

## استفاده از روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی (PCA) در سیستم استنتاج فازی (FIS) جهت مدل‌سازی سری زمانی یونوسفر

میررضا غفاری رزین\*

استادیار، گروه مهندسی نقشه‌برداری، دانشکده مهندسی علوم زمین، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران

(دریافت: ۹۸/۱۱/۱، پذیرش نهایی: ۹۹/۱۱/۵)

### چکیده

در این مقاله از ترکیب روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی (PCA) و همچنین سیستم استنتاج فازی (FIS) جهت مدل‌سازی سری زمانی تغییرات محتوای الکترون کلی (TEC) یونوسفر در منطقه ایران استفاده شده است. نوآوری مقاله در این است که مشاهدات قبل از ورود به الگوریتم فازی، با استفاده از PCA به مؤلفه‌های اصلی تجزیه شده و تنها چند مؤلفه اصلی اول به‌عنوان ورودی و جهت آموزش الگوریتم استفاده می‌شوند. حسن این کار در کاهش محاسبات ریاضی انجام گرفته، افزایش سرعت محاسبات و همچنین کاهش زمان همگرایی به جواب بهینه است. مشاهدات مربوط به ایستگاه GPS تهران که یکی از ایستگاه‌های شبکه جهانی IGS است برای سال ۲۰۱۶ مورد استفاده قرار گرفته است. از شاخص‌های آماری  $dVTEC = |VTEC_{GPS} - VTEC_{model}|$  ضریب همبستگی و همچنین جذر خطای مربعی میانگین (RMSE) جهت ارزیابی روش جدید استفاده شده است. ارزیابی‌های آماری صورت گرفته در مورد شاخص  $dVTEC$  نشان می‌دهد که برای مدل ترکیبی PCA-FIS، این شاخص نسبت به حالت مدل FIS بدون PCA، مدل تجربی NeQuick و همچنین خروجی‌های شبکه جهانی IGS (GIM-TEC) مقدار عددی کمتری را دارد. ضریب همبستگی مرحله آزمون برای مدل‌های PCA-FIS، GIM و NeQuick به ترتیب برابر با ۰/۸۹۰، ۰/۷۰۴ و ۰/۶۹۷ به دست آمده است. همچنین مقدار RMSE مرحله آزمون برای مدل‌های PCA-FIS، GIM و NeQuick به ترتیب برابر با ۸/۸۸، ۶/۱۱ و ۶/۹۷ TECU حاصل شده است. با استفاده از ترکیب PCA و شبکه فازی سرعت همگرایی به جواب بهینه از ۲۰۵ ثانیه به ۱۵۹ ثانیه کاهش یافته است. آنالیز مؤلفه‌های  $x$ ،  $y$  و  $z$  در تعیین موقعیت نقطه‌ای دقیق (PPP) نیز حاکی از بهبود ۵ الی ۱۰ میلی‌متر نسبت به مدل GIM و مدل تجربی NeQuick می‌باشد. نتایج حاصل از این مقاله نشان می‌دهد که روش PCA-FIS یک روش با دقت، صحت و سرعت بالا جهت مدل‌سازی سری زمانی تغییرات TEC در منطقه ایران است.

واژه‌های کلیدی: یونوسفر، شبکه فازی، تجزیه به مؤلفه‌های اصلی، GPS.

### ۱. مقدمه

یونوسفر لایه‌ای از جو زمین است که از ارتفاع تقریبی ۱۰۰ تا ارتفاع بیش از ۱۰۰۰ کیلومتر گسترش یافته است. این لایه از جو به دلیل اثرات مهمی که بر روی سیگنال‌های عبوری از آن دارد، هنوز هم مورد علاقه دانشمندان و محققان عرصه ژئودزی و علوم فضایی است. پارامتری که معمولاً با استفاده از آن لایه یونوسفر مورد بررسی قرار می‌گیرد مقدار محتوای الکترون کلی (TEC) است. در حقیقت TEC تعداد کل الکترون‌های آزاد در مسیر مابین ماهواره تا گیرنده در ستونی به مساحت ضلع یک متر مربع است. واحد اندازه‌گیری TEC، TECU بوده و یک TECU معادل  $10^{16}$   $(\text{ele}/\text{m}^2)$  می‌باشد. این کمیت را می‌توان از روی اندازه‌گیری‌های فاز و کد به دست آمده از

سیستم تعیین موقعیت جهانی به دست آورد (سیبر، ۲۰۰۳). تاکنون روش‌های مختلف و متفاوتی جهت مدل‌سازی مقدار TEC با استفاده از مشاهدات گیرنده‌های ماهواره‌ای ارائه شده است. این روش‌ها و مدل‌ها را می‌توان به صورت مدل‌های دوبعدی، سه‌بعدی و سه‌بعدی همراه با در نظر گرفتن پارامتر زمان دسته‌بندی کرد. در نوع دیگری از طبقه‌بندی می‌توان این مدل‌ها را به دو دسته مدل‌های تجربی و مدل‌های ریاضی دسته‌بندی کرد (لیو، ۲۰۰۴). از جمله مدل‌های دوبعدی می‌توان به مدل‌های شبکه‌ای، مدل غیر شبکه‌ای و مدل انتشاری اشاره کرد (گائو و همکاران، ۲۰۰۲؛ کومجاتی و لانگلی، ۱۹۹۶). همچنین از مدل‌های سه‌بعدی می‌توان مدل‌های توموگرافی با توابع پایه، مدل

اطلاعات کم اهمیت حذف می‌شوند. اولین مؤلفه اساسی استخراج شده، بیشترین مقدار پراکندگی داده‌ها را در کل مجموعه در نظر می‌گیرد. این امر به آن معنی است که اولین مؤلفه، حداقل با تعدادی از متغیرها همبسته است. دومین مؤلفه استخراج شده دو ویژگی مهم دارد، اول اینکه این مؤلفه بیشترین مجموعه داده‌ها که توسط مؤلفه اول محاسبه نشده است را در نظر می‌گیرد و دوم اینکه با مؤلفه اول همبستگی ندارد (تالات و ژو، ۲۰۱۶). در زمینه استفاده از روش PCA جهت مدل‌سازی زمانی و مکانی یونوسفر و همچنین کشف فرکانس‌های مختلف موجود در آن تحقیقاتی صورت گرفته است (لین، ۲۰۱۲؛ تالات و ژو، ۲۰۱۶؛ ناتالی و مزا، ۲۰۱۷؛ آلکن و همکاران، ۲۰۱۷). تمرکز اصلی این تحقیقات بر استفاده از قابلیت روش PCA در کشف آنومالی‌های موجود در یونوسفر و همچنین مدل‌سازی تغییرات مکانی مقدار TEC بوده است.

با توجه به تنوع بسیار زیاد در بحث الگوریتم‌های هوشمند و همچنین وجود الگوریتم‌های آموزش با سرعت عمل و صحت و دقت بالا، هدف اصلی و اساسی این مقاله مدل‌سازی سری زمانی محتوای الکترون کلی یونوسفر در منطقه ایران با استفاده از ترکیب مدل استنتاج فازی (FIS) و روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی است. نوآوری این مقاله استفاده از روش PCA در داده‌های ورودی به الگوریتم FIS است. براین اساس فرکانس‌های اصلی در رفتار یونوسفر در بازه زمانی سال ۲۰۱۶ مورد بررسی قرار گرفته و این اطلاعات بر اساس PCA به صورت مرحله به مرحله وارد الگوریتم FIS می‌شوند. ارزیابی‌های مختلف و متفاوتی جهت بررسی دقت و صحت مدل پیشنهادی این مقاله صورت گرفته است. شاخص‌های آماری و همچنین جذر خطای مربعی میانگین (RMSE) جهت ارزیابی روش جدید استفاده شده است. همچنین نتایج مدل جدید با نتایج مدل‌های NeQuick و خروجی‌های شبکه جهانی IGS (GIM-TEC) مقایسه می‌شوند.

توموگرافی المان‌های حجمی و مدل‌های ترکیبی را در نظر گرفت (شریفی و فرزانه، ۲۰۱۵؛ عامریان و همکاران، ۲۰۱۰؛ آستین و همکاران، ۱۹۸۸؛ آندروا و همکاران، ۱۹۹۰). در زمینه مدل‌سازی و پیش‌بینی تغییرات زمانی و مکانی مقدار TEC تحقیقات گسترده‌ای در جهان و ایران صورت گرفته و مدل‌های متنوعی ارائه شده است. از جمله این مدل‌ها می‌توان به مدل‌های چندجمله‌ای، کریجینگ، مدل ARMA، مدل هارمونیک‌های کروی، مدل هارمونیک‌های کلاه کروی، مدل اسپیلاین و مدل اسلپین اشاره کرد (لیو و گائو، ۲۰۰۳؛ انصاری و همکاران، ۲۰۱۷؛ عامریان و همکاران، ۲۰۱۳a؛ شریفی و فرزانه، ۲۰۱۴؛ اعتمادفرد و حسینعلی، ۲۰۱۶؛ عبدی و همکاران، ۲۰۱۹). هر کدام از این مدل‌ها دارای معایب و مزایایی هستند. در سالیان اخیر دسته دیگری از مدل‌های یونوسفری با استفاده از الگوریتم‌های هوشمند محاسباتی همانند شبکه‌های عصبی مصنوعی و منطق فازی همراه با الگوریتم‌های آموزش مختلف ارائه شده که نسبت به مدل‌های ریاضی قبل، از سرعت محاسباتی و دقت بیشتری برخوردار بوده‌اند (رودریگو، ۲۰۰۷؛ غفاری رزین و همکاران، ۲۰۱۵؛ غفاری رزین و وثوقی، ۲۰۱۶؛ هیروکا و همکاران، ۲۰۱۱؛ هابارولما و همکاران، ۲۰۰۹؛ آخوندزاده، ۲۰۱۴؛ سبزه‌ای و همکاران، ۲۰۱۸؛ فیضی و همکاران، ۲۰۱۹؛ ۲۰۲۰).

