

مدل‌سازی محتوای الکترونی کلی بر حسب توابع پایه شعاعی کروی در منطقه ایران

شایان خوشگواری^۱، یزدان عامریان^{۲*} و هانی محبوبی^۳

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه ژئودزی، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

۲. استادیار، گروه ژئودزی، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

۳. دانشجوی دکتری، گروه ژئودزی، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

(دریافت: ۹۸/۵/۱۴، پذیرش نهایی: ۹۸/۱/۱)

چکیده

مدل‌سازی پارامترهای چگالی الکترونی یونسفر (IED) و محتوای الکترونی کلی (TEC) در تعیین موقعیت ماهواره‌ای با گیرنده‌های تک فرکانسه، مطالعات فیزیک فضا، عملکرد سیستم‌های راداری و ارتباطات مخابراتی ضروری است. مدل‌های مرجع بین‌المللی یونسفر (IRI) و نقشه‌های جهانی یونسفر (GIMS) منابع اطلاعاتی هستند که TEC را در مقیاس جهانی در اختیار کاربران قرارمی‌دهند. این مدل‌ها از منابع داده‌های جهانی به‌دست آمده‌اند که در منطقه ایران دارای تراکم مناسبی نیستند، بنابراین دقت آنها در این ناحیه کم است. لذا مطالعه و مدل‌سازی محلی TEC در منطقه ایران دارای اهمیت است. در این مطالعه مدل‌سازی TEC برحسب توابع پایه شعاعی کروی (SRBF) و با استفاده از مشاهدات شبکه دائم GPS ایران انجام شده است. در این مطالعه مدل‌سازی TEC در روز ۱۲۴م سال ۲۰۱۶ در کل منطقه ایران که داده‌ها دارای تراکم یکنواخت نیستند و همچنین در محدوده شمال غرب ایران که داده‌ها دارای تراکم یکنواخت‌تری هستند، صورت گرفته است. نتایج مدل‌سازی نشان می‌دهند که مدل ارائه‌شده از GIMS دقیق‌تر است و همچنین دقت مدل‌سازی در منطقه شمال غرب ایران که توزیع مشاهدات یکنواخت‌تر است، بیشتر می‌باشد. در کل منطقه ایران دقت مدل‌سازی VTEC با روش مقاله برای بازه زمانی ۰ تا ۱ و ۱۰ تا ۱۱ ساعت جهانی به‌میزان ۱/۰۴ و ۰/۶۷ در مقیاس TECU نسبت به GIMS بهبود می‌یابد. همچنین محدود کردن ناحیه مدل‌سازی به شمال غرب ایران و افزایش تراکم توزیع داده‌ها، موجب بهبود دقت به‌میزان ۱/۵۴ و ۰/۸۶ TECU نسبت به GIMS می‌شود.

واژه‌های کلیدی: مدل‌سازی منطقه‌ای یونسفر، مجموع محتوای الکترونی، نقشه‌های جهانی یونسفر، توابع پایه شعاعی کروی، پایدارسازی تیخونوف.

۱. مقدمه

در تعیین زمانی-مکانی محتوای الکترونی کلی (TEC, Total Electron Content) و چگالی الکترونی یونسفر (IED, Ionospheric Electron Density) تبدیل کرده است (اشاتینبرگر و همکاران، ۲۰۰۶؛ جین و همکاران، ۲۰۰۷؛ سزن و همکاران، ۲۰۱۳). با توجه به این که TEC حاصل از مشاهدات GPS در راستای مسیر سیگنال به‌دست می‌آید، جهت تعیین مقدار TEC در تمامی نقاط لازم است که از یک روش مدل‌سازی فیزیکی یا ریاضی استفاده شود.

نقشه‌های جهانی یونسفری (GIMS, Global Ionospheric Maps) در حال حاضر با استفاده از مشاهدات ایستگاه‌های دائمی GPS که دارای پوشش جهانی هستند، مقدار محتوای الکترونی کلی را در راستای

انتشار امواج الکترومغناطیس در لایه یونسفر تحت تأثیر الکترون‌های آزاد موجود در این محیط می‌باشد. با توجه به تأثیری که محتوای الکترونی این لایه بر بسیاری از فعالیت‌ها نظیر تعیین موقعیت با استفاده از مشاهدات ژئودزی ماهواره‌ای، سیستم‌های مخابراتی و مطالعات فضایی دارد، مدل‌سازی یونسفر و تعیین چگالی الکترونی موجود در این لایه از حدود سال ۱۹۷۰ به‌بعد به یک موضوع مهم در مطالعات اتمسفر و فضا تبدیل شده است (کالایس و مینستر، ۱۹۹۸؛ اریکان و همکاران، ۲۰۱۲، عامریان، ۲۰۱۳). تأثیر محتوای الکترونی لایه یونسفر بر سیگنال‌های سیستم تعیین موقعیت جهانی (GPS, Global Positioning System)، استفاده از مشاهدات این سامانه را به روشی مؤثر و کارآمد

(اشمیت و همکاران، ۲۰۰۸). در تحقیقی دیگر، VTEC به صورت تابعی از زمان با استفاده از توابع بی‌اسپیلاین مربعی سه‌بعدی مدل‌سازی شده است (نوهوتکو و همکاران، ۲۰۱۰). در ادامه بهبود VTEC مستخرج از IRI در منطقه ایران با استفاده از توابع مقیاس بی‌اسپیلاین چند جمله‌ای و مثلثاتی صورت پذیرفته است (عامریان و همکاران، ۲۰۱۳b). سپس از توابع پایه اسلپین کروی برداری جهت مدل‌سازی منطقه‌ای VTEC استفاده شد (شریفی و فرزانه، ۲۰۱۴؛ ۲۰۱۶؛ ۲۰۱۷). همچنین از نظریه اسلپین برای بهبود دقت GIMs در نواحی قطبی و مدل‌سازی تغییرات یونوسفر استفاده شده است (اعتمادفرد و حسینعلی، ۲۰۱۶؛ ۲۰۱۷).

مدل‌سازی چندلایه یونوسفر که از آن به توموگرافی یونوسفر هم یاد می‌شود، به مدل‌سازی IED می‌پردازد که IED به صورت تابعی از مؤلفه‌های مسطحاتی، ارتفاعی و زمانی فرض می‌شود. توموگرافی یونوسفر در ابتدا توسط لیو در سال ۲۰۰۳ معرفی شد که در آن تغییرات مسطحاتی چگالی الکترونی بر حسب توابع پایه هارمونیک کروی بسط داده شده است (لیو، ۲۰۰۴). از توابع پایه بی‌اسپیلاین، هارمونیک‌های کلاه کروی، اسلپین برای مدل‌سازی IED در مقیاس محلی استفاده شده است. (زیلهوفر، ۲۰۰۸؛ اشمیت و همکاران، ۲۰۱۱؛ عامریان و همکاران، ۲۰۱۳a؛ ال فانک، ۲۰۱۳؛ فرزانه و فروتن، ۲۰۱۸).

توابع پایه شعاعی کروی (SRBF, Spherical Radial Basis Functions)، توابع پایه‌ای با محمل محلی هستند که در مقایسه با توابع ریاضی دارای محمل جهانی نظیر توابع هارمونیک کروی، قادر هستند تا تغییرات محلی یک پدیده را بهتر بازتاب دهند. مدل‌سازی میدان جاذبه با استفاده از این توابع پایه در بسیاری از مطالعات صورت گرفته و نتایج موفقیت‌آمیزی را به دنبال داشته است (تنزر و کلیر، ۲۰۰۸؛ ویتور، ۲۰۰۹؛ تنزر و همکاران، ۲۰۱۲؛ صفری و همکاران، ۲۰۱۳؛ بوکا و همکاران، ۲۰۱۵؛ ۲۰۱۶؛ کلیر و همکاران، ۲۰۱۸). از این رو در این تحقیق برای اولین بار ایده استفاده از SRBF برای مدل‌سازی

