

ترکیب مشاهدات سامانه تعیین موقعیت جهانی و رادار با روزنه مصنوعی جهت تولید مدل تأخیر یونسفری

الناز یگانه سیاهکل^۱، یزدان عامریان^{۲*}، سعید حاجی آقاجانی^۳

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد ژئودزی، دانشکده مهندسی نقشه برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

۲- دانشیار گروه ژئودزی، دانشکده مهندسی نقشه برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

۳- پژوهشگر پسادکتری ژئودزی، دانشکده مهندسی نقشه برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۳/۳۱ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۶/۲۷

چکیده

تأخیر امواج مایکروویو در اثر عبور از محیط یونسفر، دقت تعیین موقعیت با استفاده از *GPS* را کاهش می‌دهد. علاوه بر مشاهدات *GPS*، اثر یونسفر اندازه‌گیری‌های راداری مخصوصاً در باند *L* را تحت تأثیر قرار می‌دهد. از این رو برآورد اثر یونسفر در کاربردهای گوناگون از داده ماهواره‌ای امری ضروری است. با توجه به نحوه توزیع گیرنده‌های *GPS* و توان تفکیک زمانی بالای مشاهدات آن‌ها، *TEC* حاصل از مشاهدات، توان تفکیک مکانی پایینی دارد. از طرف دیگر مشاهدات رادار با روزنه مصنوعی با داشتن تفکیک مکانی بالا با پوشش جهانی، امکان برآورد پارامتر *TEC* را با توان تفکیک مکانی بالا فراهم می‌کند اما نتایج دارای توان تفکیک زمانی پایینی می‌باشند. در این مطالعه از روش پیش‌بینی کریجینگ مکانی-زمانی به منظور تلفیق مشاهدات *VTEC* تفاضلی حاصل از *ImSAR* و *GPS* استفاده شده و مدل پیش‌بینی تأخیر یونسفری با تفکیک مکانی و زمانی بالا برای محدوده‌ای واقع در آمریکای شمالی ارائه شده است. نتایج پیش‌بینی *VTEC* تفاضلی با روش کریجینگ و مدل تجربی *IRI* با مقادیر دقیق *TEC* تفاضلی حاصل از *GPS* که در پیش‌بینی وارد نشده‌اند، در موقعیت *IPPs* ارزیابی شده و *RMSE* محاسبه گردید. *RMSE* خطای *VTEC* تفاضلی حاصل از پیش‌بینی کریجینگ و مدل *IRI* در موقعیت *IPP* برای ساعت ۱۳:۴۵ روزهای ۵۸ و ۷۰ از سال به ترتیب برابر ۱/۹۱ و ۲/۱۱ *TECU*، برای ساعت ۱۳ روزهای ۷۰ و ۸۴ از سال به ترتیب برابر ۰/۶۵ و ۰/۷۵ *TECU*، برای ساعت ۱۳ روزهای ۸۴ و ۹۹ از سال به ترتیب برابر ۲/۵۴ و ۳/۸۲ *TECU* و برای ساعت ۱۴:۲۰ روزهای ۹۹ و ۱۵۸ از سال به ترتیب برابر ۷/۵۰ و ۷/۹۵ محاسبه شد. این نتایج توانایی روش کریجینگ مکانی-زمانی را در تخمین *VTEC* تفاضلی در یک بازه مکانی و زمانی محدود در منطقه مورد مطالعه و در مقایسه با مدل *IRI* نشان می‌دهند.

کلیدواژه‌ها: تأخیر یونسفری، محتوای الکترونی کلی، تداخل سنجی راداری، پیش‌بینی کریجینگ مکانی-زمانی.

* نویسنده مکاتبه‌کننده: تهران، خیابان ولیعصر، تقاطع میرداماد غربی، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی.

تلفن: ۰۲۱-۸۸۷۷۰۲۱۸

۱- مقدمه

محاسبه بوده و به عنوان مشاهده در مدل سازی یونسفر در نظر گرفته می شود.

تاکنون مطالعات گوناگونی جهت برآورد اثر یونسفر و مدل سازی یونسفر انجام شده است. مدل سازی های یونسفر با استفاده از توابع مختلفی به صورت دویبعدی یا سه بعدی پیاده سازی شده که می توان به مدل سازی یونسفر با استفاده از توابع پایه کروی شعاعی توسط خوشگواری و عامریان (۲۰۲۰) اشاره کرد [۲]. عسگری و امیری (۲۰۱۱) به تحلیل و پیش بینی TEC حاصل از مشاهدات سامانه ناوبری جهانی پرداخته اند [۳]. عبدی و دوستان (۲۰۱۸) با تلفیق مشاهدات GPS و ارتفاع-سنجی ماهواره ای یونسفر را به صورت محلی در ایران مدل سازی کرده اند [۴].

با ظهور ماهواره های راداری با روزه مصنوعی^۴ (SAR) و موضوع تداخل سنجی رادار با روزه مصنوعی^۵ ($InSAR$)، علاوه بر مشاهدات GPS ، مشاهدات راداری نیز با توجه به داشتن پوشش مکانی وسیع و توان تفکیک مکانی بالا و دقت قابل قبول، منبع مناسبی برای مطالعه اثرات اتمسفری محسوب می شود و این انگیزه را برای محققین در این زمینه ایجاد کرده تا با استفاده از این نوع مشاهدات به کشف، تخمین و مدل سازی اثرات تروپوسفری و یونسفری بپردازند. شهبازی (۲۰۱۱) روش های تصحیح خطای اتمسفر در تداخل سنجی راداری را بررسی کرده است [۵]. جعفری در سال ۹۳ روش های موجود در حذف اثر یونسفر از $InSAR$ بررسی و پیاده سازی کرده است [۶]. حاجی آقاجانی و وثوقی (۲۰۱۷) با استفاده از مشاهدات $InSAR$ اثر تروپوسفری را برآورد کرده اند [۷]. در این تحقیق نیز برای اولین بار اثر یونسفر را از مشاهدات $InSAR$ برآورد کرده ایم.

در چند دهه اخیر $InSAR$ به عنوان یک تکنیک مؤثر در محاسبه میزان جابه جایی های سطح زمین که ممکن

الکترون های آزاد لایه یونسفر بر انتشار امواج الکترومغناطیس تأثیر می گذارند و این امواج را دچار تأخیر می کنند. مقدار تأخیر امواج گذرنده از این لایه، متناسب با ضریب شکست لایه یونسفر است. ضریب شکست محیط در این لایه به فرکانس موج الکترومغناطیس و چگالی الکترونی یونسفر بستگی دارد. مقدار تأخیر امواج در محیط یونسفر با فرکانس نسبت عکس دارد بنابراین امواج با فرکانس پایین تر تأخیر بزرگ تری به نسبت فرکانس های بالا تجربه می کنند. در نتیجه تعیین چگالی الکترونی یونسفر و مطالعه چگونگی تغییرات آن به عنوان یکی از چالش ها و مسائل مهم در بسیاری از مطالعات در حوزه ژئودزی ماهواره ای، ژئودینامیک، تداخل سنجی راداری، هواشناسی و سیستم های مخابراتی مطرح می شود. به همین علت مدل سازی یونسفر از سال ۱۹۷۲ به بعد به عنوان یک موضوع مهم در مطالعات جو و فضا تبدیل شد [۱].

سیستم تعیین موقعیت جهانی^۱ (GPS) که با هدف تعیین موقعیت و ناوبری توسعه یافت، در چند دهه اخیر به منظور مطالعه خصوصیات فیزیکی جو زمین نیز به کار گرفته می شود. امواج ارسال از ماهواره های GPS در طی مسیر انتشار به سمت گیرنده، تحت تأثیر خصوصیات بخش یونسفر و تروپوسفر قرار گرفته و موجب ایجاد خطا در نتایج تعیین موقعیت می گردند. مشاهدات GPS این امکان را فراهم می کنند که بتوان با روش های محاسباتی مقدار این خطا را تخمین زده و حذف نمود تا موقعیت نقاط با دقت بهتری محاسبه گردند. مقدار محتوای الکترونی کلی در راستای خط دید ماهواره که محتوای الکترونی کلی مایل^۳ ($STEC$) نامیده می شود با استفاده از مشاهدات GPS قابل

¹ Global Positioning System

² Atmosphere

³ Slant Total Electron Content

⁴ Synthetic Aperture Radar

⁵ Interferometric Synthetic Aperture Radar

مشاهدات GPS با فواصل زمانی هر ۱۵ یا ۳۰ ثانیه، امکان محاسبه کمیت محتوای الکترونی کلی قائم^۵ (VTEC) با قدرت تفکیک زمانی بالا را با استفاده از روابط موجود فراهم می‌نمایند. اما با توجه به پراکندگی نامناسب ایستگاه‌های GPS، توان تفکیک مکانی TEC حاصل از مشاهدات GPS پایین می‌باشد. بنابراین ضعف GPS در پوشش مکانی مناسب به عنوان یک مسئله در تخمین TEC قابل توجه است. از سوی دیگر مشاهدات سیستم‌های راداری مانند مشاهدات ماهواره ALOS2 با سنجنده آرایه فازی باند L (PALSAR) به صورت یک تصویر مختلط از منطقه اخذ شده و به ازای هر یک از پیکسل‌های موجود در تصویر کمیت TEC قابل محاسبه می‌باشد. در نتیجه استخراج TEC با استفاده از سیستم‌های راداری نتایجی با تفکیک مکانی بالا فراهم می‌کند. اما دوره بازدید ماهواره ALOS2-PALSAR از یک منطقه به صورت فواصل زمانی ۱۴ روز است و در بین این فواصل اطلاعاتی از منطقه ثبت نمی‌شود. در نتیجه در سیستم‌های راداری با ضعف تفکیک زمانی مواجه هستیم. از این رو انتظار می‌رود بتوان با به کارگیری توأم مشاهدات ایستگاه‌های GPS با تفکیک زمانی بالا و مشاهدات InSAR با تفکیک مکانی بالا، ضعف دو مشاهده را برطرف کرده و کمیت TEC را با قدرت تفکیک مکانی و زمانی بهتری محاسبه نمود.

مشاهدات گیرنده‌های دو فرکانسه GPS می‌تواند برای محاسبه TEC مورد استفاده قرار گیرد. اربیب تفاضلی کد (DCB) ماهواره‌ها و گیرنده‌های GPS، یکی از مهم‌ترین منابع خطا در تخمین TEC محسوب می‌شود، در نتیجه دقت برآورد اربیب تفاضلی کد به عنوان یکی از مجهولات مورد نیاز در محاسبات بر کیفیت تخمین کمیت TEC نیز بسیار تأثیرگذار خواهد بود. مقدار اربیب

است بر اثر پدیده‌هایی همچون زلزله، تکنونیک صفحه‌ای، ناآرامی آتشفشانی، فرآیندهای هیدرولوژیکی^۲، نشست زمین و جریان‌های یخی به وجود آمده باشند، شناخته شده است. دقت اندازه‌گیری جابه‌جایی‌های به دست آمده از InSAR، به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر تأخیر امواج ماکروویو گذرنده از جو سیاره، قرار می‌گیرد. برای ماهواره‌های SAR که در حال چرخش به دور زمین می‌باشند، تأخیر امواج عمدتاً به دلیل تغییرات مکانی و زمانی بخار آب در لایه تروپوسفر [۹،۸ و ۱۰] و الکترون‌های آزاد در لایه یونسفر می‌باشد [۱۱، ۱۲ و ۱۳].

در مورد سیستم‌های راداری، اثرات پاشندگی لایه یونسفر بر روی انتشار امواج مهم‌ترین دلیل تأخیر امواج بوده و موجب ایجاد خطا در فاز امواج راداری می‌گردد. اثرات این لایه برخلاف سیستم‌های باند فرکانسی L، برای فرکانس‌های باند X ناچیز است [۱۴]. اثرات یونسفر بر خصوصیات امواج ماکروویو سیستم‌های SAR با فرکانس پایین مانند باند L قابل توجه است که تمام این اثرات تابعی از TEC می‌باشد [۱۵]. در اثر عبور امواج ماکروویو از لایه یونسفر نتایج InSAR اعوجاج می‌یابد که این اعوجاج شامل نامتمرکز شدن^۳ تصاویر SAR، چرخش فارادی^۴، تأخیر فاز و شیفت اضافی بین تصاویر SAR در جهت آزمایش (در جهت پرواز ماهواره) است [۱۶].

از این رو با توجه به اثرات یونسفر در نتایج InSAR و اهمیت کشف و تخمین اثر یونسفری، مرحله حذف تأخیر یونسفر به عنوان یک مرحله مهم در تداخل‌سنجی راداری در نظر گرفته می‌شود. بدین جهت روش‌های گوناگونی به منظور تخمین تأخیر یونسفری معرفی شده‌اند که می‌توان با محاسبه این تأخیر، کمیت TEC را برآورد کرد.

¹ Plate Tectonics

² Hydrological Processes

³ Defocusing

⁴ Faraday Rotation

⁵ Vertical Total Electron Content

⁶ Phased Array L-band SAR

⁷ Differential Code Bias

در روش اختلاف تأخیر فاز-کد در رنج، تفکیک و تشخیص سهم اثرات یونسفری و سهم جابه‌جایی در راستای رنج دشوار است. با توجه به مطالعات و ارزیابی‌های صورت گرفته روش آزیموت شیفت قادر است به خوبی مقدار تأخیر یونسفری را در تداخل نماهای فاقد تغییر شکل‌های قابل توجه و تداخل‌نماهای مربوط به کشف جابه‌جایی زمین و زمین‌لرزه با یک تفکیک مکانی مناسب اندازه‌گیری و تصحیح کند [۲۹]. ایده اصلی این روش توسط متر و گری (۲۰۰۲) مطرح و الگوریتم آن توسط میر (۲۰۰۶) استخراج شد [۱۲ و ۱۱].