تکنیک آماری تجزیه به مؤلفه‌های اصلی (PCA) روشی آماری است که غالباً برای بررسی گروهی از متغیرهای همبسته به کار می‌رود. مهم‌ترین کاربردهای این روش را می‌توان در تجزیه و تحلیل نماگرهای چندگانه، اندازه‌گیری و شناخت ساختارهای پیچیده، شاخص‌سازی و کاهش ابعاد داده‌ها جستجو کرد. این روش مخصوصاً در شرایطی که ابعاد داده‌ها و ترکیب ساختار آنها کاملاً مشخص نیست، بسیار مفید می‌باشد (آلکن و همکاران، ۲۰۱۷). در واقع PCA روشی از آنالیزهای چند متغیره آماری است که تعداد کمتری از عوامل را بنام مؤلفه‌های اصلی از میان عوامل اولیه گزینش می‌کند، به طوری که تعدادی از

$$L_{2,r}^s = \lambda_2 \phi_{2,r}^s = \rho_r^s + c(\delta t_r - \delta t^s) + c(T_{L_2}^s + T_{L_{2,r}}) + \lambda_2 N_2^s + \delta_{trop} + \delta_{ion,2} + \delta_{rel} + \delta_{tide} + \delta_{mul} \quad (4)$$

در روابط فوق  $P_1$  و  $P_2$  مشاهده شبه‌فاصله روی موج  $L_1$  و  $L_2$ ،  $\phi_1$  و  $\phi_2$  فاز موج حامل  $L_1$  و  $L_2$ ،  $\delta t_r$ ،  $\delta t^s$  خطای ساعت گیرنده،  $c$  سرعت نور،  $\delta t^s$  خطای ساعت ماهواره،  $\tau_{L_1}^s$  و  $\tau_{L_2}^s$  بایاس سخت‌افزاری وابسته به فرکانس ماهواره بر روی موج  $L_1$  و  $L_2$  برای مشاهده کد،  $T_{L_1}^s$  و  $T_{L_2}^s$  بایاس سخت‌افزاری وابسته به فرکانس ماهواره بر روی موج  $L_1$  و  $L_2$  برای مشاهده فاز،  $\tau_{L_{1,r}}$  و  $\tau_{L_{2,r}}$  بایاس سخت‌افزاری وابسته به فرکانس گیرنده بر روی موج  $L_1$  و  $L_2$  برای مشاهده کد،  $T_{L_{1,r}}$  و  $T_{L_{2,r}}$  بایاس سخت‌افزاری وابسته به فرکانس گیرنده بر روی موج  $L_1$  و  $L_2$  برای مشاهده فاز،  $\delta_{trop}$  تأخیر تروپوسفری،  $\delta_{tide}$  تأخیر ناشی از بارگذاری حاصل از جزرومد،  $\delta_{rel}$  تأخیر ناشی از خطای نسبی،  $\delta_{mul}$  تأخیر ناشی از چندمسیری،  $N_1^s$  و  $N_2^s$  پارامتر مجهول ابهام فاز برای موج  $L_1$  و  $L_2$  با ماهواره  $s$  و  $\delta_{ion,1}$  و  $\delta_{ion,2}$  تأخیر یونوسفری بر روی موج  $L_1$  و  $L_2$  می‌باشند. تأخیر یونوسفری با عکس مجذور فرکانس موج رابطه مستقیم دارد و از این طریق تأخیر یونوسفری بر روی موج  $L_2$  می‌تواند برحسب تأخیر یونوسفری بر روی موج  $L_1$  نوشته شود. بدین ترتیب با تفاضل مشاهدات در طول موج  $L_2$  از مشاهدات طول موج  $L_1$  می‌توان به ترکیب عاری از هندسه برای مشاهده کد و فاز دست یافت. در نتیجه خواهیم داشت:

$$P_{4,r}^s = 40.3 \left( \frac{f_2^2 - f_1^2}{f_1^2 f_2^2} \right) STEC_r^s + c(\tau_{L_1}^s - \tau_{L_2}^s + \tau_{L_{1,r}} - \tau_{L_{2,r}}) \quad (5)$$

$$L_{4,r}^s = -40.3 \left( \frac{f_2^2 - f_1^2}{f_1^2 f_2^2} \right) STEC_r^s + c(T_{L_1}^s - T_{L_2}^s + T_{L_{1,r}} - T_{L_{2,r}}) + \lambda_1 N_1 + \lambda_2 N_2$$

## ۲. الگوریتم محاسبه مشاهدات TEC به‌عنوان خروجی شبکه فازی

سیگنال‌های سامانه تعیین موقعیت جهانی (GPS) دو مشاهده اصلی تحت‌عنوان شبه‌فاصله و فاز موج حامل را در اختیار می‌گذارند. واحد شبه‌فاصله به متر است که فاصله میان گیرنده تا ماهواره را اندازه‌گیری کرده است. به جهت متأثر بودن این مشاهده از بسیاری از منابع خطا، این مشاهده با نام شبه‌فاصله شناخته می‌شود. مشاهده فاز موج حامل بر حسب سیکل اندازه‌گیری شده و از آنجایی که نسبت به مشاهده شبه‌فاصله از طول موج کوتاه‌تری برخوردار است، با دقت یک صدم سیکل قابل اندازه‌گیری می‌باشد. گیرنده GPS فاز موج حامل را اندازه‌گیری می‌کند اما تعداد سیکل‌های کامل طی شده توسط موج که به پارامتر ابهام فاز معروف است مجهول بوده، قابل اندازه‌گیری نیست. ابهام فاز با تشکیل ترکیب تفاضلی دو گانه مشاهدات و استفاده از روش‌های پردازش مختلف نظیر ترکیب ملبورن-ووبنا، ترکیب طول موج بلند و به‌کارگیری مدل‌های یونوسفری جهانی نظیر GIM می‌تواند تعیین شود. معادله مشاهده شبه‌فاصله و فاز موج حامل برای گیرنده  $r$  و ماهواره  $s$  در دو طول موج  $L_1$  و  $L_2$  به ترتیب به‌صورت روابط زیر نوشته می‌شوند (سیر، ۲۰۰۳):

$$P_{1,r}^s = \rho_r^s + c(\delta t_r - \delta t^s) + c(\tau_{L_1}^s + \tau_{L_{1,r}}) + \delta_{trop} + \delta_{ion,1} + \delta_{rel} + \delta_{tide} + \delta_{mul} \quad (1)$$

$$P_{2,r}^s = \rho_r^s + c(\delta t_r - \delta t^s) + c(\tau_{L_2}^s + \tau_{L_{2,r}}) + \delta_{trop} + \delta_{ion,2} + \delta_{rel} + \delta_{tide} + \delta_{mul} \quad (2)$$

$$L_{1,r}^s = \lambda_1 \phi_{1,r}^s = \rho_r^s + c(\delta t_r - \delta t^s) + c(T_{L_1}^s + T_{L_{1,r}}) + \lambda_1 N_1^s + \delta_{trop} + \delta_{ion,1} + \delta_{rel} + \delta_{tide} + \delta_{mul} \quad (3)$$

که  $M$  تابع نگاشت،  $ele$  زاویه ارتفاعی ماهواره،  $R$  شعاع کره زمین و  $h$  ارتفاع مدل تک لایه یونوسفری (۴۵۰ کیلومتر) است. با توجه به اینکه پیک چگالی الکترونی در بازه ارتفاعی ۳۰۰ الی ۴۵۰ کیلومتری از سطح زمین رخ می دهد، در مدل های تک لایه یونوسفری، ارتفاع ۴۵۰ کیلومتری را به عنوان ارتفاع بیشینه چگالی الکترونی در نظر می گیرند. در این مقاله با توجه به اینکه مقادیر  $TEC$  حاصل از مدل پیشنهادی با مقادیر  $TEC$  حاصل از مدل  $GIM$  مقایسه می شوند در نتیجه مقدار  $h$  در رابطه ۸ ۴۵۰ کیلومتر در نظر گرفته شده است. زاویه ارتفاعی نیز با استفاده از فاصله هندسی ماهواره و گیرنده و با داده های افریز ماهواره محاسبه می شود. در این مقاله کمینه زاویه ارتفاعی ۱۵ درجه در نظر گرفته شده و سیگنال های با زاویه ارتفاعی کمتر از ۱۵ درجه از روند محاسبات کنار گذاشته می شوند.

### ۳. تجزیه به مؤلفه های اصلی جهت مدل سازی سری زمانی

مهم ترین چالش در مبحث محاسبات نرم در مواردی همانند مدل سازی سری های زمانی پدیده هایی مانند یونوسفر، در وجود مشاهدات ورودی بسیار زیاد، انجام محاسبات ماتریسی زیاد و متعاقب آن کاهش سرعت همگرایی الگوریتم در رسیدن به جواب بهینه است. همین امر باعث می شود که در مواردی نتوان رزولوشن های زمانی مناسبی برای بررسی رفتار یک پدیده در نظر گرفت، چرا که نیازمند مشاهدات ورودی بسیار زیادی خواهد بود. جهت غلبه بر این مشکل در این مقاله، ایده استفاده از تجزیه به مؤلفه های اصلی (PCA) جهت کاهش ابعاد مشاهدات ورودی به سیستم استنتاج فازی ارائه شده است. کاهش ابعاد مشاهدات ورودی قبل از استفاده در سیستم FIS باعث افزایش سرعت همگرایی الگوریتم و همچنین کاهش زمان محاسبات می شود.

آنالیز چندمتغیره داده های ژئوفیزیکی برای تعیین خصوصیات ذاتی داده ها امری ضروری است. روش PCA

همان طور که در روابط ملاحظه می شود برای محاسبه STEC با استفاده از ترکیب عاری از هندسه با مشاهدات شبه فاصله، نیاز به معلوم بودن بایاس های ناشی از فرکانس برای گیرنده و ماهواره بوده و برای استفاده از مشاهدات فاز به منظور محاسبه STEC نیز پارامترهای ابهام فاز مجهول می باشند. ترم های مربوط به بایاس وابسته به فرکانس برای گیرنده و ماهواره برای مشاهده شبه فاصله به صورت زیر خلاصه می شوند:

$$\begin{aligned} bs &= \tau_{L1}^s - \tau_{L2}^s & br &= \tau_{L1,r} - \tau_{L2,r} \\ Bs &= T_{L1}^s - T_{L2}^s & Br &= T_{L1,r} - T_{L2,r} \end{aligned} \quad (6)$$

در رابطه ۶ به پارامترهای  $bs$  و  $br$  به ترتیب بایاس تفاضلی کد (DCB) برای ماهواره  $s$  و گیرنده  $r$  و به پارامترهای  $Bs$  و  $Br$  به ترتیب بایاس تفاضلی فاز برای ماهواره  $s$  و گیرنده  $r$  گفته می شود. مقدار  $bs$  برای کلیه ماهواره های GPS از سوی سرویس بین المللی IGS در فایل های مدل جهانی GIM در اختیار قرار می گیرند. از آنجایی که محاسبه STEC با استفاده از مشاهدات فاز نیازمند تخمین پارامتر ابهام فاز بر روی هر دو موج  $L_1$  و  $L_2$  می باشد، از تکنیک نرم سازی مشاهدات کد با فاز جهت بالابردن دقت و عدم نیاز به برآورد ابهام فازها استفاده می شود (عامریان و همکاران، ۲۰۱۳b). محاسبه STEC مستلزم معلوم بودن مقادیر DCB مشاهده شبه فاصله برای تمامی ماهواره ها و گیرنده های GPS است. مقادیر DCB ماهواره ها از طریق سرویس بین المللی IGS در اختیار قرار می گیرد. اما جهت برآورد DCB برای گیرنده ها می توان در فرایند مدل سازی، این مقادیر را به عنوان مجهول در نظر گرفته و همزمان با سایر مجهولات برآورد کرد. با در اختیار داشتن STEC نرم شده و همچنین تابع تصویر مناسب، می توان مقدار TEC در راستای زینت (VTEC) را محاسبه کرد، خواهیم داشت:

$$VTEC = M \times STEC_{smoother} \quad (7)$$

$$M = \left[ 1 - \left( \frac{R \cos(ele)}{R + h} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (8)$$

اصلی در تغییرات کل پدیده موردنظر از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\Gamma_i = \frac{\lambda_i}{\sum_{j=1}^p \lambda_j} \times 100 \quad (14)$$

با استفاده از PCA می‌توان فرکانس‌های غالب در رفتار یونوسفر را شناسایی کرد. هدف اصلی استفاده از این روش در مدل‌سازی سری زمانی تغییرات یونوسفر شناختن چند مؤلفه اول مؤثر در رفتار یونوسفر است. در این مقاله بر اساس قضیه تجزیه به مؤلفه‌های اصلی، از مؤلفه‌های اصلی که دارای بیشترین اطلاعات مربوط به مشاهدات هستند جهت آموزش شبکه فازی استفاده می‌شود.

