

برآورد مقادیر ارباب تفاضلی کد گیرنده‌های شبکه دائم GPS ایران با استفاده از نقشه‌های یونسفری جهانی

ناصر قلی‌پور^۱، یزدان عامریان^{۲*}

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد ژئودزی - دانشکده مهندسی نقشه‌برداری - دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی
nasser.golipour@email.kntu.ac.ir

^۲ استادیار دانشکده مهندسی نقشه‌برداری - دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی
amerian@kntu.ac.ir

(تاریخ دریافت آبان ۱۳۹۷، تاریخ تصویب دی ۱۳۹۷)

چکیده

مشاهدات گیرنده‌های دو فرکانسه سیستم تعیین موقعیت جهانی (GPS) می‌تواند برای محاسبه محتوای الکترونی کلی (TEC) مورد استفاده قرار گیرد. ارباب تفاضلی کد (DCB) ماهواره‌ها و گیرنده‌های GPS، یکی از مهم‌ترین منابع خطا و در واقع مجهولات مورد نیاز در روابط محاسبه TEC و در نتیجه تعیین موقعیت با استفاده از مشاهدات کد GPS می‌باشد. سرویس بین‌المللی سیستم‌های ماهواره‌ای ناوبری جهانی (IGS)، مقدار این کمیت را برای ماهواره‌ها و گیرنده‌های متعلق به شبکه IGS، در قالب مدل‌سازی جهانی یونسفر محاسبه و منتشر می‌کند. تعیین کمیت DCB گیرنده‌های GPS در شبکه‌های محلی و منطقه‌ای به صورت مستقل از مدل‌سازی یونسفر، دارای اهمیت و کاربرد می‌باشد. در نتیجه هدف این مقاله، محاسبه مقادیر DCB گیرنده‌های شبکه دائم GPS ایران (IPGN) به روشی جدید و مستقل از مدل‌سازی منطقه‌ای یونسفر است. ایده روش مقاله بر مبنای استفاده از نقشه‌های یونسفری جهانی (GIM) برای محاسبه مقادیر DCB گیرنده‌ها می‌باشد. مقادیر VTEC مورد نیاز در نقاط نفوذ یونسفری (IPP) در روش مقاله، با درون‌یابی‌های مکانی و زمانی GIM محاسبه می‌گردد. برای نرم کردن مشاهدات مستقل از هندسه شبه فاصله کد از فیلتر میانگین متحرک استفاده گردید. از مقادیر DCB ماهواره‌های GPS که توسط IGS منتشر می‌گردد، استفاده شد و سپس مقادیر DCB گیرنده‌ها در هر اپک با روش پیشنهادی مقاله محاسبه و برای هر روز میانگین گرفته شد تا امکان مقایسه با DCB گیرنده‌ها که توسط IGS منتشر می‌گردد، فراهم شود. روش پیشنهادی ابتدا بر روی شبکه‌ای متشکل از ایستگاه‌های IGS پیاده‌سازی و مقادیر حاصل برای DCB گیرنده‌ها با مقادیر منتشره توسط IGS مقایسه گردید. حداکثر اختلاف بین DCB برآورد شده گیرنده‌ها و DCB منتشره توسط IGS کمتر از 0.540 نانوثانیه و جذر میانگین مربعات این اختلافات (RMSE) برابر 0.231 نانوثانیه است که نشان دهنده کارایی بالای این روش در محاسبه پارامتر DCB گیرنده‌ها می‌باشد. سپس مقادیر DCB گیرنده‌های شبکه دائم GPS ایران با استفاده از روش پیشنهادی محاسبه گردید.

واژگان کلیدی: ارباب تفاضلی کد، نقشه‌های یونسفری جهانی، محتوای الکترونی کلی، فیلتر میانگین متحرک

* نویسنده رابط

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر سیستم‌های ماهواره‌ای ناوبری جهانی^۱ به عنوان یک ابزار کارآمد جهت مطالعه اتمسفر زمین مورد استفاده قرار گرفته است. یکی از مهم‌ترین سیستم‌های ماهواره‌ای ناوبری جهانی، سیستم تعیین موقعیت جهانی^۲ است. این سیستم متشکل از حدود ۳۲ ماهواره بوده که در ۶ صفحه مداری با زاویه میل ۵۵ درجه به دور زمین دوران نموده و یک پوشش جهانی برای تعیین موقعیت در هر نقطه از زمین را فراهم می‌نماید. امواج ارسالی از ماهواره‌های GPS در مسیر خود از ماهواره تا گیرنده تحت تأثیر خصوصیات فیزیکی بخش‌های مختلف اتمسفر قرار می‌گیرند. در تعیین موقعیت با استفاده از GPS، این تأثیرات (خطاها) با استفاده از روش‌های محاسباتی و مدل‌های موجود، حذف یا تعدیل می‌گردد تا موقعیت نقاط با دقت بهتری محاسبه گردند [۱-۳].

اتمسفر زمین به چند لایه تقسیم می‌گردد که لایه یونسفر پس از لایه‌های تروپوسفر و استراتوسفر از ارتفاع ۵۰ کیلومتری شروع شده و تا قبل از لایه پلاسماسفر در ارتفاع ۱۰۰۰ کیلومتری ادامه می‌یابد. هر یک از این لایه‌ها اثرات متفاوتی بر روی انتشار امواج عبوری دارند که بیشترین اثرات بر تعیین موقعیت به واسطه لایه یونسفر ایجاد می‌شود. انتشار امواج الکترومغناطیس در لایه یونسفر تحت تأثیر الکترون‌های آزاد این محیط قرار دارند. از طرفی یونسفر یک محیط پاشنده^۳ می‌باشد و خاصیت پاشندگی یونسفر موجب می‌شود که تأخیر امواج عبوری از آن به فرکانس موج بستگی داشته باشد و باعث تأخیر در امواج کد و تقدم در امواج فاز موج حامل گردد. در تعیین موقعیت دقیق، این تأخیر و تقدم زمانی از اهمیت بالایی برخوردار است. کمیتی که با استفاده از آن می‌توان چگونگی فعالیت‌های یونسفری و نیز تغییرات زمان-مکان چگالی الکترونی در این لایه از جو را مورد مطالعه قرار داد، محتوای الکترونی کلی^۴ می‌باشد. پارامتر TEC برابر تعداد کل الکترون‌های آزاد در مسیر مابین ماهواره تا گیرنده در استوانه‌ای با سطح مقطع یک متر مربع است. واحد اندازه‌گیری TEC، TECU بوده و یک TECU معادل

$10^{16} \text{ ele} / \text{m}^2$ می‌باشد. پارامتر TEC را می‌توان با استفاده از مشاهدات کد و فاز GPS بدست آورد [۳، ۴].

