

برآورد بهینه و محلی محتوای الکترونی قائم با استفاده از مشاهدات کد

صالح مافی^۱، طه صادقی چورسی^۱، و سعید فرزانه^{۲*}

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران
^۲ استادیار، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۳/۱۶، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۹/۱۳)

چکیده

محتوای کلی الکترون یکی از عناصر کلیدی و مهم برای مشاهده ساختار متغیر یونوسفر است. سیستم تعیین موقعیت جهانی یک ابزار مفید و مقرون به صرفه در پیش‌بینی محتوای الکترونی از طریق گیرنده‌های زمینی است. در این تحقیق با استفاده از مشاهدات کد سیگنال‌های سیستم تعیین موقعیت جهانی، مقدار محتوای الکترونی قائم در یک ایستگاه محاسبه و روشی برای مدل‌سازی محلی و دقیق این کمیت ارائه می‌شود. برای این منظور با استفاده از مشاهدات کد P_1 و P_2 ترکیب مستقل از هندسه را تشکیل داده و به کمک آن محتوای کلی الکترون، برای هر ماهواره به دست می‌آید. برای تبدیل محتوای کلی الکترون به محتوای الکترونی قائم می‌بایست از تابع تصویر مناسب استفاده نمود. در این پژوهش جهت افزایش دقت و کاهش خطاهای سیستماتیک محاسبات از تابع تصویر هندسی استفاده شده است. پس از محاسبه محتوای الکترونی قائم برای هر ماهواره، لازم است که محتوای الکترونی قائم در راستای زینت ایستگاه محاسبه شود. برای این منظور از یک تابع وزن به نحوی استفاده شد که دارای نسبت معکوس با زاویه ارتفاعی ماهواره باشد. تابع وزن پیشنهادی به صورت کاملاً بهینه و با دقت بالایی امکان محاسبه محتوای الکترونی قائم را در راستای زینت فراهم می‌آورد. به منظور بررسی صحت کار محاسبات، نتایج به دست آمده با شبکه جهانی محتوای الکترونی قائم مقایسه و نتایج آن به‌ازای روش‌های مختلف محاسبات مانند میانگین وزن‌دار محتوای الکترونی قائم، گزارش شده است. نتایج نشان می‌دهند که محاسبه محتوای الکترونی قائم به روش پیشنهادی تطابق بسیار خوبی با میانگین وزن‌دار مقادیر محتوای الکترونی قائم رئوس اطراف ایستگاه مورد مطالعه دارند.

واژه‌های کلیدی: محتوای کلی الکترون، محتوای الکترونی قائم، زاویه ارتفاعی ماهواره، سیستم تعیین موقعیت جهانی

۱ مقدمه

یونوسفر لایه‌ای از اتمسفر است که دارای تمرکز الکترون بالایی است و از ارتفاع ۶۰ تا ۱۰۰۰ کیلومتری بالای سطح زمین گسترش یافته است (آریکان و همکاران، ۲۰۰۴). یونوسفر محیطی را نشان می‌دهد که ناهمسانگرد، غیر همگن و متغیر با زمان و مکان است و در زمان‌های مختلف نیز به صورت غیرخطی تغییر می‌کند (اوتسوکا و همکاران، ۲۰۰۲ و سیر، ۱۹۹۳).

بعد از حذف اثر دسترسی انتخابی (SA: Selective Availability) در حال حاضر خطای یونوسفری بزرگ‌ترین منبع خطا در تعیین موقعیت و ناوبری با سیستم تعیین موقعیت (GPS: Global Positioning System) به شمار می‌آید (لایک، ۲۰۰۴). لایه یونوسفر از دو جهت بر سیگنال‌های سیستم تأثیر می‌گذارد. تأثیر اول از وجود الکترون‌های آزاد در این لایه ناشی می‌شود که در آن میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی سیگنال‌ها تحت تأثیر قرار گرفته و مسیر آنها منحرف می‌شود. تأثیر دیگر از وجود محیط مادی یونوسفر نشأت می‌گیرد و منجر به کاهش سرعت انتشار امواج در این لایه می‌شود که به آن تأخیر یونوسفری می‌گویند. مقدار خطای یونوسفری نیز به شدت متغیر است و به فاکتورهای مختلفی مانند زمان روز، عرض ژئودتیک، فعالیت‌های خورشیدی و تغییرات فصلی بستگی دارد (عامریان و همکاران، ۲۰۱۰؛ اوتسوکا و همکاران، ۲۰۰۲ و سیر، ۱۹۹۳) گیرنده‌های موجود در ایستگاه‌های زمینی سیگنال‌ها را در دو باند L_1 و L_2 و به ترتیب با فرکانس‌های $f_1 = 1575.42 \text{ MHz}$ و $f_2 = 1227.60 \text{ MHz}$ دریافت می‌کنند. تأخیر زمانی که در حین انتشار سیگنال‌ها در یونوسفر رخ می‌دهد به شبه فواصل تبدیل شده و به صورت سیگنال‌های کد P_1 و P_2 در فایل مشاهدات گیرنده ثبت می‌شوند (گائو و همکاران، ۲۰۰۲). این مشاهدات از آن جهت شبه‌فاصله نامیده می‌شود که علاوه بر داشتن پارامتر فاصله هندسی بین ماهواره و

گیرنده، شامل اثرات تروپوسفری، یونوسفری و بایاس‌های سخت‌افزاری نیز می‌باشند. اندازه‌گیری‌های تأخیر فاز حامل بر روی فرکانس‌های f_1 و f_2 نیز به ترتیب به صورت L_1 و L_2 ثبت می‌شود (وارنانت، ۱۹۹۷). مقادیر محتوای کلی الکترون (TEC: Total Electron Content) می‌توانند از تفاضل سیگنال‌های P_1 و P_2 محاسبه شوند که به آن محتوای الکترونی مطلق گفته می‌شود. از تفاضل L_1 و L_2 نیز می‌توان برای محاسبه محتوای کلی الکترون استفاده کرد که به آن محتوای الکترونی نسبی می‌گویند (باکوفسکی و همکاران، ۱۹۹۶). محاسبه محتوای کلی الکترون حاصل از تفاضل شبه فواصل بسیار ساده و واضح است و نیازی به پردازش‌های پیچیده بر روی داده‌ها و حل ابهام فاز (phase ambiguity) ندارد. اما، محاسبه محتوای الکترونی مطلق معمولاً با افزایش نوفه و اثرات چند مسیری همراه است. در مقابل محاسبه محتوای الکترونی نسبی به دلیل دقیق‌تر بودن مشاهدات فاز نسبت به مشاهدات کد از دقت قابل قبولی برخوردار است اما از نظر محاسباتی نیز دارای پیچیدگی‌های خاصی است و نیاز به حل ابهام فاز و پیدا کردن کمان‌های پیوسته (continuous arcs) دارد. منظور از ابهام فاز تعداد سیکل‌های کامل موج حامل است که در فاصله بین ماهواره و گیرنده وجود دارد و برای هر ماهواره در هر کمان پیوسته به‌عنوان یک مجهول وارد فرآیند محاسبات می‌شود. کمان پیوسته نیز بازه زمانی است که در آن ارتباط بین سیگنال ماهواره و گیرنده به صورت پیوسته حفظ می‌شود و در این بازه پدیده جهش فاز (یا قطع‌شدگی سیگنال) رخ نمی‌دهد (نایر و همکاران، ۲۰۰۷).