#### ۴. سیستم استنتاج فازی (FIS)

سیستم‌های استنتاج فازی می‌توانند رفتار یک پدیده یا فرایند را صرفاً در قالب استفاده از قواعد توصیفی و تجربی بدون نیاز به شناخت مدل دقیق تحلیلی فرمول‌بندی کنند. یک سیستم استنتاج فازی به‌طور کلی از اجزاء زیر ساخته شده است:

- فازی‌ساز

- پایگاه قواعد

- موتور استنتاج فازی

- دیفازی‌ساز

روند تبدیل متغیرهای صریح به متغیرهای زبانی را فازی‌سازی می‌گویند. موتور استنتاج با استفاده از الگوریتم‌های استنتاج، قوانین را ارزیابی و استنتاج می‌کند و پس از تجمیع قوانین خروجی توسط واحد دیفازی‌ساز به مقدار صریح یا عددی تبدیل می‌شود. معمول‌ترین نوع سیستم استنتاج فازی که قابلیت فرارگیری در یک شبکه تطبیقی را دارا است، سیستم فازی تاکاگی-سوگنو است که خروجی آن یک رابطه خطی است و پارامترهای آن را می‌توان با ترکیب روش‌های حداقل مربعات خطا و انتشار خطا

آنالیز چندمتغیره را بر اساس تبدیل از فضای متغیرهای همبسته به فضای متغیرهای ناهمبسته فراهم می‌کند (مالیکا و همکاران، ۲۰۱۸). برای مدل‌سازی سری زمانی تغییرات یونوسفر، مقادیر کمیت VTEC حاصل از ایستگاه‌های GPS در ماتریس  $VTEC(t,d)_{m \times n}$  گنجانده می‌شود. در این ماتریس پارامتر  $t$  بیانگر زمان مشاهده از ۱ تا ۲۴ ساعت در روز  $d$  از سال موردنظر است. در نتیجه خواهیم داشت:

$$VTEC(t, d) = \begin{bmatrix} VTEC_{1,1} & \dots & VTEC_{1,n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ VTEC_{m,1} & \dots & VTEC_{m,n} \end{bmatrix} \quad (9)$$

مرحله اول در استفاده از روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی محاسبه ماتریس کوواریانس متغیرها است. برای سری زمانی تغییرات VTEC خواهیم داشت:

$$C_{VTEC} = Cov(VTEC(t, d)) \quad (10)$$

ماتریس کوواریانس  $C$  در رابطه ۱۰ به مقادیر و بردارهای ویژه بر اساس رابطه زیر تجزیه می‌شود:

$$C_{VTEC} E_i = \lambda_i E_i \quad (11)$$

برای یکسان‌سازی در محاسبات، مقادیر ویژه، نرمالیزه شده و به‌صورت نزولی مرتب می‌شوند. در نتیجه مقادیر مشاهدات ورودی VTEC به توابع پایه  $E_j$  و ضرایب  $A_j$  متناظر به‌صورت زیر تجزیه می‌شوند:

$$VTEC(t, d) = \sum_{j=1}^n E_j(t) A_j(d) \quad (12)$$

برای محاسبه ضرایب  $A_j$  می‌توان از رابطه زیر استفاده کرد:

$$A_j = VTEC(t, d).E_j \quad (13)$$

ضرایب  $A_j$  در رابطه ۱۳ مؤلفه‌های اصلی نامیده شده که آنها تغییرات درازمدت همانند تغییرات خورشیدی، سالیانه، ماهیانه و فصلی را توصیف می‌کنند. سهم هر مؤلفه

#### ۵. داده‌های مورد استفاده در تحقیق

جهت آنالیز تئوری ارائه شده در مقاله، داده‌های مربوط به ایستگاه GPS تهران در موقعیت جغرافیایی ۳۵/۶۹ درجه شمالی و ۵۱/۳۳ درجه شرقی که یکی از ایستگاه‌های شبکه جهانی IGS است در سال ۲۰۱۶ مورد استفاده قرار گرفته است. تمامی فایل‌های مشاهداتی راینکس از سایت شبکه جهانی IGS دانلود شده (<ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/pub/gps/data/daily>) و با استفاده از الگوریتم بخش ۲، مقدار TEC و متعاقب آن مقدار VTEC در ۲۴ ساعت از شبانه‌روز محاسبه شده است. برای ارزیابی روش ارائه شده در این مقاله، از مقادیر VTEC در بازه‌های زمانی (۳،۱،۳،۱،۳،۱) به وقت جهانی جهت مدل‌سازی سری زمانی با استفاده از ترکیب PCA و شبکه فازی استفاده شده و از مقادیر VTEC در بازه‌های زمانی (۰، ۲، ۲، ۲، ۲) به وقت جهانی جهت ارزیابی مدل بهره گرفته می‌شود. جهت مقایسه و ارزیابی دقیق‌تر مدل پیشنهادی این مقاله، از خروجی‌های شبکه جهانی IGS (<ftp://igs.ensg.ign.fr/pub/igs/products/ionosphere>) ، مدل تجزیه NeQuick (<https://t-ict4d.ictp.it>) ، همچنین مقادیر VTEC حاصل از مشاهدات GPS در این زمان‌ها استفاده می‌شود. شاخص‌های آماری RMSE و dVTEC که اختلاف مابین VTEC مشاهداتی و VTEC مدل‌سازی شده است جهت بررسی دقت نتایج به کار گرفته شده است. برای بررسی بیشتر، مقادیر ضریب همبستگی مابین VTEC مشاهداتی و VTEC مدل‌سازی شده هم مورد مطالعه و مقایسه قرار گرفته است. همچنین جهت نشان دادن کارایی روش ارائه شده در این مقاله، نتایج یکبار با روش PCA و بار دیگر بدون PCA مورد آنالیز قرار گرفته است. دیاگرام چگونگی انجام تئوری ارائه شده در این مقاله در شکل ۱ نمایش داده شده است.

به عقب بر اساس کاهش گرادیان برآورد کرد (تاکاگی و سوگنو، ۱۹۸۵).

#### ۴-۱. الگوریتم پس انتشار خطا (BP)

جهت آموزش شبکه فازی، در این مقاله از الگوریتم پس انتشار خطا استفاده می‌شود (مارس و همکاران، ۱۹۹۶). هدف فرایند آموزش، رسیدن به خروجی مطلوب است. بدین ترتیب ابتدا باید تابع خطا تعریف شود. این خطا از اختلاف خروجی واقعی شبکه ( $O_j$ ) و خروجی موردانتظار ( $d_j$ ) به صورت زیر به دست می‌آید:

$$E_j(x, w, d_j) = (O_j(x, w) - d_j)^2 \quad (15)$$

می‌توان خطای کلی شبکه را به فرم مجموع خطای تک تک رول‌های لایه خروجی نوشت. لذا خواهیم داشت:

$$E(x, w) = \frac{1}{2} \sum_{p=1}^P \left( \sum_{m=1}^M (O_{p,m} - d_{p,m})^2 \right) \quad (16)$$

روش‌های مختلف و متفاوتی جهت برقراری ارتباط خطا با ورودی‌ها، وزن‌ها و خروجی‌های شبکه فازی وجود دارد. در این مقاله از روش گرادیان شیب جهت انجام این کار استفاده شده است. بر اساس روش گرادیان شیب، با توجه به درجه دو و مثبت بودن تابع هدف، فرض می‌شود این تابع رفتاری سهموی دارد. لذا برای رسیدن به کمینه سراسری آن بایستی در خلاف جهت شیب تابع حرکت کنیم. بنابراین با فرض اینکه وزن‌ها در ابتدای کار به صورت تصادفی انتخاب شده باشند باید شیب تابع خطا را نسبت به وزن‌ها محاسبه کرده و در جهت خلاف آن، وزن‌ها را تغییر دهیم و این روند را تا آنجا ادامه دهیم که به کمینه سراسری یا یک خطای قابل قبول برسیم.

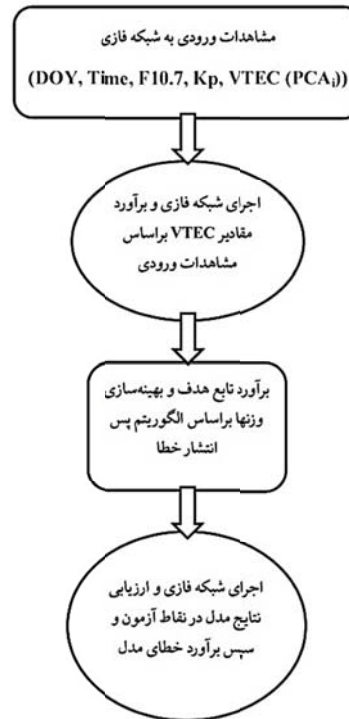
$$E = \sum_{p=1}^P (VTEC_{GPS} - VTEC_{model})^2 \quad (17)$$

در رابطه ۱۷، P بیانگر تعداد نمونه‌های مورد بررسی است. اگر مقدار تابع هدف ۱۷ از ۲ TECU کمتر بود، انگاه شبکه فازی آموزش دیده و می‌توان از آن در سایر زمان‌ها نیز استفاده کرد. اما اگر مقدار تابع هدف از ۲ TECU بیشتر بود در این صورت با استفاده از الگوریتم پس انتشار خطا مجدداً آموزش شبکه فازی تکرار می‌شود. حد خطای ۲ TECU در مرحله آموزش، بر اساس سعی و خطا و انتخاب شده است.