به کمک ترکیب خاصی از مشاهدات GPS تحت عنوان ترکیب خطی مستقل از هندسه^۵ می‌توان پارامترها و خطاهای وابسته به هندسه، نظیر فاصله هندسی بین ماهواره و گیرنده، تأخیر تروپوسفری، خطای ساعت ماهواره و گیرنده را حذف نموده و از این ترکیب جهت برآورد TEC استفاده کرد [۵، ۶]. تأخیر یونسفری و همچنین اربیب تداخل فرکانسی تفاضلی^۶ که ناشی از تأخیر سخت‌افزاری ماهواره و گیرنده GPS می‌باشد، اثراتی هستند که در ترکیب خطی مستقل از هندسه شبه فاصله کد^۷ و فاز موج حامل^۸ باقی می‌مانند. مقادیر اربیب تداخل فرکانسی تفاضلی کد ماهواره و گیرنده GPS را به اختصار اربیب تفاضلی کد^۹ نیز می‌نامند. از آنجا که DCB نتیجه تفاضل مشاهدات کد است، لذا با استفاده از مشاهدات کد P و همچنین C می‌توان انواع مختلف DCB را تعریف نمود. ترکیب خطی مستقل از هندسه شبه فاصله کد و فاز موج حامل که به ترتیب از تفاضل مشاهدات کد و فاز بدست می‌آید، مشاهده یونسفری^{۱۰} نامیده می‌شوند [۷].

میزان خطای ناشی از نادیده گرفتن DCB ماهواره و گیرنده در محاسبه TEC می‌تواند تا چندین متر نیز افزایش یافته و حتی منجر به وجود مقادیر منفی TEC در محاسبات شود [۸]. به عنوان مثال، یک نانوثانیه DCB باعث خطای 2.85 TECU در برآورد TEC می‌شود [۹].

بنابراین جهت استفاده از TEC در مدل‌سازی یونسفر لازم است که DCB گیرنده‌ها و ماهواره‌های GPS تعیین شوند که مقادیر DCB ماهواره‌های GPS به عنوان یکی از محصولات سرویس بین‌المللی GNSS^{۱۱} در دسترس می‌باشد. این سرویس از سال ۱۹۹۸ با همکاری چندین مرکز تحقیقاتی در سطح جهان و در قالب گروه کاری یونسفر IGS شروع به انتشار روزانه نقشه‌های یونسفری جهانی^{۱۲} از TEC محاسبه شده از اطلاعات GPS به عنوان یکی از محصولات IGS نموده است [۱۰].

^۵ Geometry Free Linear Combination

^۶ Differential Inter-Frequency Biases

^۷ Code Pseudorange

^۸ Carrier Phase

^۹ Differential Code Biases: DCB

^{۱۰} Ionospheric Observable

^{۱۱} International GNSS Service: IGS

^{۱۲} Global Ionospheric Maps: GIM

^۱ Global Navigation Satellite Systems: GNSS

^۲ Global Positioning System: GPS

^۳ Dispersive

^۴ Total Electron Content: TEC

مستقل محاسبه نمودند که این روش نیازمند معلوم بودن DCB یکی از ایستگاه‌های منطقه مورد مطالعه می‌باشد. نعمتی‌پور و همکاران در سال ۲۰۱۸ با استفاده از الگوریتم هنگ، DCB ایستگاه‌های IPGN را محاسبه نمودند. با توجه به اینکه DCB ایستگاه‌های تهران و همدان که جزوه ایستگاه‌های IGS می‌باشد، همیشه توسط IGS منتشر نمی‌شود، بنابراین نمی‌توان همواره با استفاده از تغییرات هندسه مشاهدات تفاضلی یگانه مقادیر DCB سایر ایستگاه‌های IPGN را محاسبه نمود [۱۷، ۱۸].

کشین نیز در سال ۲۰۱۲ با استفاده از الگوریتم IONOLAB-BIAS، DCB گیرنده‌ها را محاسبه نمود با این تفاوت که به جای استفاده از فیلتر چبی شف برای نرم کردن ترکیب خطی مستقل از هندسه شبه فاصله کد، از ترکیب خطی مستقل از هندسه فاز موج حامل برای نرم کردن ترکیب خطی مستقل از هندسه شبه فاصله کد استفاده کرده است [۱۹].

در این مقاله همانند الگوریتم IONOLAB-BIAS و کشین از GIM به منظور تعیین DCB گیرنده‌های IPGN استفاده شده است، با این تفاوت که از فیلتر میانگین متحرک^۲ که دارای محاسبات کمتر و ساده‌تری نسبت به روش‌های فوق‌الذکر می‌باشد، جهت نرم کردن ترکیب خطی مستقل از هندسه شبه فاصله کد استفاده شده است. در این الگوریتم مقادیر VTEC بدست آمده از GIM با استفاده از یک تابع نگاشت به STEC تبدیل شده و از این STEC برای بدست آوردن مقادیر DCB در ایستگاه‌های IPGN استفاده شده است، که جزئیات کار در بخش‌های بعدی توضیح داده خواهد شد. در این مقاله DCB مشاهدات کد P برآورد می‌گردد. به منظور ارزیابی روش مقاله، ابتدا این الگوریتم بر روی برخی از ایستگاه‌های با عرض‌های جغرافیایی متوسط و بالای متعلق به شبکه IGS و همچنین برای دو روز آرام و نا آرام فعالیت‌های خورشیدی پیاده‌سازی شده و اختلاف مقادیر DCB حاصل از روش پیشنهادی با مقادیر منتشر شده توسط IGS مقایسه گردید. نتایج حاصل نشان دهنده تطابق بالای مقادیر در کلیه مناطق و فعالیت‌های خورشیدی مختلف می‌باشد. در گام بعدی از روش فوق برای بدست آوردن مقادیر DCB در گیرنده‌های IPGN استفاده گردید.

