فیزیک زمین و فضا، دوره ۴۱، شماره ۳، پاییز ۱۳۹۴، صفحهٔ ۴۷۳- ۴۸۵

پیش‌بینی محتوای کلی الکترون قائم یون‌سپهری با شبکهٔ عصبی برای یک موقعیت خاص و مقایسه با مدل مرجع یون‌سپهری بین‌المللی

فریده سبزه‌ای[1*]، محمدعلی شریفی[2]، مهدی آخوندزاده[3] و سعید فرزانه[4]

۱. کارشناسی ارشد ژئودزی-هیدروگرافی، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران، ایران
۲. دانشیار، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران، ایران
۳. استادیار، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران، ایران
۴. دانشجوی دکتری ژئودزی، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران، ایران

(دریافت: ۹۳/۴/۱۶، پذیرش نهایی: ۹۴/۷/۱۴)

چکیده

با ظهور انواع ماهواره‌ها در چند دههٔ اخیر، مطالعهٔ لایهٔ یون‌سپهر به یکی از مهم‌ترین موضوع‌ها در علوم مختلف تبدیل شده است؛ چراکه امواج ارسالی از این ماهواره‌ها به سمت زمین ناگزیر از یون‌سپهر عبور می‌کنند. خطای یون‌سپهری یکی از مهم‌ترین عوامل ایجاد خطا در اندازه‌گیری‌های تعیین موقعیت و ناوبری با GPS محسوب می‌شود، به‌طوری‌که برای ناوبری دقیق، به داشتن تأخیر یون‌سپهری نیاز است. گیرنده‌های دوفرکانسه قادرند بخش عمده‌ای از این تأخیر را محاسبه کنند ولی در مواردی که فقط از اطلاعات یک فرکانس استفاده می‌شود یا گیرندهٔ دوفرکانسه در دسترس نیست، لازم است به طریقی مدل و اثر این خطا را که در مواقع حداکثر فعالیت خورشیدی به چند ppm نیز می‌رسد، تا حد امکان کاهش دهیم. پیچیدگی تغییرات در لایهٔ یون‌سپهری موجب عدم حذف کامل اثر یون‌سپهری شده است. در گیرنده‌های تک فرکانسه به‌منظور کاهش خطای یون‌سپهری می‌توان از مدل یون‌سپهری (کلوبوچار) موجود در پیغام ناوبری ارسال‌شده از ماهواره استفاده کرد. در این تحقیق کاربرد شبکهٔ عصبی در مدل‌سازی و پیش‌بینی محتوای کلی الکترون قائم در بالای منطقه‌ای واقع در استان سیستان و بلوچستان (ایرانشهر) کشور ایران برای سال ۲۰۰۶ که فعالیت خورشیدی در سطح پایینی بوده، بررسی شده است. شبکهٔ عصبی پسخور با یک لایهٔ پنهان و الگوریتم انتشار روبه عقب طراحی شده است و پارامترهای فضای ورودی شبکهٔ عصبی تغییرات روزانه، تغییرات فصلی، فعالیت‌های خورشیدی و ژئومغناطیسی می‌باشند. این مدل با محتوای کلی الکترون قائم GPS و مدل IRI2007 در چهار زمان انقلابین و اعتدالین مقایسه شده و در تمامی این زمان‌ها مدل شبکهٔ عصبی دقیق‌تر از مدل IRI2007 برای کشور ایران عمل کرده است.

واژه‌های کلیدی: سیستم تعیین موقعیت جهانی، شبکهٔ عصبی، محتوای کلی الکترون قائم، مدل مرجع یون‌سپهری بین‌المللی

۱. مقدمه

یون‌سپهر بخشی از اتمسفر زمین در ارتفاع حدوداً بین ۵۰ تا ۱۴۰۰ کیلومتر است که از تعامل بین اشعهٔ ایکس و ماورای بنفش با اتمسفر خنثی و همچنین اثرات تابش خورشیدی به وجود آمده است. از آنجا که امواج با فرکانس‌های مختلف وارد جو می‌شوند، لایه‌های یونیدهٔ متعددی در ارتفاعات مختلف شکل می‌گیرد. امواج پرانرژی ماورای بنفش و پرتو ایکس خورشید به‌طور متناوب وارد جو می‌شوند، به اتم‌ها و مولکول‌های گازهای خنثی برخورد کرده و یک یا چند الکترون را از هر اتم جدا می‌کنند. این الکترون‌های آزاد که مقداری از انرژی ماورای بنفش را جذب می‌کنند، یک لایهٔ یونیده تشکیل می‌دهند که یون‌سپهر نام دارد. امواج ماورای بنفش با فرکانس‌های بالاتر، بیشتر به جو نفوذ می‌کنند و بنابراین لایه‌های یونیده را در بخش‌های پایین‌تری از یون‌سپهر تولید می‌کنند. برعکس، امواج با فرکانس‌های پایین‌تر کمتر نفوذ می‌کنند و در نواحی فوقانی یون‌سپهر لایه‌هایی را تشکیل می‌دهند. یون‌سپهر محیطی ناهمگن و تغییرپذیر با زمان و مکان است. تغییرات زمانی منظم و نامنظم یون‌سپهر موجب ناپدیدشدن، شکست و تفرق سیگنال‌های ارتباطی ماهواره می‌شود. الکترون آزاد در آن لایه بر مسیر امواج رادیویی تأثیرگذار است؛ بنابراین تحلیل و بررسی ویژگی تغییرپذیری یون‌سپهری، هم در

*نگارنده رابط: E-mail: far_sabzehee@ut.ac.ir

فیزیک یون‌سپهر و هم در ارتباطات ماهواره نقش بسزایی دارد. پارامتری که قابلیت نمایش رفتار زمانی و مکانی یون‌سپهر در شرایط خورشیدی و ژئومغناطیسی گوناگون را دارد و همچنین منبع اصلی تفرق امواج الکترومغناطیسی است، محتوای کلی الکترون یا TEC نامیده می‌شود. برآورد محتوای کلی الکترون (TEC) یکی از روش‌های تحقیق در ساختار زمانی و فضایی و تغییرپذیری یون‌سپهر است (ما و مارویاما، ۲۰۰۳؛ درگونیکز، ۲۰۱۴).

محتوای کلی الکترون، مجموع الکترون‌های موجود در استوانه‌ای به سطح مقطع ۱ مترمربع که در مسیر سیگنال از ماهواره تا گیرنده گسترده شده است، تعریف می‌شود و برحسب واحد TECU که معادل 10^{16} الکترون بر مترمربع است، بیان می‌گردد. در سال‌های اخیر سیگنال‌های دوفرکانسی سیستم موقعیت‌یابی جهانی (GPS) به‌طور گسترده برای برآورد مقادیر محتوای کلی الکترون منطقه‌ای و جهانی استفاده می‌شوند. ماهواره‌های GPS در مقایسه با روش‌های سنتی و قدیمی‌تر یون‌سپهری مانند یونوسوندها و رادارهای پراکنده‌ساز، Top Sounderها، راکت‌های اندازه‌گیری در محل و... قادر به تشخیص دقیق‌تر پارامترهای یون‌سپهری و استخراج محتوای کلی الکترون هستند. برآورد محتوای کلی الکترون می‌تواند از تأخیر زمانی حرکت سیگنال‌های GPS ثبت‌شده در گیرنده‌های زمینی حاصل گردد. شبه‌فاصله کد (code pseudorange) و فاز موج حامل (carrier phase) مشاهدات پایهٔ GPS هستند که از آن‌ها برای محاسبهٔ شبه‌فاصلهٔ بین ماهواره و گیرنده استفاده می‌شود. از طریق شباهت‌سنجی کد دریافتی از ماهواره با کد تولیدشده در گیرنده، مدت‌زمان سیر سیگنال از ماهواره تا گیرنده برآورد می‌شوند و با ضرب این زمان در سرعت نور، شبه‌فاصله ماهواره تا گیرنده محاسبه می‌گردد که تحت تأثیر منابع مختلف خطاست و بیانگر فاصلهٔ هندسی ماهواره تا گیرنده نیست. معادلهٔ مشاهدهٔ فاز موج حامل که بر روی دو موج حامل L1 و L2 مدوله می‌شود، به ترتیب در روابط (۱) و (۲) آورده شده است.