تاکنون در زمینه محاسبه محتوای الکترونی و اثرات یونوسفری پژوهش‌های بسیاری انجام شده است که به‌عنوان نمونه می‌توان به تخمین منظم محتوای الکترونی قائم با استفاده از داده‌های سیستم تعیین موقعیت جهانی (آریکان و همکاران، ۲۰۰۴)، تخمین محتوای کلی

زنیت محلی تعریف می‌شود و تابعی از زاویه ارتفاعی ماهواره است. محتوای کلی الکترون به صورت انتگرال خطی چگالی الکترون در امتداد مسیر سیگنال L در نظر گرفته شده و به کمک رابطه زیر تعریف می‌شود (اوتسوکا و همکاران، ۲۰۰۲):

$$TEC = \int_R^S N_e(l) dl, \quad (1)$$

که N_e توزیع چگالی الکترون در مسیر سیر سیگنال از گیرنده (R) تا ماهواره (S) است (اوتسوکا و همکاران، ۲۰۰۲). TECU واحد فیزیکی محتوای کلی الکترون است و هر واحد آن برابر با $10^{16} \text{ el}/m^2$ است. به دلیل تغییرپذیری بالای یونوسفر در فضا و زمان، توزیع چگالی الکترون و محتوای کلی الکترون می‌تواند به صورت توابع تصادفی مکان-زمان در نظر گرفته شود. مدل یونوسفری مورد استفاده در این تحقیق، مدل یونوسفری تک‌لایه است که در آن تمامی الکترون‌های آزاد موجود در لایه یونوسفر در ارتفاع ۴۵۰ کیلومتری از سطح زمین متمرکز فرض می‌شود.

امروزه برای مدل‌سازی منطقه‌ای و جهانی محتوای کلی الکترون از سیگنال‌های دو فرکانسه سیستم تعیین موقعیت جهانی استفاده می‌شود (لیائو، ۲۰۰۰). استفاده از این سیستم برای مدل‌سازی محتوای الکترونی به پوشش جهانی مناسب و فرکانس بالای سیگنال‌های مورد استفاده آن مربوط می‌شود. استفاده از فرکانس‌های بالا باعث می‌شود که این سیگنال‌ها کمتر تحت تأثیر جذب یونوسفری و میدان مغناطیسی زمین قرار گیرند.

تاکنون روش‌های متعددی برای محاسبه محتوای کلی الکترون پیشنهاد شده است که مهم‌ترین آنها عبارتند از: ۱- محاسبه محتوای کلی الکترون بر اساس ترکیب مستقل از هندسه فاز، ۲- محاسبه محتوای کلی الکترون به کمک ترکیب مستقل از هندسه کد، و ۳- استفاده از ترکیب

الکترون با استفاده از روش رگرسیون (نایر و همکاران، ۲۰۰۷) و درون‌یابی مکان-زمان محتوای کلی الکترون با استفاده از یک شبکه از گیرنده‌های سیستم تعیین موقعیت جهانی (دویرن و همکاران، ۲۰۱۳) و مدل‌سازی تک‌لایه و چند لایه با استفاده از مشاهدات GPS، آلتیمتری و RO (شریفی و فرزانه a,b,c, ۲۰۱۷) اشاره کرد.

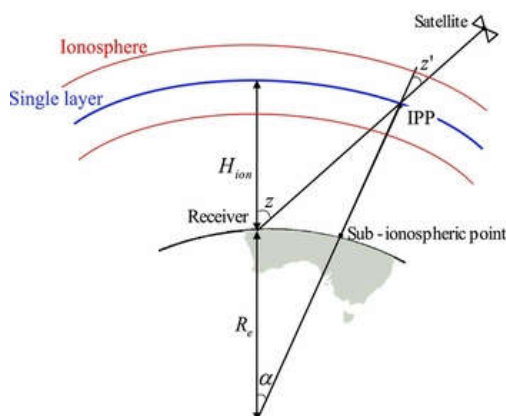
به‌طور کلی مدل‌سازی یونوسفر همواره یکی از مسائل مهم در بحث‌های تعیین موقعیت ماهواره‌ای و به‌ویژه تعیین موقعیت دقیق بوده است و به‌عنوان یک منبع خطا، مدل‌سازی دقیق محتوای کلی الکترون می‌تواند اثر منبع خطای یونوسفری را تا اندازه قابل قبولی کاهش دهد. در این مقاله اطلاعات محتوای الکترونی قائم (VTEC: Vertical Total Electron Content) موجود در سرویس بین‌المللی ناوبری (IGS: International GNSS Service) به‌عنوان منبع اطلاعاتی دقیق و معتبر در نظر گرفته شده و هدف، تعیین محتوای الکترونی قائم در ایستگاه آنکارا به کمک مشاهدات کد سیستم تعیین موقعیت، و با دقتی در حد دقت‌های سرویس بین‌المللی ناوبری است. در واقع به علت ساده بودن محاسبات محتوای الکترونی مطلق نسبت به محتوای الکترونی نسبی، پیدا کردن روشی که بتواند با استفاده از مشاهدات کد محتوای الکترونی قائم یک نقطه را با دقت مناسبی محاسبه کند، بسیار حائز اهمیت است زیرا افزایش نوفه به وجود آمده در ترکیب یونوسفری کد می‌تواند محاسبات محتوای الکترونی قائم را با خطا مواجه کند.

۲ داده‌ها و روش کار

مقدار خطای یونوسفری با مقدار محتویات الکترونی لایه یونوسفر متناسب است. محتوای کلی الکترون به صورت تعداد الکترون‌های آزاد در ستونی با سطح مقطع یک مترمربع در مسیر حرکت سیگنال در لایه یونوسفر تعریف می‌شود. این پارامتر از مسیر مایل سیگنال نسبت به راستای

$$TEC = \left| \left(\frac{f_1^2 f_2^2}{f_2^2 - f_1^2} \right) \left(\frac{P_i - DCB_{rcv} - DCB^{sat}}{40.3} \right) \right| \quad (۴)$$

رابطه (۴) محتوای کلی الکترون را در امتداد مسیر سیگنال هر ماهواره نشان می‌دهد. علامت $||$ در رابطه (۴) بیانگر قدر مطلق است، زیرا به دلیل وجود خطاهای سیستماتیک ناشی از DCB ممکن است عدد TEC در رابطه فوق منفی شود که از نظر فیزیکی هیچ مفهومی ندارد زیرا طبق رابطه (۱)، مقدار TEC از انتگرال خطی چگالی الکترون در امتداد مسیر انتشار سیگنال به دست می‌آید که از این نظر TEC همواره یک عدد مثبت است (میلنیکووا و همکاران، ۲۰۱۴). در ترکیب فاز-کد نیز مقدار نوفه موجود بر روی مشاهدات کد، به کمک مشاهدات فاز کاهش داده می‌شود. اما همان‌گونه که درباره ترکیب مستقل از هندسه فاز بیان شد، در این ترکیب به دلیل استفاده از مشاهدات فاز، نیاز به پیدا کردن ابهام فاز و کمان‌های پیوسته ضروری است. برای تبدیل محتوای کلی الکترون به محتوای الکترونی قائم از تابع نگاشت استفاده می‌شود. همان‌گونه که بیان شد، تابع نگاشت مورد استفاده در این تحقیق، تابع نگاشت هندسی است که به کمک شکل ۱ تعریف می‌شود:



شکل ۱. محتوای کلی الکترون و محتوای الکترونی قائم. در اینجا نقطه IPP در ارتفاع ۴۵۰ کیلومتری از سطح زمین قرار دارد و z زاویه زینتی ماهواره می‌باشد. مدل یونوسفری مورد استفاده نیز مدل تک‌لایه است (آرورا و همکاران، ۲۰۱۵).

