمانی و پیش‌بینی، آن را در زمره روش‌های کارا برای سیستم‌های پیچیده غیر خطی قرار داده است. (Akhoondzadeh, 2013) عملکرد شبکه عصبی برپایه تعیین وزن مناسب برای ورودی‌های شبکه می‌باشد و انتخاب هرچه بهتر این وزن‌ها، خروجی شبکه را به مقدار واقعی نزدیک‌تر خواهد کرد (کاوایی، پورموسوی کانی، جهانبانی اردکانی، ۱۳۸۶).

الگوریتم بهینه‌سازی توده ذرات (PSO) با سرعت همگرایی بالا و توانایی برطرف کردن مینیمم‌های محلی که یکی از معایب شبکه عصبی می‌باشد قادر است وزن برآورد شده توسط شبکه عصبی را بهبود بخشد (Chen, Li, 2006).

با پیاده‌سازی الگوریتم مورد نظر و تحلیل نتایج، ناهنجاری‌هایی ۱ تا ۷ روز قبل از وقوع زلزله اهر و زلزله کاکلی به خوبی قابل رؤیت است.

۱-۱- داده‌های TEC

در این مطالعه داده‌های TEC از پردازش داده‌های GPS

^۱- Disturbance Storm Time

فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (مهر) تشخیص آنامولی‌های TEC قبل از وقوع زلزله ... / ۷

ماهواره‌ها، تعیین مدل تروپوسفر و یونسفر بصورت محلی و جهانی و تعیین المان‌های مداری و برآورد پارامترهای دوران زمین اشاره نمود. نرم‌افزار Bernese به حل مجهولات زیادی می‌پردازد که از جمله آن‌ها که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است پارامترهای یونسفری و مقدار الکترون‌های لایه یونسفر می‌باشد. از مدل‌های جهانی می‌توان به مدل‌های CODE، ESAG، JPL و EMRG اشاره کرد. 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 ۸ با اشاره به یک چارچوب مرجع خورشیدی وابسته به جاذبه زمین مدل شده است. مجموعه‌ای از ۱۴۹ پارامتر یونسفری به صورت روزانه از داده‌های GPS شبکه جهانی IGS (سرویس بین‌المللی GPS) استخراج می‌شوند (www.Science.nrao.edu).

نرم‌افزار Bernese از سه مدل یونسفری استفاده می‌کند:

۱. مدل محلی (Local TEC Model): براساس بسط دو بعدی هارمونیک‌های کروی

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

۳. مدل ایستگاهی (Station-Specific TEC Model)

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

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

$E(\beta, s)$: تابعی جهت برآورد TEC در زاویه زینتی صفر

درجه که تابعی از موقعیت گیرنده نسبت به ماهواره و خورشید است.

β : عرض جغرافیایی نقطه تقاطع لایه یونسفر با امتداد گیرنده - ماهواره

s : طول جغرافیایی نقطه تقاطع لایه یونسفر با امتداد گیرنده

TEC دو بعدی در منطقه ژاپن با استفاده از بیش از ۱۰۰۰ گیرنده GPS بدست آمد. در سال ۲۰۰۲ Williams Vilas Boas و همکارانش مجموع الکترون‌های یونسفر را در عرض‌های پایین جغرافیایی در برزیل برای فعالیت کم خورشیدی و با استفاده از داده‌های GPS مورد مطالعه قرار دادند. Saraso و همکارانش (۲۰۰۷) با استفاده از داده‌های GPS به بررسی برخی از زلزله‌هایی که در سال‌های ۲۰۰۲-۱۹۹۳ رخ داده بودند پرداختند و نتایج نشان داد که ناهنجاری‌هایی ۲ تا ۷ روز قبل از زلزله قابل رؤیت بوده‌اند و برای زلزله‌های قدرتمند این ناهنجاری‌ها تا ۱۶۰۰ کیلومتر از مرکز زلزله گسترش داشته‌اند. آخوندزاده و سراجیان (۲۰۱۰) با مطالعه بر روی دو زلزله Haiti و Samoa با استفاده از روش‌های فیلتر کالمن و Wavelet توانستند آنامولی‌هایی را ۱ تا ۱۵ روز قبل از وقوع زلزله تشخیص دهند. همچنین در مطالعات دیگری که در این حیطه صورت گرفت آخوندزاده در سال ۲۰۱۲ با استفاده از شبکه عصبی و ماشین‌های بردار پشتیبان و در سال ۲۰۱۳ با به‌کارگیری الگوریتم ژنتیک به بررسی ناهنجاری‌های پیش‌لرزه‌ای پرداخت.

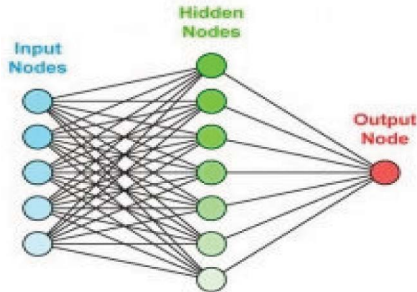
۲- روش تحقیق

در این بخش نحوه محاسبه TEC توسط نرم‌افزار Bernese و به‌کارگیری شبکه عصبی مصنوعی در تشخیص آنامولی‌های TEC قبل از وقوع زمین‌لرزه و بهبود وزن آن با الگوریتم PSO مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۱-۲ پردازش داده‌های GPS

به منظور بدست آوردن میزان الکترون‌های یونسفر در مکان و زمان مشخص، نیاز به پردازش داده‌های GPS می‌باشد. در این راستا در مطالعه‌ی حاضر، از نرم‌افزار Bernese استفاده شده است. از کاربردهای این نرم‌افزار می‌توان به پردازش شبکه‌های دائمی GPS به منظور تعیین سرعت حرکت ایستگاه‌ها و صفحات تکتونیکی، حل ابهام فاز تا طول‌های ۲۰۰۰ کیلومتری با استفاده از مختصات دقیق

نگاره (۱) ساختار یک پرسپترون چندلایه را نشان می‌دهد.



نگاره ۱ - پرسپترون چند لایه

خطای سیستم ترکیبی از پاسخ‌های مطلوب و پاسخ واقعی سیستم است که خروجی واقعی نامیده می‌شود. اطلاعات خطا که به صورت فیدبک به سیستم برمی‌گردد؛ در یک حالت سیستماتیک بر همه پارامترهای سیستم منطبق می‌شود. این فرآیند آنقدر تکرار می‌شود تا خروجی به صورت قابل قبول درآید.

الگوی ورودی داده‌ها در شبکه عصبی مصنوعی طبق روابط (۳) است:

$$\begin{aligned} x_4 &= f(x_1, x_2, x_3) \\ x_5 &= f(x_2, x_3, x_4) \\ &\vdots \\ &\vdots \\ &\vdots \end{aligned} \quad (3)$$

$$x_N = f(x_{N-3}, x_{N-2}, x_{N-1})$$

بعد از مرحله آموزش مقداری از داده‌ها برای اعتبارسنجی استفاده می‌گردد و در انتها مرحله تست داده‌ها صورت می‌گیرد.

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.