$$\boldsymbol{\varphi_{L_1} = \rho + d\rho + c(dt - dT) + N_1\lambda_1 - a.\frac{TEC}{f_1^{\,2}} + d_{trop} + \varepsilon_1} \quad (۱)$$

$$\boldsymbol{\varphi_{L_2} = \rho + d\rho + c(dt - dT) + N_2\lambda_2 - a.\frac{TEC}{f_2^{\,2}} + d_{trop} + \varepsilon_2} \quad (۲)$$

ترکیب خطی عاری از اثر یون‌سپهر (Ionosphere-Free linear combination) فاز موج حامل را که برای حذف اثر یون‌سپهر به نام L3 به کار می‌رود، می‌توان به‌صورت رابطهٔ ۳ بیان کرد (کولینز، ۱۹۹۹):

$$\varphi_{L_3} = \frac{f_2^{\,2}\varphi_2 - f_1^{\,2}\varphi_1}{f_2^{\,2} - f_1^{\,2}} = \rho + d\rho + c(dt - dT) + \frac{1}{f_2^{\,2} - f_1^{\,2}}\left(N_2\lambda_2 f_2^{\,2} - N_1\lambda_1 f_1^{\,2}\right) + d_{trop} + \frac{1}{f_2^{\,2} - f_1^{\,2}}\left(f_2^{\,2}\varepsilon_2 - f_1^{\,2}\varepsilon_1\right) \quad (۳)$$

برای استفاده از این ترکیب به داده‌های دوفرکانسه نیاز داریم. در رابطهٔ ۳، تأخیر یون‌سپهری ($d_{ion_{L_i}} = a.\frac{TEC}{f_i^{\,2}}$ i = 1, 2) حذف شده است. پارامترهای λ_1 و λ_2 طول موج دو موج حامل L_1 و L_2، N_1 و N_2 ابهام فاز دو موج حامل L_1 و L_2 و تأخیر تروپسفری (d_{trop}) و خطای مداری ($d\rho$)، dt و dT به ترتیب اختلاف ساعت ماهواره و گیرنده با زمان GPS و ε_1 و ε_2 مجموع خطای چندمسیری و نویز اندازه‌گیری در مشاهدات فاز موج حامل باقی مانده‌اند. این ترکیب خطی نقش مهمی در حل ابهام فاز (البته به‌صورت ترکیبی با دیگر ترکیبات خطی) ایفا می‌کند. در حال حاضر خطای یون‌سپهری مهم‌ترین مانع دستیابی به دقت‌های بالا در گیرنده‌های تک‌فرکانسه به شمار می‌رود. برای برخورد با بایاس یون‌سپهری در گیرنده‌های دوفرکانسه، از داده‌های دوفرکانسه و موج عاری از یون‌سپهر و همچنین در گیرنده‌های تک‌فرکانسه، از مدل‌های یون‌سپهری ارسال‌شده توسط ماهواره یا روش‌های تفاضلی می‌توان استفاده کرد، زیرا در سخت‌افزار این گیرنده‌ها توانایی حذف تأخیر یون‌سپهری تعبیه نشده است و تعیین موقعیت با خطای زیادی صورت می‌گیرد. درگیرنده‌های دوفرکانسه، تأخیر یون‌سپهری به‌طور مستقیم با مقایسهٔ

تأخیرها روی فرکانس‌های L1 (۱۵۷۵,۴۲ مگاهرتز) و L2 (۱۲۲۷,۶۰ مگاهرتز) قابل تخمین هستند (مگز، ۲۰۰۵؛ هافمن ولنهف و همکاران، ۱۹۹۲؛ میزرا و انگه، ۲۰۰۶؛ آپرمن و همکاران، ۲۰۰۷؛ هابارولما و همکاران، ۲۰۱۰). بنابراین برای تخمین محتوای کلی الکترون، گیرنده‌های دوفرکانسه به گیرنده‌های تک‌فرکانسه ارجحیت دارند، زیرا گیرنده‌های دوفرکانسه به‌گونه‌ای طراحی شده‌اند تا خطای یون‌سپهری را که منبع اصلی خطا در اندازه‌گیری‌هاست، حذف کنند. گیرنده‌های تک‌فرکانسه قابلیت حذف اثر یون‌سپهر را با L3 ندارند و بنابراین باید از مدل‌های موجود استفاده کنند.

سرویس بین‌المللی (GPS) International GNSS Service(IGS)، نقشه‌های جهانی یون‌سپهر (GIM) Global Ionosphere Maps را با قدرت تفکیک مکانی ۲,۵° در عرض جغرافیایی و ۵° در طول جغرافیایی و قدرت تفکیک زمانی ۲ ساعته تولید می‌کند (دَاُو و همکاران، ۲۰۰۹؛ شائر و همکاران، ۱۹۹۸). از جمله معایب نقشه‌های GIM حاصل از IGS، نداشتن قدرت تفکیک مکانی و زمانی زیاد است؛ در صورتی که در امور ناوبری، تعیین موقعیت استاتیک و تحقیقات آب و هوایی و کاربردهای دیگر به تولید مدل‌های محلی یون‌سپهر با قدرت تفکیک زیاد نیاز است (کوجامتی، ۱۹۹۷؛ هرناندز-پاجارز و همکاران، ۱۹۹۹؛ گائو و همکاران، ۲۰۰۲).

یکی از رایج ترین مدل‌های جهانی، مدل مرجع یون سپهری بین‌المللی (IRI2007) است که با در اختیار داشتن ارتفاع، موقعیت، زمان محلی، تعداد لکه‌های خورشیدی و با در نظر گرفتن شرایط ژئومغناطیسی حاکم بر منطقه قادر به تولید متوسط ماهانهٔ TEC است (بیلیتزا، ۲۰۰۱).

با پوشش زمانی و مکانی بسیار بالای مشاهدات ماهواره‌های GPS/GLONASS و صدها ایستگاه زمینی متناظر پخش‌شده در سرتاسر دنیا، دادهٔ محتوای کلی الکترون یون‌سپهری برای تشخیص و اندازه‌گیری تغییرات یون‌سپهر و نابهنجاری‌های آن بسیار خوب عمل می‌کند. اگر ایستگاه‌های GPS به‌صورت منظم و با پراکندگی همگنی انتخاب شوند، خطای کمتری در تولید محتوای کلی الکترون و همین‌طور در مدل‌سازی آن در مقایسه با حالتی که ایستگاه‌ها تصادفی و با پراکندگی زیاد و نامنظم انتخاب می‌شوند، به وجود می‌آید (ایلماز و همکاران، ۲۰۰۹).