یونوسفری فاز-کد (کد نرم شده) برای محاسبه محتوای کلی الکترون. محاسبه محتوای کلی الکترون به کمک ترکیب مستقل از هندسه فاز، دارای پیچیدگی‌های محاسباتی خاصی می‌باشد به این معنا که قبل از انجام پردازش‌های محاسباتی لازم است کمان‌های پیوسته ماهواره‌ها شناسایی شوند. علاوه بر این لازم است در هر کمان به‌ازای هر ماهواره یک پارامتر ابهام فاز محاسبه شود. برای محاسبه محتوای الکترونی مطلق از ترکیب مستقل از هندسه (ترکیب یونوسفری) استفاده می‌شود:

$$P_1 = \rho + c(\delta t_{rcv} - \delta t^{sat}) + Tr + \alpha_{f_1} TEC + k_{1,rcv} - K_1^{sat} + M_1 + \varepsilon_1 \quad (۲)$$

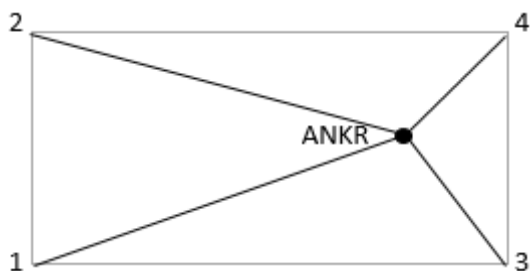
$$P_2 = \rho + c(\delta t_{rcv} - \delta t^{sat}) + Tr + \alpha_{f_2} TEC + k_{2,rcv} - K_2^{sat} + M_2 + \varepsilon_2$$

که ρ فاصله هندسی بین ماهواره و گیرنده، c سرعت نور، δt_{rcv} و δt^{sat} به ترتیب خطاهای ساعت گیرنده و ماهواره، Tr تأخیر تروپوسفری، $\alpha_{f_i} TEC$ مقدار اثر یونوسفری برای فرکانس f_i ، $k_{i,rcv}$ و K_i^{sat} به ترتیب مقادیر بایاس فرکانسی گیرنده و ماهواره برای فرکانس f_i ، M_i مقدار اثر چند مسیری برای فرکانس f_i و ε_i مقدار خطای تصادفی می‌باشد. از تفاضل معادلات بالا ترکیب مستقل از هندسه به صورت زیر تشکیل می‌شود:

$$P_l = P_1 - P_2 = 40.3 TEC \left(\frac{f_2^2 - f_1^2}{f_1^2 f_2^2} \right) + (k_{1,rcv} - k_{2,rcv}) + (K_2^{sat} - K_1^{sat}) + M_l + \varepsilon_l \quad (۳)$$

که $(k_{1,rcv} - k_{2,rcv})$ و $(K_2^{sat} - K_1^{sat})$ به ترتیب معرف انحرافات تفاضلی کد (DCB: Differential Code Bias) برای گیرنده و ماهواره هستند و به ترتیب با نمادهای DCB_{rcv} و DCB^{sat} نمایش داده می‌شوند. با جایگذاری این نمادها در رابطه (۳)، محتوای کلی الکترون به صورت زیر محاسبه می‌شود:

مقادیر کمتر از آن، سیگنال‌های دریافتی دارای نوفه و اثرات منابع خطای زیادی هستند. مقدار این پارامتر را به صورت پیش فرض برابر ۱۵ درجه انتخاب می‌شود (شریفی و فرزانه، ۲۰۱۶ و فرزانه و فروتن، ۲۰۱۷). پارامتر m مقدار توان بهینه را نشان می‌دهد که عدد آن به صورت تجربی به دست می‌آید. برای تعیین m بهینه لازم است مقادیر $VTEC_{station}^j$ محاسبه شده با مقادیر محتوای الکترونی قائم به دست آمده از سرویس بین‌المللی ناوبری، مقایسه شود. در این سرویس، مقادیر محتوای الکترونی قائم در شبکه‌ای منظم و با فاصله طولی ۵ درجه و فاصله عرضی ۵/۲ درجه منتشر می‌شوند. ایستگاه آنکارا در عرض $\varphi = 39.8875000^\circ$ و طول $\lambda = 32.7583333^\circ$ قرار دارد. رئوس شبکه در اطراف این ایستگاه به ترتیب در مختصات‌های $\left[\varphi_1 = 37.5^\circ, \lambda_1 = 30^\circ \right]$ ، $\left[\varphi_2 = 40^\circ, \lambda_2 = 30^\circ \right]$ ، $\left[\varphi_3 = 37.5^\circ, \lambda_3 = 35^\circ \right]$ ، $\left[\varphi_4 = 40^\circ, \lambda_4 = 35^\circ \right]$ واقع می‌شوند. بنابراین در این سرویس مقدار محتوای الکترونی قائم در ایستگاه آنکارا به صورت جداگانه محاسبه نمی‌شود بلکه در رئوس اطراف آن بیان می‌شود. برای این کار می‌توان به روش‌های مختلف مقدار محتوای الکترونی قائم را در ایستگاه آنکارا محاسبه نمود. شکل ۲ موقعیت فضایی ایستگاه آنکارا را نسبت به رئوس شبکه اطراف آن نشان می‌دهد.



شکل ۲. موقعیت فضایی ایستگاه آنکارا نسبت به رئوس شبکه اطراف آنکه تمامی این نقاط در لایه یونوسفر و در ارتفاع ۴۵۰ کیلومتری از سطح زمین قرار دارند. طبق محاسبات، نقطه نفوذ یونوسفری (IPP: Ionospheric Pierce Point) ایستگاه آنکارا نسبت به رأس ۴ نزدیک‌ترین فاصله را دارد.

برای تبدیل محتوای کلی الکترون به محتوای الکترونی قائم، تابع نگاشت زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$F(z) = \sqrt{1 - \left(\frac{R_e}{R_e + h} \sin(z) \right)^2}. \quad (5)$$

با در نظر گرفتن این تابع، تبدیل محتوای کلی الکترون به محتوای الکترونی قائم به صورت زیر خواهد بود:

$$TEC = \frac{VTEC}{F(z)}. \quad (6)$$

به کمک رابطه (۶) می‌توان در هر اپک مقادیر محتوای کلی الکترون برای هر ماهواره را به محتوای الکترونی قائم تبدیل کرد. حال می‌توان با استفاده از مقادیر محتوای الکترونی قائم ماهواره‌ها، مقدار محتوای الکترونی قائم را در هر اپک و در راستای زینت ایستگاه به کمک یک میانگین وزن دار تعیین کرد. منظور از اپک لحظه اندازه‌گیری یا لحظه جمع‌آوری اطلاعات توسط گیرنده است. برای محاسبه محتوای الکترونی قائم در راستای زینت ایستگاه از تابع پیشنهادی زیر استفاده می‌شود:

$$VTEC_{station}^j = \frac{\sum_{i=1}^N w_i^j VTEC_i^j}{\sum_{i=1}^N w_i^j}, \quad (7)$$

$$w_i^j = \left(\frac{1}{\cos(\theta_i^j)} \right)^m, \quad \theta_i^j \geq \theta_0,$$