در انتها خطای پیش‌بینی شده با استفاده از رابطه (۴) محاسبه می‌گردد:

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

- ماهواره به مرجعیت خورشید

m_{max} و n_{max} : بزرگترین درجه بسط سری تیلور دو بعدی در عرض β و طول s

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

β_0 و s_0 : مختصات نقطه مبدا

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

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

n_{max} : حداکثر درجه بسط هارمونیک کروی

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

$$N_{nm} = \sqrt{\frac{(n-m)!(2n+1)}{(n+m)!}}$$

P_{nm} : تابع لژاندر نرمالایز نشده

a_{nm} و b_{nm} : ضرایب هارمونیک کروی که مجهول

هستند و بایستی برآورد شوند (صادقی، ۱۳۸۵: ۶)

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

۲-۲- شبکه عصبی مصنوعی (ANN)

شبکه‌های عصبی مصنوعی با پردازش روی داده‌های ورودی قانون نهفته در ورای داده‌ها را به ساختار شبکه منتقل می‌کند. این شبکه‌ها برای تخمین^۲ و تقریب^۳ کارایی بسیار بالایی از خود نشان داده‌اند. اصولاً توانایی یادگیری مهمترین ویژگی یک سیستم هوشمند است. زمانی که یک عنصر از شبکه عصبی از کار بیفتد به دلیل خاصیت کارکرد موازی اجزاء، شبکه می‌تواند کمبود را جبران کرده و بدون مشکل به کار خود ادامه دهد (Veelenturf, 1995).

1- Artificial Neural Network

2- Estimation

3- Approximation

الگوریتم PSO این است که مجموع مربع خطاها (تفاضل مقدار واقعی و خروجی شبکه عصبی) کمینه گردد:

$$Cost\ function = \sum_{i=1}^N (e_i)^2 \rightarrow min$$

۲-۴- تشخیص ناهنجاری با استفاده از روش میان چارکی و میانه

از آنجا که نوسانات یونسفری معمولاً دارای توزیع نرمالی نمی‌باشند و از منحنی گاوسی پیروی نمی‌کنند، به منظور تشخیص ناهنجاری‌های لرزه‌ای، از میانه و دامنه بین چارکی برای تعیین مرزهای بالا و پایین استفاده می‌گردد: (Liu et al,2004; Pulnits and Boyarchuk,2004)

$$x_{low} = M - k * IQR$$

$$x_{high} = M + k * IQR$$

$$x_{low} < x < x_{high} \rightarrow -k < \frac{x - M}{IQR} < k$$

$$D_x = \frac{x - M}{IQR} \quad (6)$$

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

۳- پیاده‌سازی و تحلیل نتایج

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

زمین‌لرزه دوم زلزله در استان بوشهر با بزرگای گشتاوری ۶/۴ (Mw) در ساعت ۱۶:۲۲:۵۰ به وقت محلی (UTC=11:52:50) در روز ۲۰ فروردین ۱۳۹۲، در

که در آن x_i مقدار واقعی و \hat{x}_i مقدار خروجی شبکه عصبی می‌باشد. در واقع در تفاضل مقدار واقعی و مقدار پیش‌بینی شده اگر مقادیر خطا از حد آستانه تجاوز نماید بیانگر ناهنجاری ناشی از زلزله خواهد بود.

۲-۳- الگوریتم بهینه‌سازی توده ذرات (PSO)

الگوریتم بهینه‌سازی توده ذرات یک تکنیک تکاملی (Evolutionary) برای انجام محاسبات است. این الگوریتم با مجموعه‌ای از پاسخ‌های بالقوه (ذرات) کارش را آغاز می‌کند و با بروز کردن وضعیت ذرات به دنبال پیدا کردن نقطه بهینه می‌باشد. هر ذره دارای حافظه است و بهترین موقعیت خودش که تا کنون بدست آورده (Pb) و بهترین موقعیت همسایگانش (Pg) را در هر تکرار در حافظه اش نگه می‌دارد. در هر تکرار، هر ذره بر اساس بهترین موقعیتش (Pb) و بهترین موقعیت همسایگانش (Pg)، بردار سرعتش را تنظیم می‌کند (کاوایی، ۱۳۸۶):

$$V_{id}(t+1) = V_{id}(t) + c_1 \times r_1 \times [P_{id}(t) - X_{id}(t)] + c_2 \times r_2 \times [P_{gd}(t) - X_{id}(t)] \quad (5)$$

$$X_{id}(t+1) = X_{id}(t) + V_{id}(t+1)$$

که c_1 و c_2 ثابت‌های شتاب‌دهنده با مقادیر مثبت و r_1 و r_2 عددی تصادفی بین ۰ و ۱ می‌باشند. استفاده از پارامتر وزن اینرسی باعث می‌شود که این الگوریتم برخلاف الگوریتم شبکه عصبی توانایی جستجوی سراسری و محلی در میان فضای داده‌ها را برای رهایی از به دام افتادن در مینیمم‌های محلی داشته باشد. مقادیر بزرگ وزن اینرسی در آغاز جستجو به توانایی اکتشاف سراسری و در ادامه اجرای الگوریتم، کاهش آن به جستجو در فضاهای محلی با دقت بیشتر کمک می‌کند. همین قابلیت باعث می‌شود وزن‌های مورد نیاز در شبکه عصبی بصورت بهینه‌ی سراسری با احتمال بسیار بالا برآورد شود و خروجی شبکه عصبی در پیش‌بینی داده‌ها به مقدار مشاهداتی نزدیک‌تر شود و به تبع میزان خطای آن کاهش یابد. در واقع هدف از به‌کارگیری

عمق ۱۰ کیلومتری زیر زمین در شهرستان دشتی رخ داد. کانون این زمین‌لرزه در ۱۶ کیلومتری شهر کاکلی بوده است. اطلاعات زمین‌لرزه‌ها از سایت <http://earthquake.usgs.gov> استخراج گردیده است.