در این تحقیق در پردازش‌های *InSAR* از روش آزیموت شیفت که حساسیت بالایی نسبت به تغییرات یونسفری دارد به منظور محاسبه مقدار تأخیر یونسفری که متناسب با *TEC* است، استفاده شده است. متوسط تغییرات *TEC* در آزیموت در طول روزنه مصنوعی منجر به شیفت پیکسل آزیموت در تداخل‌نمایی شود که باعث ایجاد رگه‌های آزیموتی در تصاویر شده و فاز تصویر به درستی قابل تفسیر نخواهد بود. گری و گمولو (۲۰۰۶) این رگه‌های آزیموتی را در تداخل‌نماهای باند *L* گزارش کردند [۳۰ و ۳۱] و سپس میر و همکاران (۲۰۰۸) بحث تئوری اثرات یونسفری را ارائه دادند [۲۰]. روش آزیموت شیفت بر اساس رابطه خطی بین مشتق آزیموت تأخیر فاز یونسفری در تداخل‌نما و جابه‌جایی‌های آزیموت تعریف شده است [۲۷ و ۱۲]. در ابتدا راکولس و همکاران (۲۰۱۰) سعی کردند تا رگه‌های فاز یونسفری را با استفاده از شیفت آزیموت تداخل سنجی در تداخل‌نمای *ALOS* باند *L* تخمین زده و تصحیح کنند. نتایج آن‌ها پتانسیل جبران خطای یونسفری روی تداخل‌نماهای *SAR* با استفاده از روش آزیموت را نشان داد [۲۷]. در رابطه با

تفاضلی کد ماهواره و گیرنده برای ماهواره‌ها و گیرنده‌های متعلق به شبکه سرویس بین‌المللی سیستم‌های ماهواره‌ای ناوبری جهانی (*IGS*) قابل دسترسی است. تعیین *DCB* گیرنده‌های *GPS* در شبکه‌های محلی و منطقه‌ای به صورت مستقل از مدل‌سازی یونسفر دارای اهمیت و کاربرد می‌باشد. آریکان و همکاران (۲۰۰۸) الگوریتم محاسبه *DCB* گیرنده را ارائه کردند که بر اساس معادله مستقل از یونسفر مشاهدات کد و *DCB* ماهواره می‌باشد [۱۷]. با توجه به مجهولات مختلف از جمله بایاس بین فرکانسی گیرنده، بایاس ماهواره، انتخاب تابع نگاشت و ارتفاع تک لایه یونسفر برای تعیین نقطه نفوذ یونسفری^۲، محاسبه *TEC* همواره با چالش همراه است. سزن و همکاران (۲۰۱۳) الگوریتم محاسبه آنلاین خودکار نزدیک به آنی *TEC* را با عنوان نرم‌افزار یونولب^۴ (*IONOLAB-TEC*) را معرفی کردند [۱۸]. در این تحقیق به منظور محاسبه *STEC* از این نرم‌افزار استفاده گردیده است.

همان‌طور که اشاره شد برای تخمین و تصحیح اثرات یونسفری در فاز تداخل‌سنجی روش‌های گوناگونی تاکنون ارائه شده که شامل روش فارادی [۲۰، ۲۱، ۲۲]، روش اختلاف تأخیر کد-فاز در رنج^۵ [۱۴، ۱۵ و ۲۳]، روش تفکیک طیف [۱۴، ۲۳، ۲۴، ۲۵ و ۲۶] و روش آزیموت شیفت^۶ [۱۱، ۱۲، ۲۷، ۲۸ و ۲۹] می‌باشد. در روش فارادی محدود به استفاده از داده با پلاریزاسیون کامل^۷ هستیم [۲۰]. روش تفکیک طیف^۸ با توجه به عرض باند پایین چیرپ^۹ در سنجنده‌های باند *L*، دقت مطلوبی نخواهد داشت [۲۹]. علاوه بر این

¹ International Global Positioning Satellite System

² Mapping Function

³ Ionospheric Piercing Point

⁴ IONOLAB-TEC

⁵ Range Phase-Group Delay Difference

⁶ Azimuth Shift

⁷ Full-Polarization

⁸ Split Spectrum

⁹ Chirp

¹⁰ Interferogram

¹¹ Azimuth Streaks

¹² Ionospheric phase Streaks

InSAR و مقادیر ΔTEC به دست آمده از *GPS*، یک مدل تأخیر یونسفری تولید شده و مقدار ΔTEC برای یک موقعیت در محدوده تصویر تداخل نما و برای زمان‌های پس از ساعت اخذ *SAR* با قدرت تفکیک زمانی بهتر از نتایج *InSAR* و قدرت تفکیک مکانی بهتر از نتایج *GPS* محاسبه گردد.

بدین منظور، روش کریجینگ مکانی-زمانی به عنوان یکی از روش‌های آمار مکانی، برای تلفیق این مشاهدات به کار گرفته شد. روش پیش‌بینی کریجینگ مکانی-زمانی روشی مناسب برای تلفیق دو تابع مختلف زمانی و مکانی معرفی شده است. این روش از سال ۲۰۰۲ به منظور تخمین تأخیر یونسفری مورد توجه قرار گرفت و همچنین آزمایش‌های گسترده‌ای جهت ارزیابی روش کریجینگ به منظور تخمین یونسفر انجام شد که بلا نچ و والتر نشان دادند این روش جهت تخمین *TEC* بسیار مؤثر عمل می‌کند [۳۵].

۲- روش کریجینگ مکانی-زمانی در تلفیق *VTEC* تفاضلی حاصل از *GPS* و تداخل‌سنجی رادار

برای انجام مرحله پیش‌بینی به روش کریجینگ مکانی-زمانی و تهیه مدل تأخیر یونسفری در منطقه، ابتدا می‌بایست مقادیر *VTEC* تفاضلی از دو منبع *GPS* و ماهواره‌ی *ALOS2-PALSAR* محاسبه شوند و سپس مقادیر *VTEC* تفاضلی حاصل از داده‌های *GPS* با قدرت تفکیک زمانی بالا و مقادیر *VTEC* تفاضلی حاصل از تداخل‌سنجی داده‌های *ALOS2-PALSAR* با قدرت تفکیک مکانی بالا در محاسبات کریجینگ در نظر گرفته می‌شوند که مراحل آن در ادامه تشریح می‌شود.

۲-۱- محاسبه *VTEC* تفاضلی از داده‌های *GPS*

به منظور برآورد *VTEC* از مشاهدات *GPS*، از نرم‌افزار *IONOLAB-TEC* استفاده شد. این نرم‌افزار داده‌های مورد نیاز از جمله فایل اطلاعات مدار، مدل یونسفری، فایل مربوط به *DCB* های ماهواره، *DCB* گیرنده که بر اساس روش *IONOLAB-BIAS* محاسبه شده و فایل

روش آزیموت شیفت نیز مطالعاتی به منظور افزایش دقت محاسبات، صورت گرفته است. جونگ و همکاران با استفاده از تداخل‌سنجی *SAR* دقت روش آزیموت شیفت را بهبود دادند [۲۹ و ۳۲].

ژو و همکاران (۲۰۱۷) کاربرد روش شیفت آزیموت را در طی پردازش دو تصویر *SAR* پلاریزاسیون کامل رادار ماهواره باند *L* با سنجنده *PALSAR* بررسی و آنالیز کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که این روش به‌طور مؤثر می‌تواند خطای تأخیر فاز یونسفری را حذف نماید [۳۳]. موسیکو و همکاران (۲۰۱۸) با فرض جزئی بودن سهم فاز تروپوسفری، از *TEC* حاصل از دو منبع *InSAR* و یک شبکه متراکم از گیرنده‌های *GNSS* برای ارزیابی توانایی *InSAR* برای بازیابی اطلاعات یونسفری استفاده کرده است. نتایج بدست آمده، پتانسیل ترکیب اندازه‌گیری‌های آزمایشی *InSAR* و *GPS* برای تشخیص تغییرات کوچک مقیاس *TEC* که از لحاظ مکانی متغیر است را در منطقه‌ای که تراکم گیرنده‌های زمین مبنای *GPS* پایین باشد، به خوبی نشان می‌دهد [۳۴].

در این تحقیق برای اولین بار ایده ترکیب مقادیر *VTEC* تفاضلی حاصل از مشاهدات *InSAR* و *GPS* به منظور ایجاد یک مدل تأخیر یونسفری با استفاده از روش کریجینگ مکانی-زمانی در یک بازه مکانی و زمانی محدود پیاده‌سازی شد و نتایج اولیه آن ارائه شده است. توان تفکیک زمانی بالا *VTEC* حاصل از مشاهدات *GPS* و توان تفکیک مکانی بالا *VTEC* حاصل از مشاهدات *InSAR* این انگیزه را برای ترکیب این دو نوع مشاهده را ایجاد کرد. از این رو مدل تأخیر یونسفری حاصل این پتانسیل را دارد که *VTEC* تفاضلی را با استفاده از روش کریجینگ مکانی-زمانی در هر ساعت و موقعیت دلخواه پیش‌بینی کند.

بر اساس مطالعات صورت گرفته و همبستگی قابل قبول نتایج *TEC* حاصل از *InSAR* و *GPS* و با توجه به مزیت و ضعف مکانی و زمانی هر دو سیستم در این تحقیق از نقطه قوت هر دو منبع اطلاعاتی استفاده شده است تا در نهایت با تلفیق مقادیر ΔTEC حاصل از

به صورت رابطه (۴) قابل محاسبه است و مقدار $VTEC$ نیز به صورت رابطه (۷) محاسبه می‌شود.

رابطه (۴)

$$STE C = \frac{1}{40.3} \left(\frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \right) (B + L_4 + c(bs + br))$$

$$\tau_1^s - \tau_2^s = bs \quad \text{رابطه (۵)}$$

$$\tau_1^r - \tau_2^r = br \quad \text{رابطه (۶)}$$

$$VTEC = STEC / M(\varepsilon) \quad \text{رابطه (۷)}$$

$$M(\varepsilon) = \left[1 - \left(\frac{R \cos \varepsilon}{R + h} \right)^2 \right]^{-1/2} \quad \text{رابطه (۸)}$$

در رابطه (۴)، پارامترهای bs و br به ترتیب آرپب تفاضلی کد مربوط به ماهواره s و گیرنده r است. در رابطه (۷)، ε زاویه ارتفاعی ماهواره و M تابع نگاشت است و در رابطه (۸) تعریف شده است، در این رابطه R شعاع زمین به اندازه ۶۳۷۱ کیلومتر و h ارتفاع نقطه نفوذ یونسفری روی تک لایه یونسفر است که برابر با ۴۵۰ کیلومتر در نظر گرفته می‌شود. برای برآورد آرپب تفاضلی کد گیرنده طبق روش $IONOLAB-BIAS$ از مقادیر $VTEC$ مربوط به GIM استفاده می‌شود که در لایه‌ای به ارتفاع ۴۵۰ کیلومتر منتشر می‌شوند از این رو ارتفاع ۴۵۰ کیلومتری برای پارامتر h انتخاب شده است.

در این نرم‌افزار، $STE C$ مربوط به ماهواره‌هایی با زاویه ارتفاعی بالاتر از ۶۰ درجه که تحت اثر خطای چند مسیری قرار نگرفته‌اند با یک تابع وزن بهینه در نظر گرفته می‌شوند [۳۷]. خروجی‌های $STE C$ در در موقعیت نقاط نفوذ یونسفری^۱ (IPP) را در نظر گرفتن تابع نگاشت M ، به مقادیر $VTEC$ در نقاط IPP تبدیل می‌گردند. به منظور محاسبه $VTEC$ تفاضلی برای مشاهدات GPS مربوط به دو روز دلخواه باید مقادیر $VTEC$ در نقاط IPP روز اول از مقادیر روز دوم کم

مشاهدات خام ایستگاه‌ها را به عنوان ورودی در نظر می‌گیرد. در ادامه با به کارگیری روش نرم کردن کد با فاز طبق معادلات (۱)، (۲) و (۳)، خروجی $STE C$ را به صورت یک فایل به فرمت متنی فراهم می‌کند.

به منظور محاسبه $STE C$ با روش نرم کردن مشاهدات کد با مشاهدات فاز، پارامتر B برای هر کمان پیوسته مشاهداتی به صورت رابطه (۱) معرفی می‌شود [۳۶].

$$B = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (P_4(n) - L_4(n)) \quad \text{رابطه (۱)}$$

در رابطه (۱)، N تعداد مشاهدات موجود در یک کمان مشاهداتی است. کمان مشاهداتی بازه زمانی است که در آن پدیده جهش فاز رخ نمی‌دهد و ابهام فاز در این بازه ثابت است. از طریق اختلاف مشاهدات کد و فاز در دو اپک متوالی، جهش فاز به صورت یک تغییر ناگهانی در نمودار مشاهدات فاز زمان قابل تشخیص است.

P_4 و L_4 در پارامتر B ترکیب‌های مستقل از هندسه می‌باشند که به ترتیب با تفاضل مشاهدات کد و فاز در موج $L2$ از مشاهدات کد و فاز در موج $L1$ نتیجه می‌شوند که در رابطه (۲) و رابطه (۳) تعریف شده است.

رابطه (۲)

$$P_4 = P_1 - P_2 = \delta_{ion,1} - \delta_{ion,2} + c(\tau_1^s - \tau_2^s + \tau_1^r - \tau_2^r) \quad \text{رابطه (۳)}$$

$L_4 = \phi_1 - \phi_2 = \delta_{ion,2} - \delta_{ion,1} + \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2 + c(T_1^s - T_2^s + T_1^r - T_2^r)$
در روابط (۲) و (۳)، P_1 و P_2 مشاهده کد روی موج $L1$ و $L2$ ، ϕ_1 و ϕ_2 فاز موج حامل $L1$ و $L2$ ، $\delta_{ion,1}$ و $\delta_{ion,2}$ تأخیر یونسفری دو موج $L1$ و $L2$ ، c سرعت نور، τ_1^s و τ_2^s و τ_1^r و τ_2^r به ترتیب بایاس سخت‌افزاری وابسته به فرکانس ماهواره و گیرنده در مشاهدات کد، T_1^s و T_2^s و T_1^r و T_2^r به ترتیب بایاس سخت‌افزاری وابسته به فرکانس ماهواره و گیرنده در مشاهدات فاز موج حامل، N_1 و N_2 پارامتر مجهول ابهام فاز و λ_1 و λ_2 طول موج مربوط به دو موج $L1$ و $L2$ می‌باشند.