#### ۵-۱. آنالیز خطای مدل

بر اساس تئوری ارائه شده در بخش‌های قبل و با ترکیب روش PCA و شبکه فازی، در این قسمت هدف مدل‌سازی سری زمانی تغییرات مقدار محتوای الکترون کلی یونوسفر در سال ۲۰۱۶ می‌باشد. با کمک داده‌های GPS ایستگاه تهران به مختصات ۳۵/۶۹ درجه شمالی و ۵۱/۳۳ درجه شرقی مقادیر VTEC در بازه‌های زمانی یک ساعته محاسبه شده و جهت تجزیه به مؤلفه‌های اصلی به الگوریتم PCA معرفی می‌شوند. ماتریس VTEC حاصل از مشاهدات GPS دارای ۱۲ سطر به ازای ۱۲ بازه زمانی انتخاب شده (۱، ۳، ...، ۲۳) به وقت جهانی و ۳۶۵ ستون به ازای ۳۶۵ روز از سال ۲۰۱۶ می‌باشد. شکل ۲ چگونگی تغییرات شاخص‌های F10.7 و Kp را برای تمامی روزهای سال ۲۰۱۶ نمایش می‌دهد.

بر اساس شکل ۲ شاخص F10.7 دارای نوسانات زیادی در کل سال بوده و روزهای با فعالیت کم و روزهای با فعالیت زیاد خورشیدی دیده می‌شوند. چنین نوسانی در شاخص Kp نیز مشاهده می‌شود. با استفاده از قضیه تجزیه به مؤلفه‌های اصلی و بر اساس مفاهیم ارائه شده در بخش سوم، ماتریس VTEC حاصل از GPS به مؤلفه‌های اصلی تجزیه شده و ۶ مؤلفه اصلی تغییرات VTEC بر اساس

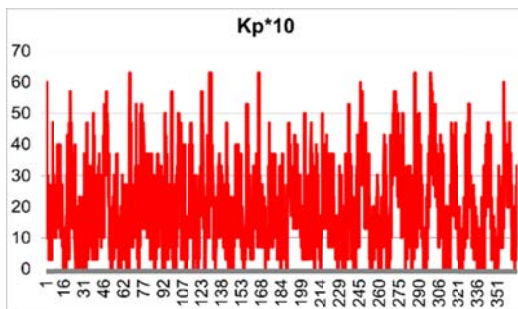


شکل ۱. دیاگرام تئوری ارائه شده در این پژوهش.

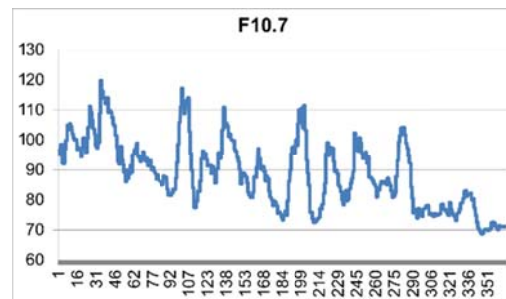
بر اساس شکل ۱، مشاهدات VTEC به دست آمده از الگوریتم بخش دوم، با PCA به مؤلفه‌های اصلی تجزیه شده و سپس بر اساس رابطه ۱۴ سهم هر مؤلفه اصلی در تغییرات مقدار VTEC محاسبه می‌شود. چندین مؤلفه اصلی اول که دارای بیشترین سهم در تغییرات سری زمانی VTEC هستند جهت آموزش شبکه فازی انتخاب می‌شوند. در مرحله بعد، شبکه فازی با استفاده از مشاهدات ورودی (DOY (روز از سال)، Time (زمان برحسب ساعت)، پارامتر F10.7 که نشان‌دهنده شار خورشیدی است که در حال حاضر یکی از بهترین شاخص‌های فعالیت خورشیدی بوده و از ۵۰ سال گذشته در حال اندازه‌گیری می‌باشد، پارامتر Kp که بیانگر شاخص فعالیت‌های ژئومغناطیسی بوده و در دو حالت آرام ( $Kp < 4$ ) و فعالیت شدید ( $Kp > 4$ ) دسته‌بندی می‌شود، آموزش می‌بیند. پس از آموزش مقادیر VTEC محاسبه شده و با مقادیر VTEC حاصل از GPS مقایسه می‌شوند. در حقیقت در این مرحله تابع هدف زیر مورد ارزیابی قرار می‌گیرد:

VTEC را ارزیابی کرد. جهت ارزیابی تئوری ارائه شده در مقاله، دو پارامتر زمان همگرایی به جواب بهینه و جذر خطای مربعی میانگین (RMSE) برای مرحله آموزش در دو حالت مشاهدات به صورت مستقیم و همچنین مشاهدات پس از تجزیه به مؤلفه‌های اصلی مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج این ارزیابی در جدول ۲ نمایش داده شده است.

درصد سهم تأثیرشان در تغییرات VTEC در جدول ۱ ارائه شده است. بر اساس نتایج حاصل از جدول ۱ به وضوح قابل مشاهده است که سه مؤلفه اصلی اول دارای سهم زیادی در تغییرات مقدار VTEC هستند و از مؤلفه چهارم به بعد این اثر بسیار ناچیز شده است. بر این اساس با استفاده از این سه مؤلفه اصلی می‌توان در حدود ۹۸ درصد تغییرات



(ب)



(الف)

شکل ۲. چگونگی تغییرات شاخص‌های F10.7 (الف) و Kp (ب) در کلیه روزهای سال ۲۰۱۶.

جدول ۱. سهم هر مؤلفه اصلی در تغییرات VTEC.

| PCA | مقدار ویژه         | سهم هر مؤلفه اصلی در تغییرات کل (%) |
|-----|--------------------|-------------------------------------|
| ۱   | $6.43 \times 10^5$ | ۹۷/۸۸                               |
| ۲   | $1.11 \times 10^4$ | ۱/۷۹                                |
| ۳   | $1.07 \times 10^3$ | ۰/۲۲                                |
| ۴   | ۵۱۶/۴۴             | ۰/۰۸                                |
| ۵   | ۱۷۸/۸۱             | ۰/۰۳                                |

جدول ۲. مقایسه پارامترهای زمان همگرایی به جواب بهینه (ثانیه) و RMSE (TECU) برای مرحله آموزش شبکه فازی با یک، دو و سه مؤلفه اصلی اول.

| نوع ترکیب    | RMSE مرحله آموزش (TECU) | زمان همگرایی به جواب بهینه (s) |
|--------------|-------------------------|--------------------------------|
| FIS          | ۱/۷۶۹                   | ۲۰۵                            |
| PCA1-FIS     | ۲/۰۹۱                   | ۱۱۵                            |
| PCA1,2-FIS   | ۱/۹۸۷                   | ۱۳۲                            |
| PCA1,2,3-FIS | ۱/۸۳۵                   | ۱۵۹                            |



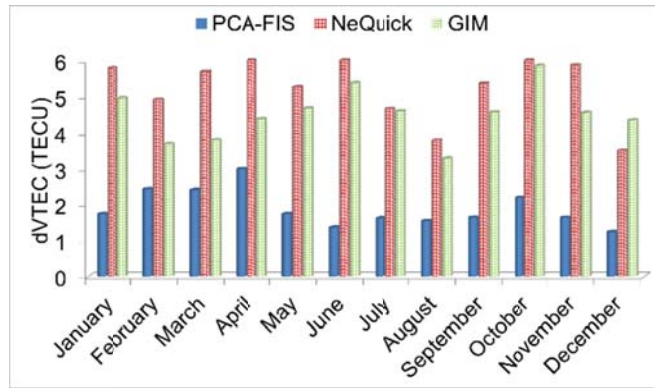
طول ۳۶۵ روز و در زمان‌های ۰، ۲، ...، ۲۴ به وقت محاسبه شده و مقدار متوسط شاخص dVTEC برای هر ماه برآورد شده است. نتایج این مقایسه در شکل ۳ نمایش داده شده است.

بر اساس نتایج حاصل از شکل ۳ بیشترین مقدار dVTEC حاصل از مدل PCA-FIS برابر ۳/۱۱ TECU در ماه آوریل و کمترین مقدار آن برابر ۱/۳۷ TECU و در ماه دسامبر می‌باشد. این شاخص برای مدل GIM به ترتیب برابر با ۵/۸۵ و ۳/۲۸ TECU به دست آمده است. در مدل تجربی NeQuick بیشترین مقدار dVTEC در ماه ژوئن و برابر با ۶/۵۹ TECU و کمترین مقدار آن در ماه دسامبر برابر با ۳/۴۹ TECU محاسبه شده است. نتایج به دست آمده برای ۱۲ ماه از سال ۲۰۱۶ بیانگر این موضوع است که مدل PCA-FIS از مقدار خطای کمتری در مقایسه با مدل‌های GIM و NeQuick برخوردار است. دلیل اصلی بیشتر بودن خطای دو مدل GIM و NeQuick در منطقه ایران، کمبود مشاهدات مورد استفاده در مرحله مدل‌سازی و استفاده از روش‌های درون‌یابی می‌باشد.

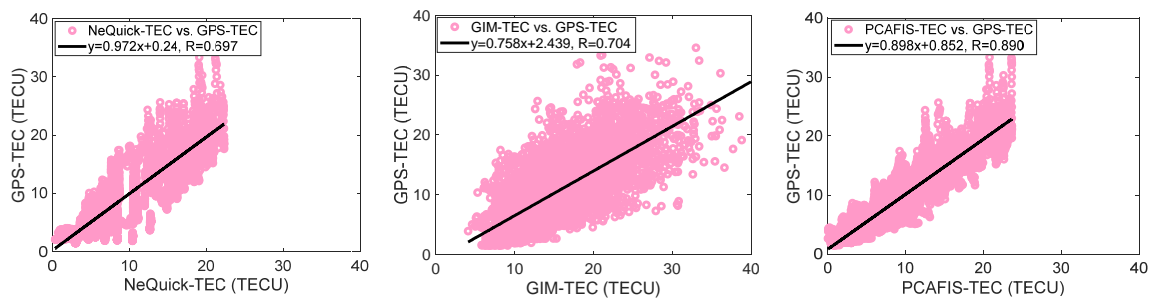
نوع دیگر ارزیابی صورت گرفته در این مقاله، استفاده از شاخص ضریب همبستگی جهت بررسی میزان همبستگی مابین نتایج حاصل از مدل پیشنهادی با GPS است. هر چقدر این ضریب به عدد یک نزدیک‌تر باشد، بیانگر همبستگی بیشتر نتایج مدل پیشنهادی با مشاهدات GPS است. در حقیقت همبستگی بالای مدل نشان‌دهنده این موضوع است که خروجی‌های VTEC حاصل از این مدل تغییرات زمانی را مشابه با VTEC حاصل از GPS نشان می‌دهند. این مقایسه در شکل ۴ نشان داده شده است. در این شکل نتایج ضریب همبستگی مربوط به مدل‌های GIM و مدل تجربی NeQuick نیز وجود دارد. در هر سه شکل خط مربوط به بهترین برازش نیز آورده شده است.