که $VTEC_{station}^j$ محتوای الکترونی قائم در راستای زینت ایستگاه در اپک j -ام، $VTEC_i^j$ محتوای الکترونی قائم ماهواره i -ام در اپک j -ام، N تعداد ماهواره‌های موجود در هر اپک که زاویه ارتفاعی آنها بیشتر از θ_0 است و θ_i^j زاویه ارتفاعی ماهواره i -ام در اپک j -ام را نشان می‌دهد. θ_0 حداقل زاویه ارتفاعی ماهواره می‌باشد که به‌ازای

$$RMSE_{nearest_vertex} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^L (VTEC_{nearest_vertex}^{j,IGS} - VTEC_{station}^j)^2}{L}} \quad (9)$$

که متغیر j معرف شماره اپک و $VTEC_{station}^j$ همان تابع معرفی شده در رابطه (۷) می باشد. به طور مشابه برای سایر روش ها نیز می توان $VTEC_{station}^{j,IGS}$ را به صورت های زیر تعریف کرد:

$$VTEC_{station}^{j,IGS} = VTEC_{average}^{j,IGS} = \frac{\sum_{i=1}^4 VTEC_i^{j,IGS}}{4} \quad (10)$$

که $VTEC_i^{j,IGS}$ مقدار محتوای الکترونی قائم در رأس i و اپک j -ام می باشد.

$$RMSE_{average} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^L (VTEC_{average}^{j,IGS} - VTEC_{station}^j)^2}{L}} \quad (11)$$

در محاسبه محتوای الکترونی قائم به صورت میانگین وزن دار از تابع زیر استفاده شده است:

$$VTEC_{station}^{j,IGS} = VTEC_{weighted_average}^{j,IGS} = \frac{\sum_{i=1}^4 w_i VTEC_i^{j,IGS}}{\sum_{i=1}^4 w_i} \quad (12)$$

$$w_i = \frac{1}{d_i} = \frac{1}{\sqrt{(x_{ANKR} - x_i)^2 + (y_{ANKR} - y_i)^2 + (z_{ANKR} - z_i)^2}}$$

$$RMSE_{weighted_average} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^L (VTEC_{weighted_average}^{j,IGS} - VTEC_{station}^j)^2}{L}} \quad (13)$$

قبل از بررسی دقت هر یک از روش های فوق، ابتدا باید مقدار توان بهینه m که در رابطه (۷) تعریف شده است، تعیین شود. همان گونه که گفته شد، مقدار این پارامتر به صورت تجربی به دست می آید. برای محاسبه این

روش های مورد استفاده برای محاسبه محتوای الکترونی قائم در اینجا عبارتند از:

۱- نسبت دادن محتوای الکترونی نزدیک ترین رأس به ایستگاه مورد نظر.

۲- استفاده از میانگین گیری محتوای الکترونی رئوس شبکه.

۳- استفاده از میانگین وزن دار برای محاسبه محتوای الکترونی ایستگاه مورد نظر.

در ادامه دقت محاسبات برای هر روش به صورت جداگانه بررسی می شود.

با توجه به پایین بودن نرخ انتشار داده های یونوسفری لازم است که از اطلاعات اپک های متناظر در سایر فایل ها استفاده کرده و از اطلاعات سایر اپک ها صرف نظر شود. برای به کارگیری روش های بالا لازم است که مختصات ایستگاه های فوق به صورت مختصات کارتین محاسبه شود. با داشتن طول و عرض جغرافیایی هر نقطه، مختصات کارتین آن به صورت زیر محاسبه می شود:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_l \cos(\varphi) \cos(\lambda) \\ R_l \cos(\varphi) \sin(\lambda) \\ R_l \sin(\varphi) \end{bmatrix}$$

که R_l شعاع لایه یونوسفر تک لایه نسبت به مرکز زمین است و مقدار آن ۶۸۲۱ کیلومتر است. برای محاسبه محتوای الکترونی قائم در ایستگاه آنکارا از روش های گفته شده در بالا استفاده می شود، در ادامه دقت هر روش به صورت جداگانه به دست می آید.

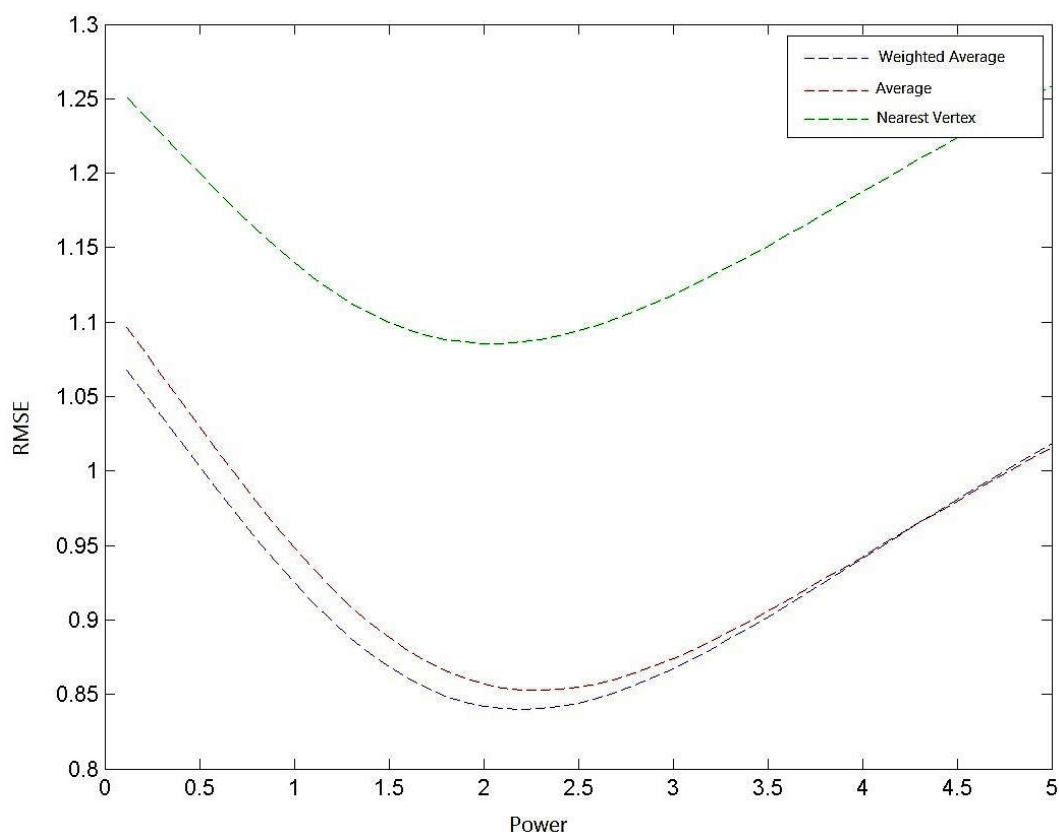
$$VTEC_{station}^{j,IGS} = VTEC_{nearest_vertex}^{j,IGS} \quad (8)$$

برای محاسبه دقت روش نیز از ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE: Root Mean Square Error) استفاده می شود:

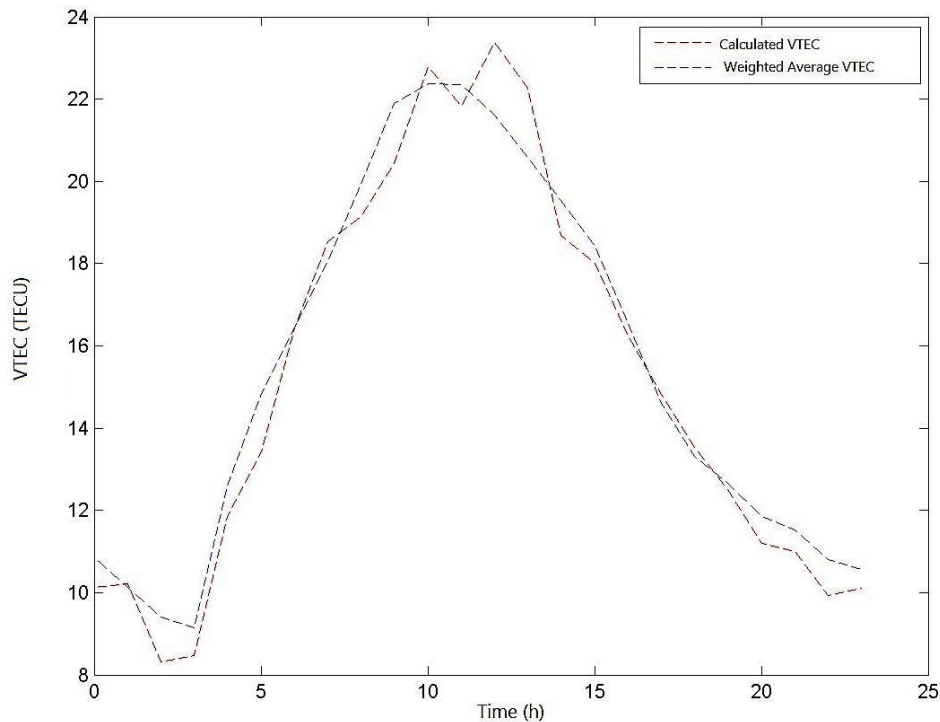
این بدان معناست که مقادیر محتوای الکترونی قائمی که از روش پیشنهادی به دست می‌آیند بیشترین تطابق را با مقادیر محتوای الکترونی قائم به دست آمده از روش میانگین وزن دار دارند. به عبارت دیگر اگر مقدار محتوای الکترونی قائم با در نظر گرفتن موقعیت رئوس شبکه نسبت به موقعیت فضایی ایستگاه آنکارا محاسبه شود، بهترین تطابق را با روش پیشنهادی خواهد داشت. با توجه به مقدار کم RMSE برای این حالت، می‌توان روش پیشنهادی را به عنوان یک روش نسبتاً دقیق برای محاسبه محتوای الکترونی قائم در نظر گرفت. شکل ۴ مقدار این تطابق را به صورت گرافیکی نشان می‌دهد.

پارامتر، مقادیر m از ۰ تا ۵ با گام ۱/۰ تغییر داده می‌شود و به ازای هر m مقدار RMSE به دست می‌آید. لازم به ذکر است که بازه مورد نظر برای تعیین m نیز به صورت تجربی انتخاب شده است. نمودارهای RMSE- m به دست آمده برای هر یک از روش‌های بالا، شکل‌های مشابهی دارند و مقدار m بهینه برای هر روش تقریباً یکسان است. در شکل ۳ نمودارهای RMSE- m در روز ۱۰۰ سال ۲۰۱۶ برای ایستگاه آنکارا ترسیم شده است.

این نمودارها مقدار RMSE را به ازای توان‌های مختلف و به صورت تجربی نشان می‌دهند. با توجه به شکل‌های بالا ملاحظه می‌شود که نمودار آبی رنگ به ازای تمامی مقادیر m کمترین مقدار RMSE را نشان می‌دهد.



شکل ۳. نمودارهای RMSE بر حسب m در این روز مقدار توان بهینه برای تمامی حالت‌ها ۲/۲ است. حداقل زاویه ارتفاعی ماهواره‌های هر بازه زمانی نیز برابر $\theta_0 = 15^\circ$ است.



شکل ۴. مقایسه مقادیر محاسبه شده VTEC و مقادیر به دست آمده از میانگین وزن دار. در اینجا مقدار توان بهینه ۲/۲ است.

جدول ۱. مقادیر m بهینه برای روزهای مختلف سال ۲۰۱۶.

روز	توان بهینه	$RMSE_{weighted-average} (TECU)$
۱۰	۰/۹	۰/۹۱
۴۰	۱/۲	۰/۹۵
۷۱	۰/۸	۰/۹۰۵
۱۰۰	۲/۲	۰/۸۴
۱۳۱	۰/۹	۱/۴۱۳
۱۶۰	۰/۵	۱/۱۹۶
۱۹۰	۰	۱/۲۶۲
۲۲۰	۰/۶	۱/۰۹۹
۲۵۰	۰/۶	۱/۰۳۶
۲۸۰	۱	۰/۸۸۶
۳۱۰	۰/۹	۰/۷۹۹
۳۴۰	۱/۹	۱/۰۵۱

با در نظر گرفتن ماهیت تصادفی یونوسفر، ممکن است در برخی از روزها، مقادیر m به صورت تصادفی افزایش یا کاهش بیش از حدی داشته باشند. بنابراین در

در شکل بالا، با توجه به ساعتی بودن اپک‌های اندازه‌گیری و نوفه‌ای بودن مشاهدات کد، نتایج VTEC چندان دیده نمی‌شود. در شکل ۵ این رفتار را می‌توان با در نظر گرفتن اپک‌های ۱۵ دقیقه‌ای فایل مختصات مداری ماهواره‌ها، به صورت دقیق‌تر مشاهده نمود. هرچند به دلیل استفاده از تابع وزن بهینه مقدار نوسانات شکل کمتر می‌شود.

با توجه به ماهیت تصادفی - تناوبی یونوسفر در طول یک سال، بررسی رفتار مقادیر m بهینه ضروری به نظر می‌رسد. برای این کار به صورت منظم فایل‌های مشاهدات، فایل‌های مداری دقیق و فایل‌های یونوسفری ۱۲ روز مختلف از سال ۲۰۱۶ تهیه شده و مقادیر m بهینه برای هر روز به صورت جداگانه محاسبه شد. جدول ۱ مقادیر m بهینه را برای روزهای مختلف سال ۲۰۱۶ نشان می‌دهد.

با بسط دادن فرم بسته تابع متناوب رابطه زیر به دست خواهد آمد:

$$A \sin\left(\frac{2\pi}{T} d_i + \varphi_0\right) + \beta = A \cos(\varphi_0) \sin\left(\frac{2\pi}{T} d_i\right) + A \sin(\varphi_0) \cos\left(\frac{2\pi}{T} d_i\right) + \beta. \quad (15)$$

با اعمال تغییر متغیر $A \cos(\varphi_0) = a$ و $A \sin(\varphi_0) = b$ رابطه (۱۴) به صورت $E(a, b, \beta)$ به دست می‌آید. برای به حداقل رساندن این تابع از شرط بهینه‌سازی $\nabla E(a, b, \beta) = 0$ استفاده می‌شود. با اعمال این شرط دستگاه معادلات زیر به دست می‌آید:

$$\nabla E(a, b, \beta) = 0 \Rightarrow \frac{\partial E}{\partial a} = 0, \frac{\partial E}{\partial b} = 0, \frac{\partial E}{\partial \beta} = 0. \quad (16)$$