۳-۱- زلزله اهر آذربایجان شرقی

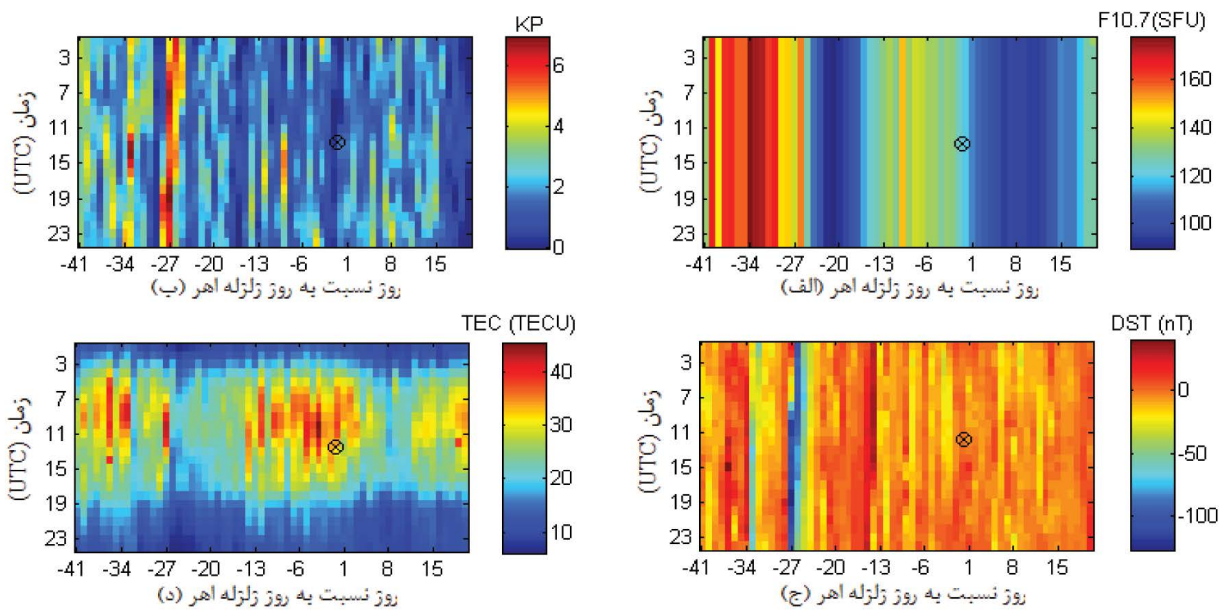
۳-۱-۱- بررسی داده‌های ایستگاه‌های زمینی

نگاره ۲ (الف) نحوه فعالیت شاخص شار رادیویی خورشیدی را در بازه زمانی ۱۰ تیر ماه تا ۹ شهریور ماه 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.

نگاره ۲ (ب) رفتار شاخص ژئومغناطیسی KP را در بازه زمانی دو ماهه از ۱۰ تیر ماه تا ۹ شهریور ماه ۱۳۹۱ نشان می‌دهد. بیشترین فعالیت این شاخص ژئومغناطیسی در بازه ۱۴ تا ۲۵ و ۴۰ تا ۶۰ روز قبل از وقوع زلزله روی داده است و

در ۲۶ روز قبل از روز زلزله به بیشترین مقدار رسیده است. نگاره ۲ (ج) تغییرات شاخص DST را در بازه زمانی مورد نظر 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. نگاره ۲ (د) تغییرات TEC را که از پردازش داده‌های ایستگاه GPS اهر (نزدیک به مرکز زلزله) بدست آمده نشان می‌دهد. بررسی نگاره (بدون انجام تجزیه و تحلیل) تغییرات غیر عادی TEC را در چند روز قبل از وقوع زلزله نشان می‌دهد.

به منظور پیاده‌سازی شبکه عصبی و الگوریتم PSO، ۴۰٪ از داده‌ها برای آموزش و ۶۰٪ برای آزمایش کردن اختصاص داده شده است. نگاره ۳ نتایج حاصل از تلفیق شبکه عصبی و PSO می‌باشد. در نگاره ۳ (الف) برای ۳۵ روز از داده‌های مورد نظر، مقدار پیش‌بینی شده حاصل از شبکه عصبی با مقادیر مشاهداتی متناظر آن از هم کم شده‌اند تا میزان انحراف کمیت پیش‌بینی شده از مقدار واقعی آن بدست آید. مقدار خطا به ازای هر یک ساعت بصورت



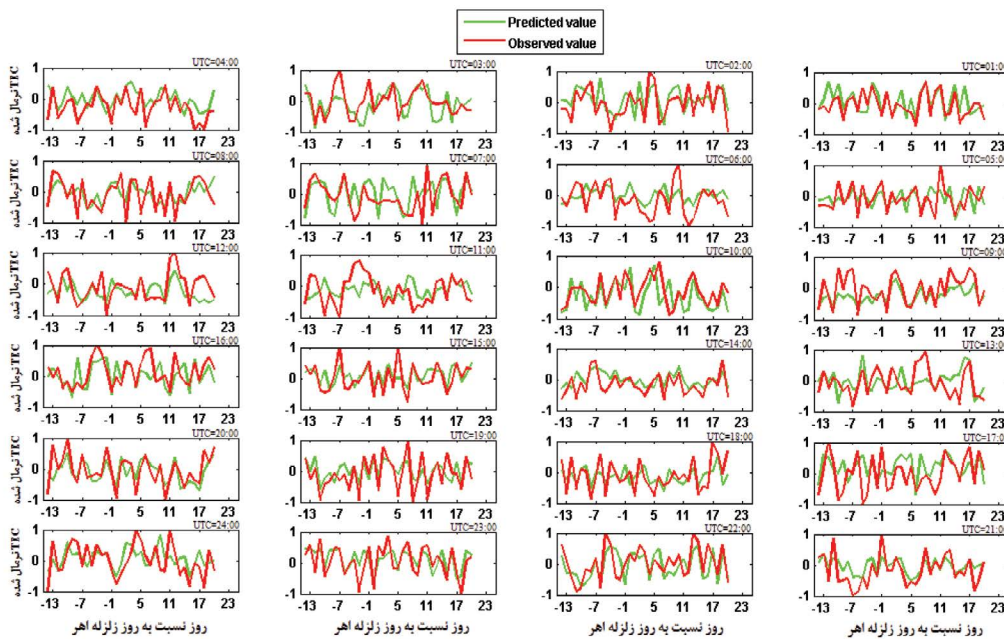
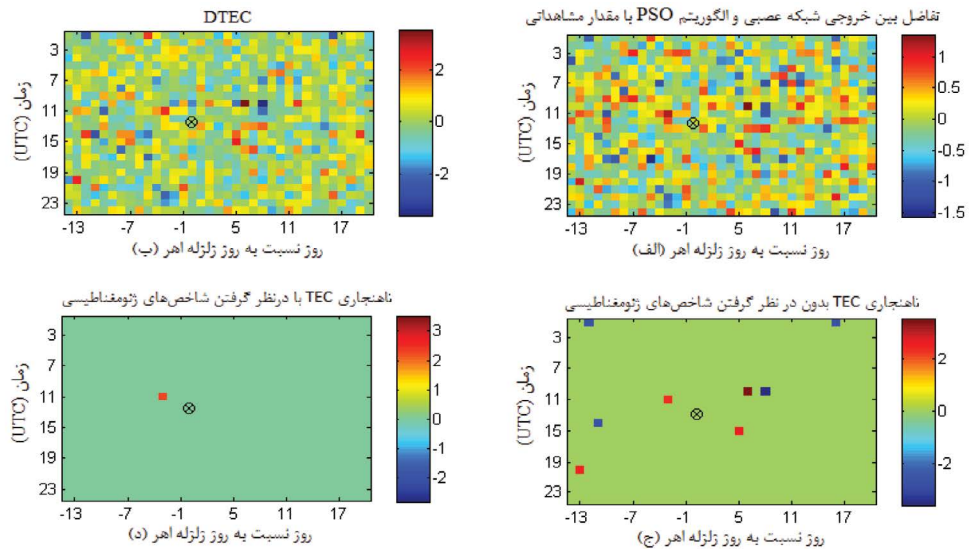
نگاره ۲- (الف) تغییرات شاخص ژئومغناطیسی F10.7، (ب) شاخص KP، (ج) شاخص DST و (د) تغییرات TEC در بازه زمانی دو ماهه

فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (ص ۱۱)
تشخیص آنامولی‌های TEC قبل از وقوع زلزله ... / ۱۱