با جایگذاری پارامتر B در معادله مربوط به L_4 ، $STE C$

¹ Ionospheric Pierce Point (IPP)

استفاده از وسایل و تکنیک‌های موجود، معمولاً دشوار به نظر می‌آید [۱۲]. از طرف دیگر، مقدار شیفت آزیموت با استفاده از روش‌های ثبت هندسی، تصویر مختلط SAR قابل اندازه‌گیری می‌باشد. این روش‌ها شامل همبستگی دوطرفه^۲ [۳۹]، افزودن گوناگونی طیفی^۳ (ESD) و تداخل‌سنجی چندروزنه‌ای (MAI)^۴ [۹] و همچنین تکنیک تقسیم پرتو تداخل‌نما^۵ (SBI) می‌باشند. با استفاده از نرم‌افزار SARPROZ^۶، مقادیر VTEC از مشاهدات رادار باند L ماهواره ALOS2 با سنجنده PALSAR^۷ برآورد شد. محاسبه VTEC در این نرم‌افزار بر مبنای یکی از روش‌های محاسبه آزیموت شیفت با عنوان روش تداخل‌سنجی چندروزنه‌ای (MAI) است.

۲-۱-۲-۲ تداخل‌سنجی چند روزنه‌ای

با توسعه تداخل‌سنجی چند روزنه‌ای، روش بهینه دیگری معرفی شد که بر اساس میدان جابه‌جایی آزیموت ایجاد شده با استفاده از الگوریتم MAI می‌باشد. بر این اساس که رگه‌های آزیموتی جهت ثابتی دارند، یک فیلتر جهتی به منظور استخراج آفست آزیموت که بر اثر یونسفر ایجاد گردیده توسط راکولس و همکاران پیشنهاد شد [۲۷]. این فیلتر به این صورت است که تصاویر آفست آزیموت را به اندازه‌ای چرخش می‌دهد تا رگه‌های آزیموتی یونسفر به صورت افقی نمایش داده شود و سپس یک چندجمله‌ای با درجه بالا روی هر خط برازش داده می‌شود و پس از آن تصاویر دوباره چرخش داده می‌شوند تا به حالت اول برگردند. نقشه جابه‌جایی‌های در امتداد آزیموت با استفاده از الگوریتم MAI، ایجاد می‌شود. این روش دقت قابل

شود. به شرطی که مختصات این نقاط در دو روز یکسان باشد می‌توانیم تغییرات TEC تفاضلی مربوط به دو روز را در نقاط IPP به دست آوریم. اما با تغییر وضعیت زمین در طول شبانه روز و تغییر آرایش هندسی ماهواره‌ها، موقعیت نقاط IPP ثابت نخواهد بود و این نقاط در تک لایه یونسفر در هر ایک مختصات متفاوتی خواهند داشت. برای رفع این مشکل، موقعیت دو بعدی نقاط IPP روز اول به عنوان مرجع در نظر گرفته شد. با در نظر داشتن مقادیر STEC روز اول و با استفاده از تابع درون‌یابی *B-spline*، مقادیر STEC روز دوم در همان موقعیت نقاط IPP روز اول برآورد شد. سپس با محاسبه اختلاف مقادیر STEC درون‌یابی شده روز اول (*master*) از مقادیر در روز دوم (*slave*)، مقادیر $\Delta VTEC$ در موقعیت نقاط IPP مطابق رابطه (۹) محاسبه شد.

$$\Delta VTEC = VTEC_{ipp_slave} - VTEC_{ipp_master} \quad (9)$$

در رابطه (۹)، $VTEC_{ipp_slave}$ مربوط به مقادیر VTEC در نقاط IPP روز دوم و $VTEC_{ipp_master}$ مربوط به مقادیر VTEC در نقاط IPP روز اول می‌باشد.

۲-۲-۲ محاسبه VTEC تفاضلی از تداخل‌سنجی

داده‌های SAR مربوط به ماهواره ALOS 2 باند L

تأخیر فاز یونسفری ایجاد شده بر اثر یونسفر در تداخل‌نما متناسب با شیفت‌های تفاضلی در راستای آزیموت است، که می‌توان از این تناسب برای تخمین فاز یونسفری استفاده کرد. در تصاویر ALOS با سنجنده PALSAR، اغلب ظهور این رگه‌های خطی تقریباً در طول خطوط میدان مغناطیسی در مناطق استوایی مغناطیسی مشاهده شده است [۳۸]. در این روش انتگرال شیفت‌ها در راستای آزیموت متناسب با TEC می‌باشد که در ادامه روابط مربوطه ارائه می‌شوند.

اگر نقشه VTEC در جهت پرواز موجود باشد این شیفت قابل پیش‌بینی است. در حالی که، دستیابی به چنین نقشه VTEC ای با مدت زمان کوتاه (ده‌ها ثانیه) و تفکیک مکانی بالا (از چند متر تا چند ده متر) با

¹ Coarse Coregistration

² Cross Correlation

³ Enhanced Spectral Diversity

⁴ Multi Aperture Interferometry (MAI)

⁵ Split Beam Interferometry (SBI)

⁶ The SAR Processing Tool By Periz

(www.sarproz.com)

⁷ Phased Array L band SAR (PALSAR)

رابطه (۱۲)

$$\Delta\phi_{ion}(i, j) = \sum_{i=1}^i \left[\left(\alpha \cdot \frac{4\pi}{\lambda} \Delta x_{ion}(i, j) + \beta \right) \cdot d_{az} \right] + C(i, j)$$

$$= \Delta\phi_{ion_az}(i, j) + C(i, j)$$

در رابطه (۱۲)، i و j اندیس‌های مربوط به سطر و ستون هستند، C ثابت انتگرال‌گیری است که تابعی از مکان می‌باشد، $\Delta\phi_{ion_az}$ تخمین‌گر صفحه فاز یونسفری است که از جابه‌جایی‌های یونسفری در امتداد آزیموت، محاسبه می‌شود.

اثرات محیط غیرایزوتروپیک^۳ و پاشنده یونسفر به صورت تقدم فاز و تأخر کد در امواج راداری ظاهر می‌شود که مقدار این دو تأخیر برابر است اما علامت متفاوتی دارند. بر اساس رابطه این دو تأخیر وابسته به فرکانس، ثابت انتگرال با استفاده از جابه‌جایی‌های یونسفری در جهت آزیموت و رنج به صورت رابطه (۱۳) قابل محاسبه می‌باشد.

رابطه (۱۳)

$$C(j) = \frac{1}{S} \sum_{s=1}^s [\Delta\phi_{ion_r}(s, j) - \Delta\phi_{ion_az}(s, j)]$$

در رابطه (۱۳)، S تعداد کل پیکسل‌های معتبر در هر خط آزیموت می‌باشد. برای آن که محاسبه ثابت انتگرال عاری از خطای ناشی از اثرات تغییر شکل باشد، پیکسل‌هایی که تغییرات سطحی شدیدی دارند کنار گذاشته می‌شوند. $\Delta\phi_{ion_r}$ مربوط به تخمین‌گر IPS با استفاده از جابه‌جایی‌های رنج است. در نهایت، $\Delta\phi_{ion}$ مربوط به IPS با استفاده از معادلات بالا به دست می‌آید و TEC تفاضلی در راستای جهت خط دید ماهواره^۴ با در نظر گرفتن IPS تخمین زده شده و معادله شیفت فاز بر اثر یونسفر به صورت رابطه (۱۴) محاسبه می‌شود.

$$\Delta TEC = -\frac{cf}{4\pi K} \cdot [\Delta\phi_{ion_az} + C] \quad \text{رابطه (۱۴)}$$

قبولی در استخراج میدان جابه‌جایی آزیموت فراهم می‌کند اما دقت آن وابسته به نسبت سیگنال به نویز و همبستگی می‌باشد [۴۰]. رابطه بین جابه‌جایی‌های آزیموت Δx بر حسب متر و فاز ϕ_{MAI} بر حسب رادیان به صورت رابطه (۱۰) است [۳۴].

$$\Delta x = -\frac{1}{4\pi n} \cdot \phi_{MAI} \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

در رابطه (۱۰)، l طول مؤثر آنتن راداری است که برای ماهواره $ALOS PALSAR$ ۸٫۹ متر در نظر گرفته می‌شود و n کسری از پهنای روزنه آنتن راداری می‌باشد و معمولاً مقدار ۰٫۵ برای این ضریب در نظر گرفته می‌شود. با فرض خطی بودن جابه‌جایی‌های ناشی از یونسفر در امتداد آزیموت و مشتق فاز $InSAR$ در راستای آزیموت، به صورت رابطه (۱۱) ارائه می‌شود [۳۰].

$$\frac{\Delta\phi_{InSAR}}{d_{az}} = \alpha \cdot \frac{4\pi}{\lambda} \Delta x_{ion} + \beta \quad \text{رابطه (۱۱)}$$

در رابطه (۱۱) d_{az} فاصله پیکسل‌ها در راستای آزیموت در تداخل‌نمای چند منظر است، λ طول موج رادار (در مورد $ALOS2 PALSAR$ ۲۳٫۶ سانتی‌متر می‌باشد)، α فاکتور وابسته به سیستم و هندسه و پارامترهای سنسور رادار می‌باشد، β مقدار آفست است که برای محاسبه میدان آفست آزیموت مرجع استفاده می‌شود و $\Delta\phi_{InSAR}$ اختلاف فاز $InSAR$ می‌باشد. با برازش یک تابع چندجمله‌ای روی جابه‌جایی‌های یونسفری آزیموت با واحد متر و مشتق آزیموت فاز $InSAR$ در تمام پیکسل‌های فاقد تغییر شکل سطحی شدید، α و β تخمین زده می‌شوند. سپس صفحه فاز یونسفری^۲ (IPS) $\Delta\phi_{ion}$ از طریق انتگرال جابه‌جایی‌های ناشی از یونسفر در امتداد آزیموت، در جهت مدار با استفاده از رابطه (۱۲) قابل محاسبه است [۲۷].

³ Anisotropic

⁴ Line Of Sight

¹ Multi Looking

² Ionospheric Phase Screen (IPS)

مدنظر در کل محدوده مکانی یک مقدار ثابتی دارد اما میانگین آن نامعلوم است. همچنین پیش‌بینی‌گر، نقاط نامعلوم را به‌عنوان یک تابع خطی وزن‌دار از مشاهدات در نظر می‌گیرد. تابع کوواریانس که در کریجینگ معمولی تعریف می‌شود برای تمام محدوده مکانی موردنظر معتبر است. تابع کوواریانس تغییرات کمیت موردنظر را بررسی می‌کند و نشان می‌دهد که مقادیر در دو موقعیت نزدیک خیلی همبسته‌اند و در موقعیت‌های دورتر همبستگی کمتری دارند. فرم ساده‌تر کریجینگ معمولی، کریجینگ ساده نام‌گرفته است که در آن فرض می‌شود مقدار میانگین ویژگی مدنظر معلوم است. در فرم دیگر که با نام کریجینگ جهانی شناخته می‌شود، میانگین ویژگی موردنظر یک ترکیب خطی نامعلوم فرض می‌شود.

با توجه به ویژگی مد نظر که ΔTEC می‌باشد و می‌توان فرض کرد که در کل منطقه مورد نظر واریانس ΔTEC ثابت باشد، از روش کریجینگ معمولی استفاده شده است. تابع کوواریانس که در کریجینگ معمولی تعریف می‌شود برای تمام محدوده مکانی مورد نظر معتبر است. تابع کوواریانس تغییرات کمیت مورد نظر را با توجه به تغییرات فاصله بررسی می‌کند و نشان می‌دهد که در دو موقعیت با فاصله مکانی کم، همبستگی کمیت بالا است و در موقعیت‌های با فاصله مکانی بالاتر همبستگی کم‌تری وجود دارد.

با توجه به داده‌های مورد نظر یک تابع واریوگرام مکانی برای داده‌های ΔTEC حاصل از *InsAR* و یک تابع واریوگرام زمانی مربوط به داده‌های ΔTEC حاصل از *GPS* تعریف شد. سپس با در نظر گرفتن مدل حاصل ضرب^۷، با استفاده از ضرب کروونکر دو واریوگرام مکانی و زمانی، تابع واریوگرام مکانی-زمانی ایجاد شد. درنهایت با استفاده از روش کریجینگ مکانی-زمانی، مقادیر ΔTEC را در موقعیت و زمان مورد نظر پیش‌بینی و مدل تأخیر یونسفری حاصل شد.

⁷ Product

در رابطه (۱۴)، ثابت K برابر $40.3 \text{ m}^3/\text{s}^2$ ، C سرعت نور در خلأ، f فرکانس رادار و C ثابت انتگرال است که از رابطه (۱۳) محاسبه می‌گردد.

۲-۳- تئوری کریجینگ مکانی-زمانی

کریجینگ یکی از روش‌های آمار مکانی است که با عنوان بهترین پیش‌بینی‌گر خطی ناآریب^۱ نیز معرفی می‌شود. هدف کلی کریجینگ پیش‌بینی مقدار تابع تصادفی $Z = Z(x)$ در هر موقعیت دلخواه x_0 می‌باشد. کریجینگ وابسته به دانش ساختار مکانی است که با خصوصیات مرتبه دوم مانند واریوگرام یا کوواریانس تابع تصادفی $Z(x)$ مدل شده اند [۴۱]. ایده اصلی کریجینگ این است که باید به نقاط نمونه نزدیک، وزن بیش‌تری در پیش‌بینی تعلق بگیرد تا تخمین بهبود یابد. این وزن‌های حاصل به مقادیر میانگین $\mu(x)$ و همچنین به واریوگرام یا تابع کوواریانس $Z(x)$ بستگی دارند.