در کنار تولید GIM به عنوان یکی از محصولات IGS، این سرویس به صورت روزانه DCB ایستگاه‌های شبکه GPS متعلق به IGS را نیز منتشر می‌کند اما با این وجود دو مسأله در این زمینه مطرح است: اول اینکه DCB تمام ایستگاه‌های متعلق به IGS به طور مرتب توسط این سرویس منتشر نمی‌شود که در این زمینه به دو ایستگاه تهران و همدان می‌توان اشاره کرد. دوم اینکه DCB ایستگاه‌های منطقه‌ای و محلی GPS که متعلق به شبکه IGS نیستند، توسط این سرویس محاسبه و منتشر نمی‌گردد که در این مورد نیز می‌توان به شبکه دائم GPS ایران^۱ اشاره کرد. مقدار پارامتر DCB گیرنده‌ها به دو روش محاسبه می‌شود. در روش اول مقادیر DCB ماهواره و گیرنده به عنوان مجهولات همراه با سایر پارامترها در فرآیند مدل‌سازی یونسفر برآورد می‌شوند که مراکز همکار IGS به همین روش مقادیر DCB را برآورد می‌کنند [۱۱، ۱۲]. مانتن براک و همکاران در سال ۲۰۱۴ با استفاده از مشاهدات گیرنده‌های GNSS و نقشه‌های یونسفری جهانی به محاسبه DCB پرداخته‌اند [۱۳]. وانگ و همکاران در سال ۲۰۱۵ با استفاده از مشاهدات گیرنده‌های GNSS به محاسبه DCB پرداخته‌اند [۱۴]. فرزانه و همکاران در سال ۲۰۱۷ از تابع اسلپین کروی جهت برآورد DCB گیرنده و ماهواره‌های GPS در یک شبکه منطقه‌ای متشکل از ایستگاه‌های IGS استفاده نمودند و نتایج با مقادیر منتشره از IGS مقایسه گردید [۱۵]. در فرآیند مدل‌سازی یونسفر، اریب تفاضلی کد گیرنده در بازه زمانی چند روزه و اریب تفاضلی کد ماهواره در بازه زمانی تا یک ماه پایدار فرض می‌شود [۴، ۱۶]. روش دوم تعیین مقادیر DCB گیرنده‌ها به صورت مستقل از مدل‌سازی یونسفر می‌باشد.

هدف این مقاله بدست آوردن مقادیر DCB گیرنده‌ها به صورت مستقل از مدل‌سازی یونسفر می‌باشد که به چند نمونه از کارهای انجام گرفته در این زمینه در ادامه اشاره می‌شود. اریکان و همکاران در سال ۲۰۰۸ با استفاده از الگوریتم IONOLAB-BIAS، DCB تک ایستگاه را به طور مستقل با استفاده از GIM محاسبه نمودند که در این روش برای نرم کردن ترکیب خطی مستقل از هندسه شبه فاصله کد از فیلتر چبی شف استفاده شده است [۵].

هنگ و همکاران در سال ۲۰۰۸ با استفاده از تغییرات هندسه مشاهدات تفاضلی یگانه، DCB گیرنده‌ها را به طور

^۲ Moving Average Filter

^۱ Iranian Permanent GPS Network: IPGN

۲- مشاهده یونسفری

شبه فاصله کد و فاز موج حامل، مشاهدات پایه GPS می‌باشند. گیرنده‌های دو فرکانسه GPS مشاهدات کد و فاز موج حامل $(P_i, L_i; i = 1, 2)$ را در باند L و با فرکانس‌های $L_1(1575.42 \text{ MHz})$ و $L_2(1227.60 \text{ MHz})$ در اختیار می‌گذارند [۲۰]. از مشاهدات کد C/A و P جهت محاسبه شبه فاصله مابین ماهواره و گیرنده استفاده می‌شود. معادله مشاهده شبه فاصله کد P که بر روی دو موج حامل L_1 و L_2 مدوله می‌شود به ترتیب در روابط (۱) و (۲) آورده شده است. موج حامل دارای طول موج کوتاه‌تری نسبت به شبه فاصله کد بوده و با دقت یک صدم دور قابل اندازه‌گیری است اما امکان استخراج مدت زمان سیر سیگنال از ماهواره تا گیرنده با استفاده از موج حامل وجود ندارد و گیرنده GPS، فقط فاز موج حامل و تغییرات بعدی آن را اندازه‌گیری می‌کند. تعداد دورهای کامل طی شده توسط موج حامل که ابهام فاز نام دارد، نیز مجهول می‌باشد که به روش‌های مختلفی در پردازش اطلاعات GPS برآورد می‌گردد. با ضرب فاز موج حامل بر حسب دور در طول موج مربوطه، معادله مشاهده فاز موج حامل بر حسب واحد طول برای دو موج حامل L_1 و L_2 ، به ترتیب به صورت رابطه (۳) و (۴) خواهد بود [۲]:

$$P_{1,u}^m = p_u^m + c(\delta t_u - \delta t^m) + d_{trop,u}^m + d_{ion1,u}^m + c(\varepsilon_1^m + \varepsilon_{1,u}) \quad (۱)$$

$$P_{2,u}^m = p_u^m + c(\delta t_u - \delta t^m) + d_{trop,u}^m + d_{ion2,u}^m + c(\varepsilon_2^m + \varepsilon_{2,u}) \quad (۲)$$

$$L_{1,u}^m = \lambda_1 \Phi_{1,u}^m = p_u^m + c(\delta t_u - \delta t^m) + \lambda_1 \Phi_{ion1,u}^m + \lambda_1 \Phi_{trop,u}^m - c(\varepsilon_1^m + \varepsilon_{1,u}) + \lambda_1 N_1^m \quad (۳)$$

$$L_{2,u}^m = \lambda_2 \Phi_{2,u}^m = p_u^m + c(\delta t_u - \delta t^m) + \lambda_2 \Phi_{ion2,u}^m + \lambda_2 \Phi_{trop,u}^m - c(\varepsilon_2^m + \varepsilon_{2,u}) + \lambda_2 N_2^m \quad (۴)$$

در روابط فوق P_1 و P_2 شبه فاصله اندازه‌گیری شده با استفاده از کد P مدوله شده بر روی دو موج حامل L_1 و L_2 ، Φ_1 و Φ_2 فاز موج حامل دو موج حامل L_1 و L_2 ، زیرنویس u اندیس گیرنده و بالانویس m اندیس ماهواره، سرعت نور، δt_u و δt^m خطای ساعت گیرنده و ماهواره، d_{ion} و d_{trop} تأخیر تروپوسفری و یونسفری کد، و Φ_{trop}

Φ_{ion} تأخیر تروپوسفری و یونسفری فاز، ε^m و ε_u به ترتیب ارباب وابسته به فرکانس ماهواره و گیرنده در مشاهدات شبه فاصله کد و فاز موج حامل به دلیل تأخیر سخت‌افزاری ماهواره و گیرنده، λ_1 و λ_2 طول موج دو موج حامل L_1 و L_2 و در نهایت N_1 و N_2 ابهام فاز دو موج حامل L_1 و L_2 می‌باشد [۴، ۲۱].

