

فیلتر سری‌های زمانی تداخل‌سنجی راداری با استفاده از آنالیز ماتریس نویز کمترین مربعات تک‌متغیره

محسن زینل پور^۱، حمید مهرابی^{۲*}، علیرضا امیری سیمکویی^۳

۱- کارشناس ارشد ژئودزی، گروه مهندسی نقشه‌برداری، دانشکده عمران و حمل و نقل، دانشگاه اصفهان

۲- استادیار گروه مهندسی نقشه‌برداری، دانشکده عمران و حمل و نقل، دانشگاه اصفهان

۳- استاد گروه مهندسی نقشه‌برداری، دانشکده عمران و حمل و نقل، دانشگاه اصفهان

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۱۰/۰۸ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۲/۱۸

چکیده

زندگی بشر همواره متأثر از حوادث طبیعی مختلف مانند زلزله، فوران آتشفشان، فرونشست و غیره می‌باشد. یکی از ابزارهای مناسب جهت بررسی و تحلیل این حوادث، تداخل‌سنجی راداری با روزه مصنوعی است. این تکنیک به عنوان یک روش ژئودتیک، با استفاده از اختلاف فاز میان تصاویر راداری، قادر به شناسایی جابه‌جایی پوسته زمین و آنالیز تغییر شکل می‌باشد. از مهم‌ترین مزایای آن می‌توان به سرعت بالای دسترسی به اطلاعات و قدرت تفکیک زمانی و مکانی بالا اشاره نمود. همانند سایر روش‌های ژئودتیک، دقت بالا در این تکنیک به مدل‌سازی آشفتگی‌ها و نویزهای موجود در مشاهدات وابسته است. علیرغم پیشرفت در دهه‌های اخیر، این آشفتگی‌ها کمتر مورد توجه قرار گرفته‌اند. منطقه مطالعاتی در این پژوهش، شمال غرب جزیره هاوایی می‌باشد. در این مطالعه فیلتر و کاهش آشفتگی‌های موجود در سری‌های زمانی بر مبنای مناسب‌ترین مدل تابعی و مدل آماری انجام می‌شود. مدل تابعی و مدل آماری مناسب با استفاده از آزمون بیشینه درست‌نمایی (MLE) تشخیص داده می‌شود. مدل‌های تابعی بررسی‌شده در این مطالعه شامل ترند، مولفه‌های متناوب و پرش‌های موجود در سری‌های زمانی می‌باشند. مدل‌های آماری نیز شامل نویز سفید، فلیکر و رندوم‌واک هستند که مولفه‌های آنها با استفاده از روش آنالیز نویز کمترین مربعات تک‌متغیره تشخیص داده می‌شوند. سری‌های زمانی با استفاده از مناسب‌ترین مدل تابعی و آماری بازتولید می‌شوند. در این مطالعه مناسب‌ترین مدل برای تمامی پیکسل‌ها، ترند خطی با حضور مولفه‌های متناوب، پرش‌ها و نویز سفید می‌باشد. پس از فیلتر سری‌های زمانی بر اساس مدل‌های تابعی و آماری مناسب، نتایج این روش و فیلترهای بالاگذر و پایین‌گذر با یکدیگر مقایسه می‌شوند. پس از اعمال روش آنالیز نویز کمترین مربعات تک‌متغیره، به طور میانگین صحت نتایج به میزان ۴۳٪ بهبود یافت درحالی که بهبود حاصل از اعمال فیلترهای بالاگذر و پایین‌گذر به طور میانگین ۲۸٪ می‌باشد.

کلید واژه‌ها: سری‌های زمانی تداخل‌سنجی راداری، آنالیز نویز کمترین مربعات تک‌متغیره، فیلترهای بالاگذر و پایین‌گذر.

* نویسنده مکاتبه کننده: اصفهان، دانشگاه اصفهان، دانشکده عمران و حمل و نقل، گروه مهندسی نقشه‌برداری.

تلفن: ۰۳۱۳۷۹۳۵۲۹۷

۱- مقدمه

امروزه با توجه به تأثیرات حوادث طبیعی بر زندگی بشر و خسارات ناشی از آن‌ها، نیاز مبرم به کسب اطلاعات در زمینه پدیده‌هایی از قبیل فرونشست، آتشفشان‌ها، رانش زمین، زلزله و ... می‌باشد. سری‌های زمانی به دلیل امکان بررسی و تحلیل تغییرات در گذر زمان و همچنین برآورد پارامترهایی همانند تغییرات سرعت و شتاب، کمک بسزایی به بررسی این پدیده‌ها می‌نمایند. امروزه تداخل‌سنجی راداری با روزنه مصنوعی ($InSAR^1$) یکی از تکنیک‌های کاربردی جهت آنالیز تغییر شکل زمین می‌باشد. از مزایای این تکنیک می‌توان به سرعت بالای دسترسی به اطلاعات، فراوانی و پراکندگی مشاهدات، عدم محدودیت در طول شبانه‌روز و ... اشاره نمود. کارایی سری‌های زمانی تداخل‌سنجی راداری وابسته به کاهش اثر نویزهای موجود در آن‌ها است [۱ و ۲] و این امر می‌تواند به افزایش دقت در برآورد میدان جابجایی کمک کند. به رغم پیشرفت‌های اخیر در سری‌های زمانی، مدل‌سازی نویزهای موجود در این تکنیک کمتر مورد توجه قرار گرفته است.