از سال ۲۰۰۲ نشان داده شد که روش کریجینگ برای تخمین تأخیر یونسفری کارا و مؤثر می‌باشد، همچنین بلانچ و والتر آزمایش‌های گسترده‌ای برای ارزیابی تکنیک کریجینگ به منظور تخمین یونسفر انجام داد که از اندازه‌گیری‌های یونسفری سیستم تقویت منطقه وسیع (WAAS)^۲ که در طول دوره‌های اغتشاشات بالا و پایین یونسفری جمع‌آوری شده بود استفاده کردند و نشان دادند که روش کریجینگ در تخمین TEC یونسفری بسیار مؤثر و مفید عمل می‌کند [۳۵].

به‌طور کلی سه روش به منظور پیش‌بینی کریجینگ در نظر گرفته می‌شود که شامل کریجینگ ساده^۴، کریجینگ معمولی^۵ و کریجینگ جهانی می‌شود. در کریجینگ معمولی فرض می‌شود که واریانس ویژگی

¹ Best Linear Unbiased Prediction (BLUP)

² Variogram

³ Wide Area Augmentation System

⁴ Simple Kriging (SK)

⁵ Ordinary Kriging (OK)

⁶ Universal Kriging (UK)

۲-۳-۱- برآورد تابع واریوگرام مکانی-زمانی

انتخاب تابع واریوگرام مرحله مهم و اساسی در پیش‌بینی با روش کریجینگ محسوب می‌شود. واریوگرام در روش آمار مکانی یک ابزار مناسب برای آنالیز داده مکانی و اساس کریجینگ است [۴۲]. ایده واریوگرام با در نظر گرفتن این مسئله که رابطه مکانی بین دو نمونه نقاط به موقعیت جغرافیایی مطلق آن‌ها وابسته نیست بلکه به موقعیت نسبی شان وابسته است، شکل گرفته است [۴۳]. تابع واریوگرام ساختار وابستگی مکانی و زمانی داده را مدل می‌کند. مرحله آنالیز واریوگرام شامل ایجاد یک واریوگرام تجربی است که با میانگین‌گیری نصف اختلاف مربع مقادیر Z در جفت مشاهدات با فاصله و جهت مشخص حاصل شده است و نتیجه در یک نمودار دوبعدی نمایش داده می‌شود. مدل تابع واریوگرام از یک مجموعه توابع ریاضی که روابط مکانی را نشان می‌دهند، انتخاب می‌شود. مدل مناسب با تطابق شکل منحنی واریوگرام تجربی حاصل و شکل منحنی تابع ریاضی انتخاب می‌شود. تغییرات مکانی و همبستگی داده‌ها با استفاده از تابع کوواریانس مکانی یا نیم واریوگرام آدر مجموعه داده اصلی محاسبه می‌شود.

معمولاً به جای تابع کوواریانس از نیم واریوگرام‌ها برای مدل کردن همبستگی مکانی داده‌ها در یک تابع مکانی-زمانی استفاده می‌شوند [۴۴]. رابطه نیم واریوگرام که همان نصف واریوگرام است به صورت رابطه (۱۵) است.

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} E \left[\{Z(x+h) - Z(x)\}^2 \right] \quad (15)$$

در رابطه (۱۵)، $Z(x)$ مقدار متغیر در موقعیت (x) می‌باشد و $E[\]$ اپراتور امید ریاضی می‌باشد. باید توجه داشت که $\gamma(h)$ تابعی از موقعیت (x) نمی‌باشد و تابع فاصله بین نقاط (h) است. رابطه (۱۵) به عنوان تعریف ریاضی واریوگرام در نظر گرفته می‌شود.

برای برازش یک تابع واریوگرام به واریوگرام تجربی در ابتدا باید پارامترهای تابع مدل واریوگرام پارامتریک تخمین زده شوند و سپس می‌توانیم بهترین مدل برازش را انتخاب کنیم [۴۴]. سه پارامتر اصلی در مدل‌های واریوگرام معتبر شاخص است که به صورت زیر تشریح می‌شود [۴۵]. شکل (۱) سه پارامتر اصلی در مدل‌های واریوگرام را نشان می‌دهد.

۱- ناگت: اگر واریوگرام تجربی در مبدأ ناپیوسته باشد اثر ناگت $\gamma(h) \rightarrow c_0 > 0, |h| \rightarrow 0$ ، آنگاه ارتفاع c_0 ناگت یا اندازه‌گیری یا تغییرات میکرو مقیاس به وجود آمده را نشان می‌دهد.

۲- سیل: مقدار $\gamma(\infty) = \lim_{|h| \rightarrow \infty} \gamma(h)$ سیل نامیده می‌شود.

۳- دامنه: فاصله‌ای که نیم واریوگرام $\gamma(h)$ برای اولین بار از مقدار سیل جلو بزند، دامنه واریوگرام نامیده می‌شود.

با فرض اینکه پارامتر مورد مطالعه $(Z(s,t))$ ایستای مرتبه دوم باشد؛ بدین ترتیب که برای مقدار پارامتر $Z(s,t)$ برای نقاط مشاهداتی s واقع در دامنه مکانی

$D \in \mathbb{R}^d$ و در زمان t درون دامنه زمانی $T \in \mathbb{R}$ ، مقدار

$E(Z(s,t))$ و $\text{Var}(Z(s,t))$ ثابت می‌باشند. واریوگرام‌های ارائه شده در روابط (۱۶) و (۱۷) به ترتیب واریوگرام‌های حاشیه‌ای^۶ مکانی و زمانی نامیده می‌شوند. تابع واریوگرام مکانی $\gamma_{st}(h_s, 0)$ با محاسبه واریانس پارامتر مطالعاتی در شعاع همسایگی h_s هر نقطه مشاهداتی $Z(s,t)$ به دست آید [۴۶].

رابطه (۱۶)

$$\gamma_s(h_s, 0) = \frac{1}{2} \text{Var}(Z(s+h_s, t) - Z(s, t))$$

³ Nugget

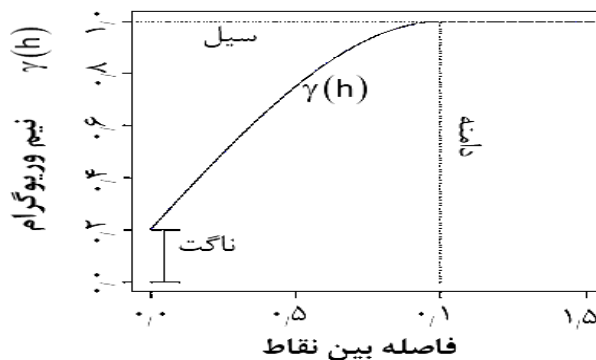
⁴ Sill

⁵ Range

⁶ Marginal Variogram

¹ Experimental

² Semivariogram



شکل ۱: پارامترهای واریوگرام [۳۹]

از مدل حاصل ضرب از ضرب دو واریوگرام زمانی $\gamma_t(h_t)$ و واریوگرام مکانی $\gamma_s(h_s)$ حاصل می‌شود که به عنوان یک مدل جدایی‌پذیر شناخته می‌شود. به همین ترتیب تابع کوواریانس مکانی-زمانی نیز از حاصل ضرب کوواریانس مکانی در کوواریانس زمانی حاصل می‌شود. کوواریانس مکانی و کوواریانس زمانی هر دو ایستا می‌باشند و از مدل‌های جدایی‌پذیر ایزوتروپیک^۳ حاصل شده‌اند.

مدل حاصل ضرب یکی از مدل‌های پر استفاده کوواریوگرام تفکیک‌پذیر می‌باشد که به طور مناسبی بر داده‌های مورد مطالعه برازش داده می‌شود [۴۸ و ۴۹]. با این وجود در اکثر موارد این مدل به دلیل ساده بودن روابط آن انتخاب شده است. به‌طور کلی مدل پروداکت با استفاده از ترم‌های کوواریوگرام به صورت رابطه (۱۹) تعریف می‌شود:

رابطه (۱۹)

$$C((s_1, t_1), (s_2, t_2)) = C_s(s_1, t_1) C_t(s_2, t_2),$$

$$\forall s_1, s_2 \in D \subset \mathbb{R}^d, \forall t_1, t_2 \in T \subset \mathbb{R}$$

در رابطه (۱۹)، $C_s(s_1, t_1)$ کواریانس مکانی و $C_t(s_2, t_2)$ کواریانس زمانی می‌باشد. تفکیک‌پذیر

به طور مشابه برای واریوگرام زمانی نیز خواهیم داشت: رابطه (۱۷)

$$\gamma_t(0, h_t) = \frac{1}{2} \text{Var}(Z(s, t + h_t) - Z(s, t))$$

به منظور درونیابی زمانی مکانی می‌بایست هر دو همبستگی زمانی و مکانی نقاط در نظر گرفته شوند. واریوگرام مکانی-زمانی که هر دو همبستگی زمانی و مکانی نقاط را لحاظ می‌کند، واریوگرام تجربی^۴ نامیده می‌شود و از رابطه (۱۸) محاسبه می‌گردد.

رابطه (۱۸)

$$\gamma_{st}(h_s, h_t) = \frac{1}{2} \text{Var}(Z(s + h_s, t + h_t) - Z(s, t))$$

به ازای مقادیر مختلف برای t و S واریانس محاسبه شده مربوط به واریوگرام مکانی متفاوت خواهد بود و در نتیجه به تعداد مشاهدات در حوزه مکان، واریوگرام مکانی و به ازای مشاهدات در حوزه زمان، واریوگرام زمانی خواهیم داشت. به منظور درونیابی از روش کریجینگ تنها یک مدل واریوگرام مکانی-زمانی می‌بایست به مشاهدات برازش داده شود که همبستگی میان هر دو نقطه واقع در دامنه مکانی-زمانی را تعیین نماید [۴۷].

مدل واریوگرام مکانی-زمانی با فرض جدایی‌پذیر بودن همبستگی زمانی و مکانی کمیت مورد نظر، با استفاده

³ Stationary

⁴ Isotropic

⁵ Covariogram

¹ Empirical Variogram

² Sepratable

پیش‌بینی‌گر خطی به صورت رابطه (۲۱) استفاده می‌کنیم و انتظار داریم که بهترین پیش‌بینی‌گر خطی نأریب باشد [۵۰].

$$\hat{Z}(s_0, t_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(s_i, t_i) \quad \text{رابطه (۲۱)}$$

در رابطه (۲۱)، λ_i ضرایب مجهول و $Z(s_i, t_i)$ مقادیر تابع در نقاط مشاهده شده (s_i, t_i) می‌باشد.

معادلات کریجینگ معمولی مکانی-زمانی با در نظر گرفتن تابع نیم‌واریوگرام به صورت رابطه (۲۲) است:

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^n \lambda_j \gamma(s_i - s_j, t_i - t_j) + \mu = \gamma(s_i - s_0, t_i - t_0), \forall i = 1, \dots, n \\ \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \end{cases}$$

در رابطه (۲۲)، $\gamma(s_i - s_0, t_i - t_0)$ تابع نیم‌واریوگرام مکانی-زمانی برای نقطه معلوم (s_i, t_i) و نقطه مجهول (s_0, t_0) است و $\gamma(s_i - s_j, t_i - t_j)$ تابع نیم‌واریوگرام مکانی-زمانی برای دو نقطه معلوم (s_i, t_i) و (s_j, t_j) می‌باشد. مجموع ضرایب برابر نیز برابر یک در نظر گرفته می‌شود.

با توجه به اینکه لازم است پیش‌بینی‌گر خطی نأریب باشد و با فرض دو شرط (i) و (ii) به صورت زیر:

(i) امید تابع تصادفی ثابت (m) است و به موقعیت مکانی و زمانی بستگی ندارد.

$$E(Z(s_0, t_0)) = m \quad \forall s_0, t_0 \quad \text{رابطه (۲۳)}$$

(ii) تابع کواریانس بین دو نقطه فقط به فاصله مکانی و زمانی بین دو نقطه وابسته است.

$$E(Z(s + h_s, t + h_t) - Z(s, t)) = 0 \quad \text{رابطه (۲۴)}$$

با در نظر گرفتن قانون انتشار خطا برای رابطه (۲۱)، واریانس خطای پیش‌بینی مکانی-زمانی کریجینگ معمولی به صورت رابطه (۲۵) است.

$$\text{رابطه (۲۵)}$$

$$V(\hat{Z}(s_0, t_0) - Z(s_0, t_0)) = \sum_{i=1}^n \lambda_i \gamma(s_i - s_0, t_i - t_0) + \mu$$

با حل دستگاه معادله (۲۲)، ضریب لاگرانژ μ و ضرایب مجهول λ_i به دست می‌آیند که می‌توانیم در معادله

بودن تابع کواریانس به این معنی نیست که نیم‌واریوگرام مرتبط نیز تفکیک‌پذیر باشد. با این وجود درحالی‌که جمع یا ضرب نیم‌واریوگرام مکانی و نیم‌واریوگرام زمانی الزاماً یک مدل نیم‌واریوگرام معتبر نمی‌باشد، ترکیب این دو به صورت رابطه (۲۰) شرایط تفکیک‌پذیری را ایجاد می‌کند.

$$\text{رابطه (۲۰)}$$

$$\gamma(h, u) = C_s(0)\gamma_t(u) + C_t(0)\gamma_s(h) - \gamma_s(h)\gamma_t(u)$$

در رابطه (۲۰)، $\gamma_t(u)$ واریوگرام زمانی و $\gamma_s(h)$ واریوگرام مکانی و $C_s(0)$ و $C_t(0)$ مقادیر سیل اند که باید تعیین شوند.