رابطه (۵) که نتیجه تفاضل روابط (۱) و (۲) است، ترکیب خطی مستقل از هندسه شبه فاصله کد و همچنین رابطه (۶) که نتیجه تفاضل روابط (۳) و (۴) است، ترکیب خطی مستقل از هندسه فاز موج حامل نامیده می‌شوند. این دو ترکیب خطی مشاهده یونسفری نیز نامیده می‌شوند.

$$P_{4,u}^m = P_{2,u}^m - P_{1,u}^m = d_{ion2,u}^m - d_{ion1,u}^m + c(\varepsilon_2^m - \varepsilon_1^m) + c(\varepsilon_{2,u} - \varepsilon_{1,u}) \quad (۵)$$

$$L_{4,u}^m = \lambda_1 \Phi_{1,u}^m - \lambda_2 \Phi_{2,u}^m = \lambda_1 \Phi_{ion1,u}^m - \lambda_2 \Phi_{ion2,u}^m + c(\varepsilon_1^m - \varepsilon_2^m) + c(\varepsilon_{1,u} - \varepsilon_{2,u}) + (\lambda_1 N_1^m - \lambda_2 N_2^m) \quad (۶)$$

در روابط فوق، DCB ماهواره و گیرنده به ترتیب به صورت رابطه (۷) و (۸) خواهد بود:

$$DCB^m = \varepsilon_1^m - \varepsilon_2^m \quad (۷)$$

$$DCB_u = \varepsilon_{1,u} - \varepsilon_{2,u} \quad (۸)$$

رابطه تقریبی تأخیر یونسفری که توسط آلفرد لیک و لیاوو ارائه شده است، به صورت رابطه زیر می‌باشد [۲۲، ۲۳]:

$$d_{ion,u}^m = -\Phi_{ion,u}^m \frac{c}{f} \approx A \frac{STEC_u^m}{f^2} \quad (۹)$$

در رابطه (۹)، $A = 40.3 m^3/s^2$ است و $STEC_u^m$ مقدار محتوای الکترونی کلی در راستای مایل بین گیرنده u و ماهواره m می‌باشد. با وارد کردن رابطه (۹) در روابط (۵) و (۶) ترکیب خطی مستقل از هندسه شبه فاصله کد و فاز موج حامل به ترتیب به صورت روابط (۱۰) و (۱۱) خواهد شد:

$$P_{4,u}^m = A \left(\frac{f_1^2 - f_2^2}{f_1^2 f_2^2} \right) STEC_u^m - c(DCB^m + DCB_u) \quad (۱۰)$$

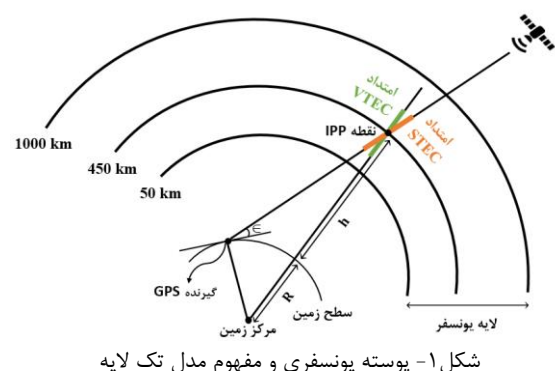
$$L_{4,u}^m = A \left(\frac{f_1^2 - f_2^2}{f_1^2 f_2^2} \right) STEC_u^m - c(DCB^m + DCB_u) + (\lambda_1 N_1^m - \lambda_2 N_2^m) \quad (۱۱)$$

زمین و برابر با ۴۵۰ کیلومتر در نظر گرفته شده است. بنابراین با معلوم بودن زاویه ارتفاعی ماهواره که با توجه به شکل (۱) از هندسه ماهواره و گیرنده محاسبه می‌شود، مقدار تابع نگاشت قابل محاسبه می‌باشد.

در این مقاله برای نرم کردن ترکیب خطی مستقل از هندسه شبه فاصله کد از فیلتر میانگین متحرک که یک فیلتر پایین گذر می‌باشد، استفاده شده است که تابع تبدیل این فیلتر در رابطه (۱۶) آمده است [۲۸، ۲۹].

$$m_t = \sum_{j=-q}^{+q} b_j y_{t+j}, \quad \sum_{j=-q}^{+q} b_j = 1 \quad (16)$$

در رابطه (۱۶)، m سیگنال خروجی، b یک ضریبی بر روی y_{t+j} می‌باشد که معمولاً به صورت تصادفی انتخاب می‌شود و مجموع این ضرایب بایستی یک شود، در غیر این صورت اندازه سیگنال خروجی بزرگ می‌شود، y سیگنال ورودی، q طول پنجره، $q < t < n - q$ و همچنین n تعداد داده‌های سیگنال اصلی یا همان ورودی می‌باشد. اگر رابطه (۱۶) را برای یک طول پنجره دلخواه بسط دهیم، می‌توان آن را بر مجموع ضرایب که مقدار آن یک است، تقسیم کرد. با این کار میانگین وزن‌دار سیگنال ورودی محاسبه می‌گردد که باعث نرم شدن سیگنال ورودی می‌شود (شکل (۲)).



۳- تعیین DCB گیرنده‌ها

مطابق رابطه (۱۲) محاسبه STEC مستلزم داشتن مشاهده یونسفری کد نرم شده و DCB گیرنده است، با توجه به اینکه هدف این مقاله محاسبه DCB گیرنده به روش مستقل از مدل‌سازی یونسفر می‌باشد، با بازنویسی رابطه (۱۲) در قالب رابطه (۱۷)، می‌توان با داشتن مقادیر VTEC از یک منبع دیگری به مانند DCB، GIM گیرنده‌ها را در هر اپک محاسبه نمود.