بر اساس نتایج حاصل از جدول ۲ می‌توان به این نکته پی برد که در حالت استفاده از تجزیه به مؤلفه‌های اصلی و استفاده از سه مؤلفه اصلی (PCA1,2,3) در مشاهدات مورد نیاز برای آموزش شبکه فازی، زمان همگرایی به جواب بهینه برابر با ۱۵۹ ثانیه و همچنین مقدار RMSE برای مرحله آموزش برابر با ۱/۸۳۵ TECU شده است. در حالی که طبق نتایج حاصل از جدول ۲، در حالت بدون استفاده از روش PCA برای مشاهدات VTEC، مقدار RMSE مرحله آموزش ۱/۷۶۹ TECU می‌باشد. به عبارت دیگر با از دست رفتن مقداری از اطلاعات موجود در VTEC به جهت استفاده از روش PCA، مقدار خطا تا حدودی افزایش داشته است. اما مورد دیگر زمان همگرایی به جواب بهینه است. در حالت بدون استفاده از روش PCA، زمان همگرایی به جواب بهینه برابر با ۲۰۵ ثانیه است که نسبت به حالت استفاده از سه مؤلفه اصلی در مرحله آموزش شبکه فازی، یعنی ۱۵۹ ثانیه، افزایش پیدا کرده است. در نتیجه، با توجه به پارامترهای زمان همگرایی به جواب بهینه و مقدار RMSE مرحله آموزش، ترکیب مدل FIS با سه مؤلفه اصلی اول به عنوان مدل بهینه در این مقاله انتخاب شده است.

پس از مرحله آموزش و ارزیابی خطای این مرحله، با استفاده از شبکه فازی آموزش دیده مقادیر VTEC در بازه‌های زمانی ۰، ۲، ...، ۲۴ برآورد شده و با مقادیر حاصل از GPS (GPS-TEC)، مدل GIM (GIM-TEC) و مدل تجربی NeQuick (Ne-TEC) مقایسه می‌شوند. در مرحله آزمون مقادیر RMSE برای سه مدل PCA-FIS، GIM و NeQuick به ترتیب برابر با ۱/۸۸، ۶/۱۱ و ۶/۹۸ TECU حاصل شده است. مقایسه شاخص آماری RMSE نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی این مقاله دارای خطای بسیار کمتری نسبت به مدل‌های GIM و NeQuick است. جهت ارزیابی بیشتر و بهتر مدل ارائه شده، مقادیر VTEC در



شکل ۳. چگونگی تغییرات شاخص dVTEC برای سه مدل PCA-FIS، GIM و مدل تجربی NeQuick در مقایسه با مشاهدات حاصل از GPS برای کلیه ماه‌های سال ۲۰۱۶.



شکل ۴. ضریب همبستگی مابین TEC حاصل از مدل‌های از راست به چپ به ترتیب PCA-FIS، GIM و NeQuick در مقایسه با TEC حاصل از GPS.

۱۱۲، ۲۰۲، ۳۴۶ در شکل ۵ مقایسه شده است. این چهار روز به گونه‌ای انتخاب شده است که دو روز دارای فعالیت خورشیدی بالا (مقدار شاخص F10.7 بیشتر از ۱۰۰) و دو روز دارای فعالیت خورشیدی پایین (مقدار شاخص F10.7 کمتر از ۱۰۰) باشد.

بر اساس نتایج حاصل از شکل ۵، سری زمانی تغییرات روزانه TEC حاصل از مدل PCA-FIS در روزهای ۱۱۲ و ۳۴۶ (Doy) که فعالیت خورشیدی کم است، به سری زمانی حاصل از GPS بسیار نزدیک می‌باشد. در این دو روز اختلافی در حدود ۰ الی ۲ TECU میان سری زمانی مدل پیشنهادی مقاله و GPS دیده می‌شود. در دو روز ۱۱۲ و ۳۴۶، اختلاف مابین سری زمانی حاصل از GPS و مدل‌های GIM و NeQuick در حدود ۰ الی ۷ TECU است. اما در روزهای با فعالیت خورشیدی بالا (روزهای ۳۵ و ۲۰۲) اختلاف مابین سری زمانی TEC حاصل از مدل PCA-FIS و GPS در حدود ۰ الی ۵ TECU شده است. به عبارت دیگر مدل پیشنهادی در روزهای با فعالیت

با توجه به شکل ۴ مقادیر ضریب همبستگی برای مدل‌های PCA-FIS، GIM و NeQuick به ترتیب برابر با ۰/۸۹۰، ۰/۷۰۴ و ۰/۶۹۷ به دست آمده است. نتایج بیانگر این موضوع است که مقادیر VTEC به دست آمده از مدل PCA-FIS دارای همبستگی زیادتری با مشاهدات VTEC به دست آمده از GPS هستند. به عبارت دیگر مقادیر VTEC به دست آمده از مدل PCA-FIS تغییرات موجود در سری زمانی VTEC را مشابه با مقادیر حاصل از GPS نشان می‌دهند.

#### ۲-۵. بررسی سری زمانی TEC

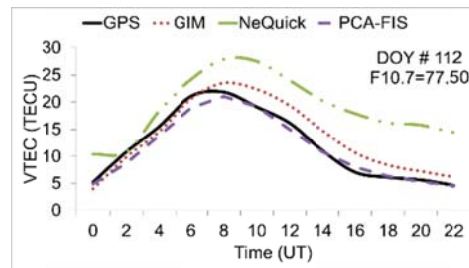
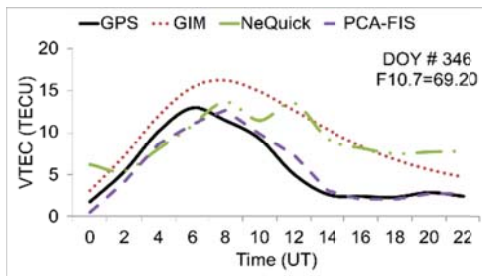
پس از بررسی دقت و صحت نتایج حاصل از مدل PCAFIS، حال می‌توان با مدل آموزش دیده، سری زمانی روزانه، ماهانه، فصلی و سالیانه TEC را برآورد کرده و با سری زمانی مدل‌های GIM و NeQuick مقایسه کرد. برای بررسی قابلیت مدل، سری زمانی تغییرات روزانه TEC در چهار روز مختلف از سال ۲۰۱۶ (روزهای ۳۵،

حاصل از GPS، دارای تغییرات بسیار هموارتر در زمان (روز از سال و ساعت در روز) است. با مقایسه مدل GIM و VTEC حاصل از GPS می‌توان نتیجه گرفت که این مدل در ایران دارای دقت زمانی مناسبی نیست. طبیعتاً این نتیجه دور از دسترس نبود، چرا که شبکه جهانی IGS تنها دو ایستگاه در فلات ایران دارد که یکی از آنها (ایستگاه همدان) به تازگی راه‌اندازی شده است. بنابراین در جو بالای ایران به دلیل کمبود مشاهده، جهت محاسبه مقدار TEC استفاده از روش‌های درون‌یابی در مدل GIM امری اجتناب‌ناپذیر است. مورد دیگر این است که رزولوشن زمانی مدل GIM به صورت دو ساعته است. در حالی که کاملاً مشخص است که یونوسفر دارای تغییرات زمانی در بازه‌های کمتر از دو ساعت است. بنابراین در مورد مدل‌سازی تغییرات زمانی نیز، مدل GIM دارای دقت پایینی خواهد بود. مدل تجربی NeQuick نیز با توجه به اینکه یک مدل پیش‌بینی یونوسفر بوده و برای انجام این کار از مشاهدات ایستگاه‌های یونوسوند (دستگاه اندازه‌گیری مستقیم یونوسفر) استفاده می‌کند، در منطقه ایران دارای دقت پایینی خواهد بود.

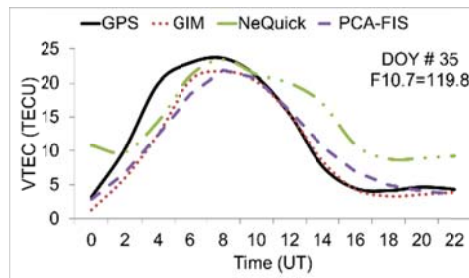
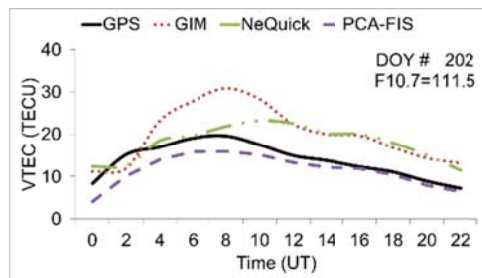
خورشیدی بالا، دقت کمتری نسبت به روزهای با فعالیت خورشیدی پایین دارد. دو مدل NeQuick و GIM در روزهای با فعالیت خورشیدی بالا دارای اختلافی در حدود ۰ الی ۱۰ TECU نسبت به سری زمانی TEC حاصل از GPS هستند. نمودارهای ترسیم شده در شکل ۵ نشان می‌دهد که مدل PCA-FIS در هر دو حالت فعالیت‌های خورشیدی پایین و زیاد، از مدل‌های GIM و NeQuick دقیق‌تر می‌باشد.

در شکل ۶ مقدار تغییرات کمیت VTEC به صورت دوبعدی و برای سه مدل PCA-FIS، GIM و NeQuick محاسبه شده و با مقدار VTEC حاصل از GPS مقایسه شده است. این مقایسه برای بازه زمانی (۰،۲،۴،۶،۸،۱۰،۱۲،۱۴،۱۶،۱۸،۲۰،۲۲) به وقت جهانی و برای کلیه روزهای سال ۲۰۱۶ انجام شده است.

نتایج حاصل از شکل ۶ بیانگر این موضوع است که سری زمانی مدل‌سازی شده توسط مدل‌های PCA-FIS به سری زمانی حاصل از GPS بسیار نزدیک (تغییرات زمانی مشابه) است. سری زمانی حاصل از مدل‌های GIM و NeQuick نسبت به مدل PCA-FIS و همچنین VTEC

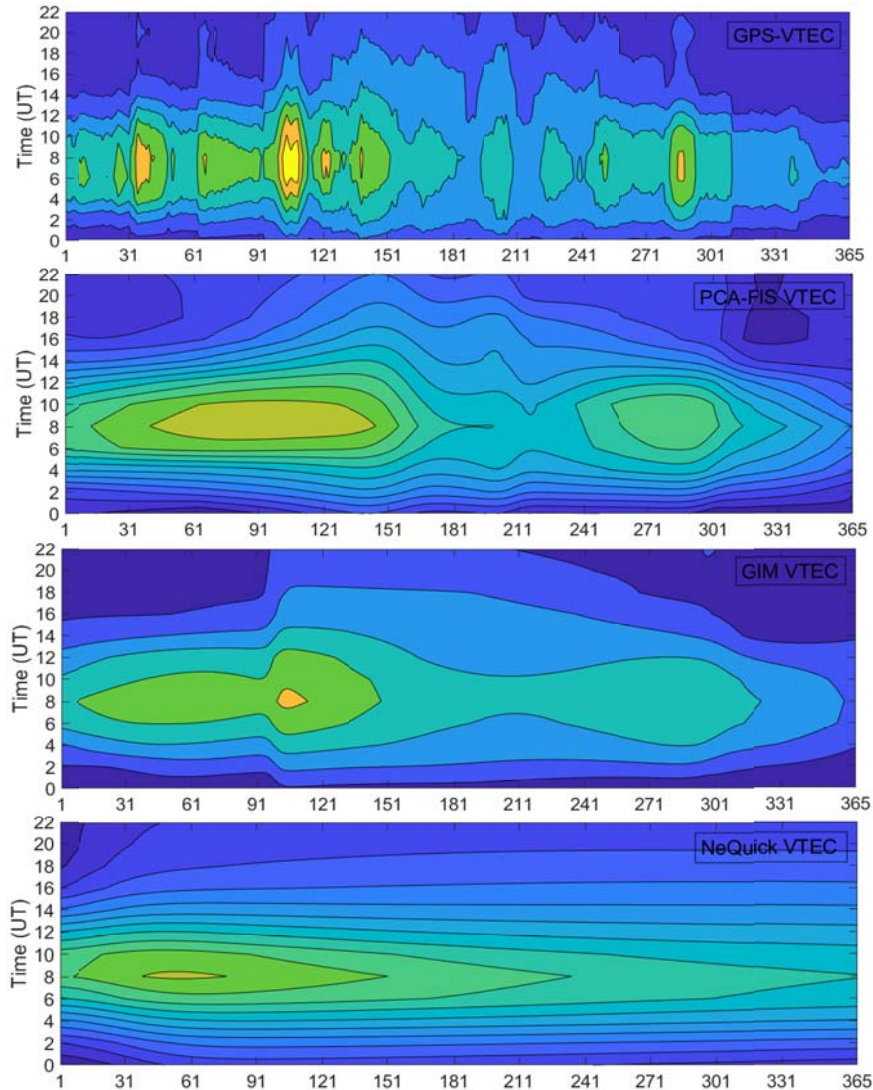


(الف)



(ب)

شکل ۵. سری زمانی تغییرات روزانه TEC حاصل از GPS، PCA-FIS، GIM و NeQuick در روزهای با فعالیت خورشیدی کم (الف) و فعالیت خورشیدی زیاد (ب).



شکل ۶. تصاویر حاصل از چگونگی تغییرات سری زمانی VTEC برای سه مدل PCAFIS، مدل GIM و مدل تجربی NeQuick در مقایسه با VTEC حاصل از GPS.

در مدل‌های PCA-FIS، مدل GIM و NeQuick نیز دیده می‌شود. مقایسه دیگر صورت گرفته جهت ارزیابی مدل ارائه شده در این مقاله مربوط به محاسبه شاخص آماری واریانس برای مؤلفه‌های x، y و z موقعیت ایستگاه تهران با روش تعیین موقعیت نقطه‌ای دقیق (PPP) و با استفاده از مدل‌های PCA-FIS، GIM و NeQuick است. بایستی اشاره شود که موقعیت دقیق ایستگاه تهران با استفاده از مشاهدات GPS و فایل افمریز دقیق به‌دست آمده از شبکه جهانی IGS، با نرم‌افزار برنیز محاسبه شده و به‌عنوان مرجع

در کشور ایران تنها یک ایستگاه اندازه‌گیری مستقیم یونوسفر وجود دارد و مشاهدات آن به‌دلیل نقص فنی، در حوزه زمان دارای گسستگی است. همین عامل باعث پایین آمدن دقت مدل NeQuick در منطقه ایران شده است. مدل پیشنهادی این مقاله علاوه از اینکه دقت بالاتری نسبت به مدل‌های GIM و NeQuick دارد، می‌تواند با رزولوشن زمانی مناسب‌تری تغییرات یونوسفر را نمایش دهد. بر اساس نتایج حاصل از شکل ۶، بیشینه مقدار VTEC حاصل از GPS در بازه زمانی ۸ الی ۱۰ به‌وقت جهانی (LT = UT + 3.30 h) رخ داده است. این حالت

مدل (PCA-FIS، GIM و NeQuick) حاصل می‌شود. سپس در مرحله بعد مختصات ایستگاه برای هر دو ساعت محاسبه شده و با مختصات حاصل از نرم‌افزار برنیز به‌عنوان مرجع مقایسه می‌شود. جدول ۳ نتایج آنالیز واریانس را برای مؤلفه‌های  $x$ ،  $y$  و  $z$  ایستگاه در ۴ روز ۱۵، ۱۰۵، ۱۹۵ و ۲۸۵ برای هر سه مدل نمایش می‌دهد. این چهار روز به‌صورت کاملاً تصادفی انتخاب شده است. بر اساس نتایج حاصل از جدول ۳، میانگین مقدار واریانس مؤلفه‌های  $x$ ،  $y$  و  $z$  برای مدل PCA-FIS در چهار روز مورد بررسی به ترتیب برابر با ۳۹/۳۱، ۵۰/۳۰ و ۸۰/۳۳ میلی‌متر محاسبه شده است. برای مدل GIM مقادیر میانگین سه مؤلفه  $x$ ،  $y$  و  $z$  در چهار روز مورد بررسی به ترتیب برابر با ۱۴۲/۴۰، ۱۷۲/۷۳ و ۲۱۰/۴۵ میلی‌متر حاصل شده است. در مدل تجربی NeQuick مقادیر میانگین مؤلفه‌های  $x$ ،  $y$  و  $z$  در چهار روز به ترتیب برابر با ۱۶۴/۴۸، ۱۸۹/۳۶ و ۲۲۳/۰۶ میلی‌متر به‌دست آمده است. مقایسه واریانس سه مؤلفه برای مدل پیشنهادی این مقاله با مدل‌های GIM و NeQuick نشان می‌دهد که مدل جدید از خطای کمتری در برآورد مختصات ایستگاه موردنظر برخوردار است. بر اساس آنالیز صورت گرفته در جدول ۳، بهبودی در حدود ۵ الی ۱۰ میلی‌متر در مؤلفه‌های  $x$ ،  $y$  و  $z$  ایستگاه بواسطه استفاده از مدل PCA-FIS نسبت به مدل‌های GIM و NeQuick مشاهده می‌شود. بر اساس مختصات به‌دست آمده از PPP برای هر سه مدل PCA-FIS، GIM و NeQuick، ضریب همبستگی سه مؤلفه مختصاتی ( $x$ ،  $y$  و  $z$ ) محاسبه شده و در جدول ۴ ارائه شده است. در محاسبه ضریب همبستگی، مختصات به‌دست آمده از نرم‌افزار برنیز به‌عنوان مختصات مرجع در نظر گرفته شده است. بایستی اشاره شود که این آنالیز برای چهار روز ۱۵، ۱۰۵، ۱۹۵ و ۲۸۵ از سال ۲۰۱۶ انجام گرفته است.

در نظر گرفته شده است. به‌عبارت دیگر مختصات به‌دست آمده از نرم‌افزار برنیز به‌عنوان مرجع جهت مقایسه با سایر مدل‌ها در نظر گرفته می‌شود. سپس خطاهای مختلف همانند بایاس ساعت ماهواره، بایاس اطلاعات مداری، بایاس چندمسیری و بایاس تروپوسفری با استفاده از نرم‌افزار برنیز از روی مشاهدات ایستگاه تهران حذف شده و تنها بایاس یونوسفری می‌ماند. پس از آن با استفاده از مشاهدات پردازش شده توسط نرم‌افزار و همچنین TEC‌های حاصل از مدل‌های PCA-FIS، GIM و NeQuick در بازه‌های زمانی دو ساعته مقدار مختصات محاسبه می‌شود (برای هر اپوک ۳۰ ثانیه‌ای یک مشاهده در نظر گرفته شده و دستگاه معادلات برای دو ساعت حل شده است). دلیل انتخاب بازه دو ساعته، مقایسه نتایج با مدل GIM است. روابط ریاضی مورد استفاده جهت انجام این کار به‌صورت زیر است:

$$\Phi_i^j(t) = \rho_i^j(t) + \lambda N_i^j + c \delta t_i(t) - \frac{40.3}{f_i^2} TEC \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \Phi_i^j(t) - \rho_0^j(t) = & -\frac{X^j(t) - X_0}{\rho_0^j(t)} \Delta X_i - \frac{Y^j(t) - Y_0}{\rho_0^j(t)} \Delta Y_i - \\ & \frac{Z^j(t) - Z_0}{\rho_0^j(t)} \Delta Z_i + \lambda N_i^j - c \delta t_i(t) \end{aligned} \quad (19)$$

$$l_i^j(t) = a_{X_i}^j \Delta X_i + a_{Y_i}^j \Delta Y_i + a_{Z_i}^j \Delta Z_i + \lambda N_i^j - c \delta t_i(t) \quad (20)$$

در رابطه ۲۰ اندیس مربوط به گیرنده (در این مقاله فقط یک ایستگاه وجود دارد) و  $z$  اندیس مربوط به ماهواره است. پس از حل دستگاه معادلات حاصل از رابطه ۲۰ مقدار تصحیحات مختصات برای هر سه

جدول ۳. مقایسه واریانس مؤلفه‌های X، Y و Z برای سه مدل PCA-FIS، NeQuick و GIM در چهار روز ۱۵، ۱۰۵، ۱۹۵ و ۲۸۵ از سال ۲۰۱۶.

| DOY     | واریانس مؤلفه X (mm) |        |         | واریانس مؤلفه Y (mm) |        |         | واریانس مؤلفه Z (mm) |        |         |
|---------|----------------------|--------|---------|----------------------|--------|---------|----------------------|--------|---------|
|         | PCA-FIS              | GIM    | NeQuick | PCA-FIS              | GIM    | NeQuick | PCA-FIS              | GIM    | NeQuick |
| ۱۵      | ۵۷/۱۵                | ۲۱۹/۹۲ | ۲۴۷/۴۶  | ۷۶/۹۱                | ۲۳۶/۲۳ | ۲۴۹/۳۷  | ۱۰۹/۴۱               | ۲۹۲/۰۶ | ۳۰۵/۲۴  |
| ۱۰۵     | ۱۱/۳۵                | ۷۶/۳۸  | ۸۹/۳۷   | ۱۴/۷۴                | ۹۴/۶۷  | ۱۰۲/۷۱  | ۳۲/۲۶                | ۱۰۵/۸۸ | ۱۱۰/۲۴  |
| ۱۹۵     | ۷۶/۵۶                | ۲۳۴/۳۹ | ۲۶۴/۶۷  | ۹۹/۴۱                | ۳۴۰/۷۷ | ۳۶۷/۸۴  | ۱۲۱/۰۱               | ۳۷۵/۹۷ | ۳۹۴/۲۷  |
| ۲۸۵     | ۱۲/۱۸                | ۳۸/۹۳  | ۵۶/۴۴   | ۱۰/۱۷                | ۱۹/۲۷  | ۳۷/۵۵   | ۵۸/۶۷                | ۶۷/۸۹  | ۸۲/۴۹   |
| میانگین | ۳۹/۳۱                | ۱۴۲/۴۰ | ۱۶۴/۴۸  | ۵۰/۳۰                | ۱۷۲/۷۳ | ۱۸۹/۳۶  | ۸۰/۳۳                | ۲۱۰/۴۵ | ۲۲۳/۰۶  |

جدول ۴. مقایسه ضریب همبستگی مؤلفه‌های X، Y و Z برای سه مدل PCA-FIS، NeQuick و GIM.

|                         | PCA-FIS | GIM  | NeQuick |
|-------------------------|---------|------|---------|
| ضریب همبستگی در مؤلفه X | ۰/۸۸    | ۰/۸۱ | ۰/۷۵    |
| ضریب همبستگی در مؤلفه Y | ۰/۸۶    | ۰/۷۶ | ۰/۷۱    |
| ضریب همبستگی در مؤلفه Z | ۰/۸۴    | ۰/۷۱ | ۰/۷۰    |
| میانگین                 | ۰/۸۶    | ۰/۷۶ | ۰/۷۲    |

که زمان همگرایی به جواب بهینه به عوامل مختلفی همانند هندسه مناسب ماهواره‌ها در زمان برداشت، شرایط محیطی مربوط به گیرنده، کیفیت مشاهدات برداشتی و نرخ برداشت مشاهدات وابسته است. نرخ اندازه‌گیری مشاهدات در ایستگاه مورد بررسی در این مقاله به صورت ۳۰ ثانیه‌ای است. جهت بررسی زمان همگرایی، دستگاه معادلات در حالت PPP با مشاهدات هر ۱۰ دقیقه حل شده و سپس واریانس مؤلفه‌های مختصاتی محاسبه شده است. جدول ۵ نتایج مربوط به دو روز ۱۵ و ۲۸۵ را برای مدل پیشنهادی این مقاله نمایش می‌دهد.

بر اساس جدول ۴ و آنالیز ضریب همبستگی صورت گرفته برای هر سه مدل، مدل پیشنهادی این مقاله در هر سه مؤلفه همبستگی بیشتری با مختصات دقیق (به دست آمده از نرم‌افزار برنیز) را دارد. نوع دیگر ارزیابی صورت گرفته در این مقاله بررسی زمان همگرایی مؤلفه‌های مختصاتی به بهینه‌ترین مقدار است. به عبارت دیگر در این آنالیز مشخص می‌شود که پس از چند دقیقه استفاده از داده‌های یک ایستگاه، مقدار واریانس مؤلفه‌های مختصاتی بهینه شده و پس از آن تغییر چندانی در دقت نتایج دیده نمی‌شود. بایستی اشاره شود

جدول ۵. مقایسه واریانس مؤلفه‌های مختصاتی مدل PCA-FIS در بازه‌های زمانی ۱۰ دقیقه‌ای برای حل به روش PPP در روزهای ۱۵ و ۲۸۵.

| دقیقه | روز ۱۵         |                |                | روز ۲۸۵        |                |                |
|-------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|       | واریانس X (mm) | واریانس Y (mm) | واریانس Z (mm) | واریانس X (mm) | واریانس Y (mm) | واریانس Z (mm) |
| ۱۰    | ۱۸۳/۳۷         | ۱۹۷/۶۷         | ۲۴۳/۵۴         | ۸۳/۹۴          | ۸۲/۴۱          | ۱۲۴/۴۹         |
| ۲۰    | ۱۳۴/۷۹         | ۱۶۹/۵۴         | ۲۰۱/۳۷         | ۵۹/۴۶          | ۷۷/۶۷          | ۹۷/۲۸          |
| ۳۰    | ۱۱۰/۶۴         | ۱۴۷/۳۳         | ۱۸۶/۲۸         | ۳۸/۳۴          | ۳۷/۲۵          | ۷۹/۸۴          |
| ۴۰    | ۹۷/۱۹          | ۱۱۶/۲۸         | ۱۶۲/۶۴         | ۱۲/۱۸          | ۱۰/۱۷          | ۵۸/۶۷          |
| ۵۰    | ۸۱/۴۳          | ۹۵/۳۴          | ۱۴۹/۴۳         | ۱۳/۳۴          | ۱۱/۵۲          | ۵۹/۳۴          |
| ۶۰    | ۶۹/۵۵          | ۸۸/۶۴          | ۱۲۳/۵۴         | ۱۲/۲۵          | ۱۲/۳۴          | ۵۹/۲۸          |
| ۷۰    | ۵۷/۱۵          | ۷۶/۹۱          | ۱۰۹/۴۱         | ۱۳/۶۴          | ۱۱/۶۴          | ۵۸/۸۸          |

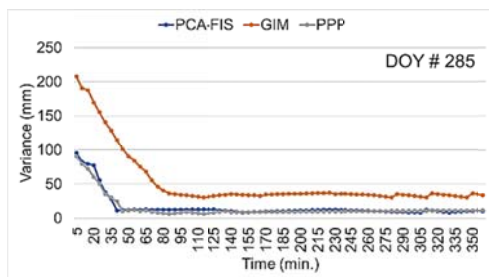
نسبت به دو مدل PCA-FIS و GIM دارد. تفاوت سرعت همگرایی در دو مدل PCA-FIS و GIM می‌تواند ناشی از تفاوت دقت TEC مدل‌سازی شده با دو روش باشد. همچنین تفاوت در نتایج دو روز هم می‌تواند به عوامل مختلفی همانند هندسه ماهواره‌های قابل‌رؤیت، کیفیت مشاهدات و شرایط محیطی وابسته باشد. نتایج حاصل از شکل ۷ بیانگر این موضوع است که استفاده از مدل پیشنهادی این مقاله در تعیین موقعیت، نه تنها دقت تعیین مختصات را بالاتر می‌برد بلکه سرعت همگرایی به جواب بهینه نیز افزایش می‌یابد.

#### ۶. بحث و نتیجه‌گیری

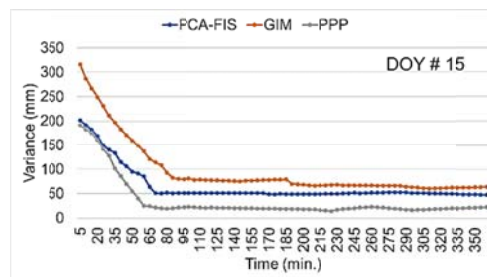
در این مقاله جهت بهبود نتایج حاصل از مدل‌سازی تغییرات سری زمانی TEC با استفاده از شبکه فازی، ترکیب این شبکه با روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی (PCA) پیشنهاد شد. در روش جدید مشاهدات قبل از ورود به شبکه فازی به مؤلفه‌های اصلی تجزیه شده و چند مؤلفه اصلی که دارای بیشترین تأثیر را در تغییرات سری زمانی دارند به شبکه فازی به‌عنوان پارامتر خروجی معرفی می‌شوند. حسن این ترکیب در این است که سرعت همگرایی الگوریتم به جواب بهینه به‌صورت قابل‌ملاحظه‌ای کاهش یافته و همچنین دقت و صحت نتایج نیز بهبود می‌یابد. جهت انجام روش از مشاهدات ایستگاه GPS تهران به‌عنوان یکی از ایستگاه‌های شبکه جهانی IGS استفاده شده است.

بر اساس نتایج جدول ۵ در روز ۱۵ با استفاده از ۷۰ دقیقه از مشاهدات ایستگاه، واریانس مؤلفه‌های مشاهداتی بهینه شده و پس از آن تغییرات اندکی مشاهده شده است. به‌عبارت دیگر پس از ۷۰ دقیقه، کمترین مقدار واریانس در مؤلفه‌های مختصاتی به‌وجود آمده است. برای روز ۲۸۵، با استفاده از ۴۰ دقیقه از مشاهدات ایستگاه، جواب بهینه حاصل شده و پس از آن تغییرات اندکی در واریانس مؤلفه‌های مختصاتی دیده می‌شود. بنابراین در روز ۲۸۵، با ۴۰ دقیقه از مشاهدات ایستگاه می‌توان به دقت‌های ۱۲/۱۸، ۱۰/۱۷ و ۵۸/۶۷ میلی‌متر در مؤلفه‌های مختصاتی X، Y و Z دست یافت. شکل ۷، نتایج زمان همگرایی را در ۶ ساعت از مشاهدات ایستگاه تهران و در روزهای ۱۵ و ۲۸۵ برای سه حالت مدل پیشنهادی (PCA-FIS)، مدل GIM و روش PPP نمایش می‌دهد.

بر اساس شکل ۷ برای روز ۱۵ و در مدل PCA-FIS از دقیقه ۷۰ و برای مدل GIM از دقیقه ۸۵ واریانس مختصات سه‌بعدی تقریباً ثابت مانده و تغییرات بسیار اندکی در هر دو مدل داشته است. به‌عبارت دیگر با استفاده از ۷۰ دقیقه مشاهدات روز ۱۵ برای مدل PCA-FIS و ۸۵ دقیقه برای مدل GIM جواب مسئله به مقدار بهینه همگرا شده است. در روز ۲۸۵ و برای مدل PCA-FIS از دقیقه ۴۰ و برای مدل GIM از دقیقه ۸۵ به بعد همگرایی به جواب بهینه اتفاق افتاده است. سرعت همگرایی در روش PPP تقریباً مشابه مدل PCA-FIS است اما از لحاظ واریانس، در هر دو روز مورد مطالعه مقدار عددی کمتری



(ب)



(الف)

شکل ۷. منحنی تغییرات واریانس مختصات سه‌بعدی در زمان برای روزهای ۱۵ (الف) و ۲۸۵ (ب) در مدل‌های PCA-FIS، GIM و روش PPP.

مشخص شد با استفاده از مدل پیشنهادی این مقاله، بهبودی در حدود ۵ الی ۱۰ میلی‌متر در هر سه مؤلفه  $x$ ،  $y$  و  $z$  به وجود آمده است. همچنین زمان همگرایی به جواب بهینه نیز مورد بررسی قرار گرفت که مشخص شد با استفاده از حداقل ۴۰ دقیقه از مشاهدات ایستگاه می‌توان به دقتی در حدود ۵۱ میلی‌متر در مختصات سه‌بعدی دست یافت. نتایج حاصل از این مقاله نشان می‌دهد که روش PCA-FIS یک روش با دقت، صحت و سرعت بالا جهت مدل‌سازی سری زمانی تغییرات TEC است. به‌عنوان پیشنهاد برای کارهای آینده می‌توان از تعداد مشاهدات در سال‌های بیشتر جهت مدل‌سازی دقیق‌تر و همچنین شناخت فرکانس‌های بیشتر از رفتار یونوسفر اشاره کرد.

#### مراجع

- Amerian, Y., Hossainali, M., Voosoghi, B. and Ghaffari Razin, M. R., 2010, Tomographic Reconstruction of the Ionospheric Electron Density in term of Wavelets. *International Journal of Aerospace science and Technologie*.
- Austen, J.R., Franke, S.J. and Liu, C.H., 1988, Ionospheric imaging using computerized tomography. *Radio Science*, 23(3), 299-307.
- Andreeva, E.S., Galinov, A.V., Kunitsyn, V.E., Mel'nichenko, Y.A., Tereshchenko, E.D., Filimonov, M.A. and Chernykov, S.M., 1990, Radio tomographic reconstructions of ionization dip in the plasma near the Earth. *Journal of Experimental and Theoretical Physics Letter* 52, 145-148.
- Ansari, K., Panda, S. K., Althuwaynee, O. F. and Corumluoglu, O., 2017, Ionospheric TEC from the Turkish Permanent GNSS Network (TPGN) and comparison with ARMA and IRI models. *Astrophys Space Sci.*, 362:178.
- Amerian, Y., Voosoghi, B. and Hossainali, M.M., 2013a, regional ionosphere modeling in support of IRI and wavelet using GPS observations. *Acta Geophysica*, 61(5), 1246-1261.
- Amerian, Y., Voosoghi, B. and Hossainali, M.M., 2013b, Regional improvement of IRI extracted ionospheric electron density by compactly supported base functions using GPS observations. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 92 (2013) 23-30.
- Abdi, N., Ardalan A.A. and Karimi, R. 2019, Rapid local ionosphere modeling based on Precise Point Positioning over Iran: A case study under 2014 solar maximum. *Advances in Space Research* 2019, (63):937-949.
- Akhoondzadeh, M., 2014, Investigation of GPS-TEC measurements using ANN method indicating seismo-273 ionospheric anomalies around the time of the Chile (Mw = 8.2) earthquake of 01 April 2014. *Advance in space research.*, 54(9), 1768-1772.
- Alken, P., Maute, A., Richmond, A. D., Vanhami, K. and Egbert, G. D., 2017, An application of principal component analysis to the interpretation of ionospheric current systems. *J. Geophys. Res. Space Physics*, 122, 5687-5708, doi:10.1002/2017JA024051.
- Etemadifard, H. and Hossainali, M.M., 2016, Application of Slepian Theory for Improving the Accuracy of Global Ionosphere Models in the Arctic Region. *J. Geophys. Res. Space Physics.*, 121(3), 2583-2594.
- Feizi, R., Voosoghi, B. and Ghaffari Razin, M. R., 2019, Evaluation of the Efficiency of the Adaptive Neuro Fuzzy Inference System (ANFIS) in the Modeling of the Ionosphere Total Electron Content Time Series Case Study: Tehran Permanent GPS Station. *JGST.*, 8 (4), 109-119.
- Feizi, R., Voosoghi, B. and Ghaffari Razin, M.R., 2020, Regional modeling of the ionosphere using adaptive neuro-fuzzy inference system in Iran. *Advances in space research*. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.02.027>.
- Gao, Y., Liao, Z. and Liu, Z., 2002, Ionosphere Modeling Using Carrier Smoothed Ionosphere Observations from a Regional GPS Network. *Geomatica*, 56(2), 97-106.
- Ghaffari Razin, M.R., Voosoghi, B. and



- Mohammadzadeh, A., 2015, Efficiency of artificial neural networks in map of total electron content over Iran. *Acta Geod Geophys*, DOI 10.1007/s40328-015-0143-3.
- Ghaffari Razin, M.R. and Voosoghi, B., 2016, Wavelet neural networks using particle swarm optimization training in modeling regional ionospheric total electron content, *Journal of Atmospheric and Solar–Terrestrial Physics*, 149(2016), 21–30 <http://dx.doi.org/10.1016/j.jastp.2016.09.005>.
- Hirooka, S., Hattori, K. and Takeda, T., 2011, Numerical validations of neural-network-based ionospheric tomography for disturbed ionospheric conditions and sparse data, *Radio Sci.*, 46, RS0F05, doi: 10.1029/2011RS004760.
- Habarulema, J.B., McKinnell, L.-A., Cilliers, P.J. and Opperman, B.D.L., 2009, Application of neural networks to South African GPS TEC modelling. *Adv. Space Res.*, 43(11), 1711–1720. doi:10.1016/j.asr.2008.08.020, 2009.
- Komjathy, A. and Langley, R. B., 1996, An Assessment of Predicted and Measured Ionospheric Total Electron Content Using a Regional GPS Network. *Proceedings of the National Technical Meeting of the Institute of Navigation*, pp. 615-624.
- Liu, Z. and Gao, Y., 2003, Ionospheric TEC predictions over a local area GPS reference network. *GPS Solutions*, 8(1), 23–29.
- Liu, Z., 2004, Ionospheric Tomographic Modeling, UCGE Reports, Number 20198, University of CALGARY.
- Lin, J.-W., 2012, Nonlinear principal component analysis in the detection of ionospheric electron content anomalies related to a deep earthquake (>300 km, M 7.0) on 1 January 2012, Izu Islands, Japan, *J. Geophys. Res.*, 117, A06314, doi:10.1029/2012JA017614.
- Mallika, I., Ratnam, D., Sivavaraprasad, G. and Raman, S., 2018, Implementation of Hybrid Ionospheric TEC Forecasting Algorithm Using PCA-NN Method. *IEEE JOURNAL OF SELECTED TOPICS IN APPLIED EARTH OBSERVATIONS AND REMOTE SENSING*.
- Mars, P., Chen, J.R. and Nambiar, R., 1996, *Learning Algorithms: Theory and Applications in Signal Processing, Control and Communications*, CRC Press, Boca Raton, Florida, 1996.
- Natali, M.P. and Meza, A., 2017, PCA and vTEC climatology at midnight over mid-latitude regions. *Earth Planets Space* 69, 168 (2017) doi:10.1186/s40623-017-0757-5
- Rodrigo, F. Leandro., 2007, A New Technique to TEC Regional Modeling using a Neural Network. *Geodetic Research Laboratory, Department of Geodesy and Geomatics Engineering, University of New Brunswick, Fredericton, Canada.*
- Seeber, G., 2003, *Satellite Geodesy, Foundations, Methods and Application*, Walter de Gruyter, Berlin and New York, 531.
- Sharifi, M.A. and Farzaneh, S., 2015, Regional TEC dynamic modeling based on Slepian functions. *Advances in Space Research*, 56(5):907-915.
- Sharifi, M.A. and Farzaneh, S., 2014, The spatio-spectral localization approach to modeling VTEC over the western part of the USA using GPS observations. *Advances in Space Research*, 54 (6), 908-916.
- Sabzehee, F., Farzaneh, S., Sharifi, M.A. and Akhoondzadeh, M., 2018, TEC Regional Modeling and prediction using ANN method and single frequency receiver over IRAN. *ANNALS OF GEOPHYSICS*. 2018; 61(1).
- Talaat, E. R. and Zhu, X., 2016, Spatial and temporal variation of total electron content as revealed by principal component analysis. *Annales Geophysicae*, 34(12).
- Takagi, T. and Sugeno, M., 1985, Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control, *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 15(1), 116-132.

## Application of Principal Component Analysis (PCA) in Fuzzy Inference System (FIS) for Time-Series Modeling of Ionosphere

Ghaffari Razin, M. R.\*

Assistant Professor, Department of Geoscience Engineering, Faculty of surveying, Arak University of Technology, Arak, Iran

(Received: 21 Jan 2020, Accepted: 24 Jan 2021)

### Summary

The ionosphere is a layer of Earth's atmosphere extending from an altitude of 100 to more than 1000 km. Typically total electron content (TEC) is used to study the behavior and properties of the ionosphere. In fact, TEC is the total number of free electrons in the path between the satellite and the receiver. TEC varies greatly with time and space. TEC temporal frequencies can be considered on a daily, monthly, seasonal and annual basis. Understanding these variations is crucial in space science, satellite systems and positioning. Therefore, ionosphere time series modeling is very important. It requires a lot of observations to model the ionosphere temporal frequencies. As a result, it requires a model with high speed and accuracy. In this paper, a new method is presented for modeling the ionosphere time series. The principal component analysis (PCA) method is combined with the fuzzy inference system (FIS) and then, the ionosphere time series are modeled. The advantage of this combination is to increase the computational speed, reduce the convergence time to the optimal solution as well as increase the accuracy of the results. With the proposed model, the ionosphere can be analyzed at shorter time resolutions.

Principal component analysis is a statistical procedure that uses an orthogonal transformation to convert a set of observations of possibly correlated variables into a set of values of linearly uncorrelated variables called principal components. This transformation is defined in such a way that the first principal component has the largest possible variance, and each succeeding component in turn has the highest variance possible under the constraint that it is orthogonal to the preceding components. The resulting vectors are an uncorrelated orthogonal basis set. PCA is sensitive to the relative scaling of the original variables. Fuzzy inference systems (FIS) take inputs and process them based on the pre-specified rules to produce the outputs. Both the inputs and outputs are real-valued, whereas the internal processing is based on fuzzy rules and fuzzy arithmetic. FIS is the key unit of a fuzzy logic system having decision making as its primary work. It uses the "IF...THEN" rules along with connectors "OR" or "AND" for drawing essential decision rules.

To evaluate the proposed method of this paper, observations of Tehran's GNSS station, in 2016 have been used. This station is one of the International GNSS Service (IGS) in Iran. Therefore, its observations are easily accessible and evaluated. The statistical indices  $dVTEC = |VTEC_{GPS} - VTEC_{model}|$ , correlation coefficient and root mean square error (RMSE) are used to evaluate the new method. The statistical evaluations made on the  $dVTEC$  show that for the PCA-FIS combination model, this index has a lower numerical value than the FIS model without PCA as well as the global ionosphere map (GIM-TEC) and NeQuick empirical ionosphere model. The correlation coefficients are obtained 0.890, 0.704 and 0.697 for PCA-FIS, GIM and NeQuick models with respect to the GPS-TEC as a reference observation. Using the combination of PCA and FIS, the convergence speed to an optimal solution decreased from 205 to 159 seconds. Also, the RMSE of training and testing steps have also been significantly reduced. Northern, eastern, and height component analysis in precise point positioning (PPP) also show higher accuracy of the proposed model than the GIM and NeQuick model. The results of this paper show that the PCA-FIS method is a new method with precision, accuracy and high speed for time series modeling of TEC variations.

**Keywords:** Ionosphere, fuzzy network, principal component analysis, GPS.

\* Corresponding author:

mr.ghafari@arakut.ac.ir