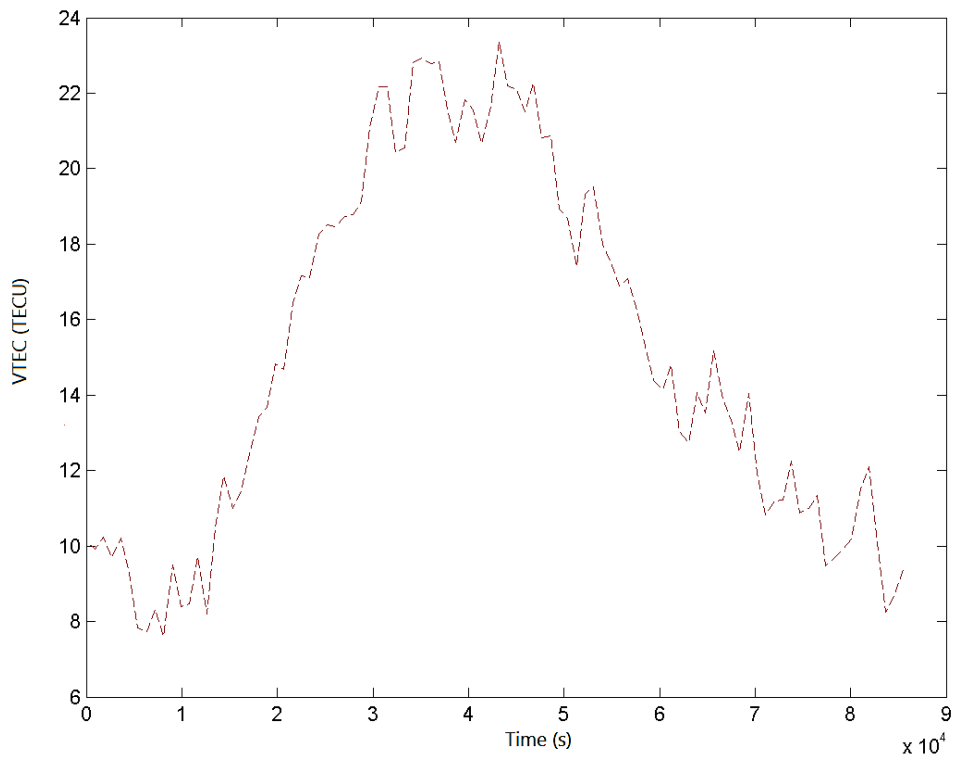
با انجام مشتقات رابطه (۱۶)، معادلات ماتریسی زیر به دست خواهد آمد.

$$\begin{bmatrix} \sum_{i=1}^N \left(\sin \frac{2\pi}{T} d_i\right)^2 & \sum_{i=1}^N \left(\sin \frac{2\pi}{T} d_i\right) \sum_{i=1}^N \left(\cos \frac{2\pi}{T} d_i\right) & \sum_{i=1}^N \left(\sin \frac{2\pi}{T} d_i\right) \\ \sum_{i=1}^N \left(\sin \frac{2\pi}{T} d_i\right) \left(\cos \frac{2\pi}{T} d_i\right) & \sum_{i=1}^N \left(\cos \frac{2\pi}{T} d_i\right)^2 & \sum_{i=1}^N \left(\cos \frac{2\pi}{T} d_i\right) \\ \sum_{i=1}^N \left(\sin \frac{2\pi}{T} d_i\right) & \sum_{i=1}^N \left(\cos \frac{2\pi}{T} d_i\right) & N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^N m_i \sin \frac{2\pi}{T} d_i \\ \sum_{i=1}^N m_i \cos \frac{2\pi}{T} d_i \\ \sum_{i=1}^N m_i \end{bmatrix}. \quad (17)$$

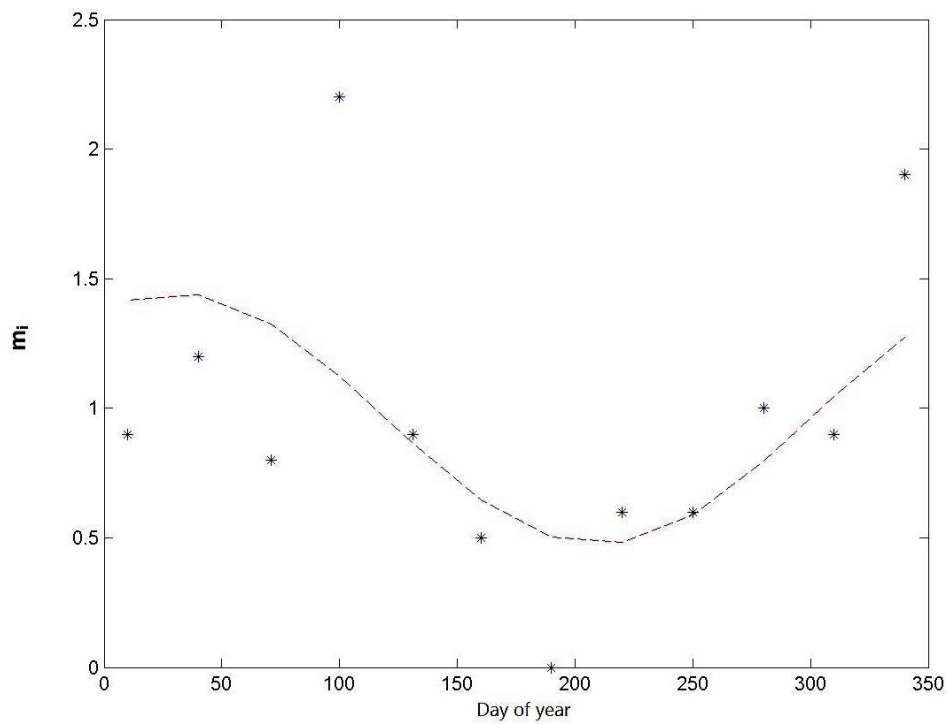
تعیین رفتار m فرض می‌شود که رفتار یونسفر صرفاً تناوبی است.

در ادامه با در نظر گرفتن رفتار تناوبی یونسفر، یک تابع سینوسی به مشاهدات برازش داده می‌شود. برای این کار ابتدا یک تابع سینوسی به شکل $y_i = A \sin\left(\frac{2\pi}{T} d_i + \varphi_0\right) + \beta$ در نظر گرفته و پارامترهای A ، φ_0 و β به گونه‌ای تعیین می‌شود که تابع خطای زیر به حداقل برسد. دوره تناوب تابع هم با سعی و خطا به دست می‌آید که در اینجا دوره تناوب ۳۶۰ روز در نظر گرفته شده است. انتخاب این دوره تناوب با در نظر گرفتن تغییرات سالیانه TEC (مقادیر TEC با تغییر فصل‌ها و تغییر زاویه میل خورشید در طول یک سال به صورت تناوبی تغییر می‌کنند) منطقی به نظر می‌رسد. از طرفی با در نظر گرفتن تکرار آرایش هندسی ماهواره‌های GPS و با توجه به این نکته که هر ماهواره در هر روز حدود ۴ دقیقه زودتر از روز قبل در افق دید ظاهر می‌شود، تکرار این آرایش بعد از ۳۶۰ روز امری بدیهی است.

$$E(A, \varphi_0, \beta) = \sum_{i=1}^N \left[\left[A \sin\left(\frac{2\pi}{T} d_i + \varphi_0\right) + \beta \right] - m_i \right]^2. \quad (14)$$



شکل ۵. محاسبه محتوای الکترونی قائم در ایستگاه آنکارا. فایل مشاهدات مربوط به روز ۱۰۰ از سال ۲۰۱۶ است. این مقادیر در بازه های ۱۵ دقیقه‌ای محاسبه شده‌اند.