پارامتر STEC را می‌توان با استفاده از روابط (۱۰) یا (۱۱) محاسبه نمود. میزان خطای مشاهدات فاز موج حامل به مراتب کمتر از مشاهدات شبه فاصله کد می‌باشد اما به دلیل مشکل ابهام فاز، امکان محاسبه STEC با استفاده از مشاهدات فاز موج حامل (رابطه (۱۱)) وجود نداشته و نیازمند پردازش‌های قبلی جهت محاسبه ابهام فاز می‌باشد. مقدار STEC محاسبه شده از رابطه (۱۰) نیز به دلیل خطای مشاهدات کد دارای دقت کمتری است. نرم کردن^۱ مشاهدات یونسفری کد با استفاده از مشاهدات یونسفری فاز که به روش Process Carrier to Code Leveling معروف است [۷]، می‌تواند روش مناسبی جهت بهره‌مندی هم‌زمان از مزایای هر دو مشاهده یونسفری جهت استخراج STEC دقیق مورد نیاز در مدل‌سازی یونسفر باشد [۴، ۲۴، ۲۵]. روابط محاسبه مقادیر STEC برحسب مشاهده یونسفری کد و فاز به ترتیب به صورت روابط (۱۲) و (۱۳) خواهد بود [۵].

$$STEC_u^m(n) = \frac{1}{A} \left(\frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \right) \times \left(P_{4,u}^m(n) + c(DCB^m + DCB_u) \right) \quad (12)$$

$$STEC_u^m(n) = \frac{1}{A} \left(\frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \right) \times \left(I_{4,u}^m(n) + c(DCB^m + DCB_u) - (\lambda_1 N_1^m - \lambda_2 N_2^m) \right) \quad (13)$$

در روابط فوق STEC مقدار محتوای الکترونی کلی در راستای خط دید ماهواره و گیرنده است (شکل (۱)). به منظور بدست آوردن مقدار محتوای الکترونی کلی یونسفر در راستای قائم می‌توان از تابع نگاشت به صورت رابطه (۱۴) استفاده کرد:

$$VTEC_u^m(n) = STEC_u^m(n) / M(\epsilon_m(n)) \quad (14)$$

که رابطه تابع نگاشت M به صورت زیر است [۲۶، ۲۷]:

$$M(\epsilon_m(n)) = \left[1 - \left(\frac{R \cos \epsilon_m(n)}{R+h} \right)^2 \right]^{-1/2} \quad (15)$$

در رابطه (۱۵) n اپک اندازه‌گیری، m اندیس ماهواره، ϵ زاویه ارتفاعی ماهواره، R شعاع متوسط زمین و برابر با ۶۳۷۱ کیلومتر، h ارتفاع مدل تک لایه یونسفر از سطح

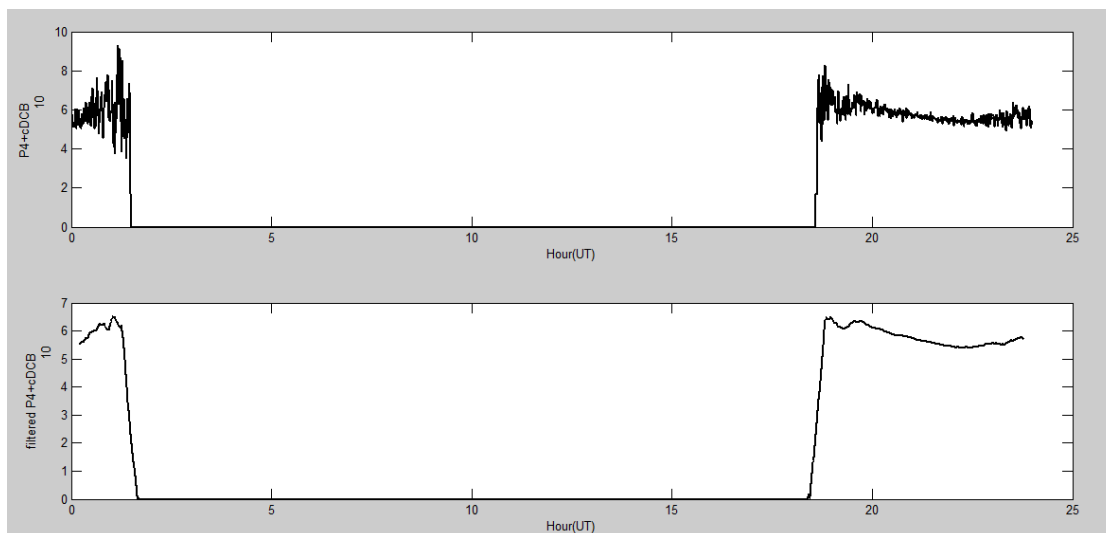
^۱ Smoothing

مستقل از هندسه شبه فاصله کد نرم شده (P_4) می‌باشد و برای اربب تفاضلی کد ماهواره‌های GPS از محصولات IGS استفاده می‌شود و سایر پارامترهای رابطه (۱۷) نیز مقادیر ثابتی هستند. شکل (۲) نشان دهنده مقادیر $P_4 + cDCB^{10}$ ماهواره با شماره ۱۰ برای ایستگاه ankr از شبکه IGS قبل و بعد نرم شدن توسط فیلتر میانگین متحرک در تاریخ ۲۰۱۷/۴/۱۳ می‌باشد.

$$DCB_u(n) = \left(\frac{A(f_1^2 - f_2^2)}{cf_1^2 f_2^2} \right) \frac{VTEC_u(n)M(\epsilon_m(n))}{STEC_u^m(n)} \quad (17)$$

$$- \frac{1}{c} P_{4,u}^m(n) + DCB^m$$

بنابراین محاسبه DCB گیرنده در هر اپک مطابق رابطه (۱۷) نیازمند محاسبه سه پارامتر محتوای الکترونی کلی در راستای قائم ($VTEC$)، تابع نگاشت (M) و همچنین مشاهده



شکل ۲- مقادیر $P_4 + cDCB^{10}$ قبل و بعد از فیلتر کردن برای ایستگاه ankr در تاریخ ۲۰۱۷/۴/۱۳ و برای ماهواره با شماره ۱۰

در مرحله دوم جهت استخراج مقادیر VTEC در نقاط IPP از GIM، ابتدا یک درون‌یابی مکانی به روش درون‌یابی دو متغیره^۲ انجام شده و مقدار VTEC در موقعیت IPP در دو GIM که قبل و بعد از اپک مربوطه می‌باشد، محاسبه می‌گردد. همان‌طور که در شکل (۳) قابل مشاهده است، با داشتن مقادیر TEC در چهار نقطه $A_{0,0}$ ، $A_{0,1}$ ، $A_{1,0}$ و $A_{1,1}$ می‌توان مقادیر TEC را با استفاده از روابط زیر در نقطه B بدست آورد [۳۰]:

$$f(R_1) = \frac{x_2 - x}{x_2 - x_1} f(A_{1,1}) + \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} f(A_{1,2}) \quad (17)$$

$$f(R_2) = \frac{x_2 - x}{x_2 - x_1} f(A_{2,1}) + \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} f(A_{2,2}) \quad (18)$$

$$f(B) = \frac{y_2 - y}{y_2 - y_1} f(R_2) + \frac{y - y_1}{y_2 - y_1} f(R_1) \quad (19)$$