از اثرات و نویزهای موجود در هر پیکسل از تداخل‌نما می‌توان به تاخیر اتمسفری، خطای مداری، خطای بازبایی فاز، خطای ناشی از ناهمبستگی‌ها^۲، خطای باقیمانده توپوگرافی اشاره نمود. تاخیر اتمسفری همواره به عنوان یکی از منابع اصلی نویز در نتایج تصاویر راداری شناخته می‌شود. در این راستا مطالعات مختلفی به بررسی لایه‌های یونسفر و تروپوسفر پرداخته‌اند [۱، ۳ و ۴]. از آنجاکه یونسفر محیطی تجزیه‌گر^۳ دارد و به فرکانس امواج وابسته می‌باشد، بیشترین تأثیر آن بر باندهای با فرکانس پایین‌تر همانند L و S می‌باشد [۳]. راکولس و همکاران (۲۰۰۸) با بررسی تغییرات محتوای

الکترونی کلی (TEC^4) و ارتباط آن با نتایج (MAI^5)، اقدام به محاسبه تاخیر یونسفری نموده‌اند [۳]. از سوی دیگر در برخی مطالعات با استفاده از مدل‌های هواشناسی و استخراج پارامترهایی از قبیل بخار آب و دما، اقدام به مدل‌سازی تاخیر تروپوسفری نموده‌اند [۴]. منبع دیگر تأثیرگذار بر نتایج، خطای بازبایی فاز می‌باشد [۵]. یانجان و همکاران (۲۰۱۹) با استفاده از روش جست‌وجوی پل^۶، خطاهای بازبایی فاز را در بعد مکان شناسایی و حذف نموده‌اند. در این مطالعه همچنین با استفاده از بست فاز^۷ در دامنه زمان، این خطاها کاهش می‌یابند [۶]. بیگز و همکاران (۲۰۰۷) پس از بازبایی فاز با استفاده از الگوریتم سنتی برش شاخه^۸ [۷]، بر اساس شبکه‌ای از تداخل‌نماها، اقدام به کاهش خطای بازبایی فاز در دامنه زمان نموده‌اند [۸]. حسین و همکاران (۲۰۱۶) خطای بازبایی فاز را با استفاده از بست فاز در دامنه زمان تشخیص و کاسته‌اند [۹ و ۱۰]. از دیگر عوامل تأثیرگذار بر سری‌های زمانی تداخل‌سنجی راداری، نویز ناشی از ناهمبستگی‌ها می‌باشد. دقت تداخل‌نماها همواره تحت تأثیر عواملی از جمله: ناهمبستگی‌های زمانی و مکانی، تغییر زوایای تصویربرداری و ... می‌باشد. ناهمبستگی‌های زمانی، ناشی از عواملی همچون تغییر خصوصیات بازپراکنشی سطح زمین در گذر زمان می‌باشد [۲ و ۱۱]. نویز ناشی از ناهمبستگی‌ها در هر تداخل‌نما مستقل است [۱۲] و در برخی از مطالعات، از مدل نویز سفید [۱] و در برخی دیگر با ارائه سایر مدل‌های آماری، سعی در کاهش این اثر شده است [۲ و ۶]. با توجه به وجود باقیمانده خطای توپوگرافی در تداخل‌نماها، مطالعات مختلفی به بررسی این اثر

^۴ Total Electron Content^۵ Multi Aperture Interferometry^۶ Bridging^۷ Phase closure^۸ Branch cut^۱ Interferometric synthetic aperture radar^۲ Decorrelation^۳ Dispersive

راستای دید ماهواره تولید می گردند. امروزه در سری های زمانی تداخل سنجی راداری، اثرات اتمسفر برآورد و از مشاهدات کاسته می شود. باقیمانده این اثر در قالب نویز در سری های زمانی مشاهده می گردد. وجود نویزهای مختلف همواره در نتایج سری های زمانی موثر بوده است [۱۵ و ۱۶].

در الگوریتم های معمول طول مبنای کوتاه و پراکنش گرهای دائمی، نویزهای موجود پس از حذف اثرات مختلف با اعمال فیلترهای مکانی-زمانی کاهش می یابند [۱۶ و ۱۷]. از نقاط ضعف فیلترهای مکانی و زمانی می توان به موارد ذیل اشاره کرد: ۱- برخی از این فیلترها نیازمند مدل جابه جایی منطقه هستند [۱۸]. ۲- وزن دهی پیکسل ها همواره از موارد چالش برانگیز در روند این نوع از فیلترها بوده است. برای مثال در برخی از فیلترها، وزن دهی بر اساس توزیع گاوسی^۴ می باشد [۱۵]. ۳- تعیین طول پنجره فیلتر در دقت نتایج تاثیر مستقیم دارد [۱].

در سالیان اخیر با به کارگیری تصحیحات خارجی از قبیل: اطلاعات هواشناسی [۴] و مدل های آماری [۱] و [۲] سعی در کاهش اثر اتمسفر شده است. خطای برآورد شده با استفاده از اطلاعات هواشناسی وابستگی شدیدی به مشاهدات در لحظه ی تصویربرداری دارد [۶]. کاهش نویز با استفاده از مدل های آماری نیز بر اساس ویژگی های منابع موثر در تداخل نماها انجام می شود. برای مثال در برخی از مدل های آماری از همبستگی مکانی و مستقل بودن تداخل نماها در راستای کاهش نویز اتمسفر استفاده می شود [۱]. نبود اطلاعات در مورد تمامی منابع نویز و ویژگی رفتاری آنها موجب می شود برخی از این اثرات بر مشاهدات باقی بماند.

یکی از روش های آنالیز نویز سری های زمانی، آنالیز نویز کمترین مربعات می باشد [۱۸ و ۱۹]. امیری سیمکویی و همکاران (۲۰۱۳) با استفاده از آنالیز نویز چندمتغیره، سری های زمانی مختصات ایستگاه های دائمی

پرداخته اند [۱۳ و ۱۴]. سمسانوف و همکاران (۲۰۱۰) بوسیله ی روش پشته بندی این اثر را کاهش داده اند [۱۳]. از دیگر منابع خطای بررسی شده می توان به خطای مدار ماهواره اشاره نمود. هانسن (۲۰۰۱) با برآزش توابع چندجمله ای و هموارسازی مشاهدات، اقدام به کاهش این اثر نموده است [۱۴].

با پیشرفت روزافزون ماموریت های تداخل سنجی راداری و کوتاه تر شدن دوره تناوب تصاویر، امکان بررسی تغییرات تدریجی در راستای زمان با ترکیب چندین تداخل نما فراهم شده است [۲]. سری های زمانی با ترکیب چندین تداخل نما امکان غلبه بر ناهمبستگی ها و آشفته گی ها را فراهم می سازند. تولید سری های زمانی تداخل سنجی راداری در قالب حل مساله معکوس انجام می گیرد. مسئله معکوس در این مبحث، دستیابی به سری های زمانی تداخل سنجی راداری سرشکن شده با استفاده از مشاهدات تفاضلی تداخل نماها می باشد که به دو شیوه ی اصلی ۱- طول مبنای کوتاه ($SBAS^1$) ۲- پراکنش گرهای دائمی ($PS-InSAR^2$) انجام می شود [۱۰]. در این دو روش تمامی تداخل نماهای ممکن، با اعمال قیود مختلف با هدف دستیابی به سری های زمانی تولید می شوند. این قیود در روش طول مبنای کوتاه، کوتاه بودن طول مبنای مکانی و زمانی می باشد و این امر موجب تشکیل شبکه ای گسترده، شامل تصاویر پایه^۳ متعدد می شود [۱۰]. قیود اعمال شده در روش پراکنش گرهای دائمی، پایداری خصوصیات پیکسل های منتخب می باشد. در این صورت شبکه ای با یک تصویر پایه تشکیل می شود و پیکسل های منتخب در امر تولید سری های زمانی شرکت داده می شوند. با به کارگیری این دو روش، در نهایت سری های زمانی اختلاف فاز و جابه جایی در

^۱ Small Baseline Subset^۲ Persistent Scatterer InSAR^۳ Master^۴ Gaussian distribution

همزمان مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در این مطالعه به دلیل دسترس نبودن تصاویر با فواصل زمانی کوتاه و همچنین تعداد کم داده‌ها، بررسی همبستگی زمانی امکان پذیر نبوده است. در نهایت با استفاده از آماره W - $test$ بهترین مدل نویز، ترکیب نویز سفید^۴ و اتورگرسیو و مناسب‌ترین مدل تابعی، تابع درجه دو انتخاب شدند [۲۱].

با توجه به اینکه نقاط پراکنش گرهای دائمی^۵ در آنالیز سری زمانی تداخل‌سنجی راداری نقشی مشابه ایستگاه‌های دائمی $GNSS$ ایفا می‌کنند، مبحث آنالیز نویز سری زمانی در تداخل‌سنجی راداری نیز می‌تواند مشابه با $GNSS$ مطرح شود. در همین راستا همبستگی زمانی هر پیکسل و همبستگی مکانی با سایر پیکسل‌ها در راستای تصویر می‌تواند مورد بحث قرار گیرد. هدف اصلی در این مطالعه، فیلتر سری‌های زمانی تداخل‌سنجی راداری با در نظر داشتن مدل تابعی و آماری مناسب می‌باشد. این روند با برآورد مدل آماری با استفاده از آنالیز نویز کمترین مربعات تک‌متغیره انجام می‌شود.

۲- تداخل‌سنجی راداری با روزه مصنوعی

$InSAR$ تکنیکی است که با استفاده از حداقل دو تصویر در زمان‌های متفاوت، قادر به تشخیص جابه‌جایی سطح زمین می‌باشد. اندازه‌گیری‌ها در تکنیک تداخل‌سنجی راداری بر اساس تولید تداخل‌نماها انجام می‌گیرند. تداخل‌نما حاصل ضرب مزدوج مختلط دو تصویر پایه و پیرو^۶ می‌باشد که رابطه (۱) بیان‌گر آن است [۱۴]:

$$y_1 y_2^* = |y_1| |y_2| \exp(j(\varphi_1 - \varphi_2)) \quad \text{رابطه (۱)}$$

در رابطه (۱) ضرب مزدوج مختلط دو سیگنال تصاویر پایه y_1 و پیرو y_2 ، تابعی از دامنه سیگنال پایه $|y_1|$ و پیرو $|y_2|$ ، فاز تصویر پایه φ_1 و پیرو φ_2 می‌باشد. پس از تولید تداخل‌نما، هر پیکسل از آن را می‌توان به

سامانه‌های ماهواره‌ای ناوبری جهانی ($GNSS$)^۱ را به صورت همزمان مورد ارزیابی قرار داده‌اند. در این روش با برآورد همزمان مولفه‌های نویز زمانی و مکانی، امکان ساخت یک ماتریس نویز چندمتغیره واقع بینانه فراهم می‌شود [۲۰]. از نمونه‌های کاربرد آنالیز نویز کمترین مربعات، می‌توان به برآورد ماتریس نویز مناسب سری‌های ایستگاه‌های دائمی $GNSS$ اشاره نمود. سری‌های قابل استخراج از هر ایستگاه شامل سه سری زمانی در راستای مولفه‌های مختصات می‌باشد. تشخیص نویز در این سری‌ها با بررسی همبستگی زمانی در طی سری زمانی یک مولفه مختصات در هر ایستگاه و همبستگی زمانی و مکانی بین سری‌ها پیاده‌سازی می‌شود. آنالیز نویز کمترین مربعات یکی از ابزارهای مناسب جهت آنالیز نویز سری‌های زمانی با شرکت دادن این همبستگی‌ها می‌باشد [۱۸ و ۱۹]. این آنالیز به دو روش تک‌متغیره^۲ و چندمتغیره^۳ قابل انجام است. در آنالیز نویز تک‌متغیره، تنها همبستگی زمانی مشاهدات در یک سری زمانی در آنالیز نویز دخالت داده می‌شود. در این روش هر کدام از سری‌ها به صورت مستقل از همدیگر مورد تحلیل قرار می‌گیرند. این در حالی است که در آنالیز نویز چندمتغیره، علاوه بر همبستگی زمانی هر ایستگاه، همبستگی مکانی میان سایر ایستگاه‌ها نیز در محاسبات ماتریس نویز در نظر گرفته می‌شوند. همبستگی‌های زمانی و مکانی شناسایی شده بین سری‌های زمانی موجب بهبود دقت در آنالیز نویز می‌شود [۱۹ و ۲۰]. طهماسبی و همکاران (۱۳۹۴) مدل‌های نویز گاوسی، کروی، اتورگرسیو، باردا آلبرتا را با استفاده از آنالیز نویز چندمتغیره بر روی سری‌های زمانی تداخل‌سنجی راداری بررسی نموده‌اند. در این مطالعه با تشکیل مدل‌های خطی، درجه دو و هارمونیک و مدل‌های نویز، تمامی پیکسل‌ها به صورت

^۴ White noise

^۵ Persistent Scatterer

^۶ Slave

^۱ Global Navigation Satellite Systems

^۲ Univariate analysis

^۳ Multivariate analysis

مبنای مکانی و زمانی به ترتیب، طول مبنای عمود^۲ و زمان دو تصویر هر تداخل نما می باشند. محور افقی این شکل بیانگر زمان تصویربرداری و محور عمودی آن مشخص کننده طول مبنای مکانی عمود هر تصویر نسبت تصویر پایه ممتاز^۳ می باشند. نقاط گره ای با توجه به حد آستانه مکانی و زمانی مدنظر، به یکدیگر متصل می شوند. در نهایت تولید تداخل نماها بر اساس شبکه ای از تصاویر پایه و پیرو منتخب انجام می شود [۱۶].

پس از تولید تداخل نماها و حذف آشفتگی ها از قبیل خطای ناشی از بازیابی فاز [۶ و ۷] و خطای مداری ماهواره [۹ و ۱۰]، پیکسل های منتخب در فرآیند SBAS شرکت داده می شوند. ارتباط میان فاز ناشی از جابه جایی در زمان های مختلف و مقادیر مشاهداتی در هر پیکسل از تداخل نما را می توان بر اساس رابطه (۴) بیان نمود [۱۶]:

$$\delta\phi_j = \phi(t_{IE_j}) - \phi(t_{IS_j}) \quad \text{رابطه (۴)}$$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & \dots \\ 1 & 0 & -1 & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix}; A = USV^T \quad \text{رابطه (۵)}$$

$$\hat{\phi} = VS^{-1}U^T \delta\phi \quad \text{رابطه (۶)}$$

در روابط (۴) تا (۶)، ϕ نشان دهنده فاز جابه جایی در تصاویر مختلف و مولفه های سری زمانی برای هر پیکسل می باشد. بردارهای $IE_{m \times 1} = [IE_1, IE_2, \dots, IE_m]^T$ و $IS_{m \times 1} = [IS_1, IS_2, \dots, IS_m]^T$ به ترتیب تصاویر پایه و پیرو متناظر در هر تداخل نما می باشند. بردارهای $\phi_{m \times 1} = [\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_m]^T$ و $\delta\phi_{m \times 1} = [\delta\phi_1, \delta\phi_2, \dots, \delta\phi_m]^T$ به ترتیب بیانگر فاز یک پیکسل در تداخل نماها و تصاویر می باشند.

صورت رابطه (۲) بیان نمود [۱۴ و ۲۲]:

$$\Delta\phi = -\frac{4\pi(r_m - r_s)}{\lambda} + (\varepsilon_m - \varepsilon_s) \quad \text{رابطه (۲)}$$

در رابطه (۲) r_s و r_m فواصل سنسور ماهواره تا پیکسل های تصاویر پایه و پیرو و λ طول موج رادیویی می باشند. ε_s و ε_m فاز ناشی از خصوصیات بازپراکنش گر ها در تصاویر پایه و پیرو هستند که با فرض ثابت بودن در زمان های تصویربرداری، اختلاف آن ها صفر است. منابع تاثیرگذار در تداخل نماهای نهایی بر اساس رابطه (۳)، به شکل زیر مدل سازی می شوند. در این رابطه فاز مشاهداتی در هر پیکسل از تداخل نمای تفاضلی، عبارت است از [۱۲]:

رابطه (۳)

$$\Delta\phi_{obs} = \Delta\phi_{disp} + \Delta\phi_{top_res} + \Delta\phi_{atm} + \Delta\phi_{orb} + \Delta\phi_{unw_e} + \Delta\phi_{dec}$$

طبق رابطه (۳) اختلاف فاز مشاهداتی در هر پیکسل از تداخل نمای تفاضلی عبارت است از: مجموع اختلاف فاز ناشی از جابه جایی $\Delta\phi_{disp}$ ، اختلاف فاز ناشی از اثر باقیمانده توپوگرافی $\Delta\phi_{top_res}$ ، اختلاف فاز ناشی از اثر اتمسفر $\Delta\phi_{atm}$ ، اختلاف فاز ناشی از خطای مدار ماهواره $\Delta\phi_{orb}$ ، اختلاف فاز ناشی از خطای بازیابی فاز^۱ $\Delta\phi_{unw_e}$ و اختلاف فاز ناشی از نویز ناهمبستگی ها $\Delta\phi_{dec}$.

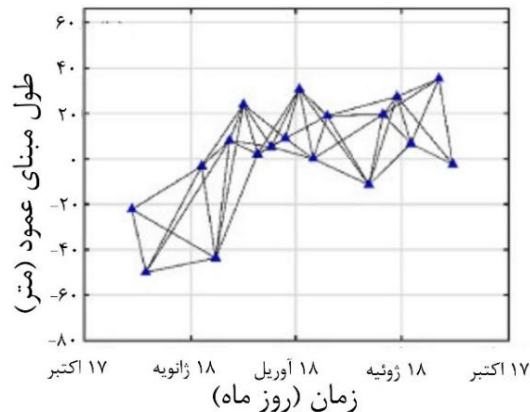
۲-۱- الگوریتم طول مبنای کوتاه (SBAS)

تکنیک SBAS یکی از روش های تولید سری های زمانی تداخل سنجی راداری، جهت رصد تغییر شکل سطح زمین در گذر زمان می باشد. در این تکنیک به منظور کاهش ناهمبستگی های مکانی و زمانی، تداخل نماهای تفاضلی مناسب با یکدیگر ترکیب می شوند [۱۶]. پیش از تولید تداخل نماها جهت انجام فرآیند SBAS، ابتدا می بایست تصاویر پایه و پیرو هر تداخل نما مشخص شوند. به همین منظور ابتدا نموداری از تصویر با توجه به طول مبنای مکانی و زمانی آن ترسیم می شود (مطابق شکل (۱)). در این روش منظور از طول

^۲ Perpendicular baseline

^۳ Super master

^۱ Phase unwrapping



شکل ۱: طول مبنای مکانی و زمانی هر تصویر [۲۳]

روزنه مصنوعی (SAR^2) استفاده می‌شود. با استفاده از رابطه (۷) می‌توان نتایج بدست آمده از داده‌های $GNSS$ را در راستای دید ماهواره تصویر نمود [۲۴].

در رابطه (۷)، U_u جابه‌جایی در راستای ارتفاعی، U_n جابه‌جایی در راستای شمالی جنوبی و U_e جابه‌جایی در راستای شرقی غربی است. مولفه‌های θ_{inc} ، α و δ_{LOS} به ترتیب زوایای فرود، آزمون و خطا در راستای دید ماهواره می‌باشند (مطابق شکل (۲)).

رابطه (۷)

$$d_{LOS} = \sin(\theta_{inc}) [U_n \sin(\alpha) + U_e \cos(\alpha)] + U_u \cos(\theta_{inc}) + \delta_{LOS}$$

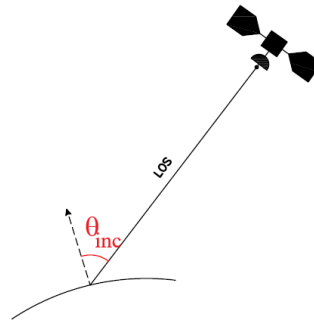
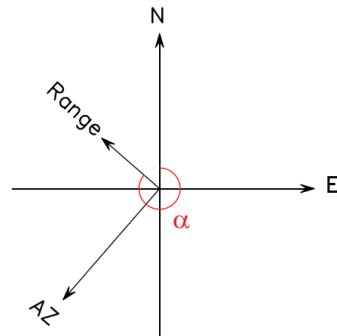
m و n مشخص‌کننده تعداد تداخل‌ناها و تصاویر و $j = [1, 2, \dots, n]$ می‌باشند. با نوشتن رابطه (۴) برای تمامی تداخل‌ناها، ماتریس طرح $A_{m \times n}$ مطابق رابطه (۵) ساخته می‌شود. وارون ماتریس $A_{m \times n}$ از روش تجزیه مقدار تکین (SVD^1) بدست می‌آید. در نهایت $\hat{\phi}$ مطابق رابطه (۶) برآورد می‌گردد. در روابط (۵) و (۶)، U و V ماتریس‌های متعامد و S ماتریسی قطری است که عناصر آن، مقادیر منفرد ماتریس $A_{m \times n}$ می‌باشند. پس از تولید سری‌های زمانی می‌توان با مدل‌سازی مولفه‌های سری زمانی توسط معادله درجه دو و اضافه نمودن مولفه باقیمانده‌ی توپوگرافی، آشفتگی‌های ناشی از اثر باقیمانده توپوگرافی را کاهش داد. همچنین باقیمانده سایر آشفتگی‌ها و اثر اتمسفر توسط فیلترهای مکانی و زمانی حذف می‌گردند [۱۶].

۲-۲- اعتبار سنجی به کمک ایستگاه‌های دائمی $GNSS$

از آنجایی که در تکنیک $InSAR$ ، برآورد جابه‌جایی و تغییر شکل در راستای دید ماهواره انجام می‌شود، امکان مقایسه‌ی مستقیم نتایج این تکنیک و نتایج ایستگاه‌های دائمی $GNSS$ وجود ندارد. به همین منظور از تصویر نتایج $GNSS$ در راستای دید ماهواره راداری با

^۲ Synthetic Aperture Radar

^۱ Singular Value Decomposition



شکل ۲: آزمون راستای دید ماهواره SAR و زاویه فرود در مدار پایین گذر

تابعی ست که با توصیف حرکت نسبی مشاهدات سری زمانی، به تمام مشاهدات برازش داده می شود. رابطه (۹) بیان گر تابعی چند جمله ای جهت مدل سازی ترند می باشد [۲۶]:

$$x_{trend} = \sum_{i=1}^{n_p+1} P_i (t - t_R)^{i-1} \quad \text{رابطه (۹)}$$

مولفه x_{jumps} نقش مدل سازی حرکات تند را در سری های زمانی برعهده دارد. مطابق شکل (۳) با تعریف تابع یک پله ای هویساید^۲ $H(t - t_j)$ در زمان معلوم t_j ، این حرکات توصیف می گردند. پرش ها می توانند از نوع طبیعی و غیر طبیعی باشند. پرش های طبیعی ناشی از عواملی همانند لرزه ها، حرکات پوسته زمین و ... و پرش های غیرطبیعی ناشی از عواملی همانند تغییرات آنتن GNSS در سری های زمانی GNSS، خطاهای انسانی و ... می باشد [۲۷ و ۲۸]. پرش های موجود در داده ها را می توان به صورت رابطه (۱۰) بیان نمود [۲۶]:

$$x_{jumps} = \sum_{j=1}^{n_j} b_j H(t - t_j) \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

مولفه سوم x_{cycles} می باشد که شامل مولفه های متناوب و فصلی است. جهت مدل سازی این حرکات، می توان از تابع هارمونیک استفاده نمود [۱۹ و ۲۶].

۳- آنالیز نوین کمترین مربعات تک متغیره

مدل ریاضی مشاهدات را می توان به صورت ترکیبی از مدل تابعی و مدل آماری بیان نمود [۲۵].

۳-۱- مدل تابعی

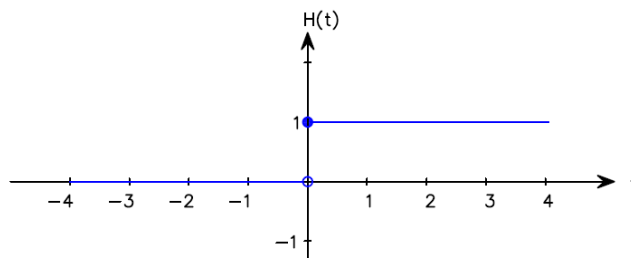
مدل تابعی مجموعه ای از معادلات می باشد که ارتباط میان مشاهدات و مجهولات را بیان می نماید. یکی از انواع مدل های تابعی جهت توصیف سری های زمانی، مدل خط سیر^۱ می باشد. این مدل از مجموع ترند، پرش و حرکات تناوبی تشکیل می شود. با تعریف ترند x_{trend} سعی در توصیف حرکات نسبی سری زمانی می شود. بسته به تغییرات سری زمانی و با توجه به منطقه مورد مطالعه و مشاهدات، می توان از توابع خطی و غیرخطی جهت مدل سازی این مولفه استفاده نمود. مولفه x_{jumps} نقش توصیف پرش ها و تغییرات تند موجود در مدل را برعهده دارند. دیگر مولفه حاضر، x_{cycles} می باشد که بیان گر حرکات متناوب و فصلی است. در کنار مولفه های مذکور مولفه خطا e موجود در سری زمانی نیز حاضر می باشد. برای درک بیشتر این مدل، به بررسی مولفه های مذکور در رابطه (۸) پرداخته می شود [۲۶]:

$$x(t) = x_{trend} + x_{jumps} + x_{cycles} + e \quad \text{رابطه (۸)}$$

مولفه x_{trend} نقش مدل سازی ترند را بیان می کند و

^۲ Heaviside

^۱ Trajectory



شکل ۳: تابع هویساید

قسمت معلوم ماتریس واریانس کواریانس، ماتریس کوفاکتور و مولفه‌های ماتریس واریانس کواریانس می‌باشند. در این رابطه p تعداد مولفه‌های واریانس (کواریانس) می‌باشد. جهت ساخت ماتریس‌های کوفاکتور، از قانون توان^۱ استفاده می‌شود.

۳-۳- قانون توان

قانون توان یکی از انواع مدل‌های آماری معمول برای سیگنال‌های ژئوفیزیکی، با امکان حضور نویز می‌باشد. قانون توان بر اساس رفتار یک بعدی زمان مطابق رابطه (۱۵) بیان می‌شود [۱۸ و ۳۰]:

$$P_y(f) = P_0 \left(\frac{f}{f_0} \right)^k \quad \text{رابطه (۱۵)}$$

در رابطه (۱۵) توان طیفی^۲ $P_y(f)$ بر اساس فرکانس زمانی f و ضرایب نرمال‌کننده f و P تعریف می‌شود. در این رابطه k ضریب طیفی ست و عموماً در بازه $[-۱, ۱]$ می‌باشد. حالات خاص در این مدل، مقادیر صحیح برای ضریب طیفی k است. در این موارد با قرار دادن $k=۰$ نویز سفید کلاسیک^۳، $k=-۱$ نویز فلیکر^۴ و $k=-۲$ نویز رندوم واک^۵، تولید می‌شود [۱۹ و ۳۰]. جهت مدل‌سازی نویز سفید می‌توان از ماتریس همبستگی $Q_w = I_{m \times m}$ استفاده نمود. جهت مدل‌سازی ماتریس

مطابق رابطه (۱۱)، این تابع متشکل از جملات و ضرایب فوریه می‌باشد و با توجه به مقدار بسامد زاویه‌ای ω_k ، این مولفه می‌تواند بیان‌گر سیگنال‌هایی با فرکانس‌های متفاوت اعم از سالانه و نیم‌سالانه باشد [۲۶]:

$$x_{cycles} = \sum_{k=1}^{n_f} [s_k \sin(\omega_k t) + c_k \cos(\omega_k t)] \quad \text{رابطه (۱۱)}$$

$$\omega_k = \frac{2\pi}{\tau_k} \quad \text{رابطه (۱۲)}$$

$$\tau_k = \frac{1}{k} \quad \text{رابطه (۱۳)}$$

در رابطه (۱۱) s_k و c_k ضرایب فوریه سری فوریه و n_f تعداد فرکانس‌های حرکات متناوب می‌باشند. در روابط (۱۲) و (۱۳)، k و τ_k به ترتیب بیانگر فرکانس و دوره تناوب متناظر آن هستند. برای مثال بسامد زاویه‌ای فرکانس‌های سالانه و نیم‌سالانه به ترتیب برابر با $\omega_1 = 2\pi$ و $\omega_2 = 4\pi$ هستند. مولفه‌های فصلی سری‌های زمانی ناشی از منابع ژئوفیزیکی و خطاهای سیستماتیک قابل مدل می‌باشند [۲۹].

۳-۲- مدل آماری

تعیین واریانس (کواریانس) و وزن دهی مشاهدات در قالب مدل آماری بیان می‌شود. این مدل به منظور توصیف مقادیر مدل‌نشده توسط مدل تابعی تعریف می‌شود. به کمک آنالیز نویز کمترین مربعات می‌توان مدل آماری را تشخیص داد. بر این اساس مدل آماری مطابق رابطه (۱۴) نوشته می‌شود [۲۰]:

$$D(\underline{y}) = Q_y = Q_0 + \sum_{k=1}^p \sigma_k Q_k \quad \text{رابطه (۱۴)}$$