را نشان می‌دهد. در نگاره ۳ (د) شاخص‌های ژئومغناطیسی AP، DST و F10.7 مانند یک فیلتر به خروجی قسمت (ج) اعمال می‌شود تا اثر فعالیت‌های ژئومغناطیسی از مقادیر TEC برداشته شود. در نهایت نگاره ۳ (د) پیش‌بینی ناهنجاری TEC را ۳ روز قبل از زلزله در ساعت ۱۱:۰۰ نشان می‌دهد. آنامولی قرمز رنگ نشان‌دهنده مثبت بودن آن است و به معنی افزایش در مقدار الکترون‌ها می‌باشد. شکل ۴ پیش‌بینی شبکه عصبی آموزش دیده با PSO

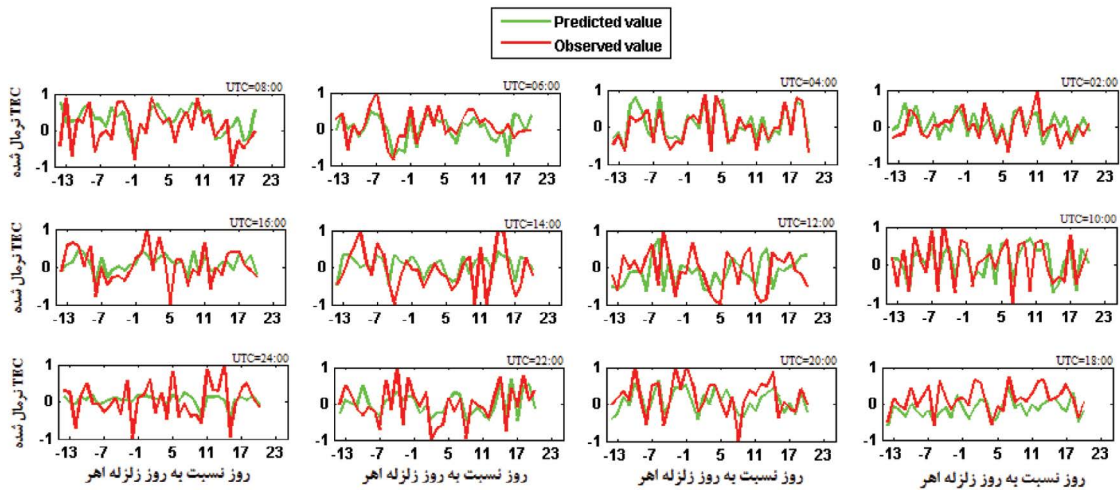
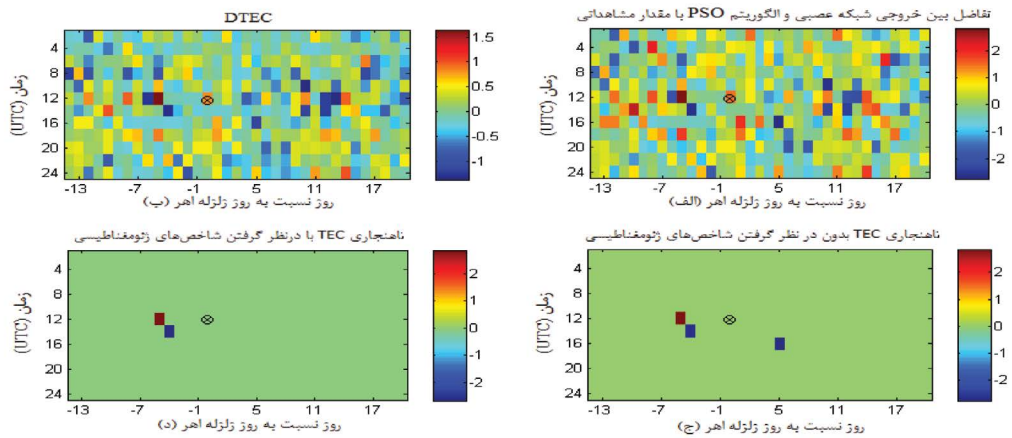
۲۴ ساعته برای داده‌ها محاسبه گردیده است. محور افقی نشان دهنده فاصله روزها از روز زلزله و محور عمودی نشان‌دهنده زمان است. نگاره ۳ (ب) مقدار x تفاضلی داده‌ها را نشان می‌دهد. این مقدار با استفاده از روابط (۶) به منظور آشکارسازی ناهنجاری محاسبه می‌گردد. در نگاره ۳ (ج) با استفاده از روش میان‌چارکی و میانه، حد آستانه‌ای بر روی خروجی قسمت (ب) اعمال می‌شود و رفتار غیرعادی TEC بدون در نظر گرفتن شاخص‌های ژئومغناطیسی

نگاره ۳- تشخیص آنامولی TEC با استفاده از شبکه عصبی با در نظر گرفتن شاخص‌های ژئومغناطیسی



نگاره ۴- پیش‌بینی شبکه عصبی آموزش دیده با PSO و مقدار واقعی داده‌های TEC، ایستگاه اهر نمودار قرمز رنگ مقادیر واقعی TEC و نمودار سبز رنگ پیش‌بینی شبکه عصبی

نگاره ۵- تشخیص
 آنامولی TEC با
 استفاده از شبکه
 عصبی با در نظر
 گرفتن شاخص‌های
 ژئومغناطیسی



نگاره ۶- پیش‌بینی شبکه عصبی آموزش دیده با PSO و مقدار واقعی داده‌های TEC حاصل از ایستگاه‌های جهانی. نمودار قرمز رنگ مقادیر واقعی TEC و نمودار سبز رنگ پیش‌بینی شبکه عصبی

۳-۱-۲- بررسی داده‌های ایستگاه‌های جهانی

نگاره ۵ نتایج حاصل از تلفیق شبکه عصبی و PSO برای داده‌های حاصل از ایستگاه‌های جهانی IGS می‌باشد. این داده‌ها برای فاصله زمانی ۲ ساعته ارائه می‌گردند. در نگاره ۵ (الف) برای ۳۵ روز از داده‌های مورد نظر، مقدار پیش‌بینی شده حاصل از شبکه عصبی با مقادیر مشاهداتی متناظر آن از هم کم شده‌اند تا میزان انحراف کمیت پیش‌بینی شده از مقدار واقعی آن بدست آید. مقدار خطا به ازای هر دو ساعت محاسبه گردیده است. محور افقی نشان دهنده فاصله روزها از روز زلزله و محور عمودی نشان‌دهنده زمان است. نگاره ۵ (ب) مقدار x تفاضلی داده‌ها را نشان می‌دهد. این مقدار

و مقدار واقعی داده‌های TEC را برای بازه‌های زمانی یک ساعته و برای داده‌های قسمت آزمایش شبکه نشان می‌دهد. محور افقی نشان‌دهنده فاصله روزها از روز زلزله و محور عمودی میزان TEC نرمال شده (بین بازه [-1,1]) است. نمودار قرمز رنگ مقادیر واقعی TEC و نمودار سبز رنگ پیش‌بینی الگوریتم می‌باشد. همان‌طور که در نگاره ملاحظه می‌گردد نتایج شبکه آموزش دیده با PSO با دقت مناسبی بر مقدار واقعی داده‌ها منطبق بوده است. در نمودار مربوط به ساعت UTC=11:00، ۳ روز قبل از وقوع زمین‌لرزه اختلاف بارزی بین مقدار واقعی و پیش‌بینی شبکه عصبی ملاحظه می‌گردد که نشان‌دهنده آنامولی مورد نظر است.

فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (ص ۱۳)
تشخیص آنامولی های TEC قبل از وقوع زلزله ... / ۱۳

مقدار واقعی و پیش بینی شبکه عصبی ملاحظه می گردد که نشان دهنده آنامولی های مورد نظر است. جدول ۱، RMSE خروجی شبکه عصبی به تنهایی و همچنین RMSE خروجی تلفیق شبکه عصبی با الگوریتم PSO را برای داده های ایستگاه زمینی اهر و داده های حاصل از ایستگاه های جهانی IGS (برای منطقه اهر) ارائه می دهد. بررسی نتایج نشان می دهد که میزان RMSE شبکه عصبی با بکارگیری الگوریتم PSO، هم برای ایستگاه زمینی و هم ایستگاه جهانی به مقدار قابل توجهی بهبود یافته است و دقت آن در پیش بینی بهتر شده است.

۲-۳ زلزله کاکلی بوشهر

۳-۲-۱ بررسی داده های ایستگاه های زمینی

نگاره ۷ تغییرات شاخص های ژئومغناطیسی را در بازه زمانی دوماهه از تاریخ ۲۱ اسفند ماه تا ۱۰ اردیبهشت ماه ۱۳۹۲ نشان می دهد. با توجه به نگاره ۷ (الف) شاخص F10.7، ۵ روز قبل از زلزله و ۳ تا روز بعد از زلزله فعالیت

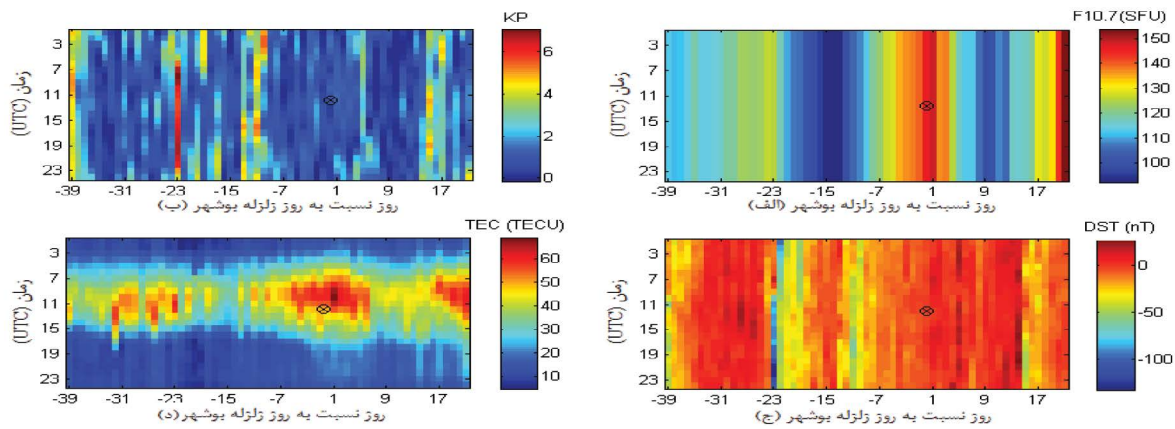
با استفاده از روابط (۶) به منظور آشکارسازی ناهنجاری محاسبه می گردد. نگاره ۵ (ج) نمایانگر رفتار غیرعادی TEC بدون در نظر گرفتن شاخص های ژئومغناطیسی است. ۵ روز بعد از زلزله آنامولی منفی (کاهش مقدار الکترون ها) در ساعت ۱۶:۰۰ ملاحظه می گردد و در نگاره ۵ (د) با اعمال اثر شاخص های ژئومغناطیسی حذف گردیده است که این موضوع بیانگر این است که این آنامولی مربوط به زمین لرزه نبوده است. نگاره ۵ (د) پیش بینی ناهنجاری TEC را ۴ روز قبل از زلزله در ساعت ۱۴:۰۰ (آنامولی منفی) و ۵ روز قبل از آن در ساعت ۱۲:۰۰ (آنامولی مثبت) نشان می دهد.

نگاره ۶ پیش بینی شبکه عصبی آموزش دیده با PSO و مقدار واقعی داده های TEC برای بازه های زمانی دو ساعته می باشد. همان طور که ملاحظه می گردد نتایج شبکه آموزش دیده با PSO با دقت مناسبی بر مقدار واقعی داده ها منطبق بوده است.

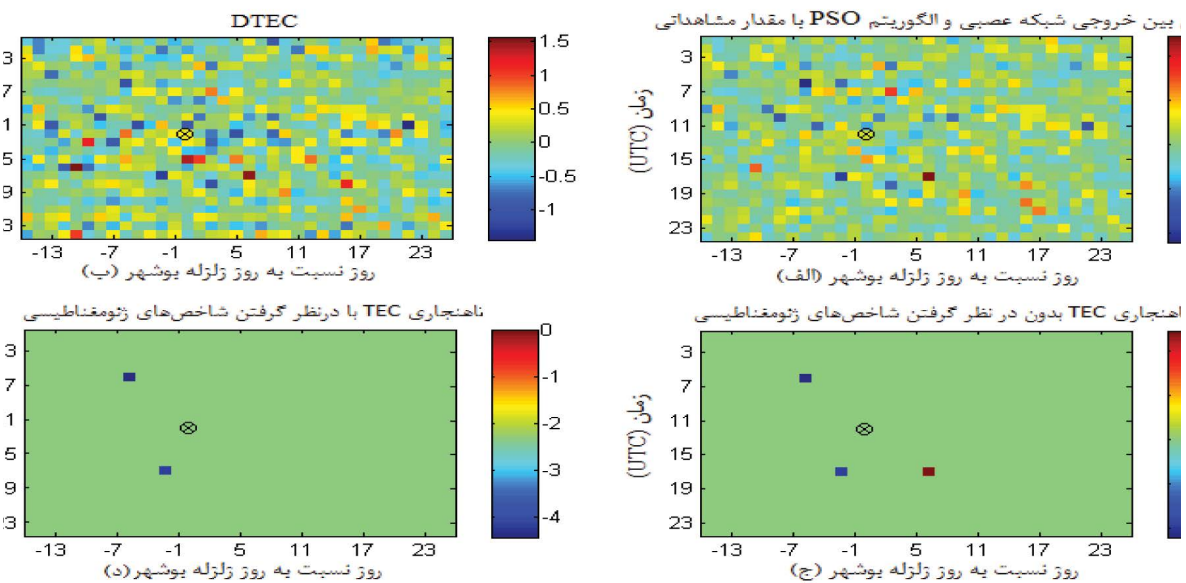
در نمودار مربوط به ساعت UTC=12:00 و UTC=14 به ترتیب ۵ و ۴ روز قبل از وقوع زمین لرزه اختلاف بارزی بین

جدول ۱ - RMSE خروجی شبکه عصبی به تنهایی و RMSE تلفیق شبکه عصبی با الگوریتم PSO - زلزله اهر