مقادیر VTEC حاصل از GIM در ارتفاع ۴۵۰ کیلومتری یا همان ارتفاع تک لایه یونسفر می‌باشد، همچنین این نقشه‌ها در بازه‌های زمانی دو ساعته مقادیر VTEC را ارائه می‌دهند. به همین خاطر به منظور دستیابی به مقادیر VTEC مورد نیاز رابطه (۱۷) در اپک‌های ۳۰ ثانیه، نیازمند درون‌یابی مکانی و زمانی مقادیر VTEC از GIM هستیم. در مرحله اول مختصات نقطه نفوذ یونسفری^۱ (مختصات مشاهدات محتوای الکترونی کلی) محاسبه می‌شود. نقطه IPP مطابق شکل (۱) محل برخورد خط دید گیرنده و ماهواره با مدل تک لایه یونسفر می‌باشد. در این مقاله برای محاسبه مختصات نقاط IPP از تقاطع خط و کره استفاده شده است. بدین صورت که در هر اپک، با در نظر گرفتن خط دید گیرنده و ماهواره و تقاطع آن با کره‌ای به شعاع تک لایه یونسفر (۴۵۰ کیلومتری)، مختصات نقاط IPP حاصل می‌گردد.

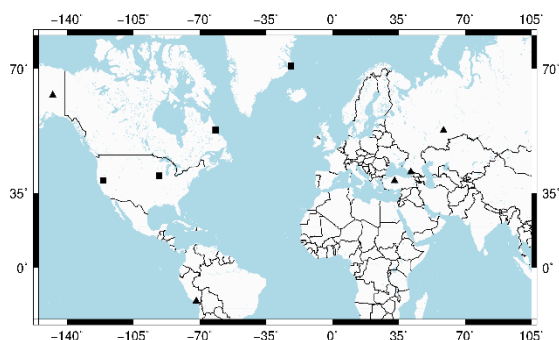
^۲ Bivariate Interpolation

^۱ Ionospheric Pierce Point: IPP

ترکیبی IGS، $RMSE$ خطای DCB محاسبه شده توسط IGS که در GIM آورده شده است، DCB_E نشان دهنده مقادیر حاصل از الگوریتم پیشنهادی، std_E نشان دهنده انحراف معیار DCB های ارائه شده توسط الگوریتم پیشنهادی و DCB_E نشان دهنده اختلاف بین مقادیر منتشره از سرویس IGS و مقادیر حاصل از الگوریتم پیشنهادی می باشد. بیشترین اختلاف بین DCB برآورد شده توسط الگوریتم پیشنهادی و DCB منتشره از IGS برابر با 0.540 نانوثانیه و جذر میانگین مربعات این اختلافات (RMSE) برابر 0.231 نانوثانیه است که نشان دهنده انطباق بالای نتایج حاصل از الگوریتم با مقادیر منتشره از IGS می باشد. بعد از ارزیابی الگوریتم پیشنهادی و اطمینان از صحت نتایج آن، مقادیر DCB گیرنده های IPGN با استفاده از این الگوریتم محاسبه گردید. شکل (۵) نحوه توزیع ایستگاه های IPGN را نمایش می دهد. در این محاسبات از داده های $2016/5/4$ گیرنده های IPGN استفاده گردیده که در این روز فعالیت خورشیدی در شرایط آرام می باشد. نتایج حاصل از محاسبه DCB برای شبکه IPGN در جدول (۳) ارائه گردیده است.

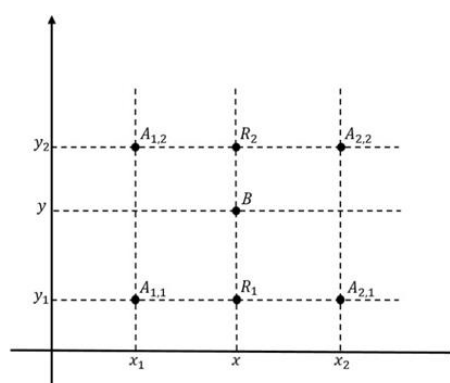
جدول ۱- مشخصات ایستگاه های مورد استفاده در محاسبه DCB در دو روز آرام و نا آرام فعالیت خورشیدی

کشور	ایستگاه	فعالیت خورشیدی
Turkey	ankr	kp2+ (آرام)
Peru	areq	kp2+ (آرام)
Russia	artu	kp2+ (آرام)
Alaska	fair	kp2+ (آرام)
Russia	zeck	kp2+ (آرام)
Canada	nain	kp6 (نا آرام)
United States	nlib	kp6 (نا آرام)
United States	quin	kp6 (نا آرام)
Greenland	scor	kp6 (نا آرام)



شکل ۴- موقعیت ایستگاه های متعلق به IGS مورد استفاده در محاسبه DCB در عرض های جغرافیایی متفاوت

سپس با یک درونیایی خطی مقدار VTEC در اپک مورد نظر از دو مقدار قبلی محاسبه می گردد. همچنین برای کاهش اثرات چند مسیری از ماهواره های با زاویه ارتفاعی بالای 60° درجه استفاده شده است. با استفاده از روش پیشنهادی مقادیر DCB گیرنده ها برای هر اپک قابل محاسبه می باشد. به منظور ارزیابی مقادیر بدست آمده از این روش با مقادیری که سرویس IGS منتشر می کند، از میانگین روزانه (۲۴ ساعته) مقادیر DCB بدست آمده برای گیرنده ها استفاده گردیده است.