برای افزایش حساسیت شبکهٔ عصبی در مدل‌سازی یون‌سپهر می‌توان علاوه بر موقعیت و زمان از شاخص‌های ژئومغناطیسی هم استفاده کرد (گوقون و همکاران، ۲۰۰۷). واضح است که سیستم مغناطوسپهر-یون‌سپهر و برهمکنش آن‌ها قویاً تحت کنترل فعالیت خورشید است (هارگریوس، ۱۹۹۲). یون‌سپهر که حاصل از تابش پرتو ایکس و ماورای بنفش ساطع‌شده از خورشید است، عمدتاً هم به‌وسیلهٔ تراز فعالیت خورشیدی و هم تراز آشفتگی ژئومغناطیسی تعیین می‌شود (پرون و فرانسسچی، ۱۹۹۸). شاخص‌های مغناطیسی اندازه‌های ساده‌ای از فعالیت مغناطیسی هستند که نوعاً در دوره‌های زمانی کمتر از چند ساعت اتفاق می‌افتند و توسط مغناط‌سنج‌ها در مشاهدات زمینی ثبت می‌شوند (می‌آد، ۱۹۸۰؛ میک فرون، ۱۹۹۵). تغییراتی که شاخص‌ها اندازه‌گیری می‌کنند، در یون‌سپهر و مغناطوسپهر زمین ریشه دارند. در آفریقای جنوبی مدل‌سازی محتوای کلی الکترون قائم با داده‌های GPS صورت گرفت و محتوای کلی الکترون روزانه‌ای که با مدل شبکهٔ عصبی و مدل مرجع یون‌سپهری بین‌المللی به دست آمد، با محتوای کلی الکترون تولیدشده از مشاهدات GPS مقایسه و چنین نتیجه‌گیری شد که مدل مرجع یون‌سپهری بین‌المللی، در زمان اعتدال بهاری، پیش‌بینی دقیق‌تری در مقایسه با شبکهٔ عصبی دارد، ولی مقایسهٔ میانگین پیش‌بینی‌های محتوای کلی الکترون با شبکهٔ عصبی و مدل مرجع یون‌سپهری بین‌المللی با محتوای کلی الکترون مشاهده‌شده با GPS آفریقای جنوبی، نشان داد که شبکهٔ عصبی با دقت بیشتری پیش‌بینی می‌کند (هابارولما و همکاران، ۲۰۰۷).

در این تحقیق داده‌های یک سال (۲۰۰۶) مشاهدات

GPS حدود ۲۰ ایستگاه ژئودینامیکی سازمان نقشه‌برداری کشور وارد نرم‌افزار برنیز شده است و به محاسبهٔ محتوای کلی الکترون پرداخته و برای مدل‌سازی با شبکهٔ عصبی، برای حذف موقعیت جغرافیایی از فضای ورودی، از یک موقعیت خاص استفاده شده است. مقایسه‌ای بین خروجی مدل شبکهٔ عصبی با مدل مرجع یون‌سپهری بین‌المللی و محتوای کلی الکترون مشاهده‌شده با GPS یا همان GPS TEC انجام گرفت و چنین نتیجه‌گیری شد که برای کشور ایران مدل مرجع یون‌سپهری بین‌المللی برآوردی غیردقیق از محتوای کلی الکترون قائم ارائه می‌دهد؛ به این دلیل که منابع اصلی مدل مرجع یون‌سپهری بین‌المللی شامل یونوسوندها و رادارهای پراکنده‌ساز ناهمبسته و ... در سراسر جهان است و در منطقه فقط یونوسوند مؤسسهٔ ژئوفیزیک در ایران وجود دارد که آن هم نیمه‌فعال است. با توجه به مطالب گفته‌شده مدل مرجع یون‌سپهری بین‌المللی کارایی لازم را برای کشور ایران ندارد. در این راستا در این پژوهش به دنبال راه‌حلی برای رفع این نقصان هستیم.

۲. روش پژوهش

۲. ۱. شبکهٔ عصبی

یک شبکهٔ عصبی مصنوعی (Artificial Neural Network) ANN ایده‌ای است برای پردازش اطلاعات که از سیستم عصبی زیستی الهام گرفته‌شده است و مانند مغز به پردازش اطلاعات می‌پردازد. عنصر کلیدی این ایده، ساختار جدید سیستم پردازش اطلاعات است. این سیستم از شمار زیادی عناصر پردازشی فوق‌العاده به‌هم‌پیوسته تشکیل شده است (neurons) که برای حل یک مسئله با هم هماهنگ عمل می‌کنند. شبکه‌های عصبی، با داشتن قابلیت بالایی در استنتاج معانی از داده‌های پیچیده یا مبهم، می‌تواند برای استخراج الگوها و شناسایی روش‌هایی که آگاهی از آن‌ها برای انسان و دیگر تکنیک‌های کامپیوتری بسیار پیچیده و دشوار است، به کار گرفته شود.

۲. ۱. ۱. شبکهٔ عصبی پرسپترون

این شبکهٔ عصبی بر مبنای واحدی محاسباتی به نام پرسپترون ساخته می‌شود. یک پرسپترون، برداری از ورودی‌ها با مقادیر حقیقی را گرفته (رابطهٔ ۴) و یک ترکیب خطی از ورودی‌ها را محاسبه می‌کند (هیکین، ۱۹۹۴؛ فاست، ۱۹۹۴). اگر حاصل، از یک مقدار آستانه بیشتر بود، خروجی پرسپترون برابر با 1 ودر غیر این صورت معادل 1- خواهد بود. شبکه‌های عصبی پرسپترون، به‌ویژه پرسپترون چندلایه، در زمرهٔ کاربردی‌ترین شبکه‌های عصبی هستند. این شبکه‌ها قادرند با انتخاب مناسب تعداد لایه‌ها و سلول‌های عصبی که اغلب هم زیاد نیستند، نگاشتی غیرخطی با دقت دلخواه صورت دهند.

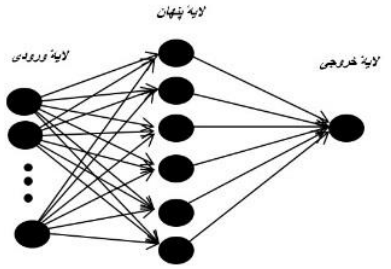
در طراحی شبکهٔ عصبی از شبکه‌های پسخور (feedforward) استفاده شده است. در این شبکه‌ها، سیگنال فقط اجازهٔ عبور در یک جهت را دارد و از ورودی به خروجی انتقال صورت می‌گیرد (شکل ۱).

طبق رابطهٔ ۴ داریم (هیکین، ۱۹۹۴؛ فاست، ۱۹۹۴):

$$y_k = \Psi(\sum_{i=1}^{m}(x_i w_{ki}) + b_k) \qquad (۴)$$

در رابطهٔ (۴)، y_k نورون خروجی؛ Ψ، تابع فعال؛ m، تعداد پارامترهای ورودی؛ x، پارامتر ورودی؛ w، وزن بین دو نورون و در نهایت b بایاس‌است. دامنهٔ نرمال‌شدهٔ یک نورون در $[0,1]$یا $[-1,1]$ تغییر می‌کند و محدودهٔ تغییر، به نوع تابع فعال‌سازی بستگی دارد. در این تحقیق، تابع فعال‌سازی شبکهٔ عصبی $(\varphi(x))$ ، تانژانت هایپربولیک سیگوئیدی است و رابطهٔ (۵) این تابع را نمایش می‌دهد.

$$\Psi(x) = \frac{2}{1+e^{-2x}} - 1 \qquad (۵)$$



شکل ۱. شبکهٔ عصبی پسخور شامل چندین ورودی، یک لایهٔ پنهان و یک خروجی نمایش داده شده است.

یون‌سپهر تغییرات زمانی و مکانی زیادی دارد و تغییرات زمانی نیز شامل منظم و نامنظم است؛ تغییرات منظم قابل مدل‌سازی و پیش‌بینی است ولی به دلیل غیرخطی‌بودن آن، مدل‌سازی‌اش بسیار پیچیده می‌شود و عوامل دیگری هم دخیل‌اند که ناشی از رفتارهای غیرعادی خورشید نظیر توفان‌های یون‌سپهری، طوفان‌های وابسته به شفق‌های قطبی و ... هستند (هارگریاوس، ۱۹۹۲؛ اسکون، ۱۹۹۸؛ کلی، ۲۰۰۹) و ما را به استفاده از جعبهٔ سیاه ناگزیر می‌کند تا با دادن ورودی و آموزش شبکه، خود را از مواجه‌شدن با پارامترهای زیاد و پیچیده دور نماییم.

۲. ۲. شاخص‌های ژئومغناطیسی و خورشیدی

فعالیت‌های ژئومغناطیسی مرتبط با یون‌سپهر را با شاخص‌های ژئومغناطیسی بیان می‌کنند. بارزترین شاخص ژئومغناطیس، KP است که بیانگر تابش ذرات خورشیدی است و به‌نوعی فعالیت خورشیدی را نشان می‌دهد. شاخص Kp، یک شاخص سه‌ساعتهٔ جهانی است و از میانگین حسابی مقادیر K محاسبه‌شده در ۱۳ ایستگاه به دست می‌آید. شاخص Kp، دارای ۲۸ گام از صفر تا نه است. شاخص Disturbance Storm Time (DST)، شاخص اختلال مغناطیسی استوایی است و با نرخ یک‌ساعته، برداشت و بر اساس نانوثانیه محاسبه می‌شود. شاخص Ap از شاخص Kp مشتق شده است و برای یک شبانه‌روز شامل ۸ مقدار ۳ ساعته است. از شاخص‌های خورشیدی می‌توان Sunspot و F10.7 را نام برد. لایهٔ یون‌سپهر به دلیل ارتباط تنگاتنگ با فعالیت‌های خورشیدی و میدان‌های مغناطیسی موجود در اطراف زمین، با تغییرات خورشید در شبانه‌روز، فصلی و سالانه بسیار هماهنگ است و همچنین با اغتشاشات جوی بی‌ارتباط نیست.

۳. اندازه‌گیری، مشاهده و محاسبه

برای مدل‌سازی محلی یون‌سپهر در ایران داده‌های گیرنده‌های دوفرکانسهٔ تقریباً ۲۰ ایستگاه GPS شبکهٔ سراسری ژئودینامیک ایران (IPGN) در سال ۲۰۰۶، با نرم‌افزار برنیز آنالیز و پردازش شده‌اند. نقشه‌های محتوای کلی الکترون تولیدشده را در بازهٔ زمانی یک‌ساعته و با نرخ ۰/۵ درجه در طول جغرافیایی و ۰/۵ درجه در عرض جغرافیایی استخراج کرده‌ایم، درحالی‌که مدل‌های یون‌سپهری IGS Ionosphere Associate (IAAC) Analysis Centers یا نقشه‌های GIM، در بازه‌های زمانی دو ساعته و با نرخ °۵ در طول و °۲/۵ در عرض جغرافیایی منتشر می‌شوند. مدل‌های محتوای کلی الکترون قائم (VTEC) ایستگاهی در نرم‌افزار برنیز به دو صورت محلی و منطقه‌ای قابل برآورد هستند و با برنامه‌های IONEST و GPSEST برآورد می‌شوند. در این تحقیق از برنامهٔ GPSEST برای تولید محتوای کلی الکترون در بازهٔ یک‌ساله و با نرخ زمانی یک‌ساعته، استفاده و فایل INX را به تعداد روزهای مورد نظر استخراج کرده‌ایم. در کنار داشتن فایل مشاهداتی GPS ایستگاه، به یک‌سری داده‌های جانبی از جمله داده‌های اتمسفری، دوران زمین، مدارهای نهایی ماهوارها و افمریز ساعت ماهواره‌ها هم نیاز است. نرم‌افزار برنیز، باید STEC را که همان محتوای کلی الکترون در راستای دید ماهواره‌ها است، حساب کرده و آن را توسط مدلی در ارتفاع حداکثر غلظت لایهٔ F2 که تقریباً ۴۵۰ کیلومتری سطح زمین در نظر گرفته می‌شود، تصویر کند. نقشه‌های GIM مربوط به مدل Center for Orbit Determination Europe (CODE)، همین ارتفاع را برای تصویر STEC به VTEC درنظر گرفته‌اند (روابط ۶ و ۷ برگرفته از هافمن-ولنهف و همکاران، ۱۹۹۲). مشاهدات محتوای کلی الکترون در راستای عمودی (VTEC)، در موقعیت جغرافیایی نقاط IPP داده می‌شوند. ارتفاع مربوط به حداکثر غلظت لایهٔ F2، (hmF2)، به‌عنوان ارتفاع این لایه در نظر گرفته می‌شود. شکل ۲ بیانگر این مطلب است که برای تبدیل مشاهدات محتوای کلی الکترون مایل به قائم، در ارتفاع ۳۵۰ تا ۴۵۰ کیلومتری سطح زمین، در نقاط IPP این

نگاشت صورت می‌گیرد. در روابط (۶) و (۷)، Re، شعاع زمین و معادل ۶۳۷۰ کیلومتر است و H، ارتفاع مربوط به حداکثر غلظت لایهٔ F2 و برابر با ۴۵۰ کیلومتر و z، معادل زاویهٔ قائم میان گیرندهٔ زمینی و ماهواره است.

$$STEC = \frac{VTEC}{\cos \acute{z}} \quad (۶)$$

$$\sin \acute{z} = \frac{Re}{Re+H} \sin z \quad (۷)$$

همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، نقشهٔ محتوای کلی الکترون قائم روز اول ژانویهٔ ۲۰۰۶، از طریق مشاهدات GPS و توسط نرم‌افزار برنیز تولید شده و نقشهٔ جهانی از طریق سایت ftp://ftp.unibe.ch/aiub/CODE در دسترس قرار گرفته است و توسط برنامه‌نویسی Matlab به‌صورت نقشهٔ محتوای کلی الکترون قائم پیش‌رو است. جای توضیح دارد که نرم‌افزار برنیز تقریباً با ۲۰ ایستگاه این نقشه‌ها را با فاصلهٔ زمانی یک‌ساعته و با قدرت تفکیک مکانی °۰/۵ در طول جغرافیایی و °۰/۵ در عرض جغرافیایی تولید می‌کند، درحالی‌که نقشه‌های GIM با فاصله‌های زمانی دو ساعته و قدرت تفکیک مکانی °۵ در طول جغرافیایی و °۲/۵ در عرض جغرافیایی در دسترس کاربران قرار می‌گیرند و یک پیکسل مشاهداتی در نقشه‌های جهانی یون‌سپهر معادل ۵۰ پیکسل در نقشهٔ تولیدشده با نرم‌افزار برنیز است و همین موضوع نشان می‌دهد که تغییرات جزئی و ریزتر در نقشه‌های جهانی یون‌سپهر از دست می‌رود و تنها، تغییرات بزرگ نمایش داده می‌شود.

در این تحقیق، منطقهٔ مورد مطالعه، ایستگاه ایرانشهر با عرض جغرافیایی °۲۷ و طول جغرافیایی °۶۰ بوده است و فضای ورودی شبکهٔ عصبی باید شامل پارامترهایی باشد که از تأثیر آن‌ها بر محتوای کلی الکترون تولیدشده از GPS آگاهی داریم که شامل تغییرات فصل، تغییرات روزانه و فعالیت خورشیدی و فعالیت مغناطیسی و موقعیت جغرافیایی ایستگاه GPS هستند. حال با در نظر گرفتن یک ایستگاه خاص، تنها با چهار پارامتر تغییرات روزانه، تغییرات فصلی و فعالیت‌های ژئومغناطیسی و خورشیدی سروکار خواهیم داشت و موقعیت جغرافیایی جزو فضای ورودی ما نخواهد بود. تغییرات فصلی و تغییرات روزانه در روابط (۸)، (۹)، (۱۰) و (۱۱) به ترتیب با پارامترهای روز از سال (DN) و ساعت (HR) تعریف شده‌اند (پوله و مکینل، ۲۰۰۰). این دو پارامتر را به دو مؤلفهٔ sin و cos تفکیک کرده‌ایم تا پیوستگی داده به وجود آید؛ DNS، DNC، HRS وHRC به ترتیب معرف مؤلفهٔ سینوسی DN، مؤلفهٔ کسینوسی DN، مؤلفهٔ سینوسی HR و مؤلفهٔ کسینوسی HR هستند (مکینل، ۲۰۰۲). عدد ۰/۲۵ در روابط (۸) و (۹)، نشان‌دهندهٔ سال کبیسه است و ورودی‌های دیگر شبکهٔ عصبی شاخص‌های KP، AP، DST، SUNSPOT و F10.7 هستند.

$$\mathrm{DNS} = \sin\left(\frac{2\pi \times \mathrm{DN}}{365.25}\right) \quad (۸)$$

$$DNC = \cos\left(\frac{2\pi \times DN}{365.25}\right) \quad (۹)$$

$$HRS = \sin\left(\frac{2\pi \times HR}{24}\right) \quad (۱۰)$$

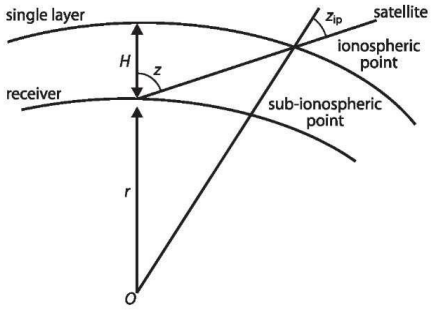
$$HRC = \cos\left(\frac{2\pi \times HR}{24}\right) \quad (۱۱)$$

شاخص‌های ژئومغناطیس و خورشیدی از سایت http://www.geomag.bgs.ac.uk/data_service/space_weather/solar.html، به دست آمده‌اند و تمامی آن‌ها به‌جز Dst با فاصلهٔ زمانی یک‌ساعته درونیابی شده‌اند (شکل ۴). شاخص Kp سه‌ساعته و شاخص‌های F10.7 و Sunspot که شاخص خورشیدی می‌باشند، یک مقدار برای یک روز برایشان ثبت می‌شود.

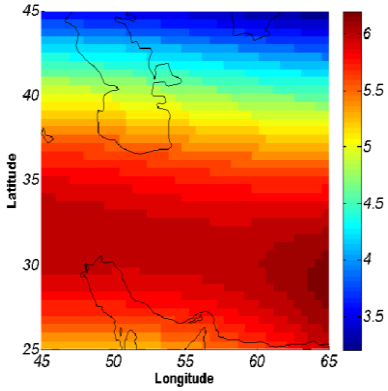
داده‌ها به سه دستهٔ آموزشی، اعتباری و تست تقسیم شده‌اند. دستهٔ آموزشی برای آموزش شبکه و دستهٔ اعتباری برای تعیین عملکرد شبکه روی داده‌هایی است که در یادگیری شبکه آموزش ندیده‌اند و دستهٔ‌آخر برای ارزیابی نهایی و تعیین عملکرد کلی شبکه است. در جدول ۱ این تقسیم‌بندی انجام گرفته است و داده‌ها برای مدل‌سازی وارد شبکه شده‌اند.

تقسیم‌بندی داده‌ها برای آموزش شبکهٔ عصبی و ارزیابی آن طبق جدول ۱ صورت گرفته است و نهایتاً مقادیر محتوای کلی الکترون به‌دست‌آمده با GPS (GPS TEC) را با

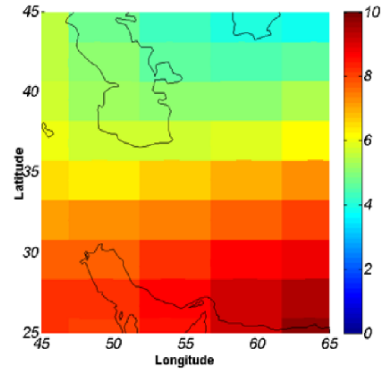
محتوای کلی الکترون محاسباتی و مدل‌سازی شده با شبکهٔ عصبی (NN TEC) مقایسه کرده‌ایم؛ این تناظریابی و شباهت‌سنجی، در سطح بالایی صورت گرفته و نسبت به یکدیگر، تقریباً خطی با زاویهٔ °۴۵ را ساخته‌اند (شکل ۵) و این دلیلی بر عملکرد درست شبکه در مدل‌سازی است.



شکل ۲. هندسهٔ تابع تصویر تبدیل محتوای کلی الکترون مایل به قائم (شائر و همکاران، ۱۹۹۶).

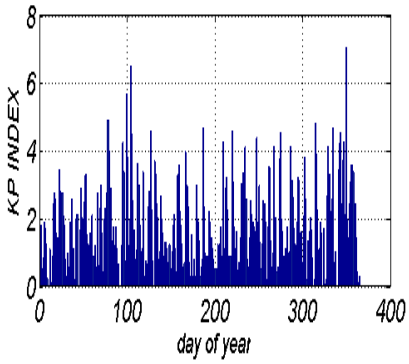


(الف)

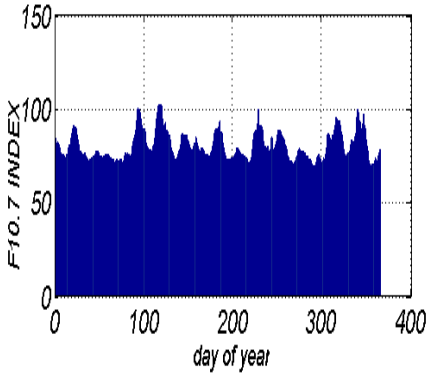


(ب)

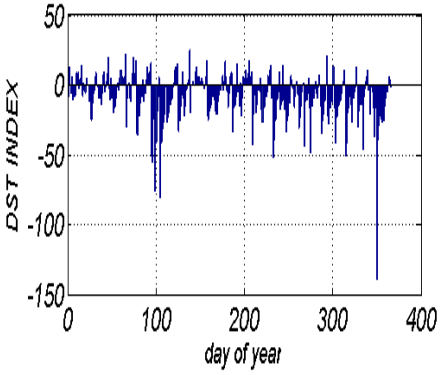
شکل ۳. (الف) محتوای کلی الکترون قائم تولیدشده با نرم‌افزار برنیز با ۲۰ ایستگاه و (ب) محتوای کلی الکترون قائم تولیدشده توسط مدل CODE؛ این نقشه‌ها برای اول ژانویه سال ۲۰۰۶ و ساعت ۲ نیمه شب و در محدودهٔ طول جغرافیایی °۴۵ تا °۶۵ و عرض جغرافیایی °۲۵ تا °۴۵ تهیه شده‌اند.



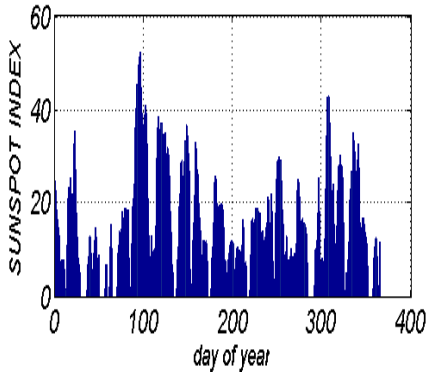
(الف)



(ب)



(ج)

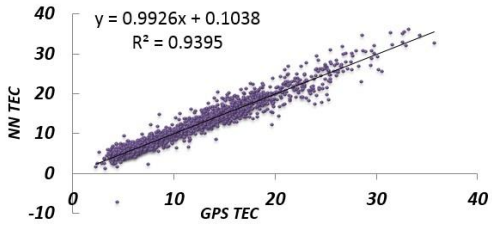


(د)

شکل ۴. نمایی از شاخص‌های ژئومغناطیسی و خورشیدی (الف) Kp، (ب) F10.7، (ج) Dst و (د) Sunspot در ساعت ۶ از سال ۲۰۰۶

جدول ۱. تقسیم‌بندی داده‌ها برای آموزش شبکهٔ عصبی و ارزیابی آن.