زمان (ساعت)	RMSE حاصل از شبکه عصبی		RMSE حاصل از شبکه عصبی و PSO	
	ایستگاه زمینی اهر	ایستگاه جهانی	ایستگاه زمینی اهر	ایستگاه جهانی
01:00	1.670	0.352	-	-
02:00	2.012	0.391	2.086	0.322
03:00	4.168	0.425	-	-
04:00	9.034	0.447	1.610	0.232
05:00	6.781	0.383	-	-
06:00	5.153	0.443	3.373	0.349
07:00	6.354	0.534	-	-
08:00	6.153	0.407	3.947	0.510
09:00	6.434	0.382	-	-
10:00	5.582	0.472	3.546	0.419
11:10	14.424	0.476	-	-
12:00	6.167	0.416	4.700	0.653
13:00	5.891	0.435	-	-
14:00	4.705	0.309	6.105	0.506
15:00	4.392	0.330	-	-
16:00	3.631	0.393	4.074	0.364
17:00	5.410	0.558	-	-
18:00	3.953	0.407	4.236	0.395
19:00	1.627	0.390	-	-
20:00	2.831	0.363	2.287	0.356
21:00	2.479	0.386	-	-
22:00	3.385	0.417	3.045	0.387
23:00	2.502	0.354	-	-
24:00	2.034	0.465	2.187	0.420



نگاره ۷- (الف) تغییرات شاخص ژئومغناطیسی F10.7، (ب) شاخص KP، (ج) شاخص DST و تغییرات TEC در بازه دو ماهه برای ایستگاه شیراز (د)



نگاره ۸- تشخیص آنامولی TEC با استفاده از شبکه عصبی با در نظر گرفتن شاخص‌های ژئومغناطیسی

داده‌های پردازش شده ایستگاه دائمی GPS شیراز در نگاره ۷ (د) بدون آنالیز و بدون اعمال اثر شاخص‌های ژئومغناطیسی، نشان می‌دهد که میزان TEC از ۷ روز قبل از وقوع زلزله تا ۶ روز بعد از وقوع آن رفتاری غیر عادی داشته است.

به منظور پیاده‌سازی شبکه عصبی مصنوعی ۴۰٪ از داده‌ها برای آموزش و ۶۰٪ برای آزمایش اختصاص داده شده است. در نگاره ۸ (الف) برای ۳۵ روز از داده‌های

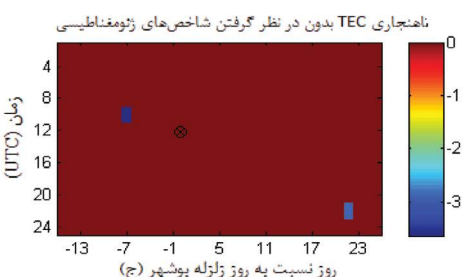
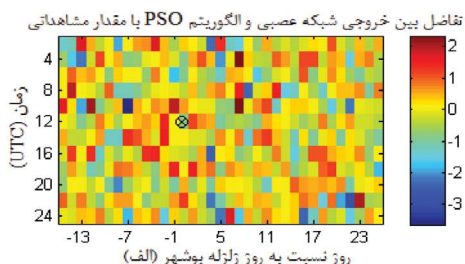
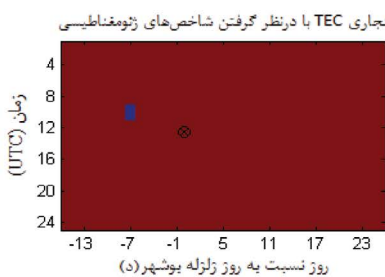
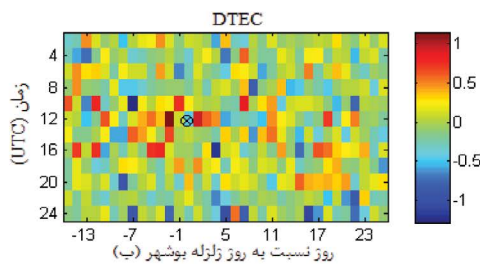
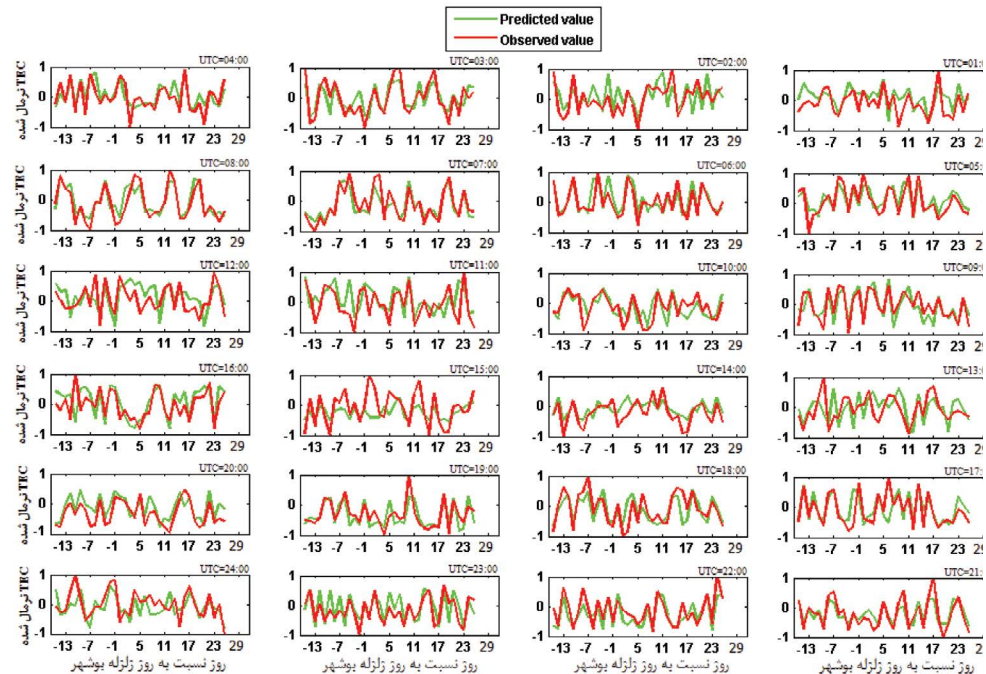
غیرعادی داشته است. به همین منظور باید اثر این شاخص مورد بررسی قرار گیرد تا نتایج حاصل از تغییرات TEC ناشی از اثر این پارامتر نباشد. شاخص KP در نگاره ۷ (ب) و شاخص DST در نگاره ۷ (ج) در بازه زمانی ۹ روز قبل از زلزله تا ۱۴ روز بعد از آن رفتاری عادی داشته‌اند و می‌توان نتیجه گرفت که تغییرات مشاهده شده در میزان TEC در محدوده زمانی نزدیک به زلزله تحت تأثیر این دو شاخص نبوده است.

فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (سپهر)
 تشخیص آنامولی های TEC قبل از وقوع زلزله ... / ۱۵

از محدوده تعریف شده حذف گردند. در نگاره ۸ (د) شاخص های ژئومغناطیسی AP، DST و F10.7 به خروجی قسمت (ج) اعمال می شود تا اثر فعالیت های ژئومغناطیسی از مقادیر TEC برداشته شود. نتایج حاصل در نگاره ۸ (د) آنامولی ۲ روز قبل از زلزله در ساعت ۱۷:۰۰ و ۶ روز قبل از آن در ساعت ۰۶:۰۰ نمایان است. هر دو آنامولی اتفاق افتاده از نوع منفی می باشند. نگاره ۹ پیش بینی شبکه عصبی آموزش دیده با PSO و مقدار واقعی TEC را برای

مورد نظر، تفاضل خروجی شبکه عصبی و الگوریتم PSO با مقدار مشاهداتی نشان داده شده است. محور افقی نشان دهنده فاصله روزها از روز زلزله و محور عمودی نشان دهنده زمان است. نگاره ۸ (ب) مقدار x تفاضلی داده ها را نشان می دهد. این مقدار با استفاده از روابط (۶) به منظور آشکارسازی ناهنجاری محاسبه می گردد. در نگاره ۸ (ج) با استفاده از روش میان چارکی و میانه، حد آستانه ای بر روی خروجی قسمت (ب) اعمال می شود تا مقادیر خارج

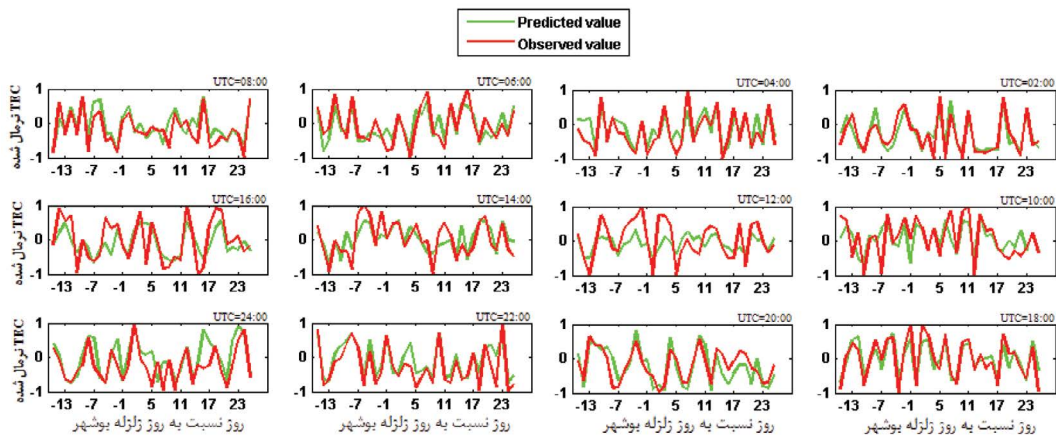
نگاره ۹ - پیش بینی شبکه عصبی آموزش دیده با PSO و مقدار واقعی داده های TEC حاصل از ایستگاه زمینی شیراز. نمودار قرمز رنگ مقادیر واقعی TEC و نمودار سبز رنگ پیش بینی شبکه عصبی



نگاره ۱۰ - تشخیص آنامولی TEC با استفاده از شبکه عصبی با در نظر گرفتن شاخص های ژئومغناطیسی

بازه‌های زمانی یک ساعته نشان می‌دهد. در نمودار مربوط به ساعت‌های UTC=17:00 و UTC=06:00 به ترتیب ۶ و ۲ روز قبل از وقوع زمین‌لرزه اختلاف بارزی بین مقدار واقعی و پیش‌بینی شبکه عصبی ملاحظه می‌گردد که نشان‌دهنده آنامولی‌های مورد نظر است.

۲-۲-۳ بررسی داده‌های ایستگاه‌های جهانی
 شکل ۱۰ نتایج حاصل از تحلیل و آنالیز داده‌های ایستگاه‌های IGS و پیاده‌سازی شبکه عصبی و الگوریتم PSO بر روی آن می‌باشد. محور افقی نشان‌دهنده فاصله روزها از روز زلزله و محور عمودی نشان‌دهنده زمان است. در نگاره



نگاره ۱۱- پیش‌بینی شبکه عصبی آموزش دیده با PSO و مقدار واقعی داده‌های TEC حاصل از ایستگاه‌های جهانی. نمودار قرمز رنگ مقادیر واقعی TEC و نمودار سبز رنگ پیش‌بینی شبکه عصبی

جدول ۲ - RMSE خروجی شبکه عصبی به تنهایی و RMSE تلفیق شبکه عصبی با الگوریتم PSO - زلزله کاکای بوشهر

زمان(ساعت)	RMSE حاصل از شبکه عصبی	RMSE حاصل از تلفیق شبکه عصبی و PSO - ایستگاه زمینی	RMSE حاصل از شبکه عصبی	RMSE حاصل از تلفیق شبکه عصبی و PSO - ایستگاه جهانی
	ایستگاه زمینی		ایستگاه جهانی	
01:00	3.890	0.368	-	-
02:00	3.058	0.381	1.158	0.243
03:00	2.936	0.327	-	-
04:00	3.281	0.300	3.511	0.294
05:00	4.632	0.249	-	-
06:00	3.442	0.261	3.843	0.285
07:00	4.320	0.258	-	-
08:00	6.743	0.264	5.141	0.296
09:00	6.121	0.277	-	-
10:00	10.322	0.348	8.599	0.425
11:10	7.548	0.482	-	-
12:00	8.135	0.454	8.672	0.444
13:00	8.347	0.440	-	-
14:00	7.348	0.302	7.997	0.340
15:00	6.541	0.463	-	-
16:00	6.969	0.432	7.546	0.430
17:00	3.894	0.393	-	-
18:00	3.868	0.361	2.659	0.244
19:00	5.617	0.266	-	-
20:00	2.984	0.304	3.902	0.312
21:00	3.219	0.247	-	-
22:00	3.145	0.301	2.188	0.290
23:00	2.060	0.347	-	-
24:00	2.643	0.383	2.153	0.428

الگوریتم شبکه عصبی و بهینه سازی توده ذرات نتایج خوبی را در آشکارسازی ناهنجاری TEC از خود ارائه داده‌اند.

منابع و مأخذ

۱- المدرسی، تابان، عبدی؛ سیدمحمدتقی، محمدرضا، جواد. (۱۳۸۳). «استفاده از شبکه عصبی در افزایش دقت گیرنده‌های GPS تک فرکانسه پس از حذف اثر SA». نهمین

کنفرانس شبکه‌های توزیع نیروی برق

۲- صادقی، فرهاد. (۱۳۸۶). «مدل‌سازی اثر یونسفر با استفاده از آنالیز مشاهدات دوفرکانسه شبکه‌های دائمی GPS و کاربرد آن در علوم مهندسی و فیزیک». اولین همایش پیش‌نشانگرهای زلزله

۳- عبدی، نانکلی؛ ناصر، حمیدرضا. (۱۳۹۳). «بررسی تغییرات زمانی و مکانی TEC در ایران با استفاده از مشاهدات GPS». نشریه علمی پژوهشی علوم و فنون نقشه‌برداری، ص.

۱۱۳-۱۲۱

۴- کاشفی کویانی، پورموسوی کانی؛ علی، علی. (۱۳۸۶). «آموزش شبکه عصبی چندلایه با به‌کارگیری الگوریتم PSO». اولین کنگره مشترک سیستم‌های فازی و سیستم‌های هوشمند

5-Akhoondzadeh, M.(2013).A MLP neural network as an investigator of TEC time series to detectseismo-ionospheric anomalies. *Advances in Space Research* 51, 2048-2057.