شکل ۳- درون یایی دوعدی با نزدیک ترین همسایگی

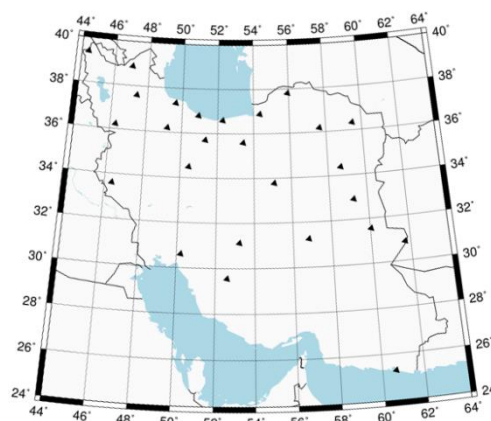
۴- نتایج محاسبات

روش پیشنهادی می تواند برای محاسبه DCB گیرنده ها در عرض های جغرافیایی متفاوت و برای روزهای آرام و نا آرام فعالیت خورشیدی در یک شبکه محلی و جهانی GNSS مورد استفاده قرار گیرد. به منظور ارزیابی روش معرفی شده، ابتدا این الگوریتم بر روی ۹ ایستگاه متعلق به شبکه IGS که در جدول (۱) ملاحظه می گردد، پیاده سازی شده و اختلاف مقادیر DCB حاصل از روش پیشنهادی با مقادیر DCB منتشر شده از نقشه های یونسفری جهانی ترکیبی IGS^۱ مقایسه می گردد. شکل (۴) نشان دهنده موقعیت ایستگاه های فوق را نشان می دهد. محاسبه DCB در ۵ ایستگاه با نماد مثلث در شکل (۴) در روز $2017/4/13$ با فعالیت های آرام خورشیدی و در ۴ ایستگاه با نماد مربع در روز $2017/4/20$ با فعالیت های نا آرام خورشیدی انجام شده است. نتایج حاصل از الگوریتم مذکور در محاسبه DCB برای ایستگاه های IGS در جدول (۲) آورده شده است. در این جدول، DCB_1 نشان دهنده مقادیر DCB منتشر شده از نقشه های یونسفری جهانی

^۱ IGS combined

۴- نتیجه‌گیری

اریب تفاضلی کد گیرنده و ماهواره یک پارامتر مهم در محاسبه TEC و تعیین موقعیت دقیق با GPS می‌باشد. مقدار پارامتر DCB گیرنده‌های GPS برای برخی از ایستگاه‌های IGS از سایت IGS قابل دسترسی می‌باشد. برای محاسبه DCB گیرنده روش‌های متفاوتی وجود دارد که بسیاری از این روش‌ها مقادیر DCB را همراه با مدل‌سازی یونسفر ارائه می‌دهند. در نتیجه تعیین کمیت DCB گیرنده‌های GPS در شبکه‌های محلی و منطقه‌ای به صورت مستقل از مدل‌سازی یونسفر در ایستگاه مورد نظر، دارای اهمیت و کاربرد می‌باشد. هدف این مقاله، محاسبه مقادیر DCB گیرنده‌های IPGN به روشی جدید و مستقل از مدل‌سازی منطقه‌ای یونسفر است. ایده روش مقاله بر مبنای استفاده از نقشه‌های یونسفری جهانی برای محاسبه مقادیر DCB گیرنده‌ها می‌باشد. مقادیر VTEC مورد نیاز در نقاط نفوذ یونسفری، با درون‌یابی‌های مکانی و زمانی نقشه‌های یونسفری جهانی محاسبه می‌گردد. برای نرم کردن مشاهدات مستقل از هندسه شبه فاصله کد از فیلتر میانگین متحرک استفاده گردید. همچنین از مقادیر DCB ماهواره‌های GPS که توسط IGS منتشر می‌گردد، استفاده شده است. سپس مقادیر DCB گیرنده‌ها در هر آپک با روش پیشنهادی مقاله محاسبه و برای هر روز میانگین گرفته شد تا امکان مقایسه با DCB گیرنده‌ها که توسط IGS منتشر می‌گردد، فراهم شود. مقایسه مقادیر حاصل از الگوریتم پیشنهادی با مقادیر منتشره از مرکز IGS، نشان دهنده انطباق بالای نتایج حاصل از الگوریتم با مقادیر منتشره از IGS و کارآیی روش مقاله می‌باشد. سپس مقادیر DCB گیرنده‌های شبکه دائم GPS ایران با استفاده از روش پیشنهادی محاسبه گردید.



شکل ۵- موقعیت ایستگاه‌های شبکه IPGN مورد استفاده در محاسبه DCB

جدول ۲- نتایج حاصل از محاسبه DCB برای ایستگاه‌های شبکه IGS

ایستگاه	DCB _I (ns)	RMS _I	DCB _E (ns)	std _E	DCB _{LE} (ns)
ankr	-۱۵/۱۳۵	۰/۰۰۰	-۱۴/۹۹۲	۰/۱۱۵	-۰/۱۴۳
areq	-۱/۶۲۳	۰/۱۱۱	-۱/۶۵۴	۰/۱۹۸	۰/۰۳۱
artu	-۱۰/۱۴۲	۰/۰۴۹	-۱۰/۰۹۲	۰/۱۱۹	-۰/۰۵۰
fair	-۱۰/۳۰۸	۰/۰۶۱	-۱۰/۱۷۱	۰/۱۰۸	-۰/۱۳۷
nain	-۴/۰۸۲	۰/۰۰۰	-۴/۳۸۰	۰/۱۷۲	۰/۳۹۸
nlib	-۱۰/۴۳۳	۰/۱۰۴	-۹/۸۹۳	۰/۲۰۹	-۰/۵۴۰
quin	-۷/۶۳۳	۰/۰۶۴	-۷/۴۶۹	۰/۰۹۰	-۰/۱۶۴
scor	-۶/۲۰۰	۰/۰۰۰	-۶/۲۵۸	۰/۱۱۴	۰/۰۵۸
zeck	۸/۸۴۰	۰/۰۱۲	۸/۶۷۳	۰/۱۴۲	-۰/۱۶۷

جدول ۳- نتایج حاصل از محاسبه DCB برای ایستگاه‌های شبکه IPGN

ایستگاه	DCB _E (ns)	std _E	ایستگاه	DCB _E (ns)	std _E
abrkr	-۲/۰۱۷	۰/۱۹۴	mshn	-۶/۱۸۷	۰/۳۱۴
bebn	-۶/۹۸۵	۰/۲۶۹	nehb	-۴/۱۹۳	۰/۱۹۹
bijd	-۱/۳۳۲	۰/۲۰۵	ravr	-۷/۹۸۰	۰/۱۰۹
bzgn	۲/۴۹۸	۰/۱۰۰	rsht	۱/۹۶۵	۰/۱۴۳
chbr	-۷/۲۱۵	۰/۲۹۰	sabz	-۵/۶۹۲	۰/۱۹۵
gona	-۴/۸۶۹	۰/۱۲۸	sagz	-۲/۹۷۵	۰/۱۱۸
grgn	-۷/۶۲۶	۰/۰۹۳	salf	-۴/۱۷۳	۰/۱۶۸
illm	-۹/۰۴۵	۰/۲۳۲	shrz	-۴/۰۵۶	۰/۱۵۳
khur	-۰/۰۸۸	۰/۱۷۴	smnn	-۵/۱۴۶	۰/۱۸۹
klbr	-۴/۱۲۵	۰/۱۲۷	tehn	-۷/۱۱۶	۰/۱۳۴
krmd	-۲/۶۵۴	۰/۱۲۹	tkbn	-۵/۱۱۴	۰/۱۰۳
mabd	-۶/۷۶۴	۰/۱۹۵	tkce	-۶/۳۴۰	۰/۱۰۹
mavt	۱/۵۰۹	۰/۱۳۳	zabl	-۲/۱۹۲	۰/۱۹۰

مراجع

- [1] Hernández-Pajares, M., Juan, J. and Sanz, J. (1999). "New approaches in global ionospheric determination using ground GPS data." Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 61(16). 1237-1247.
- [2] Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H. and Wasle, E. (2007). "GNSS—global navigation satellite systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more." Springer Science & Business Media.
- [3] Seeber, G. (2003). "Satellite geodesy: foundations, methods, and applications." Walter de gruyter.

- [4] Amerian, Y. (2013). "Regional modeling of the ionospheric electron density using wavelet analysis and GPS observations." PhD Thesis, Faculty of Geodesy and Geomatics Engineering, K. N. Toosi University of Technology.
- [5] Arikan, F., Nayir, H., Sezen, U. and Arikan, O. (2008). "Estimation of single station interfrequency receiver bias using GPS-TEC." *Radio Science*. 43(4). 1-13.
- [6] 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.
- [7] Ciraolo, L., Azpilicueta, F., Brunini, C., Meza, A. and Radicella, SM. (2007). "Calibration errors on experimental slant total electron content (TEC) determined with GPS." *Journal of Geodesy*. 81(2). 111-120.
- [8] Sardon, E., Rius, A. and Zarraoa, N. (1994). "Estimation of the transmitter and receiver differential biases and the ionospheric total electron content from Global Positioning System observations." *Radio science*. 29(3). 577-586
- [9] Mylnikova, A.A., Yasyukevich, Yu.V., Kunitsyn, V.E. and Padokhin, A.M. (2015). "Variability of GPS/GLONASS differential code biases." *Results in Physics*. 5. 9-10.
- [10] Hernández-Pajares, M., Juan, J.M., Sanz, J., Orus, R., Garcia-Rigo, A., Feltens, J., Komjathy, A., Schaer, S.C. and Krankowski, A. (2009). "The IGS VTEC maps: a reliable source of ionospheric information since 1998." *Journal of Geodesy*. 83(3-4). 263-275.
- [11] Jin, S., Luo, O. and Park, P. (2008). "GPS observations of the ionospheric F2-layer behavior during the 20th November 2003 geomagnetic storm over South Korea." *Journal of Geodesy*. 82(12). 883-892.
- [12] Ma, G. and Maruyama, T. (2003). "Derivation of TEC and estimation of instrumental biases from GEONET in Japan". *Annales Geophysicae* 21(10). 2083-2093
- [13] Montenbruck, O., Hauschild, A. and Steigenberger, P. (2014). "Differential code bias estimation using multi-GNSS observations and global ionosphere maps." *Navigation*. 61(3). 191-201.
- [14] Wang, N., Yuan, Y., Li, Z., Montenbruck, O. and Tan, B. (2016). "Determination of differential code biases with multi-GNSS observations." *Journal of Geodesy*. 90(3). 209-228.
- [15] Farzaneh, S. and Sharifi, M.A. (2017). "The regional estimates of the GPS satellite and receiver differential code biases." *Iranian Journal of Geophysics*. 10(5). 31-41.
- [16] Gao, Y., Heroux, P. and Kouba, J. (1994). "Estimation of GPS receiver and satellite L1/L2 signal delay biases using data from CACS". *International Symposium on Kinematic Systems in Geodesy, Geomatics, and Navigation*, Univ. of Calgary, Banff, Alberta, Canada.
- [17] Hong, C.-K., Grejner-Brzezinska, D.A. and Kwon, J.H. (2008). "Efficient GPS receiver DCB estimation for ionosphere modeling using satellite-receiver geometry changes." *Earth, Planets and Space*. 60(11). e25-e28
- [18] Nematipour, P., Raoofian-Naeeni, M. and Amerian, Y. (2018). "Iranian Permanent GPS Network Receivers Differential Code Biases Determination using Single Difference Observation Geometry Changes." *Journal of Geospatial Information Technology*. 6(1). 45-56.
- [19] Keshin, M. (2012). "A new algorithm for single receiver DCB estimation using IGS TEC maps." *GPS solutions*. 16(3). 283-292.
- [20] Amerian, Y., Hossainali, M.M. and Voosoghi, B. (2013). "Regional improvement of IRI extracted ionospheric electron density by compactly supported base functions using GPS observations." *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 92. 23-30.
- [21] Leick, A., Rapoport, L. and Tatarnikov, D. (2015). "GPS Satellite Surveying." John Wiley & Sons.
- [22] Komjathy, A. (1997). "Global ionospheric total electron content mapping using the Global Positioning System." *University of New Brunswick Fredericton, New Brunswick, Canada*.
- [23] Liao, X. (2001). "Carrier phase based ionosphere recovery over a regional area GPS network." *Proceedings of the 2000 National Technical Meeting of The Institute of Navigation*.
- [24] Hatch, R. (1983). "The synergism of GPS code and carrier measurements". *International geodetic symposium on satellite doppler positioning*, New Mexico State University. 2(A84-18251 06-42). 1213-1231.
- [25] Lachapelle, G. (1986). "GPS land kinematic positioning experiments". *Proceedings of the 4th International Geodetic Symposium on Satellite Positioning*, Austin, TX, USA, Apr. 28-May 2, 1986. 2. 1327-1344.
- [26] Arikan, F., Erol, C. and Arikan, O. (2003). "Regularized estimation of vertical total electron content from Global Positioning System data." *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. 108(A12). 1-12.
- [27] Arikan, F., Erol, C. and Arikan, O. (2004). "Regularized estimation of vertical total electron content from GPS data for a desired time period." *Radio Science*. 39(6). 1-10.

- [28] Guiñón, J.L., Ortega, E., García-Antón, J. and Pérez-Herranz, V. (2007). "Moving average and Savitzki-Golay smoothing filters using Mathcad." Papers ICEE.
- [29] Savitzky, A. and Golay, M.J. (1964). "Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures." Analytical chemistry. 36(8). 1627-1639.
- [30] Schaer, S., Gurtner, W. and Feltens, J. (1998). "IONEX: The ionosphere map exchange format version 1". Proceedings of the IGS AC workshop, Darmstadt, Germany 9(11). 1-12