زینتی یا قائم (VTEC, Vertical Total Electron Content) و در ارتفاع ۴۵۰ کیلومتری از سطح زمین ارائه می‌دهد و مدل مرجع بین‌المللی یونوسفر (IRI, International Reference Ionosphere) با به‌کارگیری شبکه‌ای جهانی از ایستگاه‌های یونوسوند، بستری را برای تعیین پارامترهای یونوسفری از جمله چگالی الکترونی ایجاد کرده است (بیلیترا و راینسک، ۲۰۰۸؛ کمجاتی، ۱۹۹۷؛ شائر، ۱۹۹۹). تاکنون از این مدل‌ها به منظور اعمال تصحیحات در مشاهدات GPS، مشاهدات تداخل‌سنجی طول‌باز بسیار بلند (VLBI, Very Long Baseline Interferometry) و مشاهدات ارتفاع سنجی ماهواره‌ای استفاده شده‌اند (لی و همکاران، ۱۹۸۸؛ اشترینر و همکاران، ۱۹۹۸؛ لیو و همکاران، ۲۰۰۹). با این حال، وجود تغییرات با فرکانس مکانی بالا در محتوای الکترونی لایه یونوسفر، ارائه یک مدل مرجع جهانی با دقت مناسب در تمامی نقاط زمین را با چالش روبرو کرده است. استفاده از مشاهدات با توزیع جهانی در این مدل‌ها از یک سو و از سوی دیگر مدل‌سازی به کمک توابع هارمونیک کروی که دارای محمل جهانی هستند، باعث شده است تا دقت محتوای الکترونی ارائه شده توسط این مدل‌ها در مقیاس منطقه‌ای مانند محدوده کشور ایران، کافی نباشند. از این رو انتظار می‌رود با به‌کارگیری مشاهدات ایستگاه‌های GPS با پوشش منطقه‌ای و همچنین استفاده از توابع ریاضی با محمل محلی، تغییرات با فرکانس مکانی بالاتر محتوای الکترونی یونوسفر بهتر پوشش داده شده و مدلی محلی با دقتی بالاتر از مدل‌های جهانی به دست آید.

تاکنون مدل‌سازی محلی یونوسفر با استفاده از توابع پایه ریاضی و مشاهدات GPS توسط بسیاری از محققان صورت گرفته است. در برخی از این تحقیقات VTEC در ارتفاع دارای حداکثر چگالی از سطح زمین (حدود ۴۵۰ کیلومتر) مدل‌سازی شده است که می‌توان به استفاده از توابع بی‌اسپیلاین (B-spline) مربعی دوبعدی در مدل‌سازی محلی VTEC در یک زمان ثابت اشاره کرد

مستقل از هندسه کد ($P_{4,i}^j$) و ترکیب خطی مستقل از هندسه فاز ($L_{4,i}^j$) برای مشاهده کد وفاز میان گیرنده i و ماهواره j به ترتیب به صورت روابط (۱) و (۲) تشکیل می‌شود (لیک و همکاران، ۲۰۱۵):

$$P_{4,i}^j = A \left(\frac{f_1^2 - f_2^2}{f_1^2 f_2^2} \right) STEC_i^j - c(DCB^j + DCB_i) \quad (1)$$

$$L_{4,i}^j = A \left(\frac{f_1^2 - f_2^2}{f_1^2 f_2^2} \right) STEC_i^j - c(DCB^j + DCB_i) + \Delta N^j \quad (2)$$

در این روابط، $A = 40/3 \text{ m}^3/\text{s}^2$ ، f_1 و f_2 به ترتیب فرکانس موج حامل L1 و L2 سیستم تعیین موقعیت جهانی و $STEC_i^j$ مقدار محتوای کلی الکترونی مایل میان گیرنده i و ماهواره j می‌باشند. DCB_i و DCB^j نیز به ترتیب اریب تفاضلی کد ماهواره j و گیرنده زمینی i می‌باشند. ΔN^j اختلاف ابهام فاز موج حامل L1 و L2 است.

محاسبه STEC مستلزم معلوم بودن مقادیر DCB برای تمامی ماهواره‌ها و گیرنده‌های GPS می‌باشد. مقادیر DCB ماهواره‌ها از طریق سرویس بین‌المللی IGS در اختیار هستند. اما جهت برآورد DCB گیرنده‌ها، می‌توان در فرآیند مدل‌سازی این مقادیر را به‌عنوان مجهول در نظر گرفته و همزمان با سایر مجهولات برآورد کرد. روش دیگر که در این تحقیق به کار گرفته شده محاسبه DCB برای گیرنده از طریق الگوریتم ارائه شده توسط اریکان و همکاران می‌باشد. در این روش بر اساس رابطه (۳)، DCB برآورد می‌شود (اریکان و همکاران، ۲۰۰۸):

$$DCB_i = A \left(\frac{f_1^2 - f_2^2}{f_1^2 f_2^2} \right) VTEC_i M(\epsilon_j) - \frac{1}{c} (P_{4,i}^j + DCB^j) \quad (3)$$

که در آن $VTEC_i$ مقدار محتوای الکترونی کلی قائم محاسبه شده از درون‌یابی مکانی و زمانی GIMs در موقعیت ایستگاه i بوده و $M(\epsilon_j)$ تابع تصویر به فرم رابطه (۴) بر حسب زاویه زینتی ماهواره در ایستگاه (ϵ_j) است که به‌منظور تبدیل STEC به VTEC استفاده می‌شود. R شعاع کره زمین به اندازه ۶۳۷۱ کیلومتر بوده و h ارتفاع تک لایه و برابر ۴۵۰ کیلومتر می‌باشد. علت انتخاب

محلی VTEC پیاده‌سازی شده و نتایج اولیه آن ارائه می‌شود. توانایی بالا در مدل‌سازی ریاضی کمیت‌های فیزیکی، داشتن محمل فشرده، سادگی ساختار ریاضی و وجود انواع متعدد از SRBF عاملی جهت انتخاب این توابع برای مدل‌سازی محلی VTEC شد. علاوه بر این امکان تغییر پارامترهای عمق و موقعیت این توابع پایه برای کنترل و بهبود دقت مدل‌سازی، از جمله ویژگی‌های این روش نسبت به مطالعات پیشین می‌باشد. ضرایب مدل VTEC طی فرآیند کمترین مربعات تخمین زده می‌شوند. با توجه به ناپایداری دستگاه معادلات حاصل، از روش پایدارسازی تیخونوف در برآورد کمترین مربعات ضرایب مدل استفاده شده و تعیین پارامتر پایدارسازی با منحنی-ال (L-curve) انجام شده است.

۲. مدل‌سازی محتوای الکترونی کلی قائم یونسفر

بر حسب توابع پایه شعاعی کروی

در مدل‌سازی تک‌لایه یونسفر که همان مدل‌سازی VTEC می‌باشد، مقدار کل الکترون لایه یونسفر در یک لایه با ضخامت صفر و به ارتفاع ماکزیمم چگالی الکترونی که معمولاً برابر ۴۵۰ کیلومتر از سطح زمین است، در نظر گرفته می‌شود. مقدار محتوای الکترونی کلی مایل در راستای خط دید گیرنده به ماهواره (STEC, Slant Total Electron Content) در هر اپک زمانی از مشاهدات کد و فاز GPS به دست می‌آید. محاسبه STEC علاوه بر داشتن مشاهدات کد و فاز GPS، نیازمند معلوم بودن یا برآورد اریب تفاضلی کد (DCB, Differential Code Bias) گیرنده‌ها و ماهواره‌های GPS می‌باشد. سپس از تابع تصویر جهت تبدیل STEC به VTEC استفاده شده و نهایتاً مشاهدات VTEC بر حسب توابع پایه شعاعی کروی بسط داده شده و ضرایب مدل برآورد می‌شود. در ادامه این بخش به توضیح فرآیند فوق پرداخته می‌شود.

۲-۱. محاسبه VTEC

با استفاده از مشاهدات کد و فاز GPS، ترکیب خطی

بالتر (۱ درصد طول موج)، به جهت به دست آوردن STEC مناسب می باشد. از آنجایی که برای به دست آوردن STEC از مشاهدات فاز، نیاز به تخمین پارامتر ابهام فاز موجود در رابطه (۲) وجود دارد، روش نرم کردن مشاهدات کد با استفاده از مشاهدات فاز، راه حل بهینه ای به منظور بهره از دقت مشاهدات فاز در برآورد STEC است. مشاهده کد نرم شده با فاز مطابق با رابطه (۶) تشکیل می شود که پارامتر B آن از رابطه (۷) محاسبه می شود (اریکان و همکاران، ۲۰۰۸):

$$STEC_i^j = \frac{1}{A} \left(\frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \right) (B + L_{4,i}^j + c(DCB^j + DCB_i^j)) \quad (6)$$

$$B = \frac{1}{N_{me}} \sum_{n_{me}=1}^{N_{me}} (P_{4,i}^j(n_{me}) - L_{4,i}^j(n_{me})) \quad (7)$$

N_{me} تعداد مشاهدات موجود در یک کمان بدون جهش فاز می باشد. جهش فاز از روی اختلاف مشاهدات کد و فاز در دو اپک متوالی قابل تشخیص است. حال به کمک تابع نگاشت معرفی شده در رابطه (۵)، STEC محاسبه شده در قسمت قبل، به VTEC تبدیل می شود. واحد مقادیر VTEC برآورده شده بر حسب TECU می باشد که معادل 10^{16} الکترون بر متر مربع است.