شکل ۶. برازش تابع سینوسی به مقادیر m_i .

بهینه معتبر فرض کرد. لازم به ذکر است که اختلاف مقادیر تخمینی m با مقدار اصلی m تفاوت زیادی در مقدار RMSE ایجاد نخواهد کرد و نتایج به دست آمده قابل قبول خواهند بود. همان گونه که در جدول (۲) ملاحظه می شود در روز ۷۳، بین مقدار بهینه و تخمینی m چیزی در حدود ۸/۰ اختلاف وجود دارد که علت آن همان گونه که ذکر شد، به تغییرات تصادفی محتوای الکترونی قائم برمی گردد. به هر حال سایر مقادیر به دست آمده اختلاف قابل قبولی با مقدار تخمینی دارند و از این تابع می توان برای تخمین توان بهینه و محتوای الکترونی قائم استفاده کرد.

۳ بحث و نتیجه گیری

در این بخش به تحلیل و بررسی نتایج به دست آمده پرداخته می شود و روش ها و پیشنهادهایی به منظور توسعه پژوهش انجام شده ارائه خواهد شد. به طور کلی نتایج به دست آمده را می توان در چند مقوله زیر طبقه بندی کرد. ۱- در این تحقیق برای محاسبه محتوای الکترونی قائم از فایل های مشاهدات با اپک های ۳۰ ثانیه ای، داده های مربوط به مختصات دقیق ماهواره ها که هر ۱۵ دقیقه محاسبه می شوند و اطلاعات مربوط به شبکه محتوای الکترونی قائم یونوسفر که به صورت ساعتی منتشر می شوند، استفاده شده است.

۲- از آنجایی که مشاهدات کد همواره دارای نوفه بیشتری نسبت به مشاهدات فاز هستند، پیدا کردن روشی که بتواند به کمک این مشاهدات و با دقت خوبی محتوای الکترونی قائم را تخمین بزند، دارای اهمیت است. در این پژوهش برای انجام این نوع محاسبات از یک تابع وزن خاص استفاده شد. شواهد به دست آمده نشان می دهند که نتایج به دست آمده برای محتوای الکترونی قائم، تطابق بسیار خوبی با روش میانگین گیری وزن دار از داده های محتوای الکترونی سرویس ناوبری دارند.

به کمک این معادله ماتریسی می توان پارامترهای مجهول a و b را تعیین کرد. در ادامه و به منظور محاسبه مجهولات تابع سینوسی از روابط زیر استفاده می شود.

$$A = \sqrt{a^2 + b^2}, \quad \tan(\varphi_0) = b/a. \quad (18)$$

تابع سینوسی برازش داده شده به مقادیر m_i در شکل ۶ قابل ملاحظه است.

پارامترهای برازش داده شده برای این تابع با یک سرشکنی کمترین مربعات به دست می آیند. تابع زیر نتیجه این سرشکنی است.

$$m = 0.48379 \sin\left(\frac{\pi}{180} \text{day} + 1.06527\right) + 0.9606, \quad (19)$$

که m تخمین مقدار m برای یک روز از سال است. در جدول ۲ مقادیر تخمین زده شده و مقادیر واقعی m بهینه به دست آمده برای ۴ روز دلخواه از سال ۲۰۱۷ آورده شده است.

جدول ۲. مقایسه مقادیر به دست آمده از تابع سینوسی و توان بهینه.

روز	m بهینه	m بهینه تخمینی
۲۰	۱/۴	۱/۴۳۸
۵۰	۰/۹	۱/۴۱۲
۷۳	۲/۱	۱/۳۰۸
۱۰۰	۱	۱/۱۱۸

مقادیر به دست آمده برای توان های تخمین زده شده، با مقادیر واقعی آنها دارای تفاوت هایی هستند که علت آن برازش تابع سینوسی و استفاده از روش کمترین مربعات است. بنابراین با فرض اینکه رفتار یونوسفر صرفاً تناوبی در نظر گرفته شود، می توان مقادیر به دست آمده را برای m

به دست آمده از گیرنده زمینی و با داشتن تابع سینوسی به دست آمده برای توان بهینه، می توان مقدار محتوای الکترونی قائم را در هر اپک محاسبه کرد. نتایج به دست آمده در این پژوهش، صحت کار انجام شده را نیز تأیید می کند. مقادیر RMSE محاسبه شده برای روزهای مختلف، از 0.8TECU تا 1.4TECU متغیر است که این مقادیر با در نظر داشتن مشاهدات نوفه ای کد، اعداد قابل قبولی هستند.

۵- تنها نکته ای که در اینجا باید به آن توجه شود، ماهیت محلی بودن این روش است. این بدان معنی است که تابع به دست آمده تنها در سلول اطراف ایستگاه آنکارا معتبر است. به عنوان مثال برای محاسبه محتوای الکترونی قائم در ایستگاه تهران، پارامترهای تابع سینوسی تغییر خواهند کرد. در این صورت تعیین رفتار محتوای الکترونی در یک منطقه بسیار وسیع همانند کل ایران، مستلزم آن است که برای هر سلول شبکه یونسفری IGS، یک تابع سینوسی برای مقادیر m ، محاسبه شود.

۶- همان گونه که در بخش ۲ ملاحظه شد، محاسبه محتوای الکترونی مطلق نیازمند در دست داشتن کدهای P_1 و P_2 است. بدیهی است که این روش برای فایل های مشاهداتی گیرنده هایی که حاوی این اطلاعات هستند، قابل انجام است. اما از آنجایی که فایل های مشاهدات ایستگاه های تهران فاقد چنین اطلاعاتی بودند، ترجیح بر آن شد که ایستگاه آنکارا به عنوان ایستگاه مبنا در نظر گرفته شود.

منابع

- Amerian, Y., Hossainali, M., Voosoghi, B., Ghaffari, M. R., 2010, Tomographic Reconstruction of the Ionospheric Electron Density in term of wavelets: International Journal of Aerospace Science and Technology.
- Arikan, F., Erol, C. B., and Arikan, O., 2004, Regularized estimation of vertical total electron content from GPS data for a desired

۳- در ادامه با توجه به رفتار تصادفی - تناوبی یونسفر در زمان های مختلف، بررسی این نکته ضروری به نظر می رسد که آیا توان بهینه در محاسبات میانگین وزن دار روش پیشنهادی همواره ثابت است یا در زمان های مختلف تغییر می کند؟ محاسبات مشابهی نیز برای سایر روزها به انجام رسید و در نهایت با محاسبه یک تابع سینوسی مقدار توان بهینه بر حسب روز محاسبه شد. در پایان هم به منظور ارزیابی تابع به دست آمده، محاسبات توان بهینه برای چند روز تصادفی از سال ۲۰۱۷ ارزیابی و نتایج آن در جدول ۲ گزارش شد.

۴- این پژوهش صرفاً تحقیقی است که دقت و کارایی استفاده از مشاهدات کد را در محاسبات محتوای الکترونی قائم، اثبات می کند. به منظور بررسی دقت نتایج به ناچار از اپک های ۱ ساعته (نرخ انتشار داده های یونسفری سرویس ناوبری) استفاده کردیم. با تأیید این شواهد می توان نتیجه گرفت که مقادیر محاسبه شده برای محتوای الکترونی قائم را نیز می توان در هر اپک مشاهداتی (در اینجا ۳۰ ثانیه) محاسبه نمود. اما برای محاسبه محتوای الکترونی قائم در اپک های ۳۰ ثانیه ای، به مختصات های ۳۰ ثانیه ای ماهواره ها نیاز است که برای آن می توان از فایل های ناوبری همان روز استفاده کرد. در این پژوهش برای به دست آوردن اطلاعات مربوط به بایاس های کد تفاضلی از فایل های یونسفری روزانه استفاده شد که این کار لازمه دسترسی به اینترنت را برای کاربر ایجاد می کند. یکی از راه های رفع این مشکل استفاده از داده های ماهیانه P1P2 یا P1C1 است که اطلاعات مربوط به بایاس های کد تفاضلی را در برمی گیرند و به کمک آنها برخی از توابع محلی بایاس های کد تفاضلی ماهواره و گیرنده برای یک روز دلخواه به صورت دستی و بدون نیاز به هیچ گونه فایل یونسفری خاصی قابل محاسبه است. بنابراین با داشتن فایل های یونسفری ماهیانه، فایل های مشاهدات و ناوبری

- Liao, X., 2000, Carrier Phase Based Ionosphere Recovery Over a Regional Area GPS Network: M. Sc. Thesis, University of Calgary.
- Mylnikova, A. A., Yasyukevich, Y. V., Kunitsyn, V. E., Padokhin, A. M., 2014, Variability of GPS/GLONASS Differential Code Biases.
- Nayir, H., Arikan, F., Arikan, O., and Erol, C. B., 2007, Total Electron Content Estimation with Reg-Est.
- Otsuka, Y., Ogawa, T., Saito, A., Tsugawa, T., Fukao, S., and Miyazaki, S., 2002, A new technique for mapping of total electron content using GPS network in Japan: *Earth Planets Space*, **54**, 63-70.
- Seeber, G., 1993, *Satellite Geodesy: Foundations, Methods and Application*: Walter de Gruyter, Berlin and New York, **531**.
- Sharifi, M. A., and Farzaneh, S., 2017a, The ionosphere electron density spatio-temporal modeling based on the Slepian basis functions: *Acta Geodaetica et Geophysica*, **52**(1), 5-18.
- Sharifi, M. A., and Farzaneh, S., 2017b, The local ionospheric modeling by integration ground GPS observations and satellite altimetry data: *Annals of Geophysics*, **59**(6), 0654.
- Farzaneh, S., and Forootan, E., 2017c, Reconstructing Regional Ionospheric Electron Density: A Combined Spherical Slepian Function and Empirical Orthogonal Function Approach: *Surveys in Geophysics*, 1-21.
- 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.
- Warnant, R., 1997, Reliability of the TEC computed using GPS measurements-The problem of hardware biases: *Acta Geodaetica Geophysica et Montanistica Hungarica*, **32**(3-4), 451-459.
- time period: *Radio Science*, **39**, RS6012, doi: 10.1029/2004 RS003061.
- Arora, B. S., Morgan, J., Ord, S. M., Tingay, S. J., Hurley-Walker, N., Bell, M., Bernardi, G., Bhat, R., Briggs, F., Callingham, J. R., Deshpande, A. A., Dwarakanath, K. S., Ewall-Wice, A., Feng, L., For, B. Q., Hancock, P., Hazelton, B. J., Hindson, L., Jacobs, D., Johnston-Hollitt, M., Kapińska, A. D., Kudryavtseva, N., Lenc, E., McKinley, B., Mitchell, D., Oberoi, D., Offringa, A. R., Pindor, B., Procopio, P., Riding, J., Staveley-Smith, L., Wayth, R. B., Wu, C., Zheng, Q., Bowman, J. D., Cappallo, R. J., Corey, B. E., Emrich, D., Goeke, R., Greenhill, L. J., Kaplan, D. L., Kasper, J. C., Kratzenberg, E., Lonsdale, C. J., Lynch, M. J., McWhirter, S. R., Morales, M. F., Morgan, E., Prabu, T., Rogers, A. E. E., Roshi, A., Udaya Shankar, N., Srivani, K. S., Subrahmanyam, R., Waterson, M., Webster, R. L., Whitney, A. R., Williams, A., and Williams, C. L., 2015, *Ionospheric Modelling using GPS to calibrate the MWA. 1: comparison of first order ionospheric effects between GPS models and MWA observations*: Astronomical Society of Australia, Cambridge University Press, doi: 10.1017/pas.2015.
- Gao, Y., and Liao, Z., 2002, Ionosphere Modeling Using Carrier Smoothed Ionosphere Observations from a Regional GPS Network: *Geomatica*, **56**(2), 97-106
- Deviren, M.N., and Arikan, F., 2013, spatio-temporal interpolation of total electron content using a GPS network.
- Jakowski, N., Sardon, E., Engler, E., Jungstand, A., and Klahn, D., 1996, Relationships between GPS-signal propagation errors and EISCAT observations.
- Leick, A., 2004, *GPS Satellite Surveying*, 3rd Edition: John Wiley and sons Inc., New Jersey.

Regional and optimal estimation of total electron content using pseudorange observations

Saleh Mafi¹, Taha Sadeghi Chorsi¹, and Saeed Farzaneh^{2*}

¹*M. Sc. Student, Department of Surveying and Geomatics Engineering, Faculty of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran*

²*Assistant Professor, Department of Surveying and Geomatics Engineering, Faculty of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran*

(Received: 06 July 2017, Accepted: 04 December 2017)

Summary

Total Electron Content (TEC) is one of the most important factors in monitoring the variable structure of ionosphere. Global Positioning System (GPS) is a useful and affordable instrument in TEC prediction through ground receivers. In this research, Vertical Total Electron Content (VTEC) is calculated in a GPS station using code observations and an approach is introduced for precise, and local modeling of this quantity. For doing this, a geometry-free combination of P_1 and P_2 observables is made and TEC for every satellite in an epoch is obtained using this combination and Differential Code Biases (DCB) of satellite and receiver. The calculated parameter shows total electron content in the direction of signal propagation in ionosphere layer. Besides, a mapping function is used for transforming TEC to VTEC. For doing this transformation, there are various mapping functions the common examples of which are geometric mapping function and empirical mapping function. In order to increase the precision and reduce systematic errors of calculations, the geometric mapping function is used. After calculation of VTEC for every satellite, it is necessary to obtain the amount of VTEC in zenith direction of the station. For doing this, a weighted function is used that inversely relates to the elevation angle of the satellite. The proposed weighted function provides an optimum and precise formula for calculation of VTEC in zenith direction of the station. In order to investigate the accuracy of calculations, all of the results are compared with the VTEC grids of International GNSS Service (IGS), and finally, the conclusions for every specific method are shown like weighted average, normal average and nearest vertex. In other words, IGS ionospheric products are considered as accurate and precise VTEC and the results are compared with these VTECs. As everybody knows, IGS VTECs are produced in a grid and thus, for calculation of VTEC in a specific point, mathematical approaches like weighted average of VTECs in surrounded vertexes of the point should be used. Conclusions illustrate the calculation of VTEC using proposed approach has a good adaption with the weighted average of VTECs around the Ankara grid station. The other results are also illustrated in diagrams. In addition, the periodic behavior of ionosphere at different times are also modeled, and the method is improved for optimum estimation of VTEC at various times. The only thing that is important is the local nature of this method, which is useful in one cell of IGS ionospheric network only.

Keywords: Total electron content, vertical total electron content, elevation angle of satellite, global positioning system

*Corresponding author: