نشربه علمى مهندسي فناوري اطلاعات مكانى

سال دوازدهم، شماره چهارم، زمستان ۱۴۰۳ Vol.12, No.4, Winter 2025 ۱ – ۲٦ مقاله پژوهشی

دان محمن سرنف بردار دان مدهم بر مرنف بردار

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

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

۱- دانشآموخته کارشناسیارشد ژئودزی، دانشکده مهندسی نقشهبرداری، دانشگاه صنعتی خواجهنصیرالدینطوسی ۲- دانشیار گروه ژئودزی، دانشکده مهندسی نقشهبرداری، دانشگاه صنعتی خواجهنصیرالدینطوسی ۳- پژوهشگر پسادکتری ژئودزی، دانشکده مهندسی نقشهبرداری، دانشگاه صنعتی خواجهنصیرالدینطوسی

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

چکیدہ

تأخیر امواج مایکروویو در اثر عبور از محیط یونسفر، دقت تعیین موقعیت با استفاده GPS را کاهش میدهد. علاوه بر مشاهدات GPS، اثر یونسفر اندازه گیری های راداری مخصوصا در باند *L* را تحت تأثیر قرار میدهد. از این رو برآورد اثر یونسفر در کاربردهای گوناگون از داده ماهواره ای امری ضروری است. با توجه به نحوه توزیع گیرنده های 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 TCC را با توان تفکیک مکانی بالا فراهم می کند اما نتایج دارای توان تفکیک زمانی پایینی می اشند. در این مطالعه از روش پیش بینی پارامتر TCC را با توان تفکیک مکانی بالا فراهم می کند اما نتایج دارای توان تفکیک زمانی پایینی می اشند. در این مطالعه از روش پیش بینی کریجینگ مکانی -زمانی به منظور تلفیق مشاهدات *TEC تفاض*لی حاصل از *TASA و GPS* استفاده شده و مدل پیش بینی تأخیر یونسفری با تفکیک مکانی و زمانی بالا برای محدوده ای واقع در آمریکای شمالی ارائه شده است. نتایج پیش بینی *TEC تفاض*لی با روش کریجینگ و مدل تجربی *IRI* با مقادیر دقیق *TEC تفاض*لی حاصل از *GPS د موقعیت TPC تفاض*لی با روش کریجینگ و مدل گردید. *RMSE خ*طای *TEC ت*فاضلی حاصل از *GPS که در پیش بینی* وارد نشده اند، در موقعیت *TPC ا*رزیابی شده و ۲۰ از سال تجربی ا*IPI با* مقادیر دقیق *TEC تفاض*لی حاصل از *GPS که در پیش بینی* وارد نشده اند، در موقعیت *TPI ا*رزیابی شده و 40 و ۲۰ از سال تردید. *RMSE خ*طای *TEC ت*فاضلی حاصل از *GPS که در پیش بینی* وارد نشده اند، در موقعیت *TPI ا*رزیابی شده و ۲۵ محاسبه مردید. *RMSE خ*طای *TECU ت*فاضلی حاصل از پیش بینی کریجینگ و مدل *INI در* موقعیت *TPI بر*ای ساعت ۲۵ رازوزهای ۸۸ و ۲۰ از سال به ترتیب برابر ۲۹ را و ۲۱ را ۲۷ *TEC ب*رای ساعت ۲۳ روزهای ۷۰ و ۲۰ از وال به ترتیب برابر ۲۵ را و ۲۵ را ۲۰ ای سایت ۲۳ روزهای شد. این نتایج توانایی روش کریجینگ مکانی زمانی را در تخمین ۲۰۲۲ تفاضلی در یک بازه مکانی و زمانی محدود در منطقه مورد مطالعه و شد. این نتایج توانایی روش کریجینگ مکانی زمانی را در تخمین *TEC ت*فاضلی در یک بازه مکانی و زمانی محدود در منطقه مورد مطالعه و در مقایسه با مدل *IRI* نمان می در

كليدواژهها : تأخير يونسفري، محتواي الكتروني كلي، تداخل سنجي راداري، پيشبيني كريجينگ مكاني-زماني.

[ً] نویسنده مکاتبهکننده: تهران، خیابان ولیعصر، تقاطع میرداماد غربی، دانشکده مهندسی نقشهبرداری دانشگاه صنعتی خواجهنصیرالدینطوسی. تلفن: ۸۸۷۷۰۲۱۱۰

سال دوازدهم • شماره چهارم • زمستان ۲٬۴۰۳

۱– مقدمه

الكترون هاى آزاد لايه يونسفر بر انتشار امواج الکترومغناطیس تأثیر می گذارند و این امواج را دچار تأخير مي كنند. مقدار تأخير امواج گذرنده از اين لايه، متناسب با ضریب شکست لایـه یوسـفر اسـت. ضـریب شکست محیط در این لایه به فرکانس موج الکترومغناطیس و چگالی الکترونی یونسفر بستگی دارد. مقدار تأخير امواج در محيط يونسفر با فركانس نسبت عکس دارد بنابراین امواج با فرکانس پایین تر تأخیر بزرگ تری به نسبت فرکانس های بالا تجربه می کنند. درنتیجه تعیین چگالی الکترونی یونسفر و مطالعه چگونگی تغییرات آن به عنوان یکی از چالشها و مسائل مهم در بسیاری از مطالعات در حوزه ژئودزی ماهوارهای، ژئودینامیک، تداخلسنجی راداری، هواشناسی و سیستمهای مخابراتی مطرح می شود. به همین علت مدلسازی یونسفر از سال ۱۹۷۲ به بعد به عنوان یک موضوع مهم در مطالعات جو و فضا تبدیل شد [۱].

سیستم تعیین موقعیت جهانی (GPS) که با هدف تعیین موقعیت و ناوبری توسعه یافت، در چند دهه اخیر به منظور مطالعه خصوصیات فیزیکی جو^۲زمین نیز به کارگرفته می شود. امواج ارسالی از ماهوارههای 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 مشاهدات GPS این امکان را فراهم می کنند که بتوان با روش های محاسباتی مقدار این خطا را تخمین زده و گردند. مقدار محتوای الکترونی کلی در راستای خط دید ماهواره که محتوای الکترونی کلی مایل^۳(GFC) قابل

محاسبه بوده و به عنوان مشاهده در مدلسازی یونسفر در نظر گرفته میشود.

تاکنون مطالعات گوناگونی جهت برآورد اثر یونسفر و مدلسازی یونسفر انجام شدهاست. مدلسازیهای یونسفر با استفاده از توابع مختلفی به صورت دوبعدی یا سه بعدی پیادهسازی شده که می توان به مدلسازی 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 پرداختهاند [۳]. عبدی و دوستان(۲۰۱۸) با تلفیق مشاهدات GPS و ارتفاع-سنجی ماهوارهای یوسفر را به صورت محلی در ایران مدلسازی کردهاند [۴].

با ظهور ماهوارههای راداری با روزنه مصنوعی^۴(SAR) و موضوع تداخلسنجی رادار با روزنه 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 میشود و این انگیزه را برای محققین در این زمینه ایجاد کرده تا با استفاده از این نوع مشاهدات به کشف، تخمین و مدلسازی اثرات تروپوسفری و یونسفری بپردازند. شهبازی (۲۰۱۱) روشهای تصحیح خطای اتمسفر در تداخلسنجی راداری را بررسی کرده است [۵]. جعفری در سال ۹۳ روشهای موجود در حذف اثر یوسنفر از InSAR بررسی و پیادهسازی کردهاست [۶]. حاجی آقاجانی و وثوقی(۲۰۱۷) با استفاده از مشاهدات InSAR اثر ترپوسفری را برآورد کردهاند [۷]. در این تحقیق نیز برای اولین بار اثر یونسفر را از مشاهدات InSAR برآورد كردهايم.

در چند دهه اخیر InSAR به عنوان یک تکنیک مؤثر در محاسبه میزان جابهجاییهای سطح زمین که ممکن

¹ Global Positioning System

² Atmosphere

³ Slant Total Electron Content

⁴ Synthetic Aperture Radar

⁵Interferometric Synthetic Aperture Radar

است براثر پدیده هایی همچون زلزله، تکنونیک صفحهای انارامی آت شفشانی، فرآیندهای هیدرولوژیکی ۲، نشست زمین و جریان های یخی به وجود آمده باشند، شناخته شده است. دقت اندازه گیری جابه جایی های به دست آمده از *RSAR* به طور قابل توجهی تحت تأثیر تأخیر امواج ماکروویو گذرنده از جو سیاره، قرار می گیرد. برای ماهواره های *SAR که* در حال چرخش به دور زمین می باشند، تأخیر امواج عمدتاً به دلیل تغییرات مکانی و زمانی بخار آب در لایه تروپوسفر [۸،۹و۱۰] و الکترون های آزاد در لایه یونسفر می باشد

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 می گردد. اثرات این لایه برخلاف سیستمهای با باند فرکانسی *L* برای فرکانسهای باند *X* ناچیز است [۱۴]. اثرات SAR برای فرکانسهای باند *L* قابلتوجه است که تمام یونسفر بر خصوصیات امواج ماکروویو سیستمهای SAR این اثرات تابعی از TEC می باشد [۱۵]. در اثر عبور امواج ماکروویو از لایه یونسفر نتایج INSAR اعوجاج می بابد که این اعوجاج شامل نامتمرکز شدن^۳ تصاویر می یابد که این اعوجاج شامل نامتمرکز شدن^۳ تصاویر SAR، چرخش فارادی³، تأخیر فاز و شیفت اضافی بین تصاویر SAR در جهت آزیموت (در جهت پرواز ماهواره)

از این رو با توجه به اثرات یونسفر در نتایج InSAR و اهمیت کشف و تخمین اثر یونسفری، مرحله حذف تاخیر 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.

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. درنتیجه استخراج TEC با استفاده از سیستمهای راداری نتایجی با تفکیک مکانی بالا فراهم می کند. 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 نمی شود. درنتیجه در سیستمهای راداری با ضعف تفکیک زمانی مواجه هستیم. از این رو انتظار می رود بتوان با به کار گیری 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 می تواند برای محاسبه TEC مورد استفاده قرار گیرد. اُریب تفاضلی کـد(DCB) مـاهوارههـا و گیرنـدههـای GPS، یکـی از مهم ترین منابع خطا در تخمین TEC محسوب می شود، در نتیجه دقت بر آورد اریب تفاضلی کد به عنـوان یکی از مجهولات مورد نیاز در محاسبات بر کیفیت تخمین کمیت TEC نیز بسیار تأثیرگذار خواهد بود. مقدار اریب

¹ Plate Tectonics

² Hydrological Processes

³ Defocusing

⁴ Faraday Rotation

⁵Vertical Total Electron Content

⁶Phased Array L-band SAR

⁷ Differential Code Bias

سال دوازدهم ● شماره چهارم ● زمستان ۱۴۰۳

تفاضلی کد ماهواره و گیرنده برای ماهوارهها و گیرنده های متعلق به شبکه سرویس بین المللی 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 میاشد. آریکان و همکاران(۲۰۰۸) الگوریتم محاسبه DCB گیرنده را ارائه کردند که بر اساس معادله مستقل از یونسفر مشاهدات کد و DCB ماهواره می باشد [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، محاسبه TEC همواره با چالش همراه است. سزن و همكاران(۲۰۱۳) الگوريتم محاسبه آنلاين خودكار نزدیک به آنی TEC را با عنوان نرمافزار یونولب^۴ (IONOLAB-TEC) را معرفی کردند [۱۸]. در این تحقيق به منظور محاسبه STEC از این نرم افزار استفاده گردیده است.

همان طور که اشاره شد برای تخمین و تصحیح اثرات یونسفری در فاز تداخلسنجی روشهای گوناگونی تاکنون ارائه شده که شامل روش فارادی [۲۰،۲۰،۲۹ ۲۵،۲۲ ۲۹۳]، روش اختلاف تأخیر کدفاز در رِنج^۵ و روش آزیموت شفکیک طیف [۲۰،۲۰،۲۴ و۲۹] میباشد. در روش فارادی محدود به استفاده از داده با پلاریزاسیون کامل^۷هستیم [۲۰]. روش تفکیک طیف^۸ با توجه به عرض باند پایین چیرپ^۹در سنجنده های باند *L*، دقت مطلوبی نخواهد داشت [۲۹]. علاوه بر این

- ⁷ Full-Polarization
- ⁸ Split Spectrum
- ⁹ Chirp

در روش اختلاف تأخیر فاز-کد در رِنج، تفکیک و تشخیص سهم اثرات یونسفری و سهم جابهجایی در راستای رِنج 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 نماهای فاقد تغییر شکلهای زمین روش توجه و زمین لرزه با یک تفکیک مکانی مناسب اندازه گیری و تصحیح کند [۲۹]. ایده اصلی این روش توسط متر و گری(۲۰۰۲) مطرح و الگوریتم آن توسط میر(۲۰۰۶).

در این تحقیق در پردازشهای InSAR از روش آزیموت شيفت كه حساسيت بالايي نسبت به تغييرات يونسفري 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 تداخلنما ملی شود که باعث ایجاد رگههای آزیموتی لار تصاویر شده و فاز تصویر به درستی قابل تفسیر نخواهد بود. گری و وگمـولا (۲۰۰۶) ایـن رگـههـای آزیمـوتی را در تداخلنماهای باند L گزارش کردند [۳۰و۳۱] و سیس میر و همکاران (۲۰۰۸) بحث تئوری اثرات یونسفری را ارائه دادند [۲۰]. روش آزیموت شیفت بر اساس رابطه خطے بین مشتق آزیموت تاخیر فازیونسفری در تداخلنما و جابهجاییهای آزیموت تعریف شده است [۲۲و۲۷]. در ابتدا راکولس و همکاران(۲۰۱۰) سعی کردند تا رگههای فاز یونسفری^۲را با استفاده از شیفت آزیموت تداخل سنجی در تداخل نمای ALOS باند لتخمين زده و تصحيح كنند. نتايج آنها يتانسيل جبران خطای یونسفری روی تداخل نماهای SAR با استفاده از روش آزیموت را نشان داد [۲۷]. در رابطه بـا

¹ International Global Posioning Satellite System

² Mapping Function

³ Ionospheric Piercing Point

⁴ IONOLAB-TEC

⁵ Range Phase–Group Delay Difference

⁶ Azimuth Shift

¹⁰ Interferogram

¹¹ Azimuth Streaks

¹² Ionospheric phase Streaks

روش آزیموت شیفت نیز مطالعاتی به منظور افزایش دقت محاسبات، صورت گرفته است. جونگ و همکاران با استفاده از تداخل سنجی SAR دقت روش آزیموت شیفت را بهبود دادند [۲۹و۳۲].

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 اندازه گیریهای آزمایشی InSAR و GPS برای تشخیص اندازه گیریهای آزمایشی TEC که از لحاظ مکانی متغیر است را در منطقهای که تراکم گیرندههای زمین مبنای GPS یایین باشد، به خوبی نشان می دهد [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 زمانی محدود پیادهسازی شد و نتایج اولیه آن ارائه شده رمانی محدود پیادهسازی شد و نتایج اولیه آن ارائه شده رمانی محدود پیادهسازی شد و نتایج اولیه آن ارائه شده رمانی محدود پیادهسازی شد و نتایج اولیه آن ارائه شده رمانی محدود پیادهسازی شد و نتایج اولیه آن ارائه شده رمانی محدود پیادهسازی بالا *NTEC* حاصل از مشاهدات *GPS* و توان تفکیک مکانی بالا *NTEC* 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 *NTEC* 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 ATEC حاصل از

InSAR و مقادیر ΔTEC بهدست 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 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 آمارمکانی، 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 بلانچ و والتر نشان دادند این روش جهت تخمین TEC بسیار مؤثر عمل میکند [۳۵].

۲- روش کریجینـگ مکـانی-زمـانی در تلفیـق VTEC تفاضلی حاصـل از GPS و تـداخلسـنجی رادار

برای انجام مرحله پیش بینی به روش کریجینگ مکانی-زمانی و تهیه مدل تأخیر یونسفری در منطقه، ابتدا می بایست مقادیر VTEC تفاضلی از دو منبع GPS و ماهواره ی ALOS2-PALSAR محاسبه شوند و سپس مقادیر VTEC تفاضلی حاصل از داده های GPS با قدرت تفکیک زمانی بالا و مقادیر VTEC تفاضلی حاصل از تداخل سنجی داده های ALOS2-PALSAR با قدرت تفکیک مکانی بالا در محاسبات کریجینگ در نظر گرفته می شوند که مراحل آن در ادامه تشریح می شود.

-۱-۲ 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

سال دوازدهم • شماره چهارم • زمستان ۲۴۰۳

مشاهدات خام ایستگاهها را به عنوان ورودی در نظر می گیرد. در ادامه با به کارگیری روش نرم کردن کد با فاز طبق معادلات (۱) ، (۲) و (۳)، خروجی STEC را به صورت یک فایل به فرمت متنی فراهم می کند. به منظور محاسبه STEC با روش نرم کردن مشاهدات کد با مشاهدات فاز، پارامتر B برای هر کمان پیوسته مشاهداتی به صورت رابطه (۱) معرفی می شود [۳۶]. B = $\frac{1}{N}\sum_{l=1}^{N} (P_4(n) - L_4(n))$

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

 $P_4 e_4 P_4 e_5 L_4$ در پارامتر B ترکیبهای مستقل از هندسه میباشند که به ترتیب با تفاضل مشاهدات کد و فاز در موج L_4 نتیجه موج L_2 از مشاهدات کد و فاز در موج L_2 نتیجه می شوند که در رابطه (۲) و رابطه (۳) تعریف شده است.

رابطه(۲)

 $\mathbf{p}_{4} = \mathbf{p}_{1} - \mathbf{p}_{2} = \delta_{\text{ion},1} - \delta_{\text{ion},2} + \mathbf{c} \left(\tau_{1}^{s} - \tau_{2}^{s} + \tau_{1}^{r} - \tau_{2}^{r} \right)$ (۳) رابطه (۳)

$$\begin{split} & L_4 = \phi_1 - \phi_2 = \delta_{ion,2} - \delta_{ion,1} + \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2 + c \left(T_1^s - T_2^s + T_1^r - T_2^r \right) \\ & \text{ cr (clease of the constraints of$$

STEC، L_4 با جایگذاری پارامتر B در معادله مربوط به

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

 $\tau_1^{\rm s} - \tau_2^{\rm s} = \mathbf{bs}$ (۵) رابطه

 $\tau_1^r - \tau_2^r = br$ (۶) رابطه

 $VTEC = STEC / M(\varepsilon)$ (۷)

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

در رابطه (۴)، پارامترهای so و to به ترتیب اریب تفاضلی کد مربوط به ماهواره s و گیرنده r است. در رابطه (۷)، 3 زاویه ارتفاعی ماهواره و M تابع نگاشت است و در رابطه (۸) تعریف شده است، در این رابطه Rشعاع زمین به اندازه ۶۳۷۱ کیلومتر و h ارتفاع نقطه نفوذ یونسفری روی تک لایه یونسفر است که برابر با نفوذ یونسفری روی تک لایه یونسفر است که برابر با تفاضلی کد گیرنده طبق روش GIAS IONOLAB از مقادیر VTEC مربوط به GIM استفاده می شود که در لایهای به ارتفاع ۴۵۰ کیلومتر منتشر می شوند از این رو ارتفاع ۲۵۰ کیلومتری برای پارامتر h انتخاب شده است.

در این نرمافزار، STEC 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 STEC در در موقعیت نقاط نفوذ یونسفری (IPP) را در نظر گرفتن تابع نگاشت M، به مقادیر STEC در نقاط IPP تبدیل تابع نگاشت M، به مقادیر STEC در نقاط IPP تبدیل می گردند. به منظور محاسبه VTEC تفاضلی برای مشاهدات GPS مربوط به دو روز دلخواه باید مقادیر محاک در نقاط IPP روز اول از مقادیر روز دوم کم

¹ Ionopheric Pierce Point (IPP)

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 در تک لایه یونسفر در هر ایک مختصات گرفته شد. با در نظر داشتن مقادیر STEC روز اول و با کرفته شد. با در نظر داشتن مقادیر *STEC* روز اول و با 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 STEC در موقعیت نقاط *IPP* مطابق رابطه (۹)

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

در رابطه (۹)، VTEC_{ipp_slave} مربوط به مقادیر VTEC در نقاط ۹۲ روز دوم و VTEC_{ipp_master} مربوط به مقادیر میباشد. مقادیر VTEC در نقاط *IPP* روز اول میباشد.

۲-۲- محاسبه VTEC تفاضلی از تداخلسنجی دادههای SAR مربوط به ماهواره 2 ALOS 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 فاز یونسفری استفاده کرد. در تصاویر PALSA با سنجنده طول خط وط میدان مغناطیسی در مناطق استوایی مغناطیسی مشاهده شده است [۳۸]. در این روش انتگرال شیفتها در راستای آزیموت متناسب با

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

ترکیب مشاهدات سامانه تعیین موقعیت جهانی و رادار... الناز یگانه سیاهکل و همکاران

استفاده از وسایل و تکنیکهای موجود، معمولاً دشوار به نظر می آید [۱۲]. از طرف دیگر، مقدار شیفت آزیموت با استفاده از روشهای ثبت هندسی، تصویر مختلط SAR قابل اندازه گیری می باشد. این روشها شامل همبستگی دوطرفه ۲[۳۹]، افزودن گوناگونی طیفی ۳(MAI) و تداخل سنجی چندروزنه ای (SAI) طیفی ۳(SAI) و تداخل سنجی چندروزنه ای (SAI) [۹] و همچنین تکنیک تقسیم پرتو تداخل نما (SBI) می باشند. با استفاده از نرمافزار *SARPROZ*، مقادیر می باشند. با استفاده از نرمافزار *SARPROZ*، مقادیر *SARPROZ* از مشاهدات رادار باند L ماهواره *SARPR در VTEC* از مشاهدات رادار باند L ماهواره *VTEC* در این نرمافزار بر مبنای یکی از روشهای محاسبه آزیموت شیفت با عنوان روش تداخل سنجی چندروزنه ای (MAI) است.

۲-۲-۱- 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 براثر یونسفر ایجاد گردیده توسط راکولس و ممکاران 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 دوباره چرخش داده میشوند تا به حالت اول برگردند. نقشه جابهجاییهای در امتداد آزیموت با استفاده از نقشه جابهجاییهای در امتداد آزیموت با استفاده از

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)

سال دوازدهم ● شماره چهارم ● زمستان ۳ه ۱۴

قبولی در استخراج میدان جابهجایی آزیموت فراهم می کند اما دقت آن وابسته به نسبت سیگنال به نویز و همبستگی میباشد [۴۰]. رابطه بین جابهجاییهای آزیموت Δx بر حسب متر و فاز MAI (ϕ_{MAI}) بر حسب رادیان به صورت رابطه (۱۰) است [۳۴]. $\Delta x = -\frac{1}{4\pi n} \cdot \phi_{MAI}$ (۱۰) رابطه(۱۰)، ا طول مؤثر آنتن راداری است که برای ماهواره ALOS PALSAR متر در نظر گرفته میشود و n کسری از پهنای روزنه آنتن راداری میباشد و معمولا مقدار ۵/۰ 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].

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

در رابطه (۱۱) d_{az} فاصله پیکسلها در راستای آزیموت در تداخلنمای چند منظر ^۱ست، κ طول موج رادار (در مورد *PALSAR ALOS2 PALSAR* سانتی متر میباشد)، Ω فاکتور وابسته به سیستم و هندسه و پارامترهای سنسور رادار میباشد، β مقدار آفست است که برای محاسبه میدان آفست آزیموت مرجع است که برای محاسبه میدان فاقست آزیموت مرجع میباشد. با برازش یک تابع چندجملهای روی میباشد. با برازش یک تابع چندجملهای روی آزیموت فاز *InSAR* در تمام پیکسلهای فاقد تغییر شکل سطحی شدید، $\Omega e \beta$ تخمین زده می شوند. شکل سطحی شدید، $\Omega e \beta$ تخمین زده می شوند. نتگرال جابهجاییهای ناشی از یونسفر در امتداد انتگرال جابهجاییهای ناشی از یونسفر در امتداد محاسبه است (۲۷]:

رابطه(۱۲)

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

در رابطه (۱۲)، j و j اندیسهای مربوط به سطر و ستون هستند، C ثابت انتگرال گیری است که تابعی از مکان میباشد، $\Delta \phi_{\text{ion}_{az}}$ تخمین گر صفحه فاز یونسفری است که از جابه جایی های یونسفری در امتداد آزیموت، محاسبه می شود.

اثرات محیط غیرایزوتروپیک^۳و پاشنده یونسفر به صورت تقدم فاز و تأخر کد در امواج راداری ظاهر می شود 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 جابه جایی های یونسفری در جهت آزیموت و رِنج به صورت رابطه (۱۳) قابل محاسبه می باشد.

$$C(j) = \frac{1}{2} \cdot \sum_{s=1}^{s} \left[\Delta \phi_{ion_r}(s, j) - \Delta \phi_{ion_az}(s, j) \right]$$

در رابطه (۱۳)، s تعداد کل پیکسلهای معتبر در هر خط آزیموت می باشد. برای آن که محاسبه ثابت انتگرال عاری از خطای ناشی از اثرات تغییر شکل باشد، پیکسلهایی که تغییرات سطحی شدیدی دارند کنار گذاشته می شوند. $\Delta\phi_{ion_r}$ مربوط به تخمین گر *IPS* با استفاده از جابه جاییهای رنج است. درنهایت، $\Delta\phi_{ion}^{0}$ با مربوط به *IPS* با استفاده از معادلات بالا به دست می آید و *TEC* با استفاده از معادلات بالا به دست ماهواره[†] با در نظر گرفتن *IPS* تخمین زده شده و معادله شیفت فاز براثر یونسفر به صورت رابطه (۱۴) محاسبه می شود.

$$\Delta TEC = -\frac{cf}{4\pi K} \cdot \left[\Delta \phi_{ion_{az}} + C \right]$$
 (14)

³ Anisotropic

⁴ Line Of Sight

¹ Multi Looking

² Ionospheric Phase Screen (IPS)

۲-۳- تئوری کریجینگ مکانی-زمانی

کریجینگ یکی از روشهای آمار مکانی است که با عنوان بهترین پیشبینی گر خطی ناآریب نیز معرفی میشود. هدف کلی کریجینگ پیشبینی مقدار تابع تصادفی (x) Z = Z(x) در هر موقعیت دلخواه x میباشد. کریجینگ وابسته به دانش ساختار مکانی است که با خصوصیات مرتبه دوم مانند واریو گرام⁷یا کوواریانس تابع تصادفی (x) مدل شده اند [۲۱]. ایده اصلی کریجینگ این است که باید به نقاط نمونه نزدیک، وزن بیش تری در پیشبینی تعلق بگیرد تا تخمین بهبود یابد. این وزنهای حاصل به مقادیر میانگین (x) μ و همچنین به واریو گرام یا تابع کوواریانس (x) ستگی 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 اندازه گیریهای یونسفری سیستم تقویت منطقه که از اندازه گیریهای یونسفری سیستم تقویت منطقه پایین یونسفری جمع آوری شده بود استفاده کردند و نشان دادند که روش کریجینگ در تخمین TEC. یونسفری بسیار مؤثر و مفید عمل میکند [۳۵].

بهطورکلی سه روش به منظور پیش.بینی کریجینگ در نظر گرفته میشود که شامل کریجینگ ساده^۴ ،کریجینگ معمولی⁶و کریجینگ جهانی²می شود. در کریجینگ معمولی فرض میشود که واریانس ویژگی

مدنظر در کل محدوده مکانی یک مقدار ثابتی دارد اما میانگین آن نامعلوم است. همچنین پیشبینی گر، نقاط نامعلوم را بهعنوان یک تابع خطی وزندار از مشاهدات در نظر می گیرد. تابع کوواریانسی که در کریجینگ معمولی تعریف میشود برای تمام محدوده مکانی موردنظر معتبر است. تابع کوواریانس تغییرات کمیت موردنظر را بررسی می کند و نشان میدهد که مقادیر در دو موقعیت نزدیک خیلی همبستهاند و در موقعیتهای دورتر همبستگی کمتری دارند. فرم سادهتر کریجینگ معمولی، کریجینگ ساده نام گرفته 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

با توجه به ویژگی مد نظر که ATEC میباشد و میتوان فرض کرد که در کل منطقه مورد نظر واریانس ATEC ثابت باشد، از روش کریجینگ معمولی استفاده شده است. تابع کوواریانسی 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 ۲ با استفاده از ضرب کرونوکر 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 پیشربینی و مدل تأخیر یونسفری حاصل شد.

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)

ترکیب مشاهدات سامانه تعیین موقعیت جهانی و رادار... الناز یگانه سیاهکل و همکاران

⁷ Product

نشریہ علمی – مہندسی فناوری اطلاعات مکانی

سال دوازدهم ● شماره چهارم ● زمستان ۲۰۳

۲-۳-۱ بر آورد تابع واریوگرام مکانی-زمانی انتخاب تابع واريوگرام مرحله مهم و اساسی در پیشبینے با روش کریجینے محسوب مے، شود. واریوگرام در روش آمار مکانی یک ابزار مناسب برای آنالیز داده مکانی و اساس کریجینگ است [۴۲]. ایده واريوگرام با در نظر گرفتن اين مسئله که رابط ه مکاني 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 میانگین گیری نصف اختلاف مربع مقادیر Z در جفت مشاهدات با فاصله و جهت مشخص حاصل شده است و نتیجه در یک نمودار دوبعدی نمایش داده می شود. مدل تابع واریوگرام از یک مجموعه توابع ریاضی که روابط مکانی را نشان میدهند، انتخاب میشود. مدل مناسب با تطابق شكل منحنى واريو گرام تجربى حاصل و شكل منحنى تابع رياضي انتخاب مـيشـود. تغييـرات مکانی و همبستگی دادهها با استفاده از تابع کوواریانس مکانی یا نیم واریوگرام^۲در مجموعه داده اصلی محاسبه می شود.

معمولاً بهجای 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.

 $\gamma(h) = \frac{1}{2} E[\{Z(x+h) - Z(x)\}^2]$ (۱۵) رابطه (۱۵)، (۲) مقدار متغیر در موقعیت (x) در رابطه (۱۵)، (x) مقدار متغیر در موقعیت (x) میباشد و [] اپراتور امید ریاضی میباشد. باید توجه داشت که (h) γ 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 توابع 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.

1 - i ناگت آگر واریوگرام تجربی در مبدأ ناپیوسته باشد c_0 ناگت یا $\gamma(h) \rightarrow c_0 > 0, |h| \rightarrow 0$ اثر ناگت نامیده می شود، که یک مقدار بر اثر خطای اندازه گیری یا تغییرات میکرو مقیاس به وجود آمده را نشان می دهد.

-۲ سیل ^۴: مقدار $\gamma(h) = \lim_{|h| \to \infty} \gamma(h)$ سیل نامیده میشود.

- دامنه A فاصله ای که نیم واریو گرام (h) برای اولین بار از مقدار سیل جلو بزند، دامنه واریو گرام نامیده می شود.

با فرض اینکه پارامتر مورد مطالعه ((Z(s,t)) ایستای مرتبه دوم باشد؛ بدین ترتیب که برای مقدار پارامتر مرتبه دوم باشد؛ بدین ترتیب که برای مقدار پارامتر Z(s,t) برای نقاط مشاهداتی Z واقع در دامنه مکانی $D \equiv \mathbb{R}^4$ و در زمان ادرون دامنه زمانی $\mathbb{T} = \mathbb{R}$ مقدار (Z(s,t)) و (Z(s,t)) و (Z(s,t))ارائه شده در روابط (۱۶) و (۱۷) به ترتیب واریو گرامهای حاشیها ی² مکانی و زمانی نامیده می شوند. تابع واریو گرام مکانی (Y_{st} (h_s ,0) با محاسبه می شوند. تابع واریو گرام مکانی (h_s ,0) با محاسبه واریانس پارامتر مطالعاتی در شعاع همسایگی h_s هر نقطه مشاهداتی Z(s,t) به دست آید [۶۶].

$$\gamma_{s}(h_{s},0) = \frac{1}{2} \operatorname{Var}(Z(s+h_{s},t) - Z(s,t))$$

Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-09-01

¹ Experimental

² Semivariogram

³ Nugget

⁴ Sill

⁵ Range

⁶ Marginal Variogram

الناز یگانه سیاهکل و همکار ان



شکل۱: پارامترهای واریوگرام [۳۹]

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

 $\gamma_{t}(0,h_{t}) = \frac{1}{2} \operatorname{Var}(Z(s,t+h_{t}) - Z(s,t))$ 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 می کند، واریوگرام تجربی⁽نامیده میشود و از رابطه (۱۸) محاسبه می گردد. رابطه (۱۸)

 $\gamma_{\rm st}({\rm h_s},{\rm h_t}) = \frac{1}{2} \operatorname{Var}(Z({\rm s}+{\rm h_s},{\rm t}+{\rm h_t})-Z({\rm s},{\rm t}))$ به ازای مقادیر مختلف برای S و t واریانس محاسبه شده مربوط به واریوگرام مکانی متفاوت خواهد بود و مدنتیجه به تعداد مشاهدات در حوزه مکان، واریوگرام مکانی و به ازای مشاهدات در حوزه زمان، واریوگرام مکانی زمانی خواهیم داشت. به منظور درونیابی از روش کریجینگ تنها یک مدل واریوگرام مکانی-زمانی کریجینگ تنها یک مدل واریوگرام مکانی-زمانی می میایست به مشاهدات بازش داده شود که همبستگی می ایست و این (۲۰ می ایست به مشاهدات بازش داده شود که همبستگی میان هر دو نقطه واقع در دامنه مکانی-زمانی را تعیین نماید [۲۷].

مدل واریوگرام مکانی-زمانی با فرض جداییپذیر^۲بودن همبستگی زمانی و مکانی کمیت مورد نظر، با استفاده

از مدل حاصل ضرب از ضرب دو واریو گرام زمانی $\gamma_{\rm s}({\rm h_s})$ و واریو گرام مکانی $\gamma_{\rm s}({\rm h_s})$ حاصل می شود به که به عنوان یک مدل جدایی پذیر شناخته می شود. به همین ترتیب تابع کوواریانس مکانی-زمانی نیز از حاصل ضرب کوواریانس مکانی در کوواریانس زمانی حاصل می شود. کوواریانس مکانی و کوواریانس زمانی هر دو ایستا^۳می باشند و از مدل های جدایی پذیر ایزوتروییک 3 حاصل شده اند.

مدل حاصل ضرب یکی از مدل های پر استفاده کوواریو گرام⁶نفکیک پذیر می باشد که به طور مناسبی بر داده های مورد مطالعه برازش داده می شود [۴۹و۴۹]. با این وجود در اکثر موارد این مدل به دلیل ساده بودن روابط آن انتخاب شده است. به طور کلی مدل پروداکت با استفاده از ترمهای کوواریو گرام به صورت رابطه (۱۹) تعریف می شود:

رابطه (۱۹)

 $C((s,t_i),(s_i,t_i)) = C_i(s_i,t_i)C_i(s_i,t_i),$ $\forall s, s \in D \subset \mathbb{R}^d, \forall t, t \in T \subset \mathbb{R}$ $c_i \quad (19) \quad$

¹ Empirical Variogram

² Sepratable

³ Sationary

⁴ Isotropic

⁵ Covariogram

نشریہ علمی – مہندسی فناوری اطلاعات مکانی

سال دوازدهم • شماره چهارم • زمستان ۳ه ۱۴

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

رابطه (۲۰)

$$\begin{split} \gamma(\mathbf{h},\mathbf{u}) = \mathbf{C}_{\mathrm{s}}(0)\gamma_{\mathrm{t}}(\mathbf{u}) + \mathbf{C}_{\mathrm{t}}(0)\gamma_{\mathrm{s}}(\mathbf{h}) - \gamma_{\mathrm{s}}(\mathbf{h})\gamma_{\mathrm{t}}(\mathbf{u}) \\ \gamma_{\mathrm{s}}(\mathbf{h}) & \epsilon_{\mathrm{t}}(\mathbf{u}), \quad (\mathbf{t},\mathbf{u}), \quad (\mathbf{t},\mathbf{u}) \\ \gamma_{\mathrm{s}}(\mathbf{h}) & \epsilon_{\mathrm{t}}(\mathbf{u}), \quad (\mathbf{t},\mathbf{u}), \quad (\mathbf{t},\mathbf{u}), \quad (\mathbf{t},\mathbf{u}), \\ \rho_{\mathrm{t}}(\mathbf{u}) & \rho_{\mathrm{t}}(\mathbf{u}), \quad (\mathbf{t},\mathbf{u}), \quad$$

۲-۳-۲ معادله کریجینگ مکانی-زمانی

پس از آن که دریافتیم چگونه کوواریوگرام 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 پیشبینی گر 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 پیشبینی گر زمانی همراه با واریانس پیشبینی تشریح میشود. هدف زمانی همراه با واریانس پیشبینی تشریح میشود. هدف کریجینگ مکانی-زمانی نقطه ای، پیشبینی مقدار یک نقطه نامعلوم (s_0,t_0) در نقطه مشاهده نشده (s_0,t_0)

مجموعه $\{\mathbb{R} \times \mathbb{R} \supseteq \mathbb{D} \supseteq \{\mathbb{Z}(s,t):(s,t) \mathbb{D} \supseteq \mathbb{R}^2 \times \mathbb{R}\}$ را یک تابع تصادفی مکانی-زمانی در نظر بگیریم و فرض کنیم که مقدار تابع تصادفی $\{\mathbb{Z}(s_1,t_1),\mathbb{Z}(s_2,t_2),...,\mathbb{Z}(s_n,t_n)\}$ رابع تصادفی در یک مجموعهای با n موقعیت مکانی-زمانی مقدار تابع تصادفی شده باشد. هدف پیشبینی مقدار تابع تصادفی شده باشد. هدف پیشبینی مقدار تابع تصادفی که $\mathbb{C}(s_0,t_0)$ کواهد بود که $_0$ موقعیت مکانی-زمانی (\mathbb{S}_0,t_0) خواهد بود میباشد. به منظور پیشبینی مقدار مکانی-زمانی تابع میباشد. به منظور پیشبینی مقدار مکانی-زمانی تابع

پیش بینی گر خطی به صورت رابطه (۲۱) استفاده میکنیم و انتظار داریم که بهترین پیشبینی گر خطی نااًريب باشد [۵۰]. , ابطه(۲۱) $\hat{Z}(s_0, t_0) = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i Z(s_i, t_i)$ 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: رابطه (۲۲) $\left|\sum_{i=1}^{n}\lambda_{j}\gamma\left(s_{i}-s_{j},t_{i}-t_{j}\right)+\mu=\gamma\left(s_{i}-s_{0},t_{i}-t_{0}\right),\forall i=1,...,n\right.$ $\sum_{i=1}^{n} \lambda_{i} = 1$ در رابطه (۲۲)، $\gamma(s_i - s_0, t_i - t_0)$ تابع نیموریوگرام مکانی-زمانی برای نقطه معلوم (s_i, t_j) و نقطه مجهول است و $\gamma(s_i - s_j, t_i - t_j)$ تابع نیموریوگرام (s_0, t_0) $(s_i, t_i) \, e^{\left(s_j, t_j\right)}$ مکانی-زمانی برای دو نقطه معلوم $(s_j, t_j) \, e^{\left(s_j, t_j\right)}$ می باشد. مجموع ضرایب برابر نیز برابر یک در نظر گرفته می شود. با توجه به اینکه لازم است پیشبینی گر خطی نااًریب باشد و با فرض دو شرط (ii) و (i) به صورت زیر: (i) امید تابع تصادفی ثابت (m) است و به موقعیت مکانی و زمانی بستگی ندارد. $\mathbf{E}(\mathbf{Z}(\mathbf{s}_{0},\mathbf{t}_{0})) = \mathbf{m} \quad \forall \mathbf{s}_{0},\mathbf{t}_{0}$ رابطه(۲۳) (ii) تابع كواريانس بين دو نقطه فقط به فاصله مكاني و زمانی بین دو نقطه وابسته است. $E(Z(s+h_s,t+h_t)-Z(s,t)) = 0$ (۲۴) رابطه با در نظر گرفتن قانون انتشار خطا برای رابطه (۲۱)، واریانس خطای پیشبینی مکانی-زمانی کریجینگ معمولی به صورت رابطه (۲۵) است. , ابطه (۲۵) $V\left(\hat{Z}(s_{0},t_{0})-Z(s_{0},t_{0})\right) = \sum_{i=1}^{n} \lambda_{i} \gamma(s_{i}-s_{0},t_{i}-t_{0}) + \mu$ با حل دستگاه معادله (۲۲)، ضریب لاگرانژ µ و ضرایب مجهول λ_i به دست میآیند که میتوانیم در معادله

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

۳- منطقه مورد مطالعه و منابع داده

محدودهای با طول جغرافیایی ۱۱۹ – تا ۱۲۰ – درجه و عرض جغرافیایی ۳۹ تا ۴۰ درجه واقع در آمریکای شمالی به عنوان منطقه مورد مطالعه انتخاب و مشاهدات راداری و مشاهدات حاصل از گیرندههای دو فرکانسه GPS در این محدوده در نظر گرفته شد.

۳-۱- دادههای راداری مورد استفاده

مشاهدات راداری ماهواره ALOS2-PALSAR در ۵ روز مختلف مربوط به محدوده مورد نظر انتخاب شد. دوره بازدید این ماهواره ۱۴ روز میباشد و تصاویر راداری این

تداخلنما زوج تصوير تداخلنما KP F10.7 روز از سال تصوير $r \cdot 1 \lambda / \cdot r / r v$ ۵٨ 4,777 999 پايە ۱ تصوير $\mathbf{T} \cdot \mathbf{N} / \mathbf{T} / \mathbf{N}$ γ۰ 88,9 • /٣٣٣ پيرو تصوير $\mathbf{T} \cdot \mathbf{N} / \mathbf{T} / \mathbf{N}$ γ۰ 88,9 • ,٣٣٣ پايە ۲ تصوير 5.11/.7/20 ٨۴ ۲,••• ۶٨,٠ پيرو تصوير 5.11/.7/20 ٨۴ ۶٨,٠ ۲,... پايە ٣ تصوير 5.11/.4/.9 ٩٩ ۲,۰۰۰ ۶٨,٩ پيرو تصوير 7.11/.4/.9 ۶٨,٩ ٩٩ ۲,••• پايە ۴ تصوير 2018/08/08 ۱۵۸ ۰/۳۳۳ ۷۱,۳ پيرو

جدول۱: روزهای مربوط به تصاویر پایه و پیرو به منظور ایجاد تداخلنما

ترکیب مشاهدات سامانه تعیین موقعیت جهانی و رادار...

ماهواره در باند L اخذ می شوند که دارای طول موج

۲۳٬۶ سانتیمتر و فرکانس ۱۲۵۰ مگاهرتز می باشد.

تصاویر مربوط به سال ۲۰۱۸ با تفکیک ۲۵ متر در نظر

گرفته شد و ساعت اخذ تصاویر ۱۲ 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 (Muli Temporal) و 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 تاداخلنماها را نشان مایدهاد.

الناز یگانه سیاهکل و همکار ان

نشریہ علمی – مہندسی فناوری اطلاعات مکانی

سال دوازدهم • شماره چهارم • زمستان ۳ه ۱۴

۲-۳ 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. خروجی های 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 فایل های مداری مربوط به روز مورد نظر که در سرویس IGS موجود است، محاسبه شده است.



شکل۲: موقعیت ایستگاههای GPS مورد استفاده در منطقه آمریکای شمالی

به منظور ارزیابی نتایچ حاصل از مدل مرجع بینالمللی یونسفر ^۱(IRI) مـورد اســتفاده قــرار گرفــت. آخرین ویـرایش ایــن مــدل*IRI-201*6 مــیباشــد و برای یک موقعیت جغرافیایی و زمان و تاریخ مشخص، پارامترهای مختلفی از قبیل درجه حرارت الکترونهـا، دمای یون و

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

¹ International Refrence Ionosphere (IRI)

² http://irimodel.org/IRI-2016/

ترکیب مشاهدات سامانه تعیین موقعیت جهانی و رادار... الناز یگانه سیاهکل و همکاران

> 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 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

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 آزیموت شیفت در محدودهی مورد نظر محاسبه شد. در شکل (۳) مقادیر محتوای کلی چگالی الکترون تفاضلی تداخلنماها نمایش داده شده است.



شکل۳ : 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)

همان طور که در بخش قبل اشاره شد به منظور محاسبه VTEC تفاضلی با استفاده از مشاهدات GPS در موقعیت VTEV ها درون یابی دوبعدی به روش -B spline صورت گرفت و مقادیر VTEC روز دوم در موقعیت IPP های روز اول درون یابی شد و سپس در همان موقعیت ها با تفاضل مقادیر VTEC روز دوم از روز اول مقادیر VTEC تفاضلی مربوط به دو دو روز موردنظر محاسبه شد. شکل (۴) موقعیت IPP ها در محدوده ی مورد نظر نشان می دهد که مربوط به دو روز مختلف است. نقاط قرمز رنگ مربوط به روز اول

۲۰۱۸/۰۳/۲۵ میباشد. به منظور افزایش دقت درونیابی، مقادیر VTEC روز دوم در محدوده بزرگتری نسبت به محدوده موردنظر انتخاب شد. در نهایت با محاسبه اختلاف مقادیر VTEC روز اول از روز دوم، ΔVTEC 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 مشخصشده است. *IPP* روز دوم در محدوده وسیعتری نسبت به کادر سبز انتخاب شده که در کادر آبی نشان داده شده است.

سال دوازدهم ● شماره چهارم ● زمستان ۳ه ۱۴



شکل۴: 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 موردنظر(محدوده سبز) و روز دوم (آبی) در محدودهی وسیع تر (محدوده آبی)

۴–۱– تلفیق دادهها با روش کریجینگ به منظور پیشبینی یک ساعته ΔVTEC در ساعت ۱۳ ظهر و در محدوده مورد نظر، روش پیشبینی کریجینگ مکانی-زمانی با استفاده از مشاهدات ΔVTEC حاصل از GPS به عنوان منبع مشاهداتی با تفکیک زمانی بالا و مشاهدات InSAR با تفکیک مکانی ملا به کار گرفته شد. با استفاده از مقادیر ΔVTEC 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 AVTEC 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 ΔVTEC مربوط به دو روز (۲۰۱۸/۰۳/۱۱) و (۲۰۱۸/۰۳/۲۵) به ترتیب روزهای پایه و پیرو تداخل نمای دوم را نشان می دهد. یک تابع

¹ Root Mean Square Error (RMSE)

ترکیب مشاهدات سامانه تعیین موقعیت جهانی و رادار... الناز یگانه سیاهکل و همکاران

 $\cdot,99$ برازش در آن TECU $\bullet -1,7 e^{-\delta}$ TECU ضریب تعیین $\cdot,99$ است. درنهایت با حل دستگاه معادلات کریجینگ و محاسبه ضریب لاگرانژ و ضرایب وزن، مقادیر $\Delta VTEC$ نقاط IPP در ساعت $\Lambda VTEC$ یعنی یک ساعت پس از ساعت اخذ تصویر راداری موردنظر در این مطالعه، پیشبینی و تخمین زده شد. سینوسی که RMSE برازش آن TECU و با ضریب تعیین Λ ، به عنوان تابع واریوگرام زمانی در نظر گرفته شد که در شکل (۷) نمایش داده شده است. شکل (Λ) واریوگرام مکانی مقادیر Δ VTEC مربوط به دو روز (۲۰۱۸/۰۳/۱۱) و (Λ ۰۳/۲۵) را نشان میدهد و در شکل (۹) تابع واریوگرام مکانی مربوط به مقادی ر Δ VTEC دو روز (۲۰۱۸/۰۳/۱۱) و RMSE دو منده است که RMSE



شکل۶: واریوگرام زمانی مربوط به VTEC تفاضلی روز اول (۲۰۱۸/۰۳/۱۱) و روز دوم (۲۰۱۸/۰۳/۲۵)



شکل۷: تابع واریوگرام زمانی مربوط به VTEC تفاضلی روز اول (۲۰۱۸/۰۳/۱۱) و روز دوم (۲۰۱۸/۰۳/۲۵)



شکل۸: واریوگرام مکانی مربوط به VTEC تفاضلی روز اول (۲۰۱۸/۰۳/۱۱) و روز دوم (۲۰۱۸/۰۳/۲۵)

سال دوازدهم • شماره چهارم • زمستان ۳۰ ۱۴



شکل۹: تابع واریوگرام مکانی مربوط به VTEC تفاضلی روز اول (۲۰۱۸/۰۳/۱۱) و روز دوم (۲۰۱۸/۰۳/۲۵)

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 ۱۵ (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





شکل۱۰: نتایج پیشبینی کریجینگ مکانی-زمانی مقادیر VTEC تفاضلی بر حسب TECU مربوط به روزهای (۲۰۱۸/۰۲/۲۷) و (۲۰۱۸/۰۲/۱۱) در ساعت ۱۳:۴۵



شکل۱۱: نتایج پیشبینی کریجینگ مکانی-زمانی مقادیر *VTEC* تفاضلی بر حسب *TECU* مربوط به روزهای (۲۰۱۸/۰۳/۱۱) و (۲۰۱۸/۰۳/۲۵) در ساعت ۱۳



شکل۱۲: نتایج پیشبینی کریجینگ مکانی-زمانی مقادیر VTEC تفاضلی بر حسب TECU مربوط به روزهای (۲۰۱۸/۰۳/۲۵) و (۲۰۱۸/۰۴/۰۹) در ساعت ۱۳



شکل۱۳: 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

سال دوازدهم ● شماره چهارم ● زمستان ۳ه ۱۴

به منظور ارزیابی دقت این روش مقادیر VTEC تفاضلی پیشبینی شدہ 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 واریو گرام 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 ، روش کریجینگ دقت بهتـری نشـان مـیدهـد. نتـایج پـیشبینـی مقـادیر ΔVTEC در *IPPs* حاصل از کریجینگ مکانی-زمانی و مدل جهانی IRI با مقادیر دقیق ΔVTEC حاصل از GPS در ساعات ۱۳ و ۱۳:۴۵ و ۱۴:۲۰ مقایسه شد. نتایج پیشبینی ΔVTEC در ۳ موقعیت مختلف IPP در ساعت ۱۳ مربوط به روزهای (۲۰۱۸/۰۳/۱۱) و (۲۰۱۸/۰۳/۲۵) در جدول (۲) آورده شده است.

با مقایسه مقادیر ΔVTEC حاصل از کریجینگ و IRI، با مقادیر دقیق حاصل از GPS، مقدار IRI محاسبه شد و نتایج به دست آمده نشان میدهد دقت محاسبه ΔVTEC 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 ∆VTEC روش کریجینگ در نقاط IPP برای ساعت ۱۳ برابر TECU IRI و برای ΔVTEC حاصل از مدل جهانی IRI برابر ۲*ECU ب*رای می باشد. این مراحل برای تداخلنماهای دیگر که روز متفاوتی دارند نیز پیادەسازى شد. نتایج پیشبینى یک ساعته توسط روش کریجینگ مکانی-زمانی برای مقادیر ΔVTEC تداخل نمای سوم که مربوط به روز ۲۰۱۸/۰۳/۲۵ و ۲۰۱۸/۰۴/۰۹ است، در جدول (۳) ارائه شده است. مقدار $\Delta VTEC$ محاسبه شده مربوط به $\Delta VTEC$ حاصل از روش پیشبینی کریجینگ در IPP برای ساعت ۱۳ برابر $\Delta VTEC$ و برای $\Delta VTEC$ حاصل از مدل IRI برابر ۲۲۲ ۲۲۸۲ می باشد. همان طور که ملاحظه می شود در این دو روز نیز مقادیر پیشبینی شده با روش کریجینگ دقت بیشتری نسبت به مدل جهانی IRI نشان میدهد.

نقطه نفوذ یونسفری	طول جفرافیایی (درجه)	عرض جفرافیایی (درجه)	∆VTEC GPS (TECU)	∆VTEC Kriging (TECU)	ΔVTEC IRI (TECU)
١	-119,8T	۳٩,۶۵	۰٬۱۵	۰٫۹۱	٠٫٣
٢	-119/18	۳۹٫۸۶	۶,۱	۰ ٫۹۶	٣
٣	-119,8T	۳٩٫٢۴	۰,۲۲	۰ ٫۷۸	٠٫٢

جدول۲: مقادیر محاسبه شده VTEC تفاضلی IPPs مربوط به روز (۲۰۱۸/۰۳/۱۱) و (۲۰۱۸/۰۳/۲۵)

جدول ۳: مقادیر محاسبه شده VTEC تفاضلی IPPs مربوط به روز (۲۰۱۸/۰۳/۲۵) و (۲۰۱۸/۰۴/۰۹)

نقطه نفوذ يونسفرى	طول جفرافيايی (درجه)	عرض جفرافیایی (درجه)	ΔVTEC GPS (TECU)	∆VTEC Kriging (TECU)	∆VTEC IRI (TECU)
١	- ١ ١ ٩ /٨٩	۳۹٬۸۳	-۳,۶ <i>۱</i>	-٠ _/ λ٩	۴, ۱
٢	-119,41	۳۹٫۸۲	- ٣ ,٢٣		٠٫۴

ترکیب مشاهدات سامانه تعیین موقعیت جهانی و رادار... الناز یگانه سیاهکل و همکاران

برابر $\Delta VTEC$ و برای TECU میباشد. مقادیر جهانی IRI برابر V_i ۹۵ TECU میباشد. مقادیر جهانی AVTEC حاصل از روش کریجینگ مکانی-زمانی مربوط به ساعت ۱۳:۴۵ برای دو روز ۲۰۱۸/۰۲/۲۷ و IRI به ساعت ۲۰۱۸/۰۳/۱۱ برای روش را نسبت به IRI نشان میدهد. نتایج RMSE برای روش کریجینگ و IRI به ترتیب ۱/۹۱ و ۲۱/۱ واحد TECU حاصل شده است. مقادیر ΔVTEC حاصل در جدول(۵) آورده شده است. مقادیر VTEC تفاضلی برای ۹ موقعیت IPP واقع در منطقه موردنظر برای دو روز ۲۰۱۸/۰۶/۰۷ و منطقه موردنظر برای دو روز ۲۰۱۸/۰۶/۰۹ شد که مقادیر حاصل در جدول (۴) آورده شده است. نتایج ارزیابی ΔVTEC 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 ΔVTEC روش کریجینگ در نقاط IPP

جدول۴: مقادیر محاسبهشده VTEC تفاضلی IPPs مربوط به روز (۲۰۱۸/۰۶/۰۷) و (۲۰۱۸/۰۴/۰۹)

نقطه نفوذ	طول جفرافيايي	عرض جفرافيايي	$\Delta VTEC$ GPS	∆VTEC Kriging	$\Delta VTEC$ IRI
يونسفرى	(درجه)	(درجه)	(TECU)	(TECU)	(TECU)
١	-119/VA	۳۹٬۵۳	-۴,۶۷	•, ٢ •	• , v
٢	-119/9 ۵	۳٩,۲٨	-V,84	۰,۲۸	• , Y
٣	- \ 	٣٩,٣١	-V, F9	۰,۲۸	• , Y
۴	- \ \ ٩ /٧ •	۳۹٫۴۲	$-\mathbf{e}_{i}\mathbf{D}$	۰ ٬۲۸	۰ _/ ۸
۵	-119,49	۳۹٬۵۱	$-\Delta_{I}$ ۲ ۸	۰,۲۸	۰ _/ ۸
۶	- 1 1 9,YD	٣٩,٢۴	- ੧ , • ٩	۰ ٬۲۸	• _/ •
٧	-119,7F	۳۹,۲۳	$-V_{/}$ Λ 9	۰,۲۹	• , Y
٨	- ι ι ٩ /λΥ	٣٩,۶٢	- ∀ / • ٩	۰,۲۷	• _/ Y
٩	-119,8F	۳۹٬۶۵	$-\Delta_{/}$ ۲۲	۰,۲۷	۰ _/ ۸

جدول۵: مقادیر محاسبه شده VTEC تفاضلی IPPs مربوط به روز (۲۰۱۸/۰۲/۲۷) و (۲۰۱۸/۰۳/۱۱)

نقطه نفوذ يونسفرى	طول جفرافیایی (درجه)	عرض جفرافیایی (درجه)	$\Delta VTEC$ GPS $(TECU)$	∆VTEC Kriging (TECU)	∆VTEC IRI (TECU)
١	- \ \ ٩ /٧ \	۳۹٬۵۲	١,٧٣	•، ۱۸	•
٢	-119,FV	٣٩,۶۴	•,74	۰,۱۳	•
٣	-119,78	۳۹٫۷۳	۳٫۱۱	• , \	•
۴	-119,0W	٣٩, ۶۴	٠,٩٩	۲,٠	•
۵	- ۱ ۱ ۹, • ۵	۳۹, <i>۴۴</i>	٣,٠١	• ,7 1	-•/)
۶	-119,84	۳۹٬۸۳	-٠,٢٢	• ، • ۶ ۱	•
Y	- 1 1 9,YY	۳۹,۱۱	۲٫۷۳	•,٣۴	-• _/)

سال دوازدهم ● شماره چهارم ● زمستان ۳ه ۱۴

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 می توان نتيجه گرفت پيش بيني مقادير VTEC تفاضلي توسط روش کریجینگ مکانی زمانی، دقت بهتری نسبت به مدل *IRI* نشان میدهد. نتایج *RMSE* مقادیر IRI حاصل از پیشبینی کریجینگ مکانی-زمانی مربوط به ساعت ۱۳:۴۵ برای دو روز ۵۸ام و ۷۰ام 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 پیش بینی VTEC تفاضلی در ساعت ۱۳ توسط روش کریجینگ در روزهای مربوط به تداخلنمای دوم مربوط بهروزهای ۷۰ام و ۱۸۴م از سال به میران ۶۵، TECU و برای مدل IRI، ۲۵٬۷۵ محاسبه شد و برای روزهای تداخل نمای سوم مربوط به روزهای ۸۴م 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 تداخل نمای چهارم که در روزهای ۱۹۹م و ۱۵۸ام از سال میباشد، مقادیر VTEC تفاضلی در ساعت ۱۴٬۲۰ محاسبه شد و مقدار RMSE محاسبه شده مربوط به ΔVTEC روش کریجینے در نقاط IPP برابر ۷٬۵۰ TECU و برای ΔVTEC حاصل از مدل جهانی IRI برابر ۲*ECU* ۷٬۹۵ محاسبه شد که نشاندهندهی برتری این روش نسبت به مدل IRI است. پیش بینی های 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.

[1] S. K. Llewellyn and R. B. Bent, "Documentation and Description of the نتایج پیشبینی VTEC تفاضلی حاصل از روش كريجينگ به ترتيب وابسته به واريوگرامهاي مكاني 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 منطقه ی انتخاب شده در این تحقیق که از عرض جغرافیایی ۳۹ تا ۴۰ درجه و طول جغرافیایی ۱۱۹- تـا ۱۲۰- درجـه را شـامل شـده اسـت، واريـوگرام حاصـل نمی تواند به خوبی تغییرات واریانس VTEC تفاضلی را مدل کند که این موضوع در دقت تابع واریوگرام مکانی حاصل تأثیر گذار 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 می کرد. 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 صورت گرفته این نتیجه حاصل شد که برای كنترل حجم داده و افزایش سرعت محاسبات، محاسبه مقادیر تفاضلی برای هر دو دقیقه مناسب وکافی است. مقادیر VTEC تفاضلی ییشبینی شده با استفاده از روش کریجینگ در این تحقیق برای فواصل زمانی یک تا حدوداً دو ساعته بود. در نتیجه برای محاسبه وریوگرام 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 مىشود.

۵- نتیجه گیری
مقادیر IPP نفاضلی در موقعیت IPP با در نظر

مراجع

Bent Ionospheric Model," Planetary and Space Science, vol. 4, pp. 545-545, July. ترکیب مشاهدات سامانه تعیین موقعیت جهانی و رادار...

الناز یگانه سیاهکل و همکار ان

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** InSAR, " Corrections in M.S. thesis, University ofTehran, 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 semifocusing processing". in 2014 IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2014.

سال دوازدهم • شماره چهارم • زمستان ۲٬۴۰۳

- [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 An analysis interferometry: 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. Wegmuller, 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,

ترکیب مشاهدات سامانه تعیین موقعیت جهانی و رادار...

الناز یگانه سیاهکل و همکار ان

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 Anoumoulous 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 Universitat Munchen, Munchen, 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,

نشریه علمی – مهندسی فناوری اطلاعات مکانی

سال دوازدهم ● شماره چهارم ● زمستان ۳ه۱۴

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.



Journal of Geospatial Information Technology Vol.12, No.4, Winter 2025

Research Paper

Integration of GPS and SAR observations to Generate Ionospheric Delay Model

Elnaz Yeganeh Siyahkal¹, Yazdan Amerian^{2*}, Saeid Haji-Aghajany³

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

5- Postaoctoral Researcher, Faculty of Geodesy and Geomatics Engineering, K. N. 100st University of Technology, Tenran, Ira

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 pridiction 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.

Correspondence Address : No. 1346, ValiAsr Street, Mirdamad Cross, Faculty of Geodesy and Geomatics Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran 1996715433, Iran. Tel: 021-88770218

Email: amerian@email.kntu.ac.ir