۲-۲. توابع پایه شعاعی کروی

توابع پایه شعاعی کروی، توابعی متقارن بوده و دارای محمل فشرده یا محلی در فضا هستند. این بدین معنی است که بیشتر تأثیر آنها محدود به یک ناحیه کوچک در همسایگی آنها می شود (ویتور، ۲۰۰۹). این خاصیت توابع پایه شعاعی کروی، موجب استفاده از این توابع برای مدل سازی پدیده ها در مقیاس محلی می شود. یکی از انواع توابع پایه شعاعی کروی که در مطالعات مدل سازی محلی میدان ثقل نیز به طور گسترده ای مورد استفاده قرار گرفته است، کرنل جرم نقطه ای به فرم رابطه (۸) می باشد (هایکن، ۱۹۸۱).

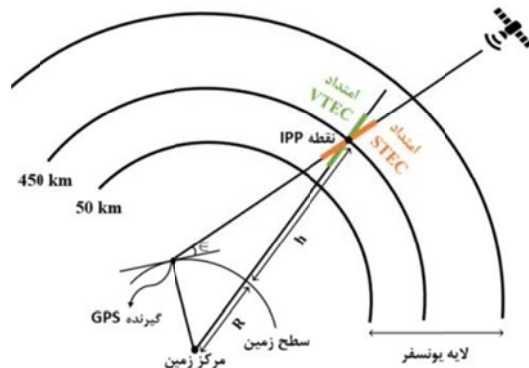
$$\psi(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) = \frac{1}{\|\mathbf{X} - \mathbf{Y}\|}, \quad \mathbf{X}, \mathbf{Y} \in \mathbb{R}^3 \quad (8)$$

ارتفاع ۴۵۰ کیلومتری این است که برای برآورد DCB گیرنده ها از مقادیر VTEC مربوط به GIMs استفاده می شود که این مقادیر در لایه به ارتفاع ۴۵۰ کیلومتر منتشر می شوند و دیگر این که امکان مقایسه مقادیر VTEC مدل سازی شده با مقادیر GIMs فراهم شود.

$$M(\varepsilon_j) = \left[1 - \left(\frac{R \cos \varepsilon_j}{R + h} \right)^2 \right]^{-1/2} \quad (4)$$

$$VTEC_i^j = STEC_i^j / M(\varepsilon_j) \quad (5)$$

در شکل ۱ پارامتر ε_j ، امتداد VTEC و STEC، و همچنین نقطه نفوذ یونسفری (Ionospheric Pierce Point: IPP) که نقطه تقاطع تک لایه و خط دید ماهواره و گیرنده می باشد، نمایش داده شده است.



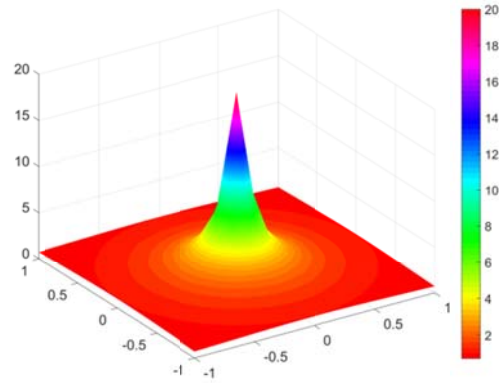
شکل ۱. نقطه تقاطع یونسفری و مفهوم مدل تک لایه (قلی پور، ۱۳۹۸).

مقدار اربب تفاضلی گیرنده برای هر بازه زمانی از مشاهدات ترکیب عاری از هندسه کد ($P_{4,i}^j$) قابل محاسبه است. با توجه به نویز موجود در مشاهدات کد، تنها از مشاهدات دارای زاویه ارتفاعی بزرگ تر از ۶۰ درجه برای به دست آوردن اربب تفاضلی گیرنده استفاده می شود. علاوه بر این یک فیلتر میانگین متحرک برای رفع نویز به مشاهدات کد اعمال می شود.

با داشتن مقدار اربب تفاضلی کد ماهواره و گیرنده، امکان محاسبه STEC از رابطه (۱) در هر اپک زمانی فراهم می شود. دقت مشاهدات کد برای به دست آوردن STEC کافی نیست و استفاده از مشاهدات فاز با دقت به مراتب

که در آن مرکز هر کرنل با مختصات کارترین معرف مختصات مرکز کرنل می‌باشد. نمودار این تابع دو متغیره در شکل ۲ نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود بیشترین مقادیر این تابع در حول مرکز آن (نقطه $\mathbf{Y} = (x, y, z)^T$) متمرکز شده و نشان می‌دهد که تأثیر توابع پایه شعاعی کروی با این کرنل در مدل‌سازی یک ناحیه در نزدیکی مرکز کرنل بیشتر است.

در رابطه فوق \mathbf{X} معرف مختصات نقطه مشاهداتی و \mathbf{Y} معرف مختصات مرکز کرنل می‌باشد. نمودار این تابع دو متغیره در شکل ۲ نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود بیشترین مقادیر این تابع در حول مرکز آن (نقطه $\mathbf{Y} = (x, y, z)^T$) متمرکز شده و نشان می‌دهد که تأثیر توابع پایه شعاعی کروی با این کرنل در مدل‌سازی یک ناحیه در نزدیکی مرکز کرنل بیشتر است.



شکل ۲. نمودار کرنل جرم نقطه‌ای به مرکز $(0, 0, 95)$ به‌ازای مشاهدات منظم روی کره واحد.

دقت مدل‌سازی بهینه نیز شود. با توجه به این که مشاهدات VTEC در نقطه IPP و در ارتفاع ثابت ۴۵۰ کیلومتری از سطح زمین قرار دارند، شعاع (r_k) برای مرکز توابع پایه نیز می‌بایست مقداری نزدیک به شعاع تک لایه را داشته باشد. بدین ترتیب، فاصله شعاعی توابع پایه با پارامتر عمق به‌صورت رابطه (۱۲) از ارتفاع ثابت ۴۵۰ کیلومتری فاصله گرفته و مقدار آن می‌تواند به‌طور تجربی برای رسیدن به بهترین دقت بهینه می‌شود.

۲-۳. مدل‌سازی VTEC بر حسب SRBF

در مدل‌سازی تک‌لایه یونوسفر بر حسب SRBF، هر مشاهده VTEC در نقطه IPP به مختصات کارترین $\mathbf{X} = (x, y, z)^T$ در زمان t به‌صورت ترکیب خطی از N تابع پایه ψ_k به‌صورت رابطه (۹) نوشته می‌شود:

$$VTEC(\mathbf{X}, t) = \sum_{k=1}^N c_k \psi_k(\mathbf{X}, \mathbf{Y}_k) \quad (9)$$

که c_k طبق رابطه (۱۰) یک چندجمله‌ای درجه ۱ بر حسب زمان می‌باشد و وابستگی مدل‌سازی VTEC به زمان را برقرار می‌کند.

$$c_k = a_{0k} + a_{1k}t \quad (10)$$

با انتخاب کرنل جرم نقطه‌ای به‌فرم رابطه (۸) و قراردادن آن به‌عنوان توابع پایه در رابطه (۹)، به رابطه (۱۱) به‌صورت زیر می‌رسیم:

$$VTEC(\mathbf{X}, t) = \sum_{k=1}^N c_k \frac{1}{\|\mathbf{X} - \mathbf{Y}_k\|} \quad (11)$$

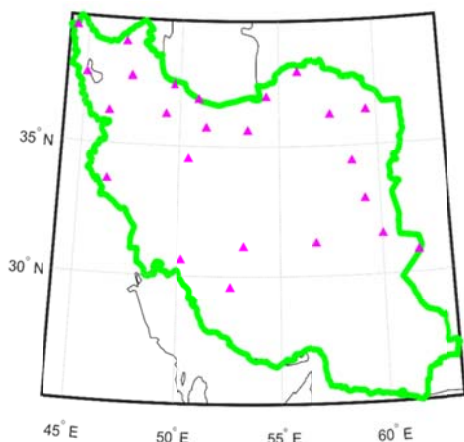
که در آن R' حاصل جمع شعاع کره زمین و ارتفاع مدل تک‌لایه و برابر ۶۸۲۱ کیلومتر می‌باشد و d پارامتر متغیر عمق توابع پایه است.

۲-۴. برآورد کمترین مربعات ضرایب توابع پایه
پس از بسط VTEC به شکل رابطه (۹)، ضرایب مجهول c_k برای هر تابع پایه می‌بایست از روش کمترین مربعات برآورد شوند. دستگاه معادلات مشاهدات به فرم خطی رابطه (۱۳) تشکیل می‌شود:

$$\mathbf{Ac} = \mathbf{b} \quad (13)$$

که در آن \mathbf{c} متشکل از ضرایب مجهول توابع پایه و \mathbf{A} ماتریس طرح متشکل از توابع پایه $\psi_k(\mathbf{X}, \mathbf{Y}_k)$ می‌باشد

کد و فاز در دو بازه زمانی از ۰ تا ۱ و از ۱۰ تا ۱۱ ساعت جهانی انتخاب می‌شوند. انتخاب این بازه‌های زمانی به دو دلیل انجام می‌شود: اولاً انجام مدل‌سازی در شرایط حداقل و حداکثر چگالی الکترونی در طول روز و ثانیاً مدل‌سازی در شرایط فعال و آرام ضریب ژئومغناطیسی Kp که در بازه زمانی ۰ تا ۱ ساعت جهانی برابر ۳/۳ (حالت فعال) و در بازه زمانی ۱۰ تا ۱۱ ساعت جهانی برابر ۱/۷ (حالت آرام) می‌باشد. مقدار VTEC طبق روش ارائه شده در ۲-۱ برای کلیه مشاهدات در این دو بازه زمانی محاسبه می‌شود. مختصات نقاط IPP با استفاده از مختصات ایستگاه‌ها و همچنین مختصات ماهواره‌ها که از اطلاعات مداری دقیق به فرمت SP3 موجود در سرویس IGS به دست آمده‌اند، محاسبه شده‌اند.



شکل ۳. موقعیت ۲۴ ایستگاه شبکه دائم GPS ایران.

جانمایی موقعیت نقاط مشاهداتی به همراه موقعیت مراکز کرنل‌ها برای هر دو بازه مطالعاتی به ترتیب در شکل‌های ۴ و ۵ نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در بازه زمانی ۰ تا ۱ تعداد مشاهدات VTEC بیشتر از بازه زمانی ۱۰ تا ۱۱ می‌باشند. به منظور ارزیابی نتایج، از هر دسته مشاهدات در ساعات ۰ تا ۱ و ۱۰ تا ۱۱ به ساعت جهانی، ۲۰۰۰ نقطه مشاهداتی به عنوان نقاط کنترل از فرآیند مدل‌سازی کنار گذاشته می‌شود. فرآیند مدل‌سازی در منطقه ایران با استفاده از ۱۷۲۵۶ مشاهده مربوط به

که تعداد سطرهای آن برابر تعداد مشاهدات و تعداد ستون‌های آن دو برابر تعداد توابع پایه به کار رفته در مدل‌سازی است. همچنین \mathbf{b} مقادیر VTEC می‌باشند. نکته قابل توجه در دستگاه معادلات تشکیل شده، وزن مربوط به مشاهدات است که برآورد کمترین مربعات را تحت تأثیر قرار می‌دهد. با توجه به این که مقادیر VTEC در زوایای ارتفاعی پایین از دقت کمتری برخوردارند، وزن هر مشاهده برابر $\sin^2(\varepsilon'_j)$ قرار داده می‌شود (اریکان و همکاران، ۲۰۰۳) که ε'_j زاویه ارتفاعی ماهواره در نقطه IPP است و به صورت رابطه (۱۴) بر حسب زاویه ارتفاعی ماهواره در ایستگاه محاسبه می‌شود:

$$\varepsilon'_j = \arccos \left\{ \frac{R \cos \varepsilon_j}{R+h} \right\} \quad (14)$$

مقادیر وزن محاسبه شده برای هر مشاهده یک ماتریس قطری وزن (\mathbf{W}) را در سرشکنی تشکیل می‌دهند. با ضرب ترم $\mathbf{A}^T \mathbf{W}$ در دو طرف رابطه (۱۴) خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} \mathbf{A}^T \mathbf{W} \mathbf{A} \mathbf{c} &= \mathbf{A}^T \mathbf{W} \mathbf{b} \\ \mathbf{N} &= \mathbf{A}^T \mathbf{W} \mathbf{A} \mathbf{c}, \quad \mathbf{l} = \mathbf{A}^T \mathbf{W} \mathbf{b} \\ \mathbf{N} \mathbf{c} &= \mathbf{l} \end{aligned} \quad (16)$$

حل دستگاه معادلات $\mathbf{N} \mathbf{c} = \mathbf{l}$ از روش کمترین مربعات، ضرایب مجهول را به ازای هر تابع پایه به دست می‌دهد. حل دستگاه معادلات مشاهدات در مدل‌سازی به روش توابع پایه شعاعی کروی، مسأله‌ای بدوضع است که در آن ماتریس طراحی دارای عدد شرط بالایی می‌باشد. لذا، روش پایدارسازی تیخونوف با تعیین پارامتر پایدارسازی از روش L-curve برای حل دستگاه معادلات خطی پیشنهاد می‌شود (هنسن، ۱۹۹۴).

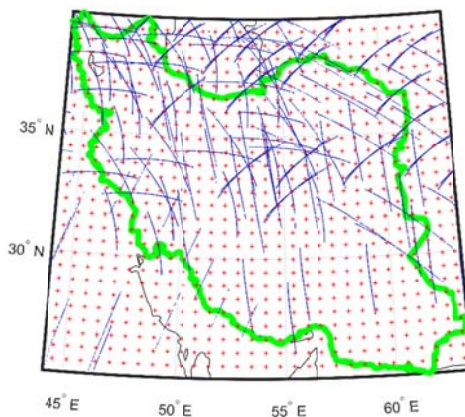
۳. پیاده‌سازی و ارزیابی نتایج

از مشاهدات ایستگاه‌های شبکه دائم GPS ایران (IPGN) در روز ۳ مه ۲۰۱۶ به منظور مدل‌سازی منطقه‌ای یونوسفر در محدوده کشور ایران استفاده شد. موقعیت ایستگاه‌های مورد استفاده در شکل ۳ نشان داده شده است. مشاهدات

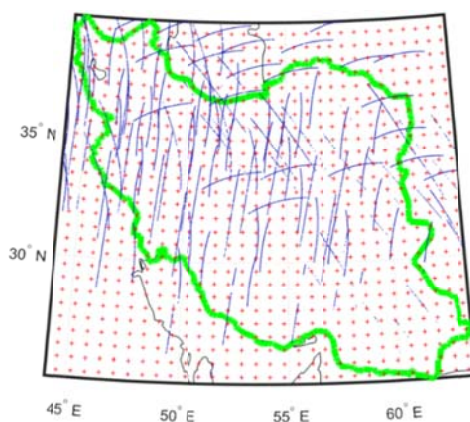
ساعت ۰ تا ۱۱ جهانی و ۱۲۵۸۱ مشاهده برای ساعت ۱۰ تا ۱۱ جهانی صورت پذیرفته است. مشخصات آماری مشاهدات در بازه‌های زمانی فوق در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱. مشخصات آماری مشاهدات VTEC.

انحراف معیار	حداکثر	میانگین	حداقل	بازه زمانی
۱/۲۹	۱۲/۸۵	۹/۴۵	۶/۵۵	۰ تا ۱
۲/۸۴	۳۳	۲۶/۰۸	۱۹/۱۳	۱۰ تا ۱۱



شکل ۴. موقعیت نقاط IPP (آبی رنگ) به همراه موقعیت مراکز کرنل‌ها (قرمز رنگ) در ۰ تا ۱۱ ساعت جهانی.



شکل ۵. موقعیت نقاط IPP (آبی رنگ) به همراه موقعیت مراکز کرنل‌های (قرمز رنگ) در ۱۰ تا ۱۱ ساعت جهانی.

جدول ۲. مقادیر خطای RMSE و misfit به ازای عمق‌های مختلف کرنل‌ها در ساعت ۰ تا ۱۱ جهانی.

عمق (km)	misfit (TECU)	RMS (TECU)
۰	۰/۸۷	۰/۸۷
۵	۰/۸۸	۰/۸۸
۱۰	۰/۸۹	۰/۸۹
۱۵	۰/۹۲	۰/۹۲
۲۰	۰/۹۳	۰/۹۳
۲۵	۰/۹۵	۰/۹۴

جدول ۳. مقادیر خطای RMSE و misfit به ازای عمق‌های مختلف کرنل‌ها در ساعت ۱۰ تا ۱۱ جهانی.

عمق (km)	misfit (TECU)	RMS (TECU)
۰	۱/۳۰	۱/۳۸
۵	۱/۲۶	۱/۳۰
۱۰	۱/۲۸	۱/۳۲
۱۵	۱/۳۴	۱/۳۹
۲۰	۱/۳۹	۱/۴۴
۲۵	۱/۴۲	۱/۴۷

عمق مختلف، ملاحظه می‌شود که RMSE مدل در نقاط کنترل نیز کاهش می‌یابد.

دقت‌های به‌دست آمده برای مدل‌سازی محتوای الکترونی کلی قائم به‌روش توابع پایه شعاعی کروی در هر دو بازه زمانی ۰ تا ۱ و ۱۰ تا ۱۱ ساعت جهانی به‌مراتب بهتر از دقت نقشه‌های جهانی GIM در این دو ساعت می‌باشد. مقدار RMSE محاسبه شده برای مقادیر VTEC نقشه‌های جهانی در نقاط کنترل برای ساعت ۰ تا ۱ برابر با TECU جهانی و برای ساعت ۱۰ تا ۱۱ برابر ۱/۹۷ TECU می‌باشد. نقشه‌های VTEC مدل‌سازی شده در شکل‌های ۸ و ۹ برای ساعت ۰/۵ و ۱۰/۵ جهانی، در کنار نقشه‌های VTEC نقشه‌های جهانی در همان ساعت‌ها آورده شده‌اند.

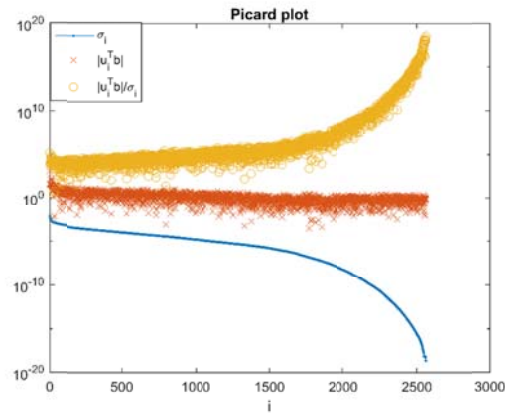
تغییر در ابعاد شبکه ایجاد شده برای قرارگیری کرنل‌ها اثر کمی در دقت مدل‌سازی دارد. افزایش ابعاد شبکه کرنل‌ها از طرفی منجر به افزایش مدت‌زمان محاسبات می‌شود. در این تحقیق فرآیند مدل‌سازی با شبکه‌های دارای ابعاد مختلف انجام شده که مناسب‌ترین انتخاب از نظر دقت و زمان مورد نیاز جهت پردازش‌ها، شبکه به ابعاد ۳۲×۴۰ می‌باشد. بنابراین در مدل‌سازی به‌روش توابع پایه شعاعی کروی، دقت مدل ساخته شده حساسیت بیشتری به تغییرات عمق نفوذ در مقایسه با تعداد کرنل‌های به‌کار رفته در مدل‌سازی دارد.

منحنی شرط پیکارد مربوط به بازه زمانی ۰ تا ۱ و ۱۰ تا ۱۱ ساعت جهانی به‌ترتیب در شکل‌های ۶ و ۷ ترسیم شده است که نشان‌دهنده ناپایداری مسئله می‌باشد. همچنین عدد شرط ماتریس طراحی نیز دارای مقادیر بسیار بزرگ

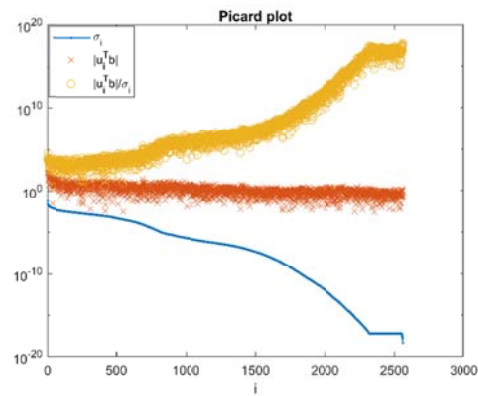
کرنل‌های در نظر گرفته شده برای مدل‌سازی بر روی یک شبکه منظم به ابعاد ۳۲ نقطه در راستای عرض جغرافیایی و ۴۰ نقطه در راستای طول جغرافیایی در محدوده کشور ایران قرار داده شدند. با توجه به چندجمله‌ای زمان ضرب شده در مدل، دو ضریب به‌ازای هر ۱۲۸۰ (۳۲×۴۰) کرنل خواهیم داشت که در این صورت تعداد مجهولات ۲۵۶۰ می‌باشد. با مقایسه مقدار VTEC محاسبه شده توسط مدل و مقدار مشاهداتی آن در نقاط کنترل و فرض این تفاوت به‌عنوان خطای مدل‌سازی، معیاری از دقت مدل‌سازی را بر اساس ریشه میانگین مربع خطاها (RMSE) خواهیم داشت. همچنین مقدار RMSE در تمامی نقاط مشاهداتی به‌کار رفته در مدل‌سازی نیز میزان عدم برازش مدل به مشاهدات (misfit) را مشخص می‌کند. به‌منظور تعیین پارامتر عمق مناسب، فرآیند مدل‌سازی در عمق‌های مختلفی صورت پذیرفته و مقادیر RMSE و misfit به‌ازای هر عمق برای ساعت ۰ تا ۱ مطابق با جدول ۲ و برای ساعت ۱۰ تا ۱۱ مطابق با جدول ۳ لیست شده است.

با انتخاب مقادیر مختلف برای عمق توابع پایه شعاعی در دو ساعت مختلف، ملاحظه می‌شود که بهترین دقت به‌ازای دو پارامتر عمق متفاوت (۰ کیلومتر و ۵ کیلومتر به‌ترتیب برای ساعت‌های ۱۰ تا ۱۱ و ۱۰ تا ۱۱) به‌دست می‌آید. با توجه به این که رفتار یونوسفر هم از لحاظ مکانی و هم از لحاظ زمانی کاملاً غیریکنواخت و دارای تغییرات است، در هر ساعت می‌بایست یک پارامتر عمق بهینه با توجه به دقت مدل‌سازی انتخاب شود. با کاهش میزان عدم برازش مدل به مشاهدات در اثر انتخاب پارامترهای

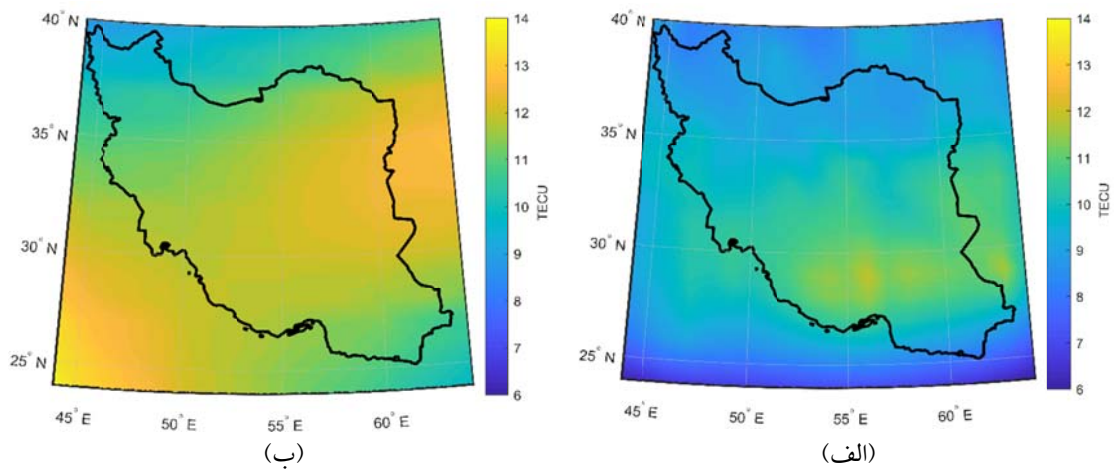
(از مرتبه ۱۰ به ۱۹) در مدلسازی بود که این امر به همراه پارامتر پایدارسازی از روش L-curve را نمایان ضرورت استفاده از روش پایدارسازی تیخونوف می‌سازد.



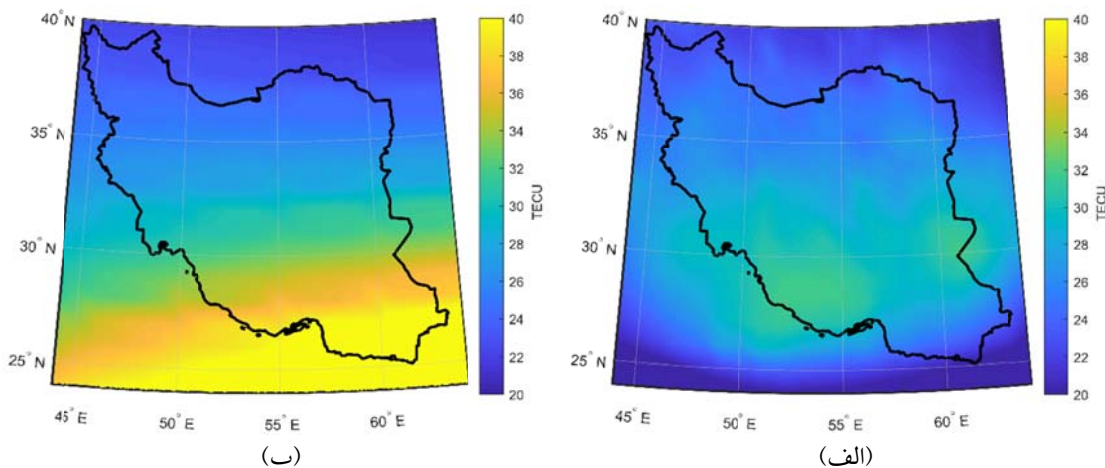
شکل ۶. منحنی شرط پیکارد برای بازه زمانی ۰ تا ۱ ساعت جهانی.



شکل ۷. منحنی شرط پیکارد برای بازه زمانی ۱۰ تا ۱۱ ساعت جهانی.



شکل ۸. نقشه VTEC مدلسازی شده از روش توابع پایه شعاعی کروی (الف) و نقشه VTEC ارائه شده از مدل جهانی (ب) در ساعت ۰/۵ جهانی.



شکل ۹. نقشه VTEC مدل‌سازی شده از روش توابع پایه شعاعی کروی (الف) و نقشه VTEC ارائه شده از مدل جهانی (ب) در ساعت ۱۰/۵ جهانی.

توزیع مناسب مشاهدات در این ناحیه می‌باشد. دقت مدل‌سازی در ساعت جهانی ۰ تا ۱ با انتخاب شبکه به ابعاد ۳۰ در ۳۰ برای مراکز توابع پایه و عمق بهینه برابر ۵ کیلومتر به ۰/۳۳ TECU رسیده است. در ساعت ۱۰ تا ۱۱ جهانی مجدداً به‌خاطر کمبود نقاط مشاهده در بعضی از قسمت‌های این محدوده دقت VTEC به‌دست آمده از مدل برای شبکه توابع پایه به ابعاد ۲۵ در ۲۵ و عمق بهینه ۱۰ کیلومتر در حدود ۱/۰۶ TECU به‌دست آمده است. اما با این حال دقت VTEC مدل‌سازی شده در این ناحیه به‌طور کلی بهتر از دقت مدل‌سازی برای کل محدوده کشور ایران می‌باشد.

جدول ۵. مقادیر خطای RMSE و misfit برای مدل‌سازی VTEC در ناحیه شمال غرب ایران از ساعت ۰ تا ۱ جهانی.

عمق (km)	misfit (TECU)	RMS (TECU)
۰	۰/۳۵	۱/۳۲
۵	۰/۲۹	۰/۳۳
۱۰	۰/۵۱	۰/۵۵
۱۵	۰/۵۴	۰/۵۷
۲۰	۰/۵۷	۰/۵۹
۲۵	۰/۶۵	۰/۶۷

مشخصات آماری مشاهدات این ناحیه در بازه زمانی ساعت ۰ تا ۱ جهانی در جدول ۴ آورده شده است:

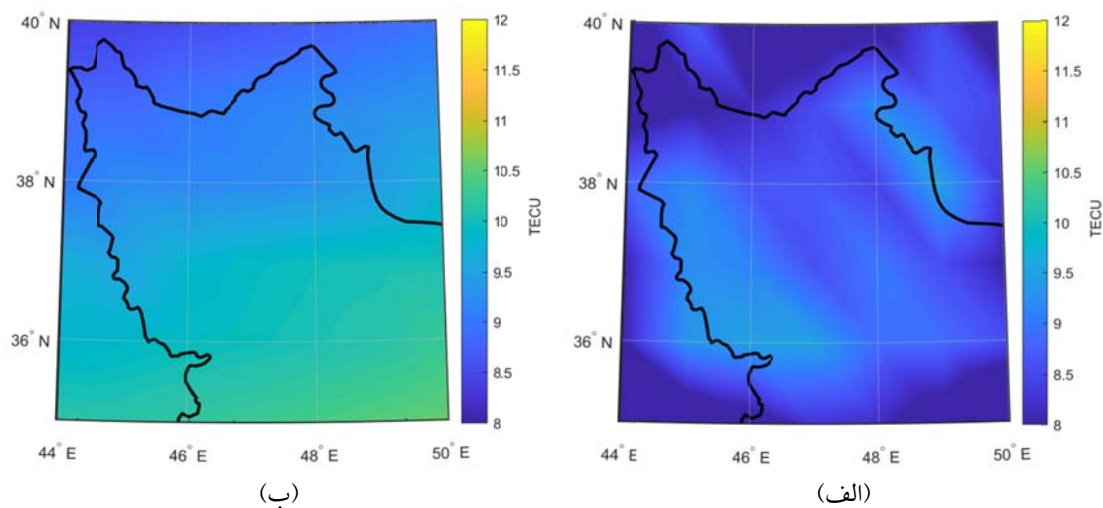
جدول ۴. مشخصات آماری مشاهدات VTEC.

انحراف معیار	حداکثر	میانگین	حداقل	بازه زمانی
۰/۸۶	۱۲/۲۸	۸/۷۹	۷/۰۵	۰ تا ۱
۱/۹	۳۱/۰۶	۲۴/۶۰	۲۰/۷۲	۱۰ تا ۱۱

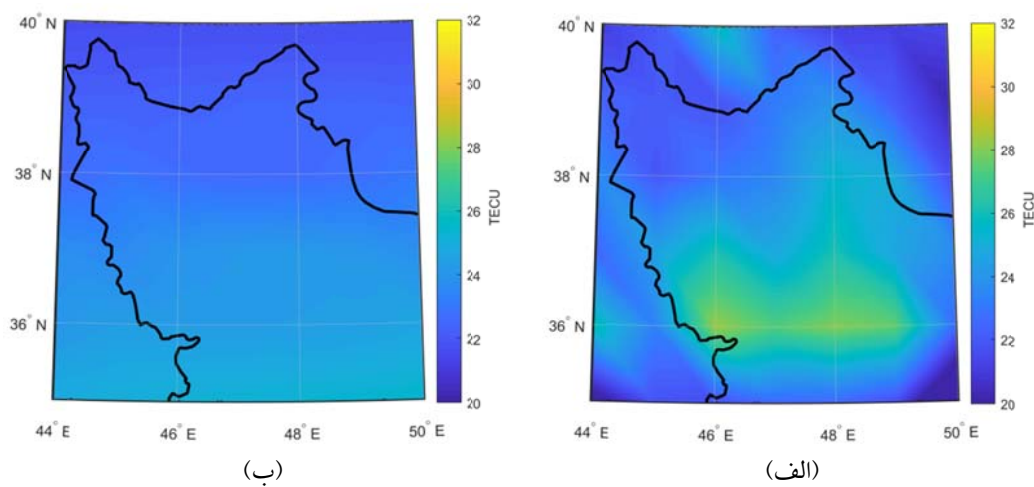
جدول ۵ و ۶ دقت مدل‌سازی در این ناحیه را به‌ترتیب برای ساعت ۰ تا ۱ و ساعت ۱۰ تا ۱۱ جهانی لیست کرده‌اند. نقشه نمایش داده شده در شکل ۱۰، VTEC به‌دست آمده برای مدل‌سازی در ناحیه شمال غرب را برای ساعت ۰/۵ جهانی و شکل ۱۱ همین نتایج را برای ساعت ۱۰/۵ جهانی با انتخاب بهترین عمق کرنل در دست‌یابی به بهترین دقت (طبق جدول‌های ۵ و ۶) نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود دقت مدل‌سازی VTEC با توابع پایه شعاعی کروی در این ناحیه بهتر از دقت مدل‌سازی این کمیت برای کل محدوده ایران است که این امر از طرفی به‌دلیل کوچک‌تر شدن منطقه مطالعاتی و تغییرات کمتر VTEC و از طرف دیگر به‌دلیل

جدول ۶. مقادیر خطای RMSE و misfit برای مدل‌سازی VTEC در ناحیه شمال غرب ایران از ساعت ۱۰ تا ۱۱ جهانی.

عمق (km)	misfit (TECU)	RMS (TECU)
۰	۱/۲۲	۱/۲۵
۵	۱/۰۸	۱/۰۹
۱۰	۱/۰۶	۱/۰۶
۱۵	۱/۲۶	۱/۲۶
۲۰	۱/۴۳	۱/۴۴
۲۵	۱/۵۱	۱/۵۱



شکل ۱۰. نقشه VTEC مدل‌سازی شده از روش توابع پایه شعاعی کروی (الف) و نقشه VTEC حاصل از مدل جهانی (ب) در ساعت ۰/۵ جهانی برای ناحیه شمال غرب.



شکل ۱۱. نقشه VTEC مدل‌سازی شده از روش توابع پایه شعاعی کروی (الف) و نقشه VTEC حاصل از مدل جهانی (ب) در ساعت ۱۰/۵ جهانی برای ناحیه شمال غرب.

۴- نتیجه گیری و پیشنهادات

در این مقاله مدل سازی VTEC به صورت محلی و برحسب توابع پایه شعاعی کروی و با ضرایب وابسته به زمان انجام شد. مشاهدات ۲۴ ایستگاه شبکه دائمی GPS ایران بدین منظور به کار گرفته شد. با ایجاد شبکه ای منظم از کرنل های جرم نقطه ای در محدوده منطقه مورد مطالعاتی، مدل سازی انجام شد و پارامتر عمق بهینه برای دستیابی به بهترین دقت مدل سازی انتخاب شد. دقت مدل سازی در ساعت های جهانی ۰ تا ۱ و ۱۰ تا ۱۱ به ترتیب به اندازه ۱/۰۴ TECU و ۰/۶۷ TECU بهتر از دقت GIM می باشد که این مسأله بیانگر کارایی توابع پایه شعاعی کروی در مدل سازی محتوای الکترونی لایه یونوسفر می باشد. ساختار توابع پایه شعاعی کروی به خصوص کرنل جرم نقطه ای ساده بوده و این امر منجر به سادگی بیشتر محاسبات در مدل سازی VTEC به این روش نسبت به روش های پیشین مدل سازی محتوای الکترونی کلی در لایه یونوسفر است. با این حال، دقت مدل سازی با استفاده از این توابع به شدت وابسته به تراکم داده ها و نحوه توزیع آنها در منطقه مدل سازی است و

electron content from Global Positioning System data. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 108(A12).

Arikan, F., Nayir, H., Sezen, U. and Arikan, O., 2008, Estimation of single station interfrequency receiver bias using GPS TEC. *Radio Science*, 43(4).

Bilitza, D. and Reinisch, B. W., 2008, International reference ionosphere 2007: improvements and new parameters. *Advances in space research*, 42(4), 599-609.

Bucha, B., Bezděk, A., Sebera, J. and Janák, J., 2015, Global and regional gravity field determination from GOCE kinematic orbit by means of spherical radial basis functions. *Surveys in Geophysics*, 36(6), 773-801.

Bucha, B., Janák, J., Papčo, J. and Bezděk, A., 2016, High-resolution regional gravity field modelling in a mountainous area from terrestrial gravity data. *Geophysical Supplements to the Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 207(2), 949-966.

Calais, E. and Minster, J. B., 1998, GPS, earthquakes, the ionosphere, and the Space Shuttle. *Physics of the Earth and Planetary*

می بایست مشاهدات VTEC دارای تراکم و توزیع مناسب در منطقه مورد مطالعه باشند تا دقت و هموار بودن VTEC مدل سازی شده از توابع پایه شعاعی کروی تضمین شود. به جهت سادگی محاسبات، این روش می تواند در آینده به سهولت در توموگرافی یونوسفر به منظور تعیین IED در زمان های مختلف در لایه یونوسفر مورد استفاده قرار گیرد.

پارامتر عمق بهینه در این تحقیق به صورت تجربی و به روش سعی و خطا برای دست یابی به بهترین دقت در مدل سازی انتخاب شد. این فرآیند تاحدودی می تواند پارامتر عمق بهینه را در مدل سازی تعیین کند. در آینده می توان با استفاده از روش های بهینه سازی بهترین مقدار عمق را برای مدل سازی اتخاذ کرد.

مراجع

قلی پور، ن. و عامریان، ی.، ۱۳۹۸، برآورد مقادیر اریب تفاضلی کد گیرنده های شبکه دائم GPS ایران با استفاده از نقشه های یونوسفری جهانی، نشریه علمی پژوهشی علوم و فنون نقشه برداری، ۸(۴)، ۱۷۷-۱۸۶.

Al-Fanek, O.J.S., 2013, Ionospheric imaging for Canadian polar regions, University of Calgary.

Amerian, Y., 2013, Regional modeling of the ionospheric electron density using wavelet analysis and GPS observations. Faculty of Geodesy and Geomatics Engineering, PhD Thesis, KN Toosi University of Technology.

Amerian, Y., Hossainali, M.M. and Voosoghi, B., 2013a, Regional improvement of IRI extracted ionospheric electron density by compactly supported base functions using GPS observations. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 92, pp.23-30.

Amerian, Y., Voosoghi, B. and Hossainali, M.M., 2013b, Regional ionosphere modeling in support of IRI and wavelet using GPS observations. *Acta Geophysica*, 61(5), 1246-1261.

Arikan, F., Deviren, M., Lenk, O., Sezen, U. and Arikan, O., 2012, Observed ionospheric effects of 23 October 2011 Van, Turkey earthquake. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 3(1), 1-8.

Arikan, F., Erol, C. and Arikan, O., 2003, Regularized estimation of vertical total

- Interiors, 105(3-4), 167-181.
- Etemadfar, H. and Hossainali, M. M., 2016, Application of Slepian theory for improving the accuracy of SH \square -based global ionosphere models in the Arctic region. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 121(3), 2583-2594.
- Etemadfar, H. and Hossainali, M. M., 2017, Vector ionosphere modeling by vector spherical Slepian base functions. *GPS solutions*, 21(2), 675-684.
- Farzaneh, S. and Forootan, E., 2018, Reconstructing regional ionospheric electron density: a combined spherical slepian function and empirical orthogonal function approach. *Surveys in Geophysics*, 39(2), 289-309.
- Hansen, P. C., 1994, Regularization tools: a Matlab package for analysis and solution of discrete ill-posed problems. *Numerical algorithms*, 6(1), 1-35.
- Heikkinen, M., 1981, Solving the shape of the earth by using digital density models. *Rep. Finnish Geod. Inst.*, 81(2), 69-81.
- Jin, S., Cho, J.-H. and Park, J.-U., 2007, Ionospheric slab thickness and its seasonal variations observed by GPS. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 69(15), 1864-1870.
- Klees, R., Slobbe, D. and Farahani, H., 2018, A methodology for least-squares local quasi-geoid modelling using a noisy satellite-only gravity field model. *Journal of Geodesy*, 92(4), 431-442.
- Komjathy, A., 1997, Global ionospheric total electron content mapping using the Global Positioning System, University of New Brunswick Fredericton.
- Leick, A., Rapoport, L. and Tatarnikov, D., 2015, *GPS satellite surveying*. John Wiley & Sons.
- Leigh, R., Robinson, T. and Lester, M., 1988, Ionospheric corrections for radar altimetry, *International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 'Remote Sensing: Moving Toward the 21st Century'*. IEEE, 989-992.
- Liu, Z., 2004, Ionosphere tomographic modeling and applications using Global Positioning System (GPS) measurements. Calgary.
- Liu, Q., Kikuchi, F., Goossens, S., Matsumoto, K., Hanada, H., Ping, J., Shi, X., Tamura, Y., Harada, Y., Asari, K., Tsuruta, S., Ishikawa, T., Kawano, N., Ishihara, Y., Noda, H., Sasaki, Sh., Iwata, T. and Namiki, N., 2009, S-band same-beam VLBI observations in SELENE (Kaguya) and correction of atmospheric and ionospheric delay. *J. Geod. Soc. Japan*, 55, 243-254.
- Nohutcu, M., Karslioglu, M. and Schmidt, M., 2010, B-spline modeling of VTEC over Turkey using GPS observations. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 72(7-8), 617-624.
- Safari, A., Sharifi, M. and Foroughi, I., 2013, Local gravity field modeling using radial basis functions, case study: coastal area of the Persian Gulf. *Journal of the EARTH and SPACE PHYSICS*, 39, 33-48.
- Schaer, S., 1999, Mapping and predicting the Earth's ionosphere using the Global Positioning System. PhD thesis, Bern University, Switzerland.
- Schmidt, M., Karslioglu, M.O. and Zeilhofer, C., 2008, Regional multi-dimensional modeling of the ionosphere from satellite data. *Proceedings of the TUJK Annual Scientific Meeting*, Ankara.
- Schmidt, M., Dettmering, D., Mößner, M., Wang, Y. and Zhang, J., 2011, Comparison of spherical harmonic and B spline models for the vertical total electron content. *Radio Science*, 46(6).
- Schreiner, W. S., Markin, R. E. and Born, G. H., 1997, Correction of single frequency altimeter measurements for ionosphere delay. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 35(2), 271-277.
- Sezen, U., Arikani, F., Arikani, O., Ugurlu, O. and Sadeghimorad, A., 2013, Online, automatic, near-real time estimation of GPS-TEC: IONOLAB-TEC. *Space Weather*, 11(5), 297-305.
- 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.
- Sharifi, M. A. and Farzaneh, S., 2016, Local Ionospheric Modeling Using the Localized Global Ionospheric Map and Terrestrial GPS. *Acta Geophysica*, 64(1), 237-252.
- Sharifi, M. A. and Farzaneh, S., 2017, The ionosphere electron density spatio-temporal modeling based on the Slepian basis functions. *Acta Geodaetica et Geophysica*, 52(1), 5-18.
- Steigenberger, P., Rothacher, M., Dietrich, R., Fritsche, M., Rulke, A. and Vey, S., 2006, Geodesy and Gravity Tectonophysics-B05402-Reprocessing of a global GPS network (DOI 10.1029/2005JB003747). *Journal of Geophysical Research-Part B-Solid Earth*, 111(5).
- Tenzer, R. and Klees, R., 2008, The choice of the spherical radial basis functions in local gravity field modeling. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 52(3), 287.
- Tenzer, R., Klees, R. and Wittwer, T., 2012, Local gravity field modelling in rugged terrain using spherical radial basis functions: case study for the Canadian rocky mountains,

Geodesy for Planet Earth. Springer, 401-409.
Wittwer, T., 2009, Regional gravity field
modelling with radial basis functions.
Zeilhofer, C., 2008, Multi-dimensional B-spline

modeling of spatio-temporal ionospheric
signals. 123, A, DGK, München.

Total electron content modeling in terms of spherical radial basis functions over Iran

Khoshgovari, Sh.¹, Amerian, Y.^{2*} and Mahbuby, H.³

1. M.Sc. Student, Department of Geodesy, Faculty of Geodesy and Geomatics Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran
2. Assistant Professor, Department of Geodesy, Faculty of Geodesy and Geomatics Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran
3. Ph.D. Student, Department of Geodesy, Faculty of Geodesy and Geomatics Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

(Received: 5 Aug 2019, Accepted: 21 Jan 2020)

Summary

Satellite positioning using single frequency receivers and space technologies such as radar and communication systems all demand a precise knowledge of the ionosphere. Ionosphere is the upper layer of atmosphere which is ionized and affects the transmission of electromagnetic waves depending on their frequencies. Parameters that characterize this layer of the atmosphere are the Ionospheric Electron Density (IED) and the Total Electron Content (TEC). Hence, modeling and understanding of TEC in a precise way is an undeniable necessity. International Reference Ionosphere (IRI) and Global Ionospheric Maps (GIMs) are the sources of information that provide TEC values globally for all users. It could be expected that the accuracy of such global models in some regions like Iran are not suitable since these models are obtained from the global data sources which they lack a good density in Iran plateau. Thus, regional TEC modeling over Iran needs more attention. In this study, the total electron content obtained from the permanent dual-frequency GPS receivers are utilized in regional TEC modeling. Estimation of TEC requires satellites and receivers Differential Code Biases (DCB) to be known. DCB values for satellites and the International GNSS Service (IGS) receivers can be observed from IGS analysis centers e.g. the Center for Orbit Determination in Europe (CODE). However, for local dual frequency receivers to be used for the purpose of TEC monitoring, their DCB should be estimated. In this research, the DCB value of each station is computed from observations which their corresponding elevation angles are more than 60 degrees. The DCB computation process consists of 3 steps. First, Vertical Total Electron Content (VTEC) is obtained from the spatial and temporal interpolation of (IGS-IONEX) files. Second, each interpolated VTEC is multiplied by a mapping function. After that, the difference of the observed pseudo-range of the two frequencies is denoised via a moving average filter. Eventually utilizing the interpolated VTEC and smoothed difference of the observed pseudo-ranges and the mapping function, DCB values of all stations are estimated. Thereafter, a parameterization of the estimated VTEC over the study area is implemented. For this purpose, the Spherical Radial Basis Function (SRBF) method is used. These functions are compact support and more practical for interpolation of observations on a regional scale. It is necessary to mention that the optimization of the depth of SRBFs plays an important role in increasing the accuracy of the regression. The coefficients of the expansion are computed by least squares estimation, and the Tikhonov regularization method is used in which the regularization parameter is obtained from L-curve. Some of the observations are excluded from the dataset as check points for evaluation of the constructed model. In this research, once the modeling process is conducted over Iran and also the north-western region of Iran which has a more proper distribution of data, is parameterized on the 124th day of 2016. The height of the ionosphere layer is assumed 450 km above the earth's surface. Then a regular grid of point-mass functions that has the simplest form of SRBFs is constructed. Then, by changing the depth of the grid, an optimal depth is estimated at which the best accuracy is obtained at the check points. The results reveal that the parameterization of TEC with a regular grid of SRBFs in which the number of grid points are approximately 10% of the number of data, leads to the construction of a model whose accuracy in the check points is significantly enhanced comparing to GIMs. In addition, the accuracy of the modeling is better in areas where data density and distribution are more appropriate. The results of this research show that the accuracy of VTEC modeling in the whole region of Iran in 0 to 1 Universal Time (UT) and 10 to 11 UT are 0.87 and 1.30 TECU respectively. According to the GIMs VTEC accuracy of 1.91 and 1.97 TECU in the same periods of time, it is concluded that the accuracy of VTEC modeling in this research is improved by 1.04 and 0.67 TECU with respect to GIM. In addition, with increasing the density of data distribution and limiting the study region to the north west of Iran, the accuracy of the proposed model is equal to 0.33 and 1.66 TECU. With respect to the GIMs accuracy this is equal to 1.87 and 1.92 TECU, the proposed method has an improvement of about 1.54 and 0.86 TECU comparing to the GIMs model.

Keywords: Local ionosphere modeling, Total Electron Content (TEC), Global Ionospheric Maps (GIMs), Spherical Radial Basis Functions (SRBF), Tikhonov regularization.

* Corresponding author:

amerian@kntu.ac.ir