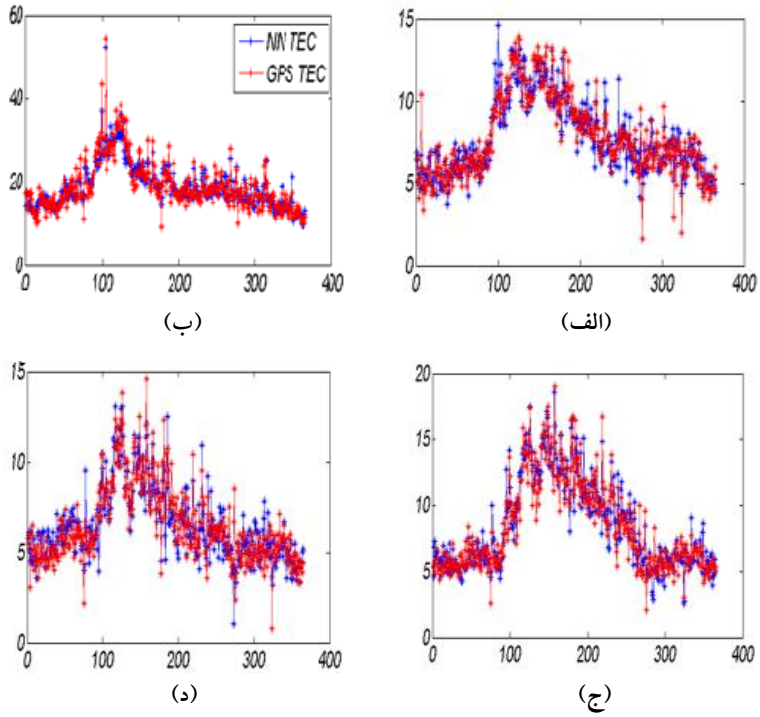
سال	روزها	فاز
۲۰۰۶	**1 Jul-31 Oct**	آموزشی
۲۰۰۶	**1 Nov-10 Nov**	اعتباری
۲۰۰۶	**11 Nov-31 Dec**	کنترلی



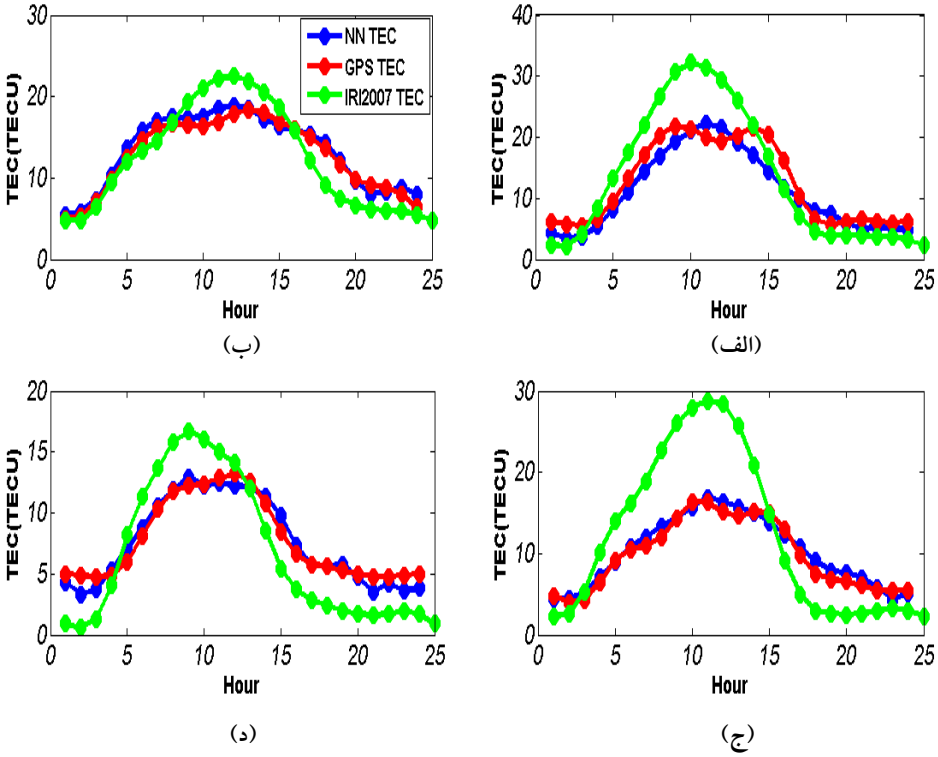
شکل ۵. شباهت بین محتوای کلی الکترون مشاهداتی GPS به نام GPS TEC و محتوای کلی الکترون تولیدشده با شبکهٔ عصبی به نام NN TEC.

۴. بحث و بررسی

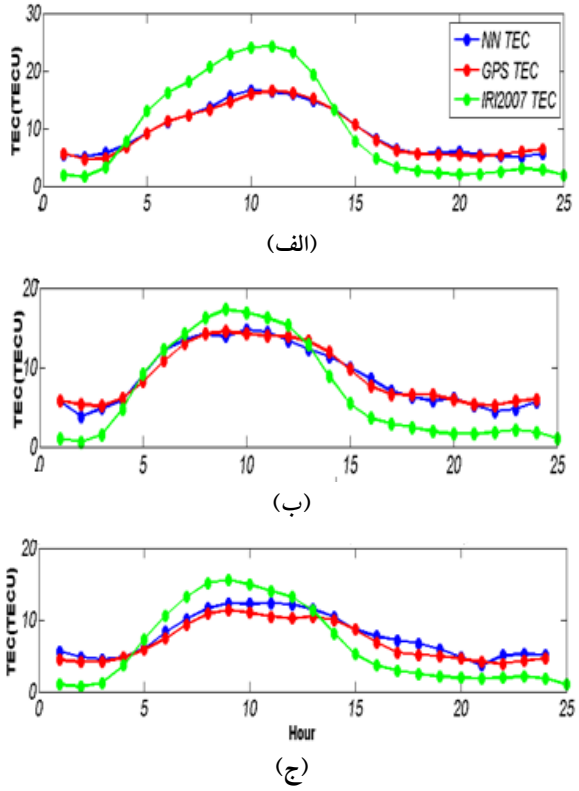
در روزهای اعتدال بهاری (۲۰ مارس ۲۰۰۶)، انقلاب تابستانی (۲۱ ژوئن ۲۰۰۶)، اعتدال پاییزی (۲۳ سپتامبر ۲۰۰۶) و انقلاب زمستانی (۲۱ دسامبر ۲۰۰۶) بیشترین تغییرات در محتوای کلی الکترون قائم رخ می‌دهد؛ به همین دلیل برای بررسی عملکرد و دقت مدل‌سازی با شبکهٔ عصبی، این روزها را مبنای بررسی قرار می‌دهیم. زمان‌های طلوع آفتاب، وسط روز (تقریباً ۱۲ تا ۲ بعدازظهر)، غروب آفتاب و نیمه‌شب، زمان‌های اصلی در تغییرات محتوای کلی الکترون قائم در یک شبانه‌روز به‌حساب می‌آیند. در شکل ۶ این مقایسه انجام گرفته است و شباهت بسیار زیادی بین محتوای کلی الکترون مشاهداتی و محاسباتی دیده می‌شود.



شکل ۶. مقایسهٔ بین محتوای کلی الکترون مشاهداتی (GPS TEC) و محتوای کلی الکترون شبکهٔ عصبی (NN TEC) برای سال ۲۰۰۶ در (الف) طلوع آفتاب (3 UT +3.30)، (ب) وسط روز (10 UT +3.30)، (ج) غروب آفتاب (18 UT+3.30) و (د) نیمه شب (21 UT+3.30).



شکل ۷. مقایسهٔ بین محتوای کلی الکترون مشاهداتی (GPS TEC) و تولیدشده با شبکهٔ عصبی (NN TEC) و مدل مرجع یون‌سپهری بین‌المللی (IRI2007 TEC) در زمان‌های اعتدالین (الف و ج) و انقلابین (ب و د).



شکل ۸. مقایسهٔ میان محتوای کلی الکترون ایجادشده با شبکهٔ عصبی (NN TEC) و محتوای کلی الکترون مشاهداتی (GPS TEC) و مدل مرجع یون‌سپهری بین‌المللی (IRI2007 TEC) در سه زمان مختلف؛ (الف) ۲ نوامبر ۲۰۰۶ و (ب) ۸ دسامبر ۲۰۰۶ و (ج) ۳۰ دسامبر ۲۰۰۶.

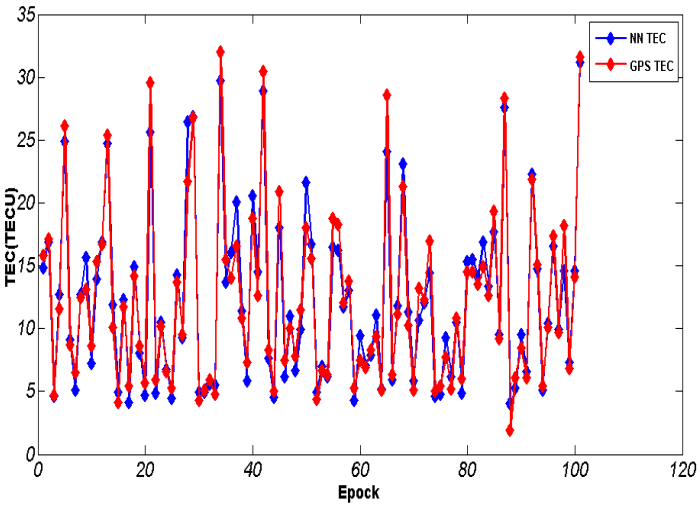
در شکل ۷، محتوای کلی الکترون روزهای اعتدالین و انقلابین به‌صورت مجزا در یک شبانه‌روز بررسی شده‌اند. در روز ۲۰ مارس جدایی بیشتری میان محتوای کلی الکترون مشاهداتی و محاسباتی دیده می‌شود ولی در روزهای ۲۳ سپتامبر تقریباً این جدایی به کمترین مقدار می‌رسد. از طرفی مدل بین‌المللی یون‌سپهری بیشترین مقدار را برای روزهای ۲۰ مارس و ۲۳ سپتامبر شامل می‌شود و جدایی بسیار زیادی با TEC مشاهداتی و TEC محاسباتی دارد. در روزهای انقلابین، جدایی این مدل بین‌المللی یون‌سپهری از TEC مشاهداتی و محاسباتی بسیار کمتر از روزهای اعتدالین است. در روز ۲۱ ژوئن کمترین اختلاف بین این سه مقدار TEC مشاهده می‌شود.

برای اطمینان بیشتر از عملکرد و درست‌بودن شبکه، سه روز متفاوت از روزهای اعتدالین و انقلابین را، انتخاب و محتوای کلی الکترون مشاهداتی (GPS TEC) و محتوای کلی الکترون محاسباتی (NN TEC) و محتوای کلی الکترون به‌دست‌آمده از مدل مرجع یون‌سپهری بین‌المللی (IRI2007 TEC) آن را ترسیم کرده‌ایم (شکل ۸). روزهای انتخاب‌شده از روزهای آموزش‌ندیده هستند که از فاز کنترلی و اعتباری انتخاب شده‌اند (جدول ۱). جدایی میان محتوای کلی الکترون مشاهداتی (GPS TEC) و محاسباتی (NN TEC) در این روزهای انتخابی بسیار ناچیز است. در ۲ نوامبر این اختلاف به کمترین مقدار رسیده است و از طرف دیگر محتوای کلی الکترون مدل مرجع یون‌سپهری بین‌المللی (IRI2007 TEC) در ۸ دسامبر به محتوای کلی الکترون‌های مشاهداتی (GPS TEC) و محاسباتی (NN TEC) نزدیک‌تر شده است.

در شکل ۹، محتوای کلی الکترون مشاهداتی (GPS TEC)، ۳ روز پایانی ماه دسامبر با محتوای کلی الکترون محاسباتی (NN TEC) مقایسه شده و نزدیکی بین مقادیر، کاملاً مشهود است. برای ارزیابی و محاسبهٔ درصد اطمینان از مدل، به محاسبهٔ خطای مطلق و نسبی نیاز است. خطای مطلق، شدت اختلاف بین محتوای کلی الکترون پیش‌بینی‌شده با شبکهٔ عصبی (NN TEC) و محتوای کلی الکترون به دست آمده با GPS (GPS TEC) را می‌دهد و خطای نسبی، سهم خطای مطلق را به محتوای کلی الکترون به‌دست‌آمده از GPS بیان می‌کند. رابطه‌های ۱۲ و ۱۳ برای محاسبهٔ خطای مطلق (E_{abs}) و نسبی (E_{rel}) مطرح شده‌اند (تولونی و همکاران، ۲۰۰۴ و ۲۰۰۶؛ لیاندرو وسنتوز، ۲۰۰۷).

$$|E_{abs}| = |NN\ TEC - GPS\ TEC| \qquad (۱۲)$$

$$|E_{rel}| = \left(\frac{|E_{abs}|}{GPS\ TEC}\right) \times 100 \qquad (۱۳)$$



شکل ۹. مقایسهٔ میان داده‌های تست و داده‌های واقعی صورت گرفته است (محتوای کلی الکترون تولیدشده با شبکهٔ عصبی به رنگ آبی (NN TEC) و محتوای کلی الکترون تولیدشده توسط نرم‌افزار برنیز با مشاهدات GPS به رنگ قرمز (GPS TEC)).

جدول ۲. مقایسه‌ای میان میانگین و انحراف معیار و درصد اطمینان مدل برای سال ۲۰۰۶ طبق روابط (۹) و (۱۰).

روز (۲۰۰۶)	متوسط GPS TEC	واریانس GPSTEC	متوسط TEC NN	واریانس NNTEC	میانگین‌خطای متوسط (NN)	تصحیح نسبی (درصد)
2006 March 20	12.4333	6.6929	11.0536	6.4467	0.184186	81.5814
2006 June 22	12.7625	4.4398	13.2417	4.5234	0.067326	93.2674
2006 September 23	9.7917	4.3009	10.1691	7.2817	0.093718	90.6282
2006 December 21	7.7500	3.2737	7.5990	3.5586	0.111567	88.8433

در جدول ۲، با استفاده از آمار و ارقام، عملکرد شبکه بررسی شده است. برای محاسبهٔ تصحیح نسبی کافی است میانگین خطای متوسط، به درصد تبدیل و از ۱۰۰ درصد کم شود. آنچه باقی می‌ماند، تصحیح نسبی مدل در آن روز خاص است و درصد اطمینان ما را در استفاده از مدل برای آن روز بیان می‌کند. در جدول ۳، میان محتوای کلی الکترون به‌دست‌آمده از شبکهٔ عصبی (NN TEC)، محتوای کلی الکترون مشاهده‌شده از GPS (GPS TEC) و محتوای کلی الکترون مدل مرجع یون‌سپهری بین‌المللی (IRI TEC) مقایسه‌ای انجام گرفته است و خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) و ضریب تشخیص (R^2) بین این دو دسته داده، نشان‌دهندهٔ آن است که عملکرد مدل به‌وجودآمده از شبکهٔ عصبی، بسیار خوب است و خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) آن به‌طور میانگین کمتر از ۱/۵ در واحد TECU است؛ درحالی‌که ضریب تشخیص (R^2) در مدل بین‌المللی یون‌سپهری و GPS (IRI TEC -GPS TEC) بسیار پایین است و خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) آن، به 7 در واحد TECU هم می‌رسد. مقدار R2 بیشتر از ۰/۹ نشان‌دهندهٔ عملکرد رضایت‌بخش مدل است. R^2 بین ۰/۸ تا ۰/۹ حاکی از عملکرد قابل‌قبول مدل و مقدار کمتر از ۰/۸ نشان‌دهندهٔ عملکرد نامطلوب مدل است.

جدول ۳. مقایسه‌ای از خطا و ضریب عملکرد مدل بین مدل IRI و شبکهٔ عصبی در چهار زمان انقلابین و اعتدالین.