۲-۳-۲- معادله کریجینگ مکانی-زمانی

پس از آن که دریافتیم چگونه کواریوگرام یا واریوگرام تجربی متناسب با داده را ایجاد کنیم و چگونه آن را به مدل‌های نظری معرفی‌شده برازش دهیم، اکنون می‌توانیم پیش‌بینی مکانی-زمانی کریجینگ را اجرا کنیم. تنها ابزارهایی که نیاز داریم عبارت است از پیش‌بینی‌گر بهینه مکانی-زمانی، معادلات کریجینگ مکانی-زمانی که وزن‌های داده مکانی-زمانی را معرفی می‌کنند و واریانس پیش‌بینی که نمایشگر دقت پیش‌بینی‌ها می‌باشد. در این بخش پیش‌بینی‌گر کریجینگ مکانی-زمانی و معادلات کریجینگ مکانی-زمانی همراه با واریانس پیش‌بینی تشریح می‌شود. هدف کریجینگ مکانی-زمانی نقطه‌ای، پیش‌بینی مقدار یک نقطه نامعلوم $Z(s_0, t_0)$ در نقطه مشاهده نشده (s_0, t_0) است.

مجموعه $\{Z(s, t); (s, t) \in D \subseteq \mathbb{R}^2 \times \mathbb{R}\}$ را یک تابع

تصادفی مکانی-زمانی در نظر بگیریم و فرض کنیم که مقدار تابع تصادفی $\{Z(s_1, t_1), Z(s_2, t_2), \dots, Z(s_n, t_n)\}$ در یک مجموعه‌ای با n موقعیت مکانی-زمانی مشاهده شده باشد. هدف پیش‌بینی مقدار تابع تصادفی $Z(s_0, t_0)$ در موقعیت مکانی-زمانی (s_0, t_0) خواهد بود که s_0 موقعیت مکانی دلخواه و t_0 یک لحظه در زمان می‌باشد. به منظور پیش‌بینی مقدار مکانی-زمانی تابع تصادفی در نقطه مشاهده نشده (s_0, t_0) ، از

ماهواره در باند L اخذ می‌شوند که دارای طول‌موج $23/6$ سانتی‌متر و فرکانس 1250 مگاهرتز می‌باشد. تصاویر مربوط به سال 2018 با تفکیک 25 متر در نظر گرفته شد و ساعت اخذ تصاویر 12 ظهر می‌باشد. برای انجام پردازش‌های تداخل‌سنجی از نرم‌افزار *SARPROZ* استفاده شد که یک نرم‌افزار پیشرفته و در عین حال با کاربری آسان است که به منظور پردازش و آنالیز داده چندزمانه (*SAR (Multi Temporal)*) داده تداخل‌سنجی *SAR* طراحی شده است. این نرم‌افزار در متلب نوشته شده که هم در نرم‌افزار متلب و هم به‌طور مستقل از آن قابل اجرا است. جدول (۱) روزهای منتخب به منظور ایجاد تداخل‌نماها را نشان می‌دهد.

کریجینگ معمولی جایگذاری کنیم و $\hat{Z}(s_0, t_0)$ را تخمین بزنیم.

۳- منطقه مورد مطالعه و منابع داده

محدوده‌ای با طول جغرافیایی 119 - تا 120 - درجه و عرض جغرافیایی 39 تا 40 درجه واقع در آمریکای شمالی به عنوان منطقه مورد مطالعه انتخاب و مشاهدات راداری و مشاهدات حاصل از گیرنده‌های دو فرکانس *GPS* در این محدوده در نظر گرفته شد.

۳-۱- داده‌های راداری مورد استفاده

مشاهدات راداری ماهواره *ALOS2-PALSAR* در 5 روز مختلف مربوط به محدوده مورد نظر انتخاب شد. دوره بازدید این ماهواره 14 روز می‌باشد و تصاویر راداری این

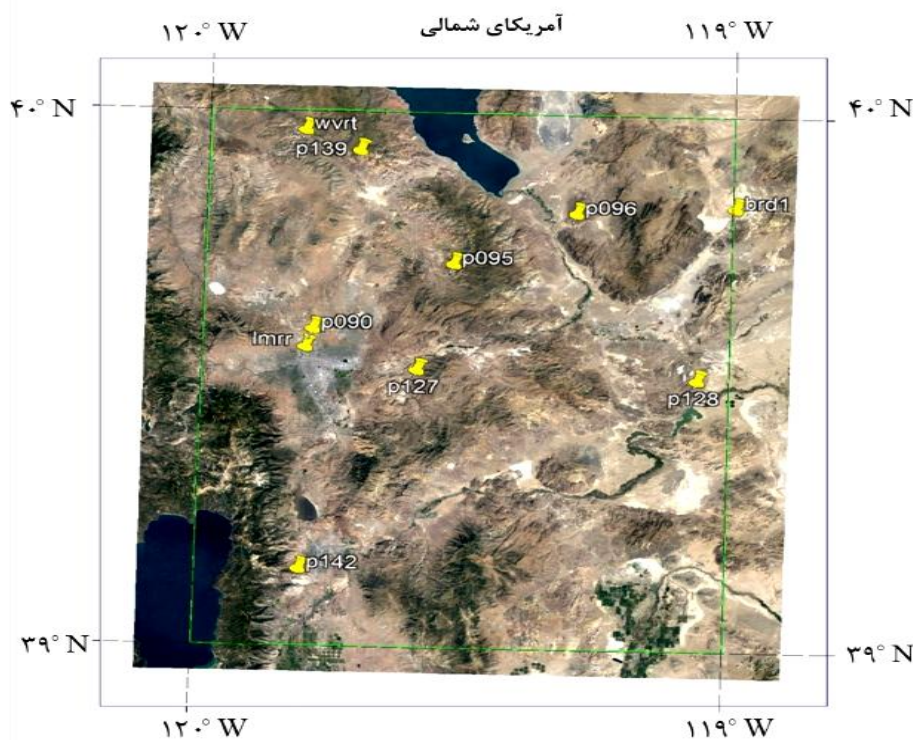
جدول ۱: روزهای مربوط به تصاویر پایه و پیرو به منظور ایجاد تداخل‌نما

تداخل‌نما	زوج تصویر تداخل‌نما		روز از سال	KP	F10.7
	تصویر پایه	تصویر پیرو			
۱	تصویر پایه	۲۰۱۸/۰۲/۲۷	۵۸	۴,۳۳۳	۶۶,۶
	تصویر پیرو	۲۰۱۸/۰۳/۱۱	۷۰	۰,۳۳۳	۶۶,۹
۲	تصویر پایه	۲۰۱۸/۰۳/۱۱	۷۰	۰,۳۳۳	۶۶,۹
	تصویر پیرو	۲۰۱۸/۰۳/۲۵	۸۴	۲,۰۰۰	۶۸,۰
۳	تصویر پایه	۲۰۱۸/۰۳/۲۵	۸۴	۲,۰۰۰	۶۸,۰
	تصویر پیرو	۲۰۱۸/۰۴/۰۹	۹۹	۲,۰۰۰	۶۸,۹
۴	تصویر پایه	۲۰۱۸/۰۴/۰۹	۹۹	۲,۰۰۰	۶۸,۹
	تصویر پیرو	۲۰۱۸/۰۶/۰۷	۱۵۸	۰,۳۳۳	۷۱,۳

۳-۲- داده‌های GPS مورد استفاده

از مشاهدات ۱۰ ایستگاه GPS واقع در محدوده مورد نظر مطابق با تاریخ تداخل‌نماها استفاده شده است. شکل (۲) پراکندگی ایستگاه‌های GPS مورد استفاده در این مطالعه را نشان می‌دهد. به منظور استخراج STEC، پردازش‌های GPS با استفاده از نرم‌افزار IONOLAB-TEC انجام شد و خروجی STEC در هر ۱۵ ثانیه

برای ۱۰ ایستگاه GPS و ۵ روز مورد نظر حاصل شد. خروجی‌های STEC با استفاده از تابع نگاشت، به VTEC در IPP تبدیل شد. مختصات IPP با استفاده از مختصات ایستگاه‌ها و همچنین مختصات ماهواره‌ها که از طریق فایل‌های مداری مربوط به روز مورد نظر که در سرویس IGS موجود است، محاسبه شده است.



شکل ۲: موقعیت ایستگاه‌های GPS مورد استفاده در منطقه آمریکای شمالی

ترکیب یونی و TEC را در رنج ارتفاعی ۵۰ الی ۲۰۰۰ کیلومتر محاسبه می‌کند.

۴- نتایج عددی

شرایط فعالیت‌های خورشیدی و ژئومغناطیسی یونسفر برای پنج روز مورد نظر بررسی شد و نتایج در جدول (۱) ارائه شده است. پارامتر KP به عنوان شاخص سنجش فعالیت‌های ژئومغناطیسی، در روزهای مورد مطالعه مقادیری کمتر از پنج واحد می‌باشد که نشان

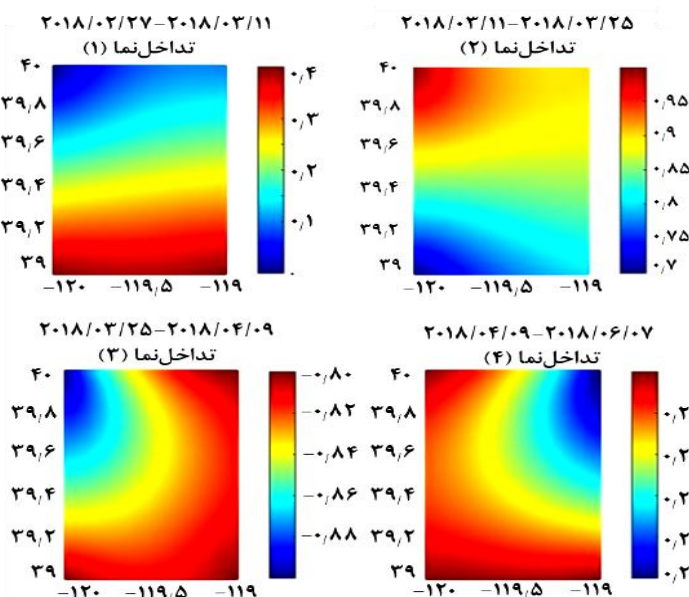
به منظور ارزیابی نتایج حاصل از مدل مرجع بین‌المللی یونسفر^۱ (IRI) مورد استفاده قرار گرفت. آخرین ویرایش این مدل IRI-2016 می‌باشد و برای یک موقعیت جغرافیایی و زمان و تاریخ مشخص، پارامترهای مختلفی از قبیل درجه حرارت الکترون‌ها، دمای یون و

^۱ International Reference Ionosphere (IRI)

^۲ <http://irimodel.org/IRI-2016/>

فعالیت‌های خورشیدی در یک سال، این مقادیر سطح پایین فعالیت‌های خورشیدی را نشان می‌دهد. پس از ایجاد تداخل‌نماها طبق جدول (۱)، مقادیر محتوای کلی چگالی الکترون تفاضلی با استفاده از روش آزمون شیفیت در محدوده‌ی مورد نظر محاسبه شد. در شکل (۳) مقادیر محتوای کلی چگالی الکترون تفاضلی تداخل‌نماها نمایش داده شده است.

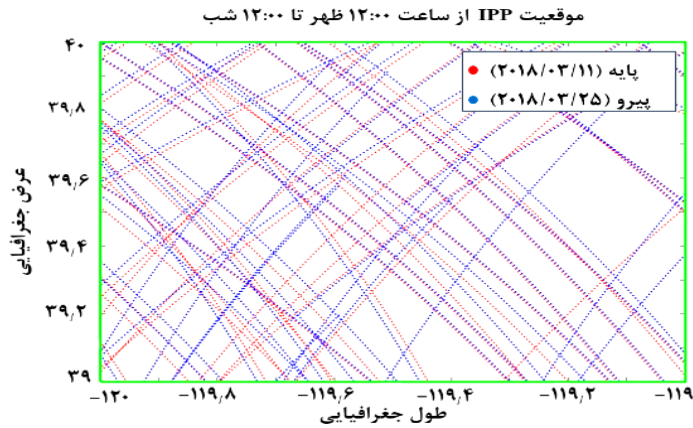
می‌دهد سطح فعالیت‌های ژئومغناطیسی پایین و طوفان‌های مغناطیسی جزئی است از این رو اغتشاشات ضعیفی ایجاد شده است و در عملکرد ماهواره‌ها تأثیر چشمگیری نداشته است. پارامتر $F10.7$ به عنوان شاخص سنجش فعالیت‌های خورشیدی، در روزهای مورد مطالعه مقادیری بین ۶۶٫۶ تا ۷۱٫۳ را نشان داده است که با توجه به دامنه تغییرات



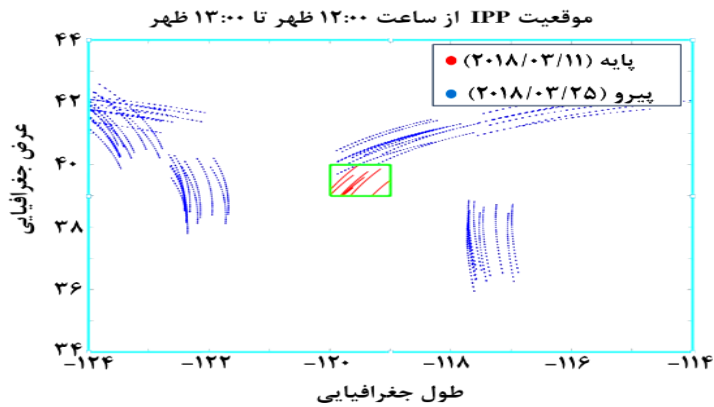
شکل ۳: محتوای کلی الکترون تفاضلی مربوط به تداخل‌نماها بر حسب $TECU$. (تاریخ‌های درج شده به ترتیب از چپ به راست نشان-دهنده تاریخ تصویر پایه و تاریخ تصویر پیرو می‌باشند)

همان‌طور که در بخش قبل اشاره شد به منظور محاسبه $VTEC$ تفاضلی با استفاده از مشاهدات GPS در موقعیت IPP ها درون‌یابی دوبعدی به روش $B-spline$ صورت گرفت و مقادیر $VTEC$ روز دوم در موقعیت IPP های روز اول درون‌یابی شد و سپس در همان موقعیت‌ها با تفاضل مقادیر $VTEC$ روز دوم از روز اول مقادیر $VTEC$ تفاضلی مربوط به دو روز موردنظر محاسبه شد. شکل (۴) موقعیت IPP ها در محدوده‌ی مورد نظر نشان می‌دهد که مربوط به دو روز مختلف است. نقاط قرمز رنگ مربوط به روز اول و نقاط آبی رنگ مربوط به روز دوم

۲۰۱۸/۰۳/۲۵ می‌باشد. به منظور افزایش دقت درون‌یابی، مقادیر $VTEC$ روز دوم در محدوده بزرگ‌تری نسبت به محدوده موردنظر انتخاب شد. نهایتاً با محاسبه اختلاف مقادیر $VTEC$ روز اول از روز دوم، $\Delta VTEC$ در IPP به دست آمد. شکل (۵) موقعیت IPP مربوط به ساعت ۱۲ تا ۱۳ ظهر در روز اول به رنگ قرمز و روز دوم به رنگ آبی را نشان می‌دهد. محدوده موردنظر با کادر سبزرنگ مشخص شده است. IPP روز دوم در محدوده وسیع‌تری نسبت به کادر سبز انتخاب شده که در کادر آبی نشان داده شده است.



شکل ۴: موقعی IPP روز ۲۰۱۸/۰۳/۱۱ (نقاط قرمز) و روز ۲۰۱۸/۰۳/۲۵ (نقاط آبی)



شکل ۵: موقعیت IPP برای ساعت ۱۲ ظهر تا ۱۳ ظهر در روز اول (قرمز) در محدوده مورد نظر (محدوده سبز) و روز دوم (آبی) در محدوده‌ی وسیع‌تر (محدوده آبی)

۴-۱- تلفیق داده‌ها با روش کریجینگ

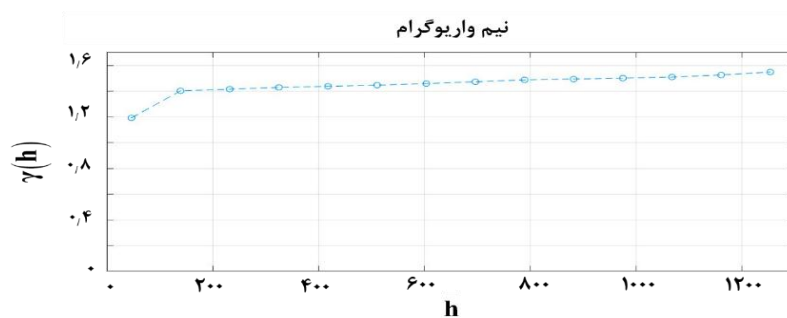
به منظور پیش‌بینی یک ساعته $\Delta VTEC$ در ساعت ۱۳ ظهر و در محدوده مورد نظر، روش پیش‌بینی کریجینگ مکانی-زمانی با استفاده از مشاهدات $\Delta VTEC$ حاصل از GPS به عنوان منبع مشاهداتی با تفکیک زمانی بالا و مشاهدات *InSAR* با تفکیک مکانی بالا به کار گرفته شد. با استفاده از مقادیر $\Delta VTEC$ حاصل از داده‌های GPS، واریوگرام زمانی مربوطه در نقاط IPP محاسبه شد و سپس از بین توابعی که به واریوگرام زمانی برازش داده شد، تابعی که خطای ریشه

میانگین مربعات (*RMSE*) برازش در آن کمینه باشد و هم چنین ضریب تعیین آن به یک نزدیکتر باشد، به عنوان تابع واریوگرام زمانی معتبر در نظر گرفته شد. به همین ترتیب یک تابع واریوگرام مکانی نیز با استفاده از مقادیر $\Delta VTEC$ حاصل از *InSAR* انتخاب شد. تابع واریوگرام مکانی-زمانی از حاصل ضرب دو تابع با استفاده از مدل حاصل ضرب ایجاد شد. شکل (۶) واریوگرام زمانی مقادیر $\Delta VTEC$ مربوط به دو روز (۲۰۱۸/۰۳/۱۱) و (۲۰۱۸/۰۳/۲۵) به ترتیب روزهای پایه و پیرو تداخل نمای دوم را نشان می‌دهد. یک تابع

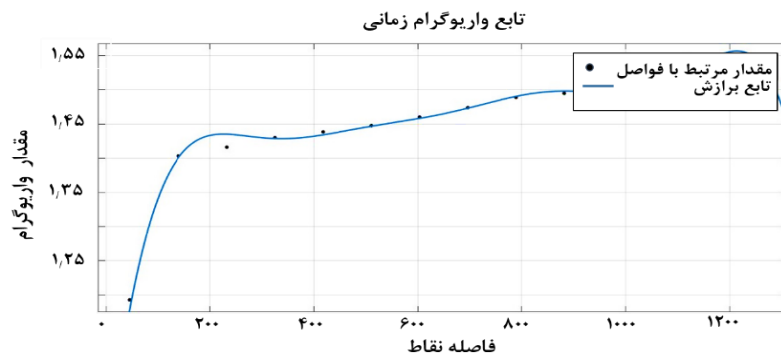
^۱ Root Mean Square Error (*RMSE*)

برازش در آن 1.7×10^{-5} TECU ضریب تعیین ۰/۹۹ است. در نهایت با حل دستگاه معادلات کریجینگ و محاسبه ضریب لاگرائز و ضرایب وزن، مقادیر $\Delta VTEC$ نقاط IPP در ساعت ۱۳ یعنی یک ساعت پس از ساعت اخذ تصویر راداری موردنظر در این مطالعه، پیش‌بینی و تخمین زده شد.

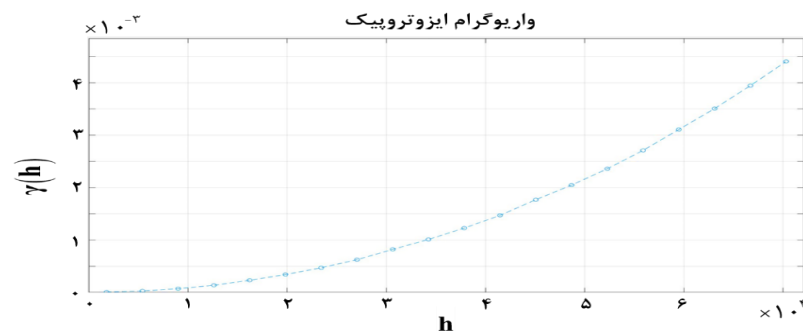
سینوسی که $RMSE$ برازش آن 0.22 TECU و با ضریب تعیین ۰/۹۸ به عنوان تابع واریوگرام زمانی در نظر گرفته شد که در شکل (۷) نمایش داده شده است. شکل (۸) واریوگرام مکانی مقادیر $\Delta VTEC$ مربوط به دو روز (۲۰۱۸/۰۳/۲۵) و (۲۰۱۸/۰۳/۱۱) را نشان می‌دهد و در شکل (۹) تابع واریوگرام مکانی مربوط به مقادیر $\Delta VTEC$ دو روز (۲۰۱۸/۰۳/۱۱) و (۲۰۱۸/۰۳/۲۵) نشان داده شده است که $RMSE$



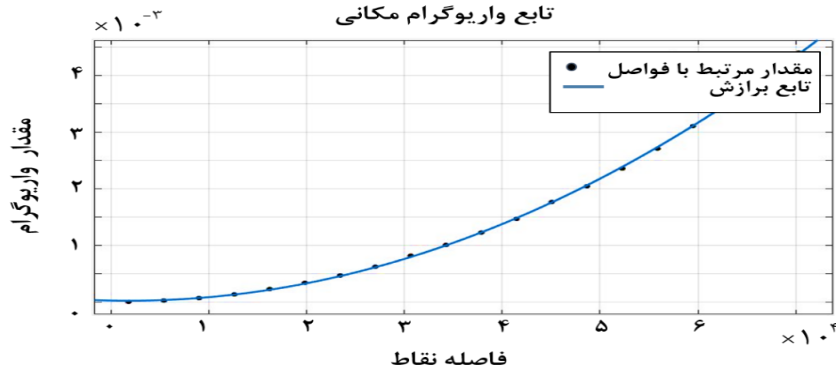
شکل ۶: واریوگرام زمانی مربوط به $VTEC$ تفاضلی روز اول (۲۰۱۸/۰۳/۱۱) و روز دوم (۲۰۱۸/۰۳/۲۵)



شکل ۷: تابع واریوگرام زمانی مربوط به $VTEC$ تفاضلی روز اول (۲۰۱۸/۰۳/۱۱) و روز دوم (۲۰۱۸/۰۳/۲۵)



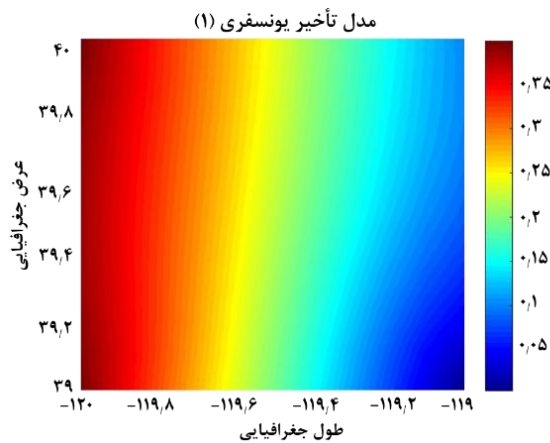
شکل ۸: واریوگرام مکانی مربوط به $VTEC$ تفاضلی روز اول (۲۰۱۸/۰۳/۱۱) و روز دوم (۲۰۱۸/۰۳/۲۵)



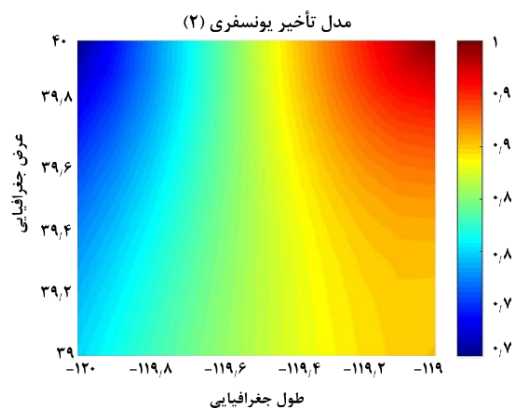
شکل ۹: تابع واریوگرام مکانی مربوط به $VTEC$ تفاضلی روز اول (۲۰۱۸/۰۳/۱۱) و روز دوم (۲۰۱۸/۰۳/۲۵)

آمد. شکل (۱۰) نتایج حاصل از پیش‌بینی کریجینگ مکانی-زمانی در ساعت ۱۳:۴۵ برای روزهای ۲۰۱۸/۳/۱۱ و ۲۰۱۸/۲/۲۷ نشان می‌دهد. مدل پیش‌بینی کریجینگ مکانی-زمانی تأخیر یونسفری برای روزهای ۲۰۱۸/۳/۲۵ و ۲۰۱۸/۴/۹ در ساعت ۱۳ در شکل (۱۲) و برای روزهای ۲۰۱۸/۴/۹ و ۲۰۱۸/۶/۷ در ساعت ۱۴:۲۰ در شکل (۱۳) نشان داده شده است.

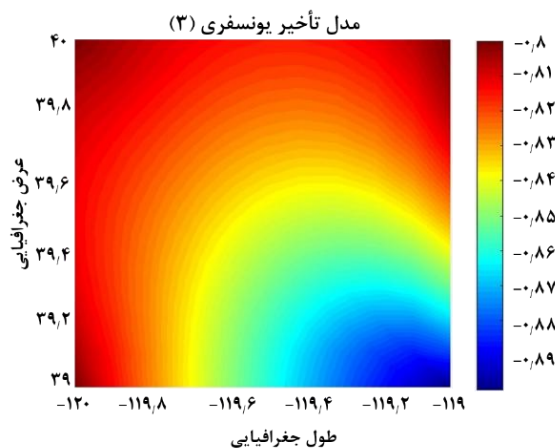
با استفاده از تابع واریوگرام مکانی به دست آمده از مشاهدات $InSAR$ و تابع واریوگرام زمانی حاصل از مشاهدات GPS ، مقادیر $VTEC$ تفاضلی با استفاده از کریجینگ مکانی-زمانی در محدوده مورد نظر و در ساعت ۱۳ مربوط به روزهای ۲۰۱۸/۰۳/۱۱ و ۲۰۱۸/۰۳/۲۵ پیش‌بینی شد که در شکل (۱۱) نشان داده شده است. به همین ترتیب مدل های پیش‌بینی در ساعت های ۱۳ و ۱۳:۴۵ و ۱۴:۲۰ با استفاده از روش پیش‌بینی کریجینگ برای روزهای مورد نظر به دست



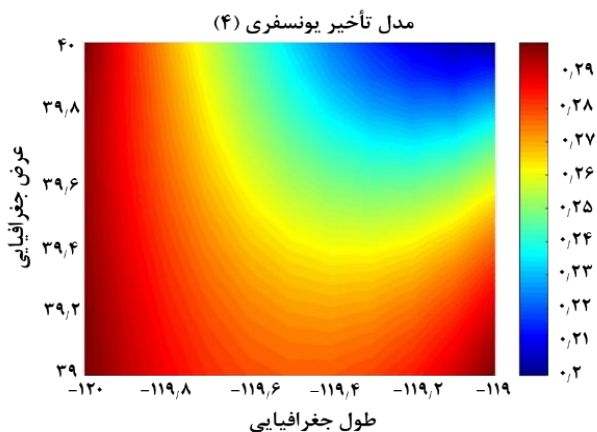
شکل ۱۰: نتایج پیش‌بینی کریجینگ مکانی-زمانی مقادیر $VTEC$ تفاضلی بر حسب $TECU$ مربوط به روزهای (۲۰۱۸/۰۲/۲۷) و (۲۰۱۸/۰۳/۱۱) در ساعت ۱۳:۴۵



شکل ۱۱: نتایج پیش‌بینی کریجینگ مکانی-زمانی مقادیر $VTEC$ تفاضلی بر حسب $TECU$ مربوط به روزهای (۲۰۱۸/۰۳/۱۱) و (۲۰۱۸/۰۳/۲۵) در ساعت ۱۳



شکل ۱۲: نتایج پیش‌بینی کریجینگ مکانی-زمانی مقادیر $VTEC$ تفاضلی بر حسب $TECU$ مربوط به روزهای (۲۰۱۸/۰۳/۲۵) و (۲۰۱۸/۰۴/۰۹) در ساعت ۱۳



شکل ۱۳: نتایج پیش‌بینی کریجینگ مکانی-زمانی مقادیر $VTEC$ تفاضلی بر حسب $TECU$ مربوط به روزهای (۲۰۱۸/۰۴/۰۹) و (۲۰۱۸/۰۶/۰۷) در ساعت ۱۴:۲۰

با مقایسه مقادیر $\Delta VTEC$ حاصل از کریجینگ و IRI با مقادیر دقیق حاصل از GPS ، مقدار $RMSE$ محاسبه شد و نتایج به دست آمده نشان می‌دهد دقت محاسبه $\Delta VTEC$ تفاضلی با استفاده از روش کریجینگ مکانی-زمانی در یک بازه‌ی مکانی و زمانی محدود بهتر از دقت مدل جهانی IRI است. مقدار $RMSE$ محاسبه شده مربوط به $\Delta VTEC$ روش کریجینگ در نقاط IPP برای ساعت ۱۳ برابر $TECU$ 0.65 و برای $\Delta VTEC$ حاصل از مدل جهانی IRI برابر $TECU$ 0.75 می‌باشد. این مراحل برای تداخل‌نماهای دیگر که روز متفاوتی دارند نیز پیاده‌سازی شد. نتایج پیش‌بینی یک ساعته توسط روش کریجینگ مکانی-زمانی برای مقادیر $\Delta VTEC$ تداخل نمای سوم که مربوط به روز $2018/03/25$ و $2018/04/09$ است، در جدول (۳) ارائه شده است. مقدار $RMSE$ محاسبه شده مربوط به $\Delta VTEC$ حاصل از روش پیش‌بینی کریجینگ در IPP برای ساعت ۱۳ برابر $TECU$ 2.54 و برای $\Delta VTEC$ حاصل از مدل IRI برابر $TECU$ 3.82 می‌باشد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در این دو روز نیز مقادیر پیش‌بینی شده با روش کریجینگ دقت بیشتری نسبت به مدل جهانی IRI نشان می‌دهد.

به منظور ارزیابی دقت این روش مقادیر $VTEC$ تفاضلی پیش‌بینی شده از روش کریجینگ با یک‌سری مقادیر دقیق مقایسه شده است. تعدادی از مقادیر $VTEC$ تفاضلی حاصل از مشاهدات GPS در موقعیت $IPPs$ در ساعت پیش‌بینی کنار گذاشته شده و در مرحله ایجاد واریوگرام زمانی استفاده نشدند سپس در همان موقعیت $IPPs$ و در همان زمان مقادیر $VTEC$ تفاضلی با استفاده از روش پیش‌بینی کریجینگ بازتولید شده و با مقادیر دقیق حاصل از GPS مقایسه شد. همچنین در همان موقعیت $IPPs$ و در همان زمان مقادیر $VTEC$ تفاضلی با استفاده از مدل IRI نیز محاسبه و با مقادیر دقیق حاصل از GPS مقایسه شد. سپس با محاسبه ریشه مربعات میانگین از این اختلافات مشاهده شد که تا بعضی موارد تا $TECU$ 1 ، روش کریجینگ دقت بهتری نشان می‌دهد. نتایج پیش‌بینی مقادیر $\Delta VTEC$ در $IPPs$ حاصل از کریجینگ مکانی-زمانی و مدل جهانی IRI با مقادیر دقیق $\Delta VTEC$ حاصل از GPS در ساعات ۱۳ و $13:45$ و $14:20$ مقایسه شد. نتایج پیش‌بینی $\Delta VTEC$ در ۳ موقعیت مختلف IPP در ساعت ۱۳ مربوط به روزهای $(2018/03/11)$ و $(2018/03/25)$ در جدول (۲) آورده شده است.

جدول ۲: مقادیر محاسبه‌شده $VTEC$ تفاضلی $IPPs$ مربوط به روز $(2018/03/11)$ و $(2018/03/25)$

نقطه نفوذ یونسفری	طول جغرافیایی (درجه)	عرض جغرافیایی (درجه)	$\Delta VTEC$ GPS ($TECU$)	$\Delta VTEC$ $Kriging$ ($TECU$)	$\Delta VTEC$ IRI ($TECU$)
۱	-۱۱۹٫۶۲	۳۹٫۶۵	۰٫۱۵	۰٫۹۱	۰٫۳
۲	-۱۱۹٫۱۶	۳۹٫۸۶	۱٫۶	۰٫۹۶	۰٫۳
۳	-۱۱۹٫۶۳	۳۹٫۲۴	۰٫۲۲	۰٫۷۸	۰٫۲

جدول ۳: مقادیر محاسبه‌شده $VTEC$ تفاضلی $IPPs$ مربوط به روز $(2018/03/25)$ و $(2018/04/09)$

نقطه نفوذ یونسفری	طول جغرافیایی (درجه)	عرض جغرافیایی (درجه)	$\Delta VTEC$ GPS ($TECU$)	$\Delta VTEC$ $Kriging$ ($TECU$)	$\Delta VTEC$ IRI ($TECU$)
۱	-۱۱۹٫۸۹	۳۹٫۸۳	-۳٫۶۱	-۰٫۸۹	۰٫۴
۲	-۱۱۹٫۴۱	۳۹٫۸۲	-۳٫۲۳	-۰٫۸۸	۰٫۴

برابر 7.50 $TECU$ و برای $\Delta VTEC$ حاصل از مدل جهانی IRI برابر 7.95 $TECU$ می‌باشد. مقادیر $\Delta VTEC$ حاصل از روش کریجینگ مکانی-زمانی مربوط به ساعت ۱۳:۴۵ برای دو روز $2018/02/27$ و $2018/03/11$ نیز برتری این روش را نسبت به IRI نشان می‌دهد. نتایج $RMSE$ برای روش کریجینگ و IRI به ترتیب 1.91 و 2.11 واحد $TECU$ حاصل شده است. مقادیر $\Delta VTEC$ حاصل در جدول (۵) آورده شده است.

مقادیر $VTEC$ تفاضلی برای ۹ موقعیت IPP واقع در منطقه موردنظر برای دو روز $2018/06/07$ و $2018/04/09$ در ساعت ۱۴:۲۰ نیز محاسبه شد که مقادیر حاصل در جدول (۴) آورده شده است. نتایج ارزیابی $\Delta VTEC$ حاصل از روش کریجینگ مکانی-زمانی و مدل IRI با استفاده از نتایج GPS نشان می‌دهد پیش‌بینی کریجینگ دقت بهتری نسبت به مدل جهانی IRI دارد. مقدار $RMSE$ محاسبه شده مربوط به $\Delta VTEC$ روش کریجینگ در نقاط IPP

جدول ۴: مقادیر محاسبه شده $VTEC$ تفاضلی $IPPs$ مربوط به روز ($2018/06/07$) و ($2018/04/09$)

نقطه نفوذ یونسفری	طول جغرافیایی (درجه)	عرض جغرافیایی (درجه)	$\Delta VTEC$ GPS ($TECU$)	$\Delta VTEC$ $Kriging$ ($TECU$)	$\Delta VTEC$ IRI ($TECU$)
۱	-۱۱۹/۷۸	۳۹,۵۳	-۴,۶۷	۰,۲۰	۰,۷
۲	-۱۱۹,۹۵	۳۹,۲۸	-۷,۶۴	۰,۲۸	۰,۷
۳	-۱۱۹,۹۳	۳۹,۳۱	-۷,۴۹	۰,۲۸	۰,۷
۴	-۱۱۹,۷۰	۳۹,۴۲	-۹,۱۵	۰,۲۸	۰,۸
۵	-۱۱۹,۴۹	۳۹,۵۱	-۵,۲۸	۰,۲۸	۰,۸
۶	-۱۱۹,۷۵	۳۹,۲۴	-۹,۰۹	۰,۲۸	۰,۷
۷	-۱۱۹,۲۴	۳۹,۲۳	-۷,۸۹	۰,۲۹	۰,۷
۸	-۱۱۹,۸۷	۳۹,۶۲	-۷,۰۹	۰,۲۷	۰,۷
۹	-۱۱۹,۶۴	۳۹,۶۵	-۵,۲۲	۰,۲۷	۰,۸

جدول ۵: مقادیر محاسبه شده $VTEC$ تفاضلی $IPPs$ مربوط به روز ($2018/02/27$) و ($2018/03/11$)

نقطه نفوذ یونسفری	طول جغرافیایی (درجه)	عرض جغرافیایی (درجه)	$\Delta VTEC$ GPS ($TECU$)	$\Delta VTEC$ $Kriging$ ($TECU$)	$\Delta VTEC$ IRI ($TECU$)
۱	-۱۱۹,۷۱	۳۹,۵۲	۱,۷۳	۰,۱۸	۰
۲	-۱۱۹,۴۷	۳۹,۶۴	۰,۲۴	۰,۱۳	۰
۳	-۱۱۹,۲۶	۳۹,۷۳	۳,۱۱	۰,۱	۰
۴	-۱۱۹,۵۳	۳۹,۶۴	۰,۹۹	۰,۲	۰
۵	-۱۱۹,۰۵	۳۹,۴۴	۳,۰۱	۰,۲۱	-۰,۱
۶	-۱۱۹,۶۴	۳۹,۸۳	-۰,۲۲	۰,۰۶۱	۰
۷	-۱۱۹,۷۲	۳۹,۱۱	۲,۷۳	۰,۳۴	-۰,۱

گرفتن روزهای مختلف، با استفاده از روش کریجینگ مکانی-زمانی در منطقه مورد نظر برای فاصله زمانی یک ساعته پیش‌بینی و نتایج حاصل ارائه گردید. با توجه به مقادیر $RMSE$ محاسبه شده در ارزیابی صورت گرفته توسط مقادیر دقیق حاصل از GPS می‌توان نتیجه گرفت پیش‌بینی مقادیر $VTEC$ تفاضلی توسط روش کریجینگ مکانی زمانی، دقت بهتری نسبت به مدل IRI نشان می‌دهد. نتایج $RMSE$ مقادیر $\Delta VTEC$ حاصل از پیش‌بینی کریجینگ مکانی-زمانی مربوط به ساعت ۱۳:۴۵ برای دو روز ۱۵۸م و ۱۷۰م از سال که به عنوان تداخل‌نمای اول در نظر گرفته شد برای کریجینگ و IRI به ترتیب ۱/۹۱ و ۲/۱۱ حاصل شد. دقت پیش‌بینی $VTEC$ تفاضلی در ساعت ۱۳ توسط روش کریجینگ در روزهای مربوط به تداخل‌نمای دوم مربوط به روزهای ۱۷۰م و ۱۸۴م از سال به میزان $TECU$ ۰/۶۵ و برای مدل IRI ، $TECU$ ۰/۷۵ محاسبه شد و برای روزهای تداخل‌نمای سوم مربوط به روزهای ۱۸۴م و ۱۹۹م از سال دقت پیش‌بینی کریجینگ $VTEC$ تفاضلی و مدل تجربی IRI در ساعت ۱۳ به ترتیب ۲/۵۴ و ۳/۸۲ واحد $TECU$ محاسبه شد. برای تداخل‌نمای چهارم که در روزهای ۱۹۹م و ۱۱۵۸م از سال می‌باشد، مقادیر $VTEC$ تفاضلی در ساعت ۱۴:۲۰ محاسبه شد و مقدار $RMSE$ محاسبه شده مربوط به $\Delta VTEC$ روش کریجینگ در نقاط IPP برابر ۷/۵۰ $TECU$ و برای $\Delta VTEC$ حاصل از مدل جهانی IRI برابر ۷/۹۵ $TECU$ محاسبه شد که نشان‌دهنده برتری این روش نسبت به مدل IRI است. پیش‌بینی‌های انجام شده با روش کریجینگ برای یک بازه مکانی و زمانی بوده و مدل تأخیر یونسفری حاصل به صورت محلی و در بازه مکانی و زمانی محدود در مقایسه با مدل IRI نتایج بهتری را نشان داده است.

نتایج پیش‌بینی $VTEC$ تفاضلی حاصل از روش کریجینگ به ترتیب وابسته به واریوگرام‌های مکانی و زمانی محاسبه شده از مقادیر $VTEC$ تفاضلی حاصل از مشاهدات $InSAR$ و مشاهدات GPS بوده است. با توجه به تغییرات مکانی بالای کمیت $VTEC$ و وسعت محدود منطقه‌ی انتخاب شده در این تحقیق که از عرض جغرافیایی ۳۹ تا ۴۰ درجه و طول جغرافیایی ۱۱۹- تا ۱۲۰- درجه را شامل شده است، واریوگرام حاصل نمی‌تواند به خوبی تغییرات واریانس $VTEC$ تفاضلی را مدل کند که این موضوع در دقت تابع واریوگرام مکانی حاصل تأثیرگذار بوده است. از طرفی دیگر با وجود آن که مقادیر $VTEC$ برای هر ۱۵ ثانیه موجود بود اما برای محاسبه $VTEC$ تفاضلی به یک درون‌یابی نیاز بود که این حجم داده کار را با چالش روبه‌رو می‌کرد. مقادیر $VTEC$ تفاضلی برای فواصل زمانی ۳۰ ثانیه، یک دقیقه و دو دقیقه محاسبه شد اما با مقایسه واریوگرام زمانی حاصل اختلاف قابل توجهی مشاهده نشد، بنابراین با بررسی صورت‌گرفته این نتیجه حاصل شد که برای کنترل حجم داده و افزایش سرعت محاسبات، محاسبه مقادیر تفاضلی برای هر دو دقیقه مناسب و کافی است. مقادیر $VTEC$ تفاضلی پیش‌بینی شده با استفاده از روش کریجینگ در این تحقیق برای فواصل زمانی یک تا حدوداً دو ساعته بود. در نتیجه برای محاسبه واریوگرام زمانی، از مقادیر $VTEC$ تفاضلی در فاصله زمانی یک ساعته استفاده شده است که در آن فاصله زمانی مقادیر تفاضلی دو دقیقه می‌باشد. در صورتی که بازه زمانی بزرگتری در نظر گرفته شود، وریانس زمانی مقادیر $VTEC$ تفاضلی با دقت بالاتری مدل شده و واریوگرام زمانی به فرم معمول واریوگرام نزدیک‌تر می‌شود.

۵- نتیجه‌گیری

مقادیر $VTEC$ تفاضلی در موقعیت IPP با در نظر

مراجع

[1] S. K. Llewellyn and R. B. Bent, "Documentation and Description of the

Bent Ionospheric Model," Planetary and Space Science, vol. 4, pp. 545-545, July.

- 1973.
- [2] Sh. Khoshgovari, Y. Amerian, and H. Mahbuby, "Total Electron Content Modeling in Terms of Spherical Radial Basis Functions over Iran," *Journal of the Earth and Space Physics*, vol. 46, pp. 67-80, Jan. 2020.
- [3] J. Asgari and A. R. Amiri-Simkooei, "Analysis and Prediction of GNSS Estimated Total Electron Contents," *Journal of the Earth and Space Physics*, vol. 37, no. 1, pp. 11-2, Oct. 2011.
- [4] N. Abdi, A. R. Azmoudeh Ardalan, and R. Karimi, "Combination of GPS and Satellite Altimetry Observations for Local Ionosphere Modeling Over Iran " *Journal of Geomatics Science and Technology*, vol. 7, no. 3, pp. 109-12, Sep. 2018.
- [5] A. Shahbazi, "Investigation Of Methodologies for Atmospheric Corrections in InSAR," M.S. thesis, University of Tehran, College of Engineering Department of Geomatics Engineering, 2011.
- [6] S. Jafari, "Evaluation and Implementation of Methods for InSAR Atmospheric Correction," University of Tafresh, Department of Surveying and Geomatics Engineering, 1393.
- [7] S. H. Aghajani and B. Vosoghi, "Tropospheric Delay Estimation from InSAR Observation," in *National Conference and Exhibition of Surveying Engineering and Spatial Information; Geomatics, Teh. , 2017*.
- [8] H. Fattahi and F. Amelung, "InSAR bias and uncertainty due to the systematic and stochastic tropospheric delay". *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, vol.120, no. 12, pp. 8758-8773, Nov. 2015.
- [9] R. Jolivet, P. Agram, N. Lin, M. Simons, M. Doin, G. Peltzer and Z. LI, "Improving InSAR geodesy using Global Atmospheric Models". *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol. 119, no. 3, pp. 2324-2341, Feb 2014.
- [10] Z. Li, E. J. Fielding, P. Cross, and J. Muller, "Interferometric synthetic aperture radar atmospheric correction: Medium Resolution Imaging Spectrometer and Advanced Synthetic Aperture Radar integration". *Geophysical Research Letters*, vol. 33, no. 6, Mar. 2006.
- [11] K. E. Mattar and A. L. Gray, "Reducing ionospheric electron density errors in satellite radar interferometry applications". *Canadian Journal of Remote Sensing*, vol. 28, no. 4, pp. 593-600, Jun. 2002.
- [12] F. Meyer, R. Bamler, N. Jakowski, and T. Fritz, "The Potential of Low-Frequency SAR Systems for Mapping Ionospheric TEC Distributions". *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 3, no. 4, pp. 560-564, Oct. 2006.
- [13] U. Wegmüller, C. Werner, O. Frey, C. Magnard, and T. Strozzi, "Reformulating the Split-Spectrum Method to Facilitate the Estimation and Compensation of the Ionospheric Phase in SAR Interferograms". *Procedia Computer Science*, vol. 138, pp. 318-325, Jan. 2018.
- [14] R. Brcic, A. Parizzi, M. Eineder, R. Bamler, and F. Meyer. "Estimation and compensation of ionospheric delay for SAR interferometry". in *2010 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2010*.
- [15] F. Meyer, R. Bamler, N. Jakowski, and T. Fritz, "Methods for small scale ionospheric TEC mapping from broadband L-B and SAR data", *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 10.1109/IGARSS, 2006, 957.
- [16] G. Gomba, M. Eineder, A. Parizzi, and R. Bamler. "High-resolution estimation of ionospheric phase screens through semi-focusing processing". in *2014 IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2014*.

- [17] F. Arikan, H. Nayir, U. Sezen, and O. Arikan, "Estimation of single station interfrequency receiver bias using GPS-TEC". *Radio Science*, vol. 43, no. 4, July. 2008.
- [18] U. Sezen, F. Arikan, O. Arikan, O. Ugurlu, and A. Sadeghimorad, "Online automatic near-real time estimation of GPS-TEC: IONOLAB-TEC". *Space Weather*, vol. 11, no. 5, pp. 297-305, May. 2013.
- [19] A. Freeman, "Calibration of linearly polarized polarimetric SAR data subject to Faraday rotation". *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 42, no. 8, pp. 1617-1624, Aug. 2004.
- [20] F. J. Meyer and J. Nicoll. "The Impact of the Ionosphere on Interferometric SAR Processing". in *IGARSS 2008 - 2008 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2008.
- [21] M. Jehle, M. Rüegg, D. Small, E. Meier, and D. Nüesch, "Estimation of ionospheric TEC and Faraday rotation for L-band SAR". in *SPIE Remote Sensing Conference*. vol. 5979. 2005, PP. 252-260.
- [22] X. Pi, A. Freeman, B. Chapman, P. Rosen, and Z. Li, "Imaging ionospheric inhomogeneities using spaceborne synthetic aperture radar". *J. Geophys. Res.* vol. 116, Apr. 2011.
- [23] R. Brcic, A. Parizzi, M. Eineder, R. Bamler, and F. Meyer. "Ionospheric effects in SAR interferometry: An analysis and comparison of methods for their estimation". in *2011 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2011.
- [24] G. Gomba, A. Parizzi, F. De Zan, M. Eineder, and R. Bamler, "Toward Operational Compensation of Ionospheric Effects in SAR Interferograms": The Split-Spectrum Method. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. vol. 54, no. 3, pp. 1446-1461, Mar. 2016.
- [25] P. A. Rosen, S. Hensley, and C. Chen. "Measurement and mitigation of the ionosphere in L-band Interferometric SAR data". in *2010 IEEE Radar Conference*. 2010.
- [26] H. Fattahi, M. Simons, and P. Agram, "InSAR Time-Series Estimation of the Ionospheric Phase Delay: An Extension of the Split Range-Spectrum Technique". *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 55, no. 10, pp. 5984-5996. Jul. 2017.
- [27] D. Raucoules and M. de Michele, "Assessing Ionospheric Influence on L-Band SAR Data: Implications on Coseismic Displacement Measurements of the 2008 Sichuan Earthquake". *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 7, no. 2, pp. 286-290, Apr. 2010.
- [28] U. Wegmüller, T. Strozzi, and C. Werner. "Ionospheric path delay estimation using split-beam interferometry". in *2012 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2012.
- [29] H. Jung, D. Lee, Z. Lu, and J. Won, "Ionospheric Correction of SAR Interferograms by Multiple-Aperture Interferometry". *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 51, no. 5, pp. 3191-3199, May. 2013.
- [30] U. Wegmüller, C. Werner, T. Strozzi, and A. Wiesmann. "Ionospheric Electron Concentration Effects on SAR and INSAR", in *2006 IEEE International Symposium on Geoscience and Remote Sensing*, 2006.
- [31] A. L. Gray, K. E. Mattar, and G. Sofko, "Influence of ionospheric electron density fluctuations on satellite radar interferometry". *Geophysical Research Letters*, vol. 27, no. 10, pp. 1451-1454, May. 2000.
- [32] H. Jung and W. Lee, "An Improvement of Ionospheric Phase Correction by Multiple-Aperture Interferometry". *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 53, no. 9, pp. 4960-4952,

- Apr. 2015.
- [33]W. Zhu, W. Zhang, Y. He, and W. Qu, "Performance Evaluation of Azimuth Offset Method for Mitigating the Ionospheric Effect on SAR Interferometry". *Journal of Sensors*, vol. 2017, Jul. 2017.
- [34]E. Musicò, C. Cesaroni, L. Spogli, J.P. Merryman Boncori, G. De Franceschi and R. Seu, "The Total Electron Content From InSAR and GNSS: A Midlatitude Study", *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 11, no. 5, pp. 1725-1733, May. 2018.
- [35]J. Blanch and T. Walter. "Application of Spatial Statistics to Ionosphere Estimation for WAAS". *Proceedings of the 2002 National Technical Meeting of The Institute of Navigation, San Diego, CA, Jan. 2002*, pp. 719-724.
- [36]H. Nayir, F. Arikan, O. Arikan, and C. B. Erol, "Total Electron Content Estimation with Reg-Est". *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, vol. 112, no. A11, Nov. 2007.
- [37]F. Arikan, C. B. Erol, and O. Arikan, "Regularized estimation of vertical total electron content from Global Positioning System data", *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, vol. 108, no. A12, Dec. 2003.
- [38]M. Shimada, Y. Muraki, and Y. Otsuka. "Discovery of Anomalous Stripes Over the Amazon by the PALSAR onboard ALOS satellite", in *IGARSS 2008 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2008.
- [39]F. Casu, A. Manconi, A. Pepe, and R. Lanari, "Deformation Time-Series Generation in Areas Characterized by Large Displacement Dynamics: The SAR Amplitude Pixel-Offset SBAS Technique," in *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 49, no. 7, pp. 2752-2763, July. 2011, doi: 10.1109/TGRS.2010.2104325.
- [40]N. B. D. Bechor and H. A. Zebker, "Measuring two-dimensional movements using a single InSAR pair", *Geophysical Research Letters*, vol. 33, no. 16, Aug. 2006.
- [41]A. Lichtenstern, "Kriging methods in spatial statistics, in *Department of Mathematics*", B.S. thesis, Technische Universität München, München, 2013.
- [42]R. Webster and M. Oliver, "Geostatistics for Environmental Scientists". *Geostatistics for Environmental Scientists*, 2 ed., 2007. 10.1002/9780470517277.
- [43]H. Wackernagel, "Multivariate Geostatistics: An Introduction with Applications", vol. 388, 3 ed., Springer-Verlag Berlin Heidelberg. XV, 2003.
- [44]T. Gneiting, F. Balabdaoui, and A. E. Raftery, "Probabilistic forecasts, calibration and sharpness", *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Statistical Methodology)*, vol. 69, no. 2, pp. 243-268, Mar. 2007.
- [45]N. Cressie, "Spatial Prediction and Kriging, in *Statistics for Spatial Data*", ch3, 1993, pp. 105-209, 10.1002/9781119115151.
- [46]P. Goovaerts, "Geostatistics for Natural Resources Evaluation", *Applied Geostatistics Series*, Oxford University Press on Demand, Geological Magazine, vol. 135, no. 6, 1997, pp. 819-842.
- [47]J. Xu and H. Shu, "Spatio-temporal kriging based on the product-sum model: some computational aspects", *Earth Science Informatics*, vol. 8, pp. 639-648, Dec. 2014.
- [48]L. Cesare, D. Myers, and D. Posa, "Spatial-Temporal Modeling of SO2 in Milan District", *Kluwer Academic Publishers*, vol. 2, pp. 1031-1042, Jan. 1997.
- [49]I. Rodríguez-Iturbe and J. M. Mejía, "The design of rainfall networks in time and space". *Water Resources Research*, vol. 10,

no. 4, pp. 713-728, Aug. 1974.

[50]F. G Montero J, Mateu J, “Spatial and Spatio-Temporal Geostatistical Modeling and Kriging”, 2015, pp. 266-273, 10.1002/9781118762387.



Integration of GPS and SAR observations to Generate Ionospheric Delay Model

*Elnaz Yeganeh Siyahkal*¹, *Yazdan Amerian*^{2*}, *Saeid Haji-Aghajany*³

1- Graduated in Master Degree, Faculty of Geodesy and Geomatics Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

2- Associate professor, Faculty of Geodesy and Geomatics Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

3- Postdoctoral Researcher, Faculty of Geodesy and Geomatics Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

Abstract

Microwave signals are delayed due to passing through the ionosphere layer. This delay reduces the accuracy of GPS positioning. In addition to affecting the GPS observations, the ionospheric delay also affects the radar measurements, especially in the L-band. Therefore, the computation of the ionospheric delay is important in different applications of the satellite data. Due to the distribution of the GPS stations and high temporal resolution of their observations, the TEC map calculated by GPS has a low spatial resolution. On the other hand unlike the SAR observations, these observations have high temporal resolution. Therefore, the estimated TEC from SAR observation has high spatial but low temporal resolution. In this paper, the spatio-temporal kriging prediction was used to combine the differential VTEC observations estimated from GPS and InSAR to generate a ionospheric delay prediction model with high spatio-temporal resolution for a district in Northern America. The differential VTEC obtained from the spatio-temporal kriging prediction and IRI model were verified using VTEC obtained from GPS in IPP. For this case, the RMSE for kriging prediction and IRI model in IPP was calculated 1.91 and 2.11 TECU at 2:45 p.m. for the days 58 and 70 of the year. In addition, the RMSE for kriging prediction and IRI model were 0.65 and 0.75 TECU at 1:00 p.m. for the days 70 and 84, 2.54 and 3.82 TECU at 1:00 p.m. for the days 84 and 99, and 7.50 and 7.95 TECU at 2:20 p.m. for the days 99 and 158 of the year respectively. In comparison with IRI the statistical results show high potential of the spatio-temporal kriging prediction method to estimate the differential VTEC for a limited spatio-temporal period of time in the studied area.

Key words: Ionospheric delay, Total Electron Content (TEC), Radar interferometry, Spatio-temporal kriging prediction.