6- Akhoondzadeh ,M. (2013). An Adaptive Network-based Fuzzy Inference System for thedetection of thermal and TEC anomalies around the time of the Varzeghan, Iran, (Mw = 6.4) earthquake of 11 August 2012. *Advances in Space Research* 52,837-852.

7- Akhoondzadeh, M.(2013).Genetic algorithm for TEC seismo-ionospheric anomalies detection around the time of the Solomon (Mw=8.0) earthquake of 06 February 2013. *Advances in Space Research* 52,581-590.

8- Akhoondzadeh, M. (2012). Anomalous TEC variations associated with the powerful Tohoku earthquake of 11 March 2011. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*12, 1453-1462

9- Akhoondzadeh, M.(2013).Support vector machine

۱۰(الف) برای ۳۵ روز از داده‌های مورد نظر، تفاضل مقدار پیش‌بینی شده حاصل از شبکه عصبی با مقادیر مشاهداتی به ازای هر دو ساعت نشان داده شده است. نگاره ۱۰ (ب) مقدار x تفاضلی داده‌ها را نشان می‌دهد که از روابط (۶) حاصل شده است. در نگاره ۱۰(ج) با استفاده از روابط (۶)، حد آستانه‌ای بر روی خروجی قسمت (ب) اعمال می‌شود (بدون در نظر گرفتن اثر شاخص‌های ژئومغناطیسی) و در نهایت اثر شاخص‌ها اعمال می‌گردد و نتایج آن در نگاره ۱۰(د) پیش‌بینی ناهنجاری TEC را ۷ روز قبل از زلزله در ساعت ۱۰:۰۰ نشان می‌دهد.

نگاره ۱۱ پیش‌بینی شبکه عصبی آموزش دیده با PSO و مقدار واقعی داده‌های TEC را برای بازه‌های زمانی دو ساعته نشان می‌دهد. در نمودار مربوط به ساعت UTC=10:00، ۷ روز قبل از وقوع زمین‌لرزه اختلاف بسیار باری بین مقدار واقعی و پیش‌بینی شبکه عصبی ملاحظه می‌گردد که نشان‌دهنده آنامولی‌های از نوع منفی است.

جدول ۲، RMSE خروجی شبکه عصبی به تنهایی و همچنین RMSE خروجی تلفیق شبکه عصبی با الگوریتم PSO را برای داده‌های ایستگاه زمینی شیراز و داده‌های حاصل از ایستگاه‌های جهانی IGS (برای منطقه شیراز) ارائه می‌دهد. بررسی نتایج نشان می‌دهد که میزان RMSE شبکه عصبی با بکارگیری الگوریتم PSO، هم برای ایستگاه زمینی و هم ایستگاه جهانی به مقدار قابل توجهی بهبود یافته است و دقت آن در پیش‌بینی بهتر شده است.

۴- نتیجه‌گیری

تشخیص رفتارهای غیرعادی TEC قبل از وقوع زلزله از اهمیت زیادی به عنوان پیش‌نشانگر زلزله برخوردار است. نرم افزار Bernese نتایج خوبی از پردازش داده‌های GPS در محاسبه محتوای الکترون‌های لایه یونسفر ارائه می‌نماید که تحلیل خروجی آن همبستگی بالایی با داده‌های ایستگاه‌های جهانی دارد. در این مقاله سعی بر این بوده است که روشی هوشمند و کارا برای این منظور استفاده گردد که از این میان

- World Academy of Science, Engineering and Technology 59 .
- 19- Meza, A. Brunini, C. Kleusberg, A. (2000). Global ionospheric models in three dimensions from GPS measurements: Numerical simulation. *Geofísica Internacional* .39, 21-27.
- 20- naggar, Aly M El. (2013). Artificial neural network as a model for ionospheric TEC map to serve the single frequency receiver. *Alexandria Engineering Journal* 52, 425-432.
- 21- Saroso, S . Liu, L. Hattori, K . Chen, C .(2008). Ionospheric GPS TEC Anomalies and $M > 5.9$ Earthquakes in Indonesia during 1993 - 2002. *Terr. Atmos. Ocean. Sci.* 19, 481-488.
- 22- Seradjian, M R Akhoondzadeh, M.(2010). 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.
- 23- Telbany, Mohammed El, Karmi, Fawwaz El.(2007). Short-term forecasting of Jordanian electricity demand using particle swarm optimization. *Electric Power Systems Research* 78, 425-433.
- 24- Xia, C. Yang, S. Xu, G. Zhao, B. Yu, T.(2011). Ionospheric Anomalies Observed by GPS TEC Prior to the Qinghai-Tibet Region Earthquakes. *Terr. Atmos. Ocean. Sci.* 22, 177-185.
- 25- Yao, Y B. Chen, P. Zhang, S. Chen, J. Yan, F. Peng, W F.(2012). Analysis of pre-earthquake ionospheric anomalies before the global $M = 7.0+$ earthquakes in 2010". *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 12, 575-585.
- 26- Zhao, L .Yang, Y .(2009). PSO-based single multiplicative neuron model for time series prediction. *Expert Systems with Applications* 36, 2805-2812.
- for TEC seismo-ionospheric anomalies detection. *Ann. Geophys.* 31, 173-186 .
- 10- Akhoondzadeh, M.(2013). 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.
- 11- Akhoondzadeh, M.(2013). A comparison of classical and intelligent methods to detect potential thermal anomalies before the 11 August 2012 Varzeghan, Iran, earthquake ($M_w = 6.4$). *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 13, 1077-1083.
- 12- Akhoondzadeh, M. Saradjian, M R.(2010). TEC variations analysis concerning Haiti (January 12, 2010) and Samoa (September 29, 2009) earthquakes. *Advances in Space Research* 47, 94-104.
- 13- Akhoondzadeh, M. Parrot, M. Saradjian, M R. (2010). Electron and ion density variations before strong earthquakes ($M > 6.0$) using DEMETER and GPS data". *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 10, 7-18.
- 14- Akhoondzadeh, M. Parrott, M. Saradjian, M R. (2010). Investigation of VLF and HF waves showing seismo-ionospheric anomalies induced by the 29 September 2009 Samoa earthquake ($M_w = 8.1$). *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 10, 1061-1067.
- 15- Da Costa, A, Vilas Boas, J. Da Fonseca Junior, E. (2004). GPS Total Electron Content measurements at low latitudes in Brazil for low solar activity. *Geofísica Internacional* 43, 129-137.
- 16- Garner, T W. Gaussiran, T L.. Tolman, B W. Harris, R B. Calfas, R S. Gallagher, H. (2008) . Total electron content measurements in ionospheric physics. *Advances in Space Research* 42, 720-726 .
- 17- Mahnam, M. .Fatemi Ghomi, S.M.T .(2012). A Particle Swarm Optimization Algorithm for Forecasting Based on Time Variant fuzzy Time Series. *International Journal of Industrial Engineering & Production Research* 23, 269-276 .
- 18- Mann, M. Lognonne, P, Rolland, L.(2011) Ionospheric TEC Calculation from GPS Data and a Non-linear Frequency-Domain Approach for Approximation and Spectral Representation of Ionospheric Perturbances.