در رابطه (۱۴)، Q ، Q_k و σ_k به ترتیب

^۱ Power law

^۲ Power spectrum

^۳ Classic white noise

^۴ Flicker noise

^۵ Random walk noise

$$n_{ij} = \frac{1}{2} \text{tr}(Q_j Q_y^{-1} P_A^+ Q_i Q_y^{-1} P_A^+) \quad \text{رابطه (۱۹)}$$

$$l_i = \frac{1}{2} \hat{e}^T Q_y^{-1} Q_i Q_y^{-1} \hat{e} \quad \text{رابطه (۲۰)}$$

$$P_A^+ = I - A(A^T Q_y^{-1} A)^{-1} A^T Q_y^{-1} \quad \text{رابطه (۲۱)}$$

در روابط (۱۹) تا (۲۱)، i و j مولفه های سطری و ستونی P_A^+ ، $i, j = 1, 2, \dots, p$ بردار باقیمانده های ظاهری، تصویرگر قائم، A ماتریس طرح و Q ماتریس واریانس کواریانس می باشد. در نهایت ماتریس واریانس کواریانس مولفه های برآورد شده برابر با $C_{\hat{\theta}} = N^{-1}$ می باشد.

۳-۵- آزمون بیشینه درست نمایی (MLE^2)

یکی از روش های موجود جهت انتخاب مناسب ترین مدل مشاهداتی، آزمون MLE می باشد. بر این اساس، تابع درست نمایی^۳ مناسب ترین مدل، دارای مقدار بیشینه است. با فرض نرمال بودن تابع چگالی احتمال برآورد درست نمایی به صورت رابطه (۲۲) است [۳۱]:

رابطه (۲۲)

$$\ln L(y; x, \sigma) = -\frac{m}{2} \ln 2\pi - \frac{1}{2} \ln \det(Q_y) - \frac{1}{2} \hat{e}^T Q_y^{-1} \hat{e}$$

در رابطه (۲۲)، m تعداد مشاهدات سری زمانی، \hat{e} بردار باقیمانده های برآورد شده و Q_y ماتریس واریانس کواریانس می باشد که در این مطالعه ماتریس نويز برآورد شده می باشد.

۴- پیاده سازی و نتایج

منطقه مطالعاتی در این مطالعه، شمال غربی جزیره هاوایی می باشد. این جزیره یکی از زلزله خیزترین مناطق جهان می باشد. در این منطقه سالانه به طور متوسط هزاران زمین لرزه رخ می دهد. بزرگای برخی از این زلزله ها به قدری کوچک می باشد که تنها توسط لرزه نگارها و ابزار دقیق قابل اندازه گیری هستند. طبق اطلاعات زمین لرزه نگاری از سال ۱۸۲۳ میلادی تاکنون به طور متوسط سالانه ۱۰۰ زمین لرزه به بزرگای حدود

کوفاکتور نويز فلیکر می توان از رابطه (۱۶) استفاده نمود [۱۸]:

رابطه (۱۶)

$$Q_{ij}^f = \begin{cases} \frac{9}{8} & \tau \neq 0 \\ \frac{9}{8} \left(1 - \frac{\log \tau + 2}{24} \right) & \tau = 0 \end{cases}$$

در رابطه (۱۶) Q_{ij}^f مولفه سطر i ام و ستون j ام ماتریس کوفاکتور نويز فلیکر، i و j مولفه های سری و $\tau = |t_i - t_j|$ می باشد. جهت مدل سازی ماتریس کوفاکتور نويز رندوم واک از رابطه (۱۷) استفاده می شود [۱۸]:

رابطه (۱۷)

$$Q_{rw} = f_s^{-1} \begin{bmatrix} 1 & \dots & \dots & \dots & 1 \\ \vdots & 2 & \dots & \dots & 2 \\ \vdots & \vdots & 3 & \dots & 3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & 2 & 3 & \dots & m \end{bmatrix} f_s = \frac{m-1}{T}$$

در رابطه (۱۷) m تعداد مولفه های سری زمانی، f_s فرکانس نمونه برداری و T بازه زمانی نمونه برداری بر حسب سال می باشند.

۳-۴- برآورد مولفه های ماتریس واریانس کواریانس با استفاده از برآورد مولفه واریانس کمترین مربعات ($LS-VCE^1$)

پس از ساخت ماتریس کوفاکتور نويز مطابق بخش ۳-۳ و جایگذاری در رابطه (۱۴)، می بایست \hat{e} را با استفاده از روش $LS-VCE$ مطابق رابطه (۱۸) برآورد نمود [۱۸] و [۳۱]:

$$\hat{e} = N^{-1} L \quad \text{رابطه (۱۸)}$$

در رابطه (۱۸)، $N_{p \times p}$ ماتریس نرمال و L بردار مشاهدات می باشند که عناصر آن از روابط (۱۹) تا (۲۱) بدست می آیند:

² Maximum Likelihood Estimation

^۳ Likelihood

¹ Least Squares Variance Component Estimation

۳، ۱۰ زمین لرزه به بزرگای حدود ۴ و ۱ زمین لرزه به بزرگای حدود ۵ رخ داده است. علاوه بر این اطلاعات هر ۱۰ سال یک زمین لرزه به بزرگای حدود ۶ و هر ۱۰۰ سال یک زمین لرزه به بزرگای ۷ رخ داده است. همچنین بیشترین میