نشریه علمی مهندسی فناوری اطلاعات مکانی

سال دوازدهم، شماره چهارم، زمستان ۱۴۰۳

Vol.12, No.4, Winter 2025

۱ -۲۶

مقاله پژوهشی

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- 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

چکیده

تأخیر امواج مایکروویو در اثر عبور از محیط یونسفر، دقت تعیین موقعیت با استفاده *GPS* را کاهش می‌دهد. علاوه بر مشاهدات *GPS*، اثر یونسفر اندازه‌گیری‌های راداری مخصوصا 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 *InSAR* 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 ۱۳:۴۵روزهای 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 خواجه‌نصیرالدین‌طوسی.

تلفن: ۸۸۷۷۰۲۱۸-۰۲۱

Email: amerian@kntu.ac.ir

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-11]

[DOI: 10.61882/jgit.12.4.1]

۱- مقدمه

الکترون‌های آزاد لایه یونسفر بر انتشار امواج الکترومغناطیس تأثیر می‌گذارند و این امواج را دچار تأخیر می‌کنند. مقدار تأخیر امواج گذرنده از این لایه، متناسب با ضریب شکست لایه یوسفر 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 پایین‌تر تأخیر بزرگ‌تری به نسبت فرکانس‌های بالا تجربه می‌کنند. 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 می‌شود. 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[1] *(GPS)* که با هدف تعیین موقعیت و ناوبری توسعه یافت، در چند دهه اخیر به منظور مطالعه خصوصیات فیزیکی جو[2]زمین 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 می‌گردند. مشاهدات *GPS* این امکان را فراهم می‌کنند که بتوان با روش‌های 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[3] *(STEC)* نامیده می‌شود با استفاده از مشاهدات *GPS* 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 می‌توان 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 پیش‌بینی *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[4] *(SAR)* و موضوع تداخل‌سنجی رادار با روزنه مصنوعی[5] *(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 کرده‌ایم.

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*
[5] *Interferometric Synthetic Aperture Radar*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-11]
[DOI: 10.61882/jgit.12.4.1]

است براثر پدیده‌هایی همچون زلزله، تکنونیک صفحه‌ای[1]، ناآرامی آتش‌فشانی، فرآیندهای هیدرولوژیکی[2]، نشست زمین و جریان‌های یخی به وجود آمده باشند، شناخته شده است. دقت اندازه‌گیری جابه‌جایی‌های به‌دست‌آمده 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 بخارآب در لایه تروپوسفر [۹،۸و۱۰] و الکترون‌های آزاد در لایه یونسفر می‌باشد [۱۲،۱۱و۱۳].

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 با باند فرکانسی *L*، برای فرکانس‌های باند *X* ناچیز است [۱۴]. اثرات یونسفر بر خصوصیات امواج ماکروویو سیستم‌های *SAR* با فرکانس پایین مانند باند *L* قابل‌توجه 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[3] تصاویر *SAR*، چرخش فارادی[4]، تأخیر فاز و شیفت اضافی بین تصاویر *SAR* در جهت آزیموت (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.

مشاهدات *GPS* با فواصل زمانی هر ۱۵ یا ۳۰ ثانیه، امکان محاسبه کمیت محتوای الکترونی کلی قائم[5] *(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)*[6] 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 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. درنتیجه در سیستم‌های راداری با ضعف تفکیک زمانی مواجه هستیم. از این رو انتظار می‌رود بتوان با به‌کارگیری 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. اُریب تفاضلی کد[7] *(DCB)* ماهواره‌ها و گیرنده‌های *GPS*، یکی از مهم‌ترین منابع خطا در تخمین *TEC* محسوب می‌شود، در نتیجه دقت برآورد اریب تفاضلی کد به عنوان 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*

[5] *Vertical Total Electron Content*
[6] *Phased Array L-band SAR*
[7] *Differential Code Bias*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-11]
[DOI: 10.61882/jgit.12.4.1]

تفاضلی کد ماهواره و گیرنده برای ماهواره‌ها و گیرنده‌های متعلق به شبکه سرویس بین‌المللی سیستم‌های ماهواره‌ای ناوبری جهانی[1](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[2] و ارتفاع تک لایه یونسفر برای تعیین نقطه نفوذ یونسفری،[3] محاسبه TEC همواره با چالش همراه است. سزِن و همکاران(۲۰۱۳) الگوریتم محاسبه آنلاین خودکار نزدیک به آنی TEC را با عنوان نرم‌افزار یونولب[4] (IONOLAB-TEC) را معرفی کردند [۱۸]. در این تحقیق به منظور محاسبه STEC از این نرم افزار 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 [۱۹،۲۰،۲۱و۲۲]، روش اختلاف تأخیر کد-فاز در رِنج[5] [۱۴،۱۵و۲۳]، روش تفکیک طیف [۱۴،۲۳،۲۴،۲۵و۲۶] و روش آزیموت شیفت[6] [۱۱،۱۲،۲۷،۲۸و۲۹] می‌باشد. در روش فارادی محدود به استفاده از داده با پلاریزاسیون کامل[7] هستیم [۲۰]. روش تفکیک طیف[8] با توجه به عرض باند پایین چیرپ[9] در سنجنده های باند L، دقت مطلوبی نخواهد داشت [۲۹]. علاوه بر این 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 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 [۱۱و۱۲].

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 تداخل‌نما[10] می‌شود که باعث ایجاد رگه‌های آزیموتی[11] در تصاویر شده و فاز تصویر به درستی قابل تفسیر نخواهد بود. گری و وگمولا (۲۰۰۶) این رگه‌های آزیموتی را در تداخل‌نماهای باند L گزارش کردند [۳۰و۳۱] 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 [۱۲و۲۷]. در ابتدا راکولس و همکاران(۲۰۱۰) سعی کردند تا رگه‌های فاز یونسفری[12] را با استفاده از شیفت آزیموت تداخل سنجی در تداخل نمای ALOS باند L تخمین زده و تصحیح کنند. نتایج آن‌ها پتانسیل جبران خطای یونسفری روی تداخل نماهای SAR با استفاده از روش آزیموت را نشان داد [۲۷]. در رابطه با

[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
[7] Full-Polarization
[8] Split Spectrum
[9] Chirp
[10] Interferogram
[11] Azimuth Streaks
[12] Ionospheric phase Streaks

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-11]
[DOI: 10.61882/jgit.12.4.1]

روش آزیموت شیفت نیز مطالعاتی بـه منظـور افـزایش دقت محاسبات، صورت گرفته است. جونگ و همکـاران با استفاده از تداخل سـنجی *SAR* دقـت روش آزیمـوت شیفت را بهبود دادند [۲۹و۳۲].

ژو و همکاران(۲۰۱۷) کـاربرد روش شـیفت آزیمـوت را در طی پردازش دو تصویر *SAR* پلاریزاسیون کامل رادار ماهواره باند *L* بـا سـنجنده *PALSAR* بررسـی و آنـالیز کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که این روش به‌طـور مـؤثر می‌تواند خطای تـأخیر فـاز یونسـفری را حـذف نمایـد [۳۳]. موسیکو و همکاران(۲۰۱۸) با فرض جزئی بـودن سـهم فـاز تروپوسـفری، از *TEC* حاصـل از دو منبـع *InSAR* و یک شبکه متراکم از گیرنده‌های *GNSS* بـرای ارزیابی توانایی *InSAR* برای بازیابی اطلاعات یونسـفری 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، به‌خوبی 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 *InSAR* و مقادیر ΔTEC به‌دست‌آمده از *GPS*، یک مدل تأخیر یونسفری تولید شده و مقدار ΔTEC برای یک موقعیت در محدوده تصویر تداخل‌نما 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 بـه عنـوان یکی از روش‌های آمارمکانی، برای تلفیق این مشاهدات به کار گرفته شد. روش پیش‌بینـی کریجینـگ مکـانی-زمانی روشی مناسب برای تلفیق دو تابع مختلف زمـانی و مکانی معرفی شده است. این روش از سال ۲۰۰۲ بـه منظور تخمین تأخیر یونسفری مورد توجه قرار گرفت و همچنین آزمایش‌های گسترده‌ای جهـت ارزیـابی روش کریجینگ به منظور تخمین یونسفر انجام شد که بلانـچ و والتر نشان دادند این روش جهت تخمین *TEC* بسـیار مؤثر عمل می‌کند [۳۵].

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

برای انجام مرحله پیش‌بینی به روش کریجینگ مکانی-زمانی و تهیه مـدل تـأخیر یونسـفری در منطقـه، ابتـدا می‌بایست مقـادیر *VTEC* تفاضـلی از دو منبـع *GPS* و ماهواره‌ی *ALOS2-PALSAR* محاسـبه شـوند و سـپس مقـادیر *VTEC* تفاضـلی حاصـل از داده‌هـای *GPS* بـا قـدرت تفکیـک زمـانی بـالا و مقـادیر *VTEC* تفاضـلی حاصل از تداخل‌سنجی داده‌های *ALOS2-PALSAR* بـا قدرت تفکیک مکانی بـالا در محاسـبات کریجینـگ در نظر گرفته می‌شـوند کـه مراحـل آن در ادامـه تشـریح می‌شود.

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

به منظور برآورد *VTEC* از مشاهدات *GPS*، از نـرم‌افـزار *IONOLAB-TEC* استفاده شد. این نـرم‌افـزار داده‌هـای مورد نیاز از جمله فایل اطلاعات مدار ، مدل یونسفری ، فایل مربوط به *DCB* های ماهواره، *DCB* گیرنده که بـر اساس روش *IONOLAB-BIAS* محاسـبه شـده و فایـل

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-11]

[DOI: 10.61882/jgit.12.4.1]

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 *STEC* را به صورت یک فایل به فرمت متنی فراهم می‌کند.

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 می‌شود [۳۶].

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

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)
$$p_4 = p_1 - p_2 = \delta_{ion,1} - \delta_{ion,2} + c\left(\tau_1^s - \tau_2^s + \tau_1^r - \tau_2^r\right)$$

رابطه(۳)
$$L_4 = \phi_1 - \phi_2 = \delta_{ion,2} - \delta_{ion,1} + \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2 + c\left(T_1^s - T_2^s + T_1^r - T_2^r\right)$$

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 $\delta_{ion,1}$ تأخیر یونسفری دو موج $L1$ و $L2$، c سرعت نور، τ_1^s و τ_2^s و τ_2^r و τ_1^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 طول‌موج مربوط به دو موج $L1$ و $L2$ می‌باشند.

با جایگذاری پارامتر B در معادله مربوط به L_4، *STEC* به صورت رابطه (۴) قابل محاسبه است و مقدار *VTEC* نیز به صورت رابطه (۷) محاسبه می‌شود.

رابطه(۴)
$$STEC = \frac{1}{40.3}\left(\frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2}\right)\left(B + L_4 + c(bs + br)\right)$$

رابطه(۵)
$$\tau_1^s - \tau_2^s = bs$$

رابطه(۶)
$$\tau_1^r - \tau_2^r = br$$

رابطه(۷)
$$VTEC = STEC / M(\varepsilon)$$

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

در رابطه (۴)، پارامترهای bs و br به ترتیب اُریب 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 اُریب 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، *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[1] *(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

[1] *Ionopheric Pierce Point (IPP)*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-11]
[DOI: 10.61882/jgit.12.4.1]

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 اپک 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 $\Delta\mathrm{VTEC}$ در موقعیت نقاط *IPP* مطابق رابطه (۹) محاسبه شد.

$$\Delta\mathrm{VTEC} = \mathrm{VTEC}_{\mathrm{ipp_slave}} - \mathrm{VTEC}_{\mathrm{ipp_master}} \quad \text{رابطه(۹)}$$

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

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 (ده ها ثانیه) و تفکیک مکانی بالا (از چند متر تا چند ده متر) با استفاده از وسایل و تکنیک‌های موجود، معمولاً دشوار به نظر می‌آید [۱۲]. از طرف دیگر، مقدار شیفت آزیموت با استفاده از روش‌های ثبت هندسی[1] تصویر مختلط *SAR* قابل اندازه‌گیری می‌باشد. این روش‌ها شامل همبستگی دوطرفه[2][۳۹]، افزودن گوناگونی طیفی[3] *(ESD)* و تداخل‌سنجی چندروزنه‌ای *(MAI)*[4] [۹] و همچنین تکنیک تقسیم پرتو تداخل‌نما[5] *(SBI)* می‌باشند. با استفاده از نرم‌افزار *SARPROZ*[6]، مقادیر *VTEC* از مشاهدات رادار باند *L* ماهواره *ALOS2* با سنجنده *PALSAR*[7] برآورد شد. محاسبه *VTEC* در این نرم‌افزار بر مبنای یکی از روش‌های محاسبه آزیموت شیفت با عنوان روش تداخل‌سنجی چندروزنه‌ای *(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 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

[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)*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-11]
[DOI: 10.61882/jgit.12.4.1]

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 MAI (ϕ_{MAI}) بر حسب رادیان به صورت رابطه (۱۰) است [۳۴].

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

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 معمولا 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].

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

در رابطه (۱۱) d_{az} فاصله پیکسل‌ها در راستای آزیموت در تداخل‌نمای چند منظر[1]است، λ طول‌موج 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[2] $\Delta\phi_{ion}$ *(IPS)* از طریق انتگرال جابه‌جایی‌های ناشی از یونسفر در امتداد آزیموت، در جهت مدار با استفاده از رابطه (۱۲) قابل محاسبه است [۲۷]:

رابطه(۱۲)

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

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[3]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 رِنج به صورت رابطه(۱۳) قابل محاسبه می‌باشد.

رابطه(۱۳)

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

در رابطه (۱۳)، s تعداد کل پیکسل‌های معتبر در هر خط آزیموت می‌باشد. برای آن‌که 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 رِنج است. درنهایت، $\Delta\phi_{ion}$ مربوط به *IPS* با استفاده از معادلات بالا به دست می‌آید و *TEC* تفاضلی در راستای جهت خط دید ماهواره[4] با در نظر گرفتن *IPS* تخمین زده شده و معادله شیفت فاز براثر یونسفر به صورت رابطه (۱۴) محاسبه می‌شود.

رابطه(۱۴) $$\Delta TEC = -\frac{cf}{4\pi K}.\left[\Delta\phi_{ion_az} + C\right]$$

[1] *Multi Looking*
[2] *Ionospheric Phase Screen (IPS)*
[3] *Anisotropic*
[4] *Line Of Sight*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-11]
[DOI: 10.61882/jgit.12.4.1]

در رابطه (۱۴)، ثابت K برابر $40.3\ m^3/s^2$، 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 ناأریب[1]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[2]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[3]*(WAAS)* 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].

به‌طورکلی سه روش به منظور پیش‌بینی کریجینگ در نظر گرفته می‌شود که شامل کریجینگ ساده[4]، کریجینگ معمولی[5]و کریجینگ جهانی[6]می شود. در کریجینگ معمولی فرض می‌شود که واریانس ویژگی 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 کوواریانسی 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 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 حاصل‌ضرب[7] 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 پیش‌بینی 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)*
[7] *Product*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-11]
[DOI: 10.61882/jgit.12.4.1]

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 نسبی‌شان وابسته است، شکل‌گرفته است [۴۳]. تابع واریوگرام ساختار وابستگی مکانی و زمانی داده را مدل می‌کند. مرحله آنالیز واریوگرام شامل ایجاد یک واریوگرام تجربی[1] 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[2] در مجموعه داده اصلی محاسبه می‌شود.

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.

$$\gamma(h)=\frac{1}{2}E\left[\{Z(x+h)-Z(x)\}^2\right] \qquad \text{رابطه(۱۵)}$$

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 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.

۱- ناگت[3]: اگر واریوگرام تجربی در مبدأ ناپیوسته باشد $\gamma(h)\to c_0>0, |h|\to 0$ ، آنگاه ارتفاع c_0 ناگت یا اثر ناگت نامیده می‌شود، که یک مقدار بر اثر خطای اندازه‌گیری یا تغییرات میکرو مقیاس به وجود آمده را نشان می‌دهد.

۲- سیل[4]: مقدار $\gamma(\infty)=\lim_{|h|\to\infty}\gamma(h)$ سیل نامیده می‌شود.

۳- دامنه[5]: فاصله‌ای که نیم واریوگرام $\gamma(h)$ برای اولین بار از مقدار سیل جلو بزند، دامنه واریوگرام نامیده می‌شود.

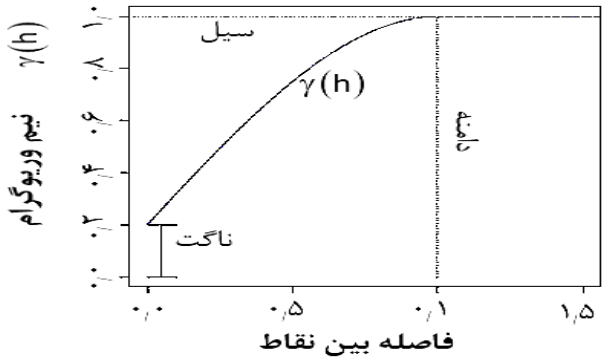
با فرض اینکه پارامتر مورد مطالعه $(Z(s,t))$ ایستای مرتبه دوم باشد؛ بدین ترتیب که برای مقدار پارامتر $Z(s,t)$ برای نقاط مشاهداتی S واقع در دامنه مکانی $D\in\mathbb{R}^d$ و در زمان t درون دامنه زمانی $T\in\mathbb{R}$، مقدار $E(Z(s,t))$ و $Var(Z(s,t))$ ثابت می‌باشند. واریوگرام‌های ارائه شده در روابط (۱۶) و (۱۷) به ترتیب واریوگرام‌های حاشیه‌ای[6] 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)

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

[1] *Experimental*
[2] *Semivariogram*
[3] *Nugget*
[4] *Sill*
[5] *Range*
[6] *Marginal Variogram*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-11]
[DOI: 10.61882/jgit.12.4.1]



شکل۱: پارامترهای واریوگرام [۳۹]

به طور مشابه برای واریوگرام زمانی نیز خواهیم داشت:

رابطه (۱۷)

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

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[1]نامیده می‌شود و از رابطه (۱۸) محاسبه می‌گردد.

رابطه (۱۸)

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

به ازای مقادیر مختلف برای S و t واریانس محاسبه شده مربوط به واریوگرام مکانی متفاوت خواهد بود و درنتیجه 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[2]بودن همبستگی زمانی و مکانی کمیت مورد نظر، با استفاده از مدل حاصل‌ضرب 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 حاصل‌ضرب کوواریانس مکانی در کوواریانس زمانی حاصل می‌شود. کوواریانس مکانی و کوواریانس زمانی هر دو ایستا[3]می‌باشند و از مدل‌های جدایی‌پذیر ایزوتروپیک[4]حاصل شده اند.

مدل حاصل‌ضرب یکی از مدل‌های پر استفاده کوواریوگرام[5]تفکیک‌پذیر می‌باشد که به طور مناسبی بر داده‌های مورد مطالعه برازش داده می‌شود [۴۸و۴۹]، با این وجود در اکثر موارد این مدل به دلیل ساده بودن روابط آن انتخاب شده است. به‌طورکلی مدل پروداکت با استفاده از ترم‌های کوواریوگرام به صورت رابطه (۱۹) تعریف می‌شود:

رابطه (۱۹)

$$C((s_i,t_i),(s_j,t_j))=C_s(s_i,t_i)C_t(s_j,t_j),$$
$$\forall s_i,s_j\in D\subset\mathbb{R}^d,\ \forall t_i,t_j\in T\subset\mathbb{R}$$

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

[1] *Empirical Variogram*
[2] *Sepratable*
[3] *Sationary*
[4] *Isotropic*
[5] *Covariogram*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-11]
[DOI: 10.61882/jgit.12.4.1]

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)

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

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 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 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 $\{Z(s,t):(s,t)D\subseteq\mathbb{R}^2\times\mathbb{R}\}$ را یک تابع تصادفی مکانی-زمانی در نظر بگیریم و فرض کنیم که مقدار تابع تصادفی $\{Z(s_1,t_1),Z(s_2,t_2),...,Z(s_n,t_n)\}$ 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 پیش‌بینی‌گر خطی به صورت رابطه (۲۱) استفاده می‌کنیم و انتظار داریم که بهترین پیش‌بینی‌گر خطی ناأریب باشد [۵۰].

رابطه(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)

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

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

با توجه به اینکه لازم است پیش‌بینی‌گر خطی ناأریب 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.

رابطه(۲۳)

$$E(Z(s_0,t_0))=m\quad\forall s_0,t_0$$

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

رابطه(۲۴)

$$E(Z(s+h_s,t+h_t)-Z(s,t))=0$$

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

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

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-11]
[DOI: 10.61882/jgit.12.4.1]

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 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 ماهواره در باند L اخذ می‌شوند که دارای طول‌موج ۲۳٫۶ سانتی‌متر و فرکانس ۱۲۵۰ مگاهرتز می‌باشد. 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 (*Muli Temporal*) *SAR* 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 تداخل‌نماها را نشان می‌دهد.

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

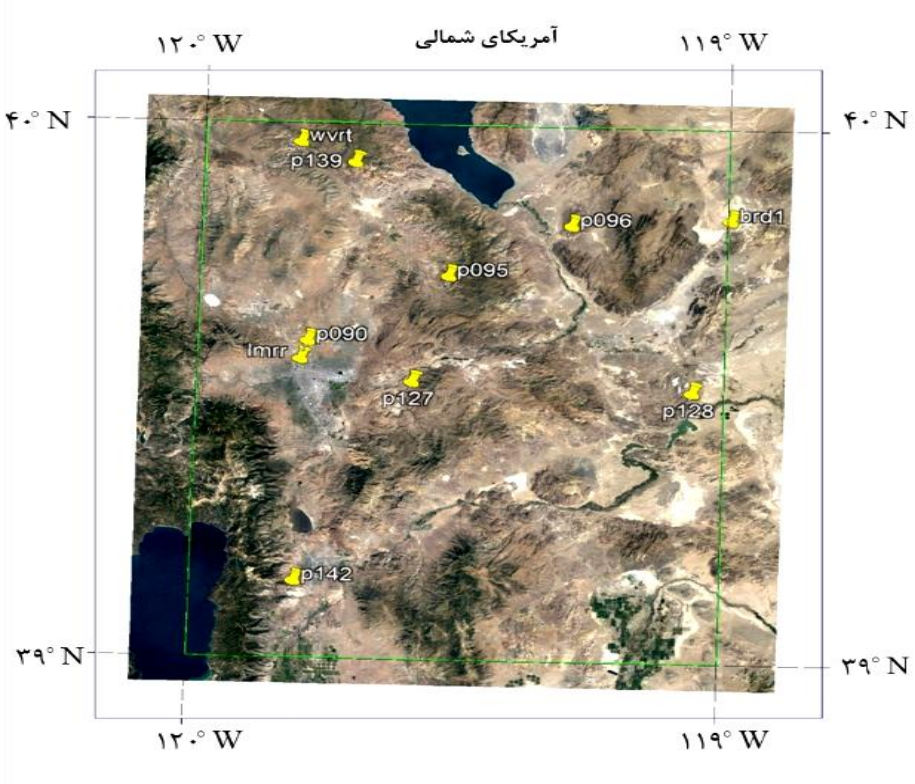
تداخل‌نما	زوج تصویر تداخل‌نما		روز از سال	*KP*	*F10.7*
۱	تصویر پایه	۲۰۱۸/۰۲/۲۷	۵۸	۴٫۳۳۳	۶۶٫۶
	تصویر پیرو	۲۰۱۸/۰۳/۱۱	۷۰	۰٫۳۳۳	۶۶٫۹
۲	تصویر پایه	۲۰۱۸/۰۳/۱۱	۷۰	۰٫۳۳۳	۶۶٫۹
	تصویر پیرو	۲۰۱۸/۰۳/۲۵	۸۴	۲٫۰۰۰	۶۸٫۰
۳	تصویر پایه	۲۰۱۸/۰۳/۲۵	۸۴	۲٫۰۰۰	۶۸٫۰
	تصویر پیرو	۲۰۱۸/۰۴/۰۹	۹۹	۲٫۰۰۰	۶۸٫۹
۴	تصویر پایه	۲۰۱۸/۰۴/۰۹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

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-11]

[DOI: 10.61882/jgit.12.4.1]

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.



شکل۲: موقعیت ایستگاه‌های *GPS* مورد استفاده در منطقه آمریکای شمالی

به منظور ارزیابی نتایج حاصل از مدل مرجع بین‌المللی یونسفر[1] *(IRI)* مورد استفاده قرار گرفت. آخرین ویرایش این مدل *IRI-2016*[2] می‌باشد و برای یک موقعیت جغرافیایی و زمان و تاریخ مشخص، پارامترهای مختلفی از قبیل درجه حرارت الکترون‌ها، دمای یون و ترکیب یونی و *TEC* را در رنج ارتفاعی ۵۰ الی ۲۰۰۰ کیلومتر محاسبه می‌کند.

۴- نتایج عددی

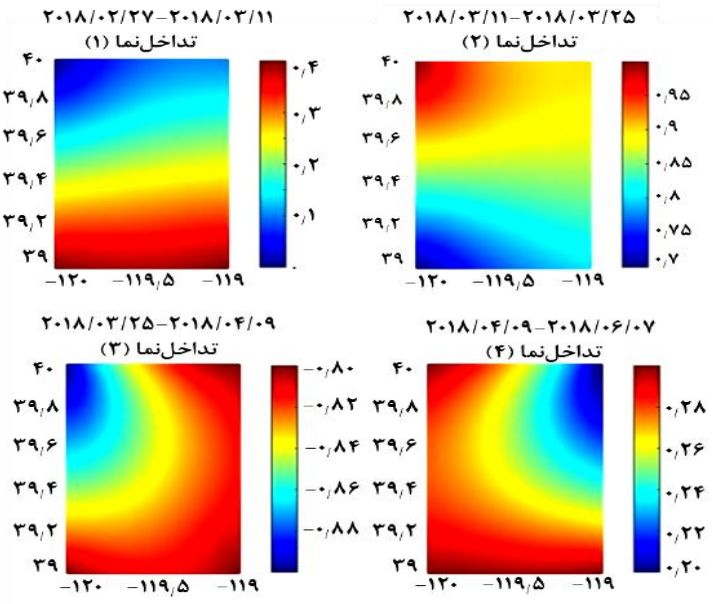
شرایط فعالیت‌های خورشیدی و ژئومغناطیسی یونسفر برای پنج روز مورد نظر بررسی شد و نتایج در جدول(۱) ارائه شده است. پارامتر *KP* به عنوان شاخص سنجش فعالیت‌های ژئومغناطیسی، در روزهای مورد مطالعه مقادیری کمتر از پنج واحد می‌باشد که نشان

[1] *International Refrence Ionosphere (IRI)*
[2] *http://irimodel.org/IRI-2016/*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-11]
[DOI: 10.61882/jgit.12.4.1]

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 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.

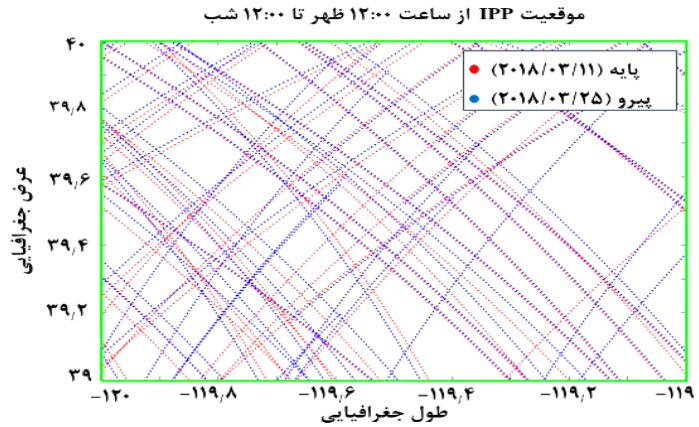


شکل ۳ : محتوای کلی الکترون تفاضلی مربوط به تداخل‌نماها بر حسب *TECU*. (تاریخ‌های درج شده به ترتیب از چپ به راست نشان-دهنده تاریخ تصویر پایه و تاریخ تصویر پیرو می‌باشند)

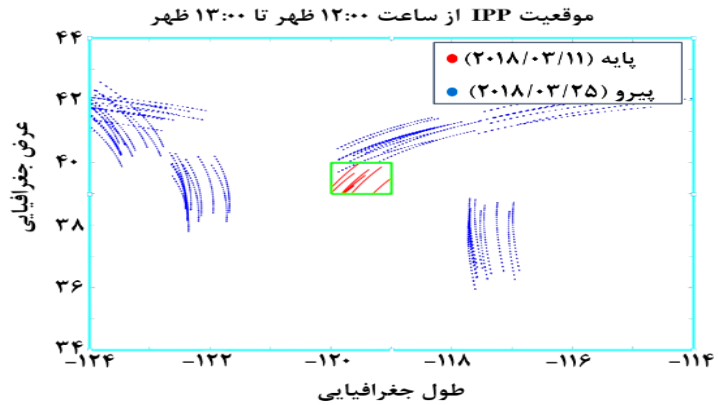
همان‌طور که در بخش قبل اشاره شد به منظور محاسبه *VTEC* تفاضلی با استفاده از مشاهدات *GPS* در موقعیت *IPP* ها درون‌یابی دوبعدی به روش *B-spline* صورت گرفت و مقادیر *VTEC* روز دوم در موقعیت *IPP* های روز اول درون‌یابی شد و سپس در همان موقعیت ها با تفاضل مقادیر *VTEC* روز دوم از روز اول مقادیر *VTEC* تفاضلی 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 ۲۰۱۸/۰۳/۱۱ 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. 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.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-11]
[DOI: 10.61882/jgit.12.4.1]



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 وسیع‌تر (محدوده آبی)

۴-۱- تلفیق داده‌ها با روش کریجینگ

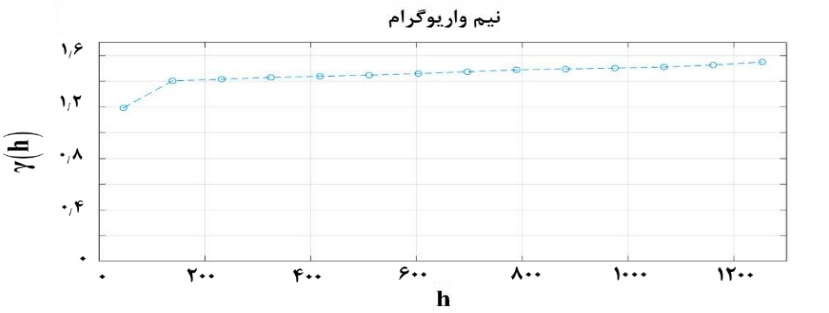
به منظور پیش‌بینی یک ساعته ΔVTEC در ساعت ۱۳ ظهر و در محدوده مورد نظر، روش پیش‌بینی کریجینگ مکانی-زمانی با استفاده از مشاهدات ΔVTEC حاصل از *GPS* به عنوان منبع مشاهداتی با تفکیک زمانی بالا و مشاهدات *InSAR* با تفکیک مکانی بالا به کار گرفته شد. با استفاده از مقادیر ΔVTEC حاصل از داده‌های *GPS*، واریوگرام 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[1] *(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 ΔVTEC حاصل از *InSAR* انتخاب شد.

تابع واریوگرام مکانی-زمانی از حاصل‌ضرب دو تابع با استفاده از مدل حاصل‌ضرب 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 می‌دهد. یک تابع

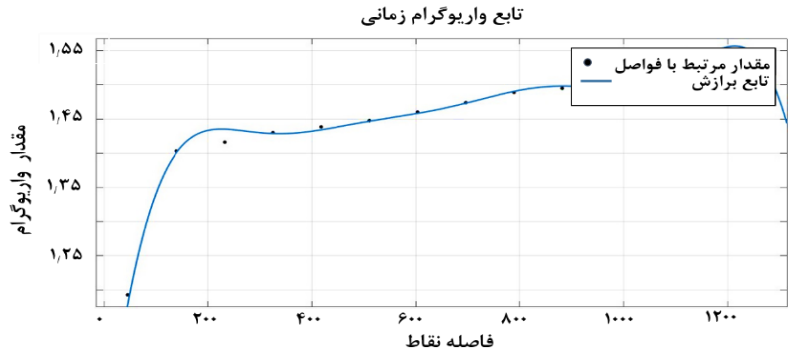
[1] *Root Mean Square Error (RMSE)*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-11]
[DOI: 10.61882/jgit.12.4.1]

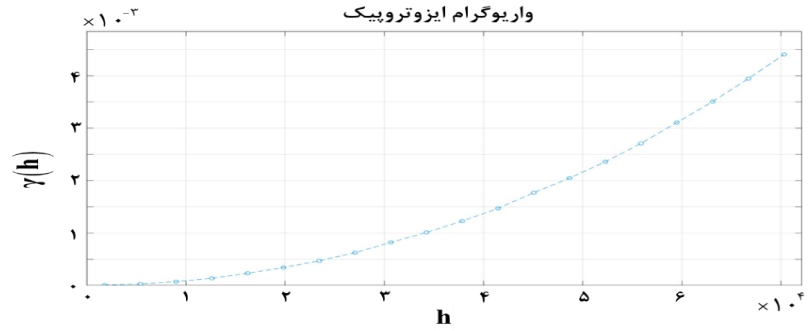
سینوسی که *RMSE* برازش آن ۰٫۲۲ *TECU* و با ضریب تعیین ۰٫۹۸ به عنوان تابع واریوگرام زمانی در نظر گرفته شد که در شکل (۷) نمایش داده شده است. شکل (۸) واریوگرام مکانی مقادیر ΔVTEC مربوط به دو روز (۲۰۱۸/۰۳/۱۱) و (۲۰۱۸/۰۳/۲۵) را نشان می‌دهد و در شکل (۹) تابع واریوگرام مکانی مربوط به مقادیر ΔVTEC دو روز (۲۰۱۸/۰۳/۱۱) و (۲۰۱۸/۰۳/۲۵) نشان داده شده است که *RMSE* برازش در آن *TECU* $1/7e^{-5}$ ضریب تعیین ۰٫۹۹ است. درنهایت با حل دستگاه معادلات کریجینگ و محاسبه ضریب لاگرانژ و ضرایب وزن، مقادیر ΔVTEC نقاط *IPP* در ساعت ۱۳ یعنی یک ساعت پس از ساعت اخذ تصویر راداری موردنظر در این مطالعه، پیش‌بینی و تخمین زده شد.



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

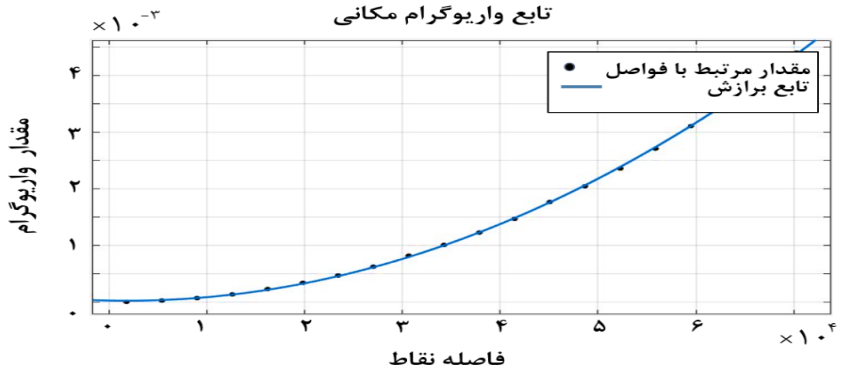


شکل۷: تابع واریوگرام زمانی مربوط به *VTEC* تفاضلی روز اول (۲۰۱۸/۰۳/۱۱) و روز دوم (۲۰۱۸/۰۳/۲۵)



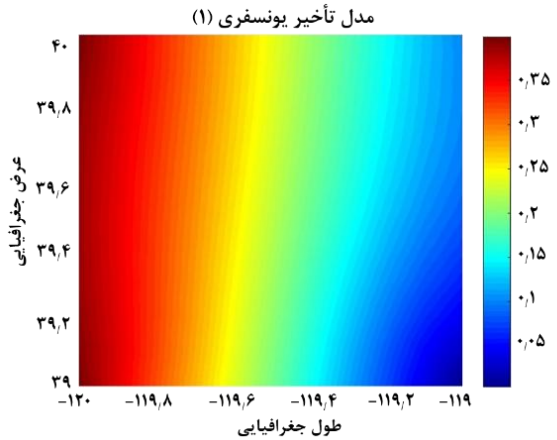
شکل۸: واریوگرام مکانی مربوط به *VTEC* تفاضلی روز اول (۲۰۱۸/۰۳/۱۱) و روز دوم (۲۰۱۸/۰۳/۲۵)

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-11]
[DOI: 10.61882/jgit.12.4.1]



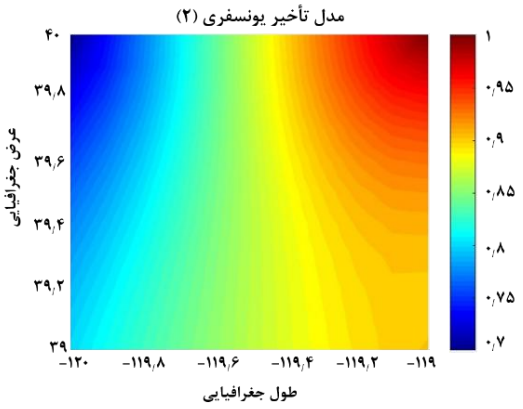
شکل۹: تابع واریوگرام مکانی مربوط به *VTEC* تفاضلی روز اول (۲۰۱۸/۰۳/۱۱) و روز دوم (۲۰۱۸/۰۳/۲۵)

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 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 ۱۳:۴۵و ۱۴:۲۰ با استفاده از روش پیش‌بینی کریجینگ برای روزهای مورد نظر به دست آمد. شکل (۱۰) نتایج حاصل از پیش‌بینی کریجینگ مکانی-زمانی در ساعت ۱۳:۴۵ برای روزهای ۲۰۱۸/۲/۲۷ و ۲۰۱۸/۳/۱۱ در محدوده مورد نظر را نشان می دهد. 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.

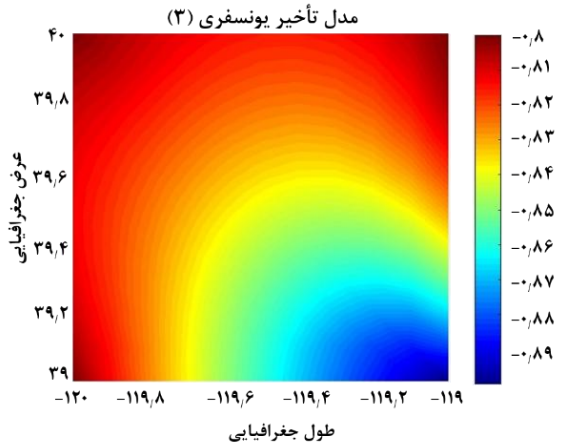


شکل۱۰: نتایج پیش‌بینی کریجینگ مکانی-زمانی مقادیر *VTEC* تفاضلی بر حسب *TECU* مربوط به روزهای (۲۰۱۸/۰۲/۲۷) و (۲۰۱۸/۰۳/۱۱) در ساعت ۱۳:۴۵

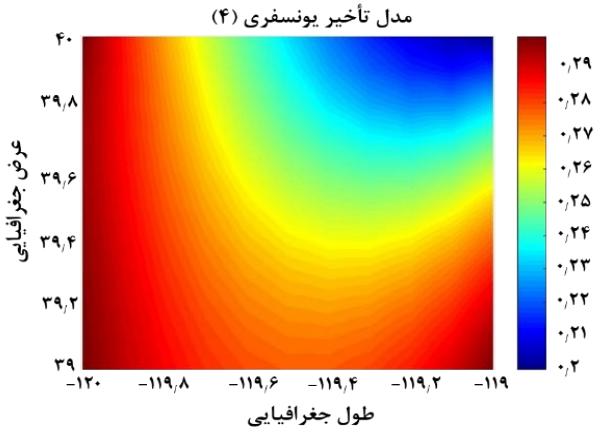
[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-11]
[DOI: 10.61882/jgit.12.4.1]



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

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-11]

[DOI: 10.61882/jgit.12.4.1]

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* ۱، روش کریجینگ دقت بهتری نشان می‌دهد. نتایج پیش‌بینی مقادیر 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 *RMSE* 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 ΔVTEC روش کریجینگ در نقاط *IPP* برای ساعت ۱۳ برابر *TECU* ۰٫۶۵ و برای ΔVTEC حاصل از مدل جهانی *IRI* برابر *TECU* ۰٫۷۵ می‌باشد. این مراحل برای تداخل‌نماهای دیگر که روز متفاوتی دارند نیز پیاده‌سازی شد. نتایج پیش‌بینی 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 *RMSE* محاسبه شده مربوط به ΔVTEC حاصل از روش پیش‌بینی کریجینگ در *IPP* برای ساعت ۱۳ برابر *TECU* ۲٫۵۴ و برای ΔVTEC حاصل از مدل *IRI* برابر *TECU* ۳٫۸۲ 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.

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

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

جدول۳: مقادیر محاسبه‌شده *VTEC* تفاضلی *IPPs* مربوط به روز (۲۰۱۸/۰۳/۲۵) و (۲۰۱۸/۰۴/۰۹)

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

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-11]
[DOI: 10.61882/jgit.12.4.1]

مقادیر *VTEC* تفاضلی برای ۹ موقعیت *IPP* واقع در منطقه موردنظر برای دو روز ۲۰۱۸/۰۶/۰۷ و ۲۰۱۸/۰۴/۰۹ در ساعت ۱۴:۲۰ نیز محاسبه 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* برابر ۷٫۵۰ *TECU* و برای ΔVTEC حاصل از مدل جهانی *IRI* برابر ۷٫۹۵ *TECU* می‌باشد. مقادیر ΔVTEC حاصل از روش کریجینگ مکانی-زمانی مربوط به ساعت ۱۳:۴۵ برای دو روز ۲۰۱۸/۰۲/۲۷ و ۲۰۱۸/۰۳/۱۱ نیز برتری این روش را نسبت به *IRI* نشان می‌دهد. نتایج *RMSE* برای روش کریجینگ و *IRI* به ترتیب ۱٫۹۱ و ۲٫۱۱ واحد *TECU* حاصل شده است. مقادیر ΔVTEC حاصل در جدول(۵) آورده شده است.

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

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

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

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

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-11]

[DOI: 10.61882/jgit.12.4.1]

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 به‌خوبی 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 قابل‌توجهی 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 وکافی 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 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 می‌شود.

۵- نتیجه‌گیری

مقادیر *VTEC* تفاضلی در موقعیت *IPP* با در نظر 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 ΔVTEC حاصل از پیش‌بینی کریجینگ مکانی-زمانی مربوط به ساعت ۱۳:۴۵ برای دو روز ۱۵۸ام و ۱۷۰ام 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 به‌روزهای ۱۷۰ام و ۱۸۴ام از سال به میزان *TECU*۰٫۶۵ و برای مدل *IRI*، ۰٫۷۵ *TECU* محاسبه شد و برای روزهای تداخل نمای سوم مربوط به روزهای ۱۸۴ام و ۱۹۹ام 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 ۱۹۹ام و ۱۵۸ام از سال می‌باشد، مقادیر *VTEC* تفاضلی در ساعت ۱۴:۲۰ محاسبه شد و مقدار *RMSE* محاسبه شده مربوط به ΔVTEC روش کریجینگ در نقاط *IPP* برابر ۷٫۵۰ *TECU* و برای ΔVTEC حاصل از مدل جهانی *IRI* برابر ۷٫۹۵ *TECU* محاسبه شد که نشان‌دهنده‌ی 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.

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.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-11]

[DOI: 10.61882/jgit.12.4.1]

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.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-11]

[DOI: 10.61882/jgit.12.4.1]

[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. 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,

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-11]

[DOI: 10.61882/jgit.12.4.1]

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 Pubtishers, 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,

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-11]

[DOI: 10.61882/jgit.12.4.1]

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.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-11]

[DOI: 10.61882/jgit.12.4.1]

K. N. TOOSI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
FACULTY OF GEODESY AND GEOMATICS ENGINEERING

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 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 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 respectivelly. 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*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-11]

[DOI: 10.61882/jgit.12.4.1]