روز ماه سال	RMSE(TECU)	RMSE(TEU)
	NN TEC - GPS TEC	**IRI TEC-GPS TEC**
2006 March 20	2.4572	5.3451
2006 June 22	0.8521	2.7847
2006 September 23	0.8689	6.8850
2006 December 21	0.8155	3.1038
	R2	***R2***
2006 March 20	0.8484	0.3345
2006 June 22	0.9630	0.5895
2006 September 23	0.9570	0
2006 December 21	0.9452	0.0620

۵. نتیجه‌گیری

در این تحقیق، هدف مدل‌سازی محلی محتوای کلی الکترون قائم یون‌سپهری بوده است و داده‌های یک سال تقریباً ۲۰ ایستگاه GPS، با نرم‌افزار برنیز، پردازش و محتوای کلی الکترون استخراج شده است. برای مدل‌سازی فقط یک موقعیت خاص را از بین طول و عرض‌های جغرافیایی محدودهٔ کشور ایران انتخاب کرده‌ایم، بنابراین پارامتر موقعیت جغرافیایی از ورودی‌های مدل حذف می‌شود. شاخص‌های ژئومغناطیسی و خورشیدی، ورودی‌های دیگر مدل بوده است و شبکهٔ عصبی پسخور با یک لایهٔ پنهان، انتخاب و تعداد نورون آن با تکنیک آزمون سعی و خطا به‌صورت بهینه درنظر گرفته شده است. در نهایت با مقایسه با مدل مرجع یون‌سپهری بین‌المللی (IRI2007 TEC) چنین نتیجه گرفته شد که مدل مرجع یون‌سپهری بین‌المللی (IRI2007 TEC) در محدودهٔ کشور ایران، به تعداد ایستگاه‌های یونوسوند و سیستم‌های اندازه‌گیری پارامترهای یون‌سپهری زیادی نیاز دارد، ولی در حال حاضر فقط با یک ایستگاه یونوسوند مدل‌سازی برای کل کشور ایران صورت می‌گیرد. بنابراین مدل مرجع یون‌سپهری بین‌المللی کارایی لازم را برای کشور ایران ندارد. همچنین به دلیل کمبود ایستگاه‌های جهانی GPS در منطقهٔ مطالعاتی، چنین نتیجه گرفته شد که مقادیر محتوای کلی الکترون در نقشه‌های جهانی با مقادیر تولید شده توسط نرم‌افزار برنیز دارای اختلاف زیادی است. مدل تولیدشده با شبکهٔ عصبی (NN TEC)شباهت بسیار زیادی با داده‌های واقعی دارد و میانگین مجموع مربعات خطای مدل ۱,۵۲۷۳ در واحد TECU و ضریب تشخیص (R^2) آن ۰,۹۳۴۳ است. از نتایج چنین برمی‌آید که مدل ایجادشده با شبکهٔ عصبی (NN TEC) توانایی بیشتری در تخمین محتوای کلی الکترون یون‌سپهری در مقایسه با مدل مرجع یون‌سپهری بین‌المللی (IRI2007 TEC) خواهد داشت.

مراجع

Bilitza, D., 2001, International reference ionosphere 2000, Radio Sci., 36(2), 261-275, doi: 10.1029/2000RS002432.

Collins, J. P., 1999, An overview of GPS inter-frequency carrier phase combinations, Geodesy and Geomatics Engineering Report, University of New Brunswick, pp. 1-15.

Dow, J. M., Neilan, R. E. and Rizos, C., 2009, The international GNSS service in a changing landscape of global navigation satellite systems, J. Geod., 83, 191-198.

Fausett, L., 1994, Fundamentals of neural networks: architectures, Algorithms, and Applications, Prentice Hall, New Jersey.

Gao, Y., Liao, X. and Liu, Z. Z., 2002, Ionosphere modeling using carrier smoothed ionosphere observations from a regional GPS network, Geomatica, 56(2), 97-106.

Gurun, m, Erinc Akdogan, k. and yilmaz, A., 2007, Regional ionosphere mapping by using neural networks, IEEE, 1-4244-1057-6/07, 2.

Habarulema, J. B., McKinnell, L. A. and Cilliers, P. J., 2007, Prediction of global positioning system total electron content using neural networks over South Africa, J. Atmos Solar Terr. Phys., 69, 1842-1850.

Habarulema, J. B., McKinnell, L.-A. and Opperman, B. D. L., 2010, TEC measurements and modelling over Southern Africa during magnetic storms; a comparative analysis, Journal of Atmospheric and Solar Terrestrial Physics, 72(5-6), 509-520.

Hargreaves, J. K., 1992, The solar-terrestrial environment: an introduction to geospace - the science of the terrestrial upper atmosphere, ionosphere and magnetosphere, Cambridge University Press, Cambridge.

Haykin, S., 1994, Neural networks, a comprehensive foundation, Macmillan College Publishing Company.

Herna´ndez-Pajares, M., Juan, J. M. and Sanz, J., 1999, New approaches in global ionospheric determination using ground GPS data, J. Atmos Sol Terr Phys., 61(16), 1237-1247.

Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H. and Collins, J., 1992, Global positioning system theory and Practice, Springer-Verlag, Wien, New York.

Kelley, M. C., 2009, The Earth's ionosphere: plasma physics and electrodynamics, Intern. Geophys. Series, vol 43, San Diego: Academic Press.

Leandro, R. F. and Santos, M. C., 2007, A neural network approach for regional vertical total electron content modelling, Studia Geophysica et Geodaetica, 51, 279-292.

Ma, G. and Maruyama, T., 2003, Derivation of

TEC and estimation of instrumental biases from GEONET in Japan, Ann. Geophys., 21, 2083-2093.

Mayaud, P. N., 1980, Derivation, meaning and use of geomagnetic indices, Geophysical Monograph, 22. Washington, DC: American Geophysical Union.

Meggs, R., 2005, Mapping of ionospheric total electron content using global navigation satellite systems, Ph.D. thesis, University of Bath, Bath, UK.

McKinnell, L. A., 2002, A neural network based ionospheric model for the bottomside electron density profile over Grahamstown, South Africa, Ph.D. thesis of Rhodes University, Grahamstown, South Africa.

McPherron, R. L., 1995, Standard indices of geomagnetic activity. In Kivelson, M. G., and Russell, C. T. (eds.), Introduction to space physics. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 451-458.

Misra, P. and Enge, P., 2006, Global positioning system; signals, mea-surements and performance, Ganga-Jumuna Press, P.O. Box 692 Lincoln, Massachusetts 01773.

Opperman, B. D. L., Cilliers, P. J., McKinnell, L.-A. and Hag-gard, R., 2007, Development of a regional GPS-based Ionospheric TEC model for South Africa, Advances in Space Research, 39(5),808-815.

Perrone, L. and Franceschi, G. D., 1998, Solar, ionospheric and geomagnetic indices, ANNALI DI GEOFISICA, 41, 5-6.

Poole, A.W. and McKinnell, L. A., 2000, On the predictability of foF2 using neural networks, Radio Science, 1, 225-234.

Schaer, S., Beutler, G. and Rothacher, M., 1998, Mapping and predicting the ionosphere, paper presented at 1998 IGS Analysis Center Workshop, Int. GNSS Serv., Darmstadt, Germany, 9-11 Feb.

Schaer, S., Markus, R., Gerhard, B. and Timon, A. S., 1996, Daily global ionosphere maps based on GPS carrier phase data routinely produced by the CODE Analysis Center, Proceeding of the IGS Analysis Center Workshop, Silver Spring, Maryland, pp. 181-192, USA.

Skone, S., 1998, Wide area ionosphere grid modelling in the auroral region, Ph.D. thesis, University of Calgary, Department of Geomatics Engineering, Calgary, Alberta, Canada.

Tulunay, E., Senalp, E. T., Cander, L. R., Tulunay, Y. K., Bilge, A. H., Mizrahi, E., Kouris, S. S. and Jakowski, N., 2004, Development of algorithms and software for forecasting now casting and variability of TEC. Ann. Geophys., 47(2/3), 1201-1214.

Tulunay, E., Senalp, E. T., Radicella, S. M. and Tulanay, Y., 2006, Forecasting total electron content maps by neural network technique, Radio Science, 41, doi: 10.1029/2005RS003285.

Yilmaz, A., Akdogan, K. E. and Gurun, M., 2009, Regional TEC mapping using neural networks, Radio Science, 44, RS3007, doi.org/10.1029/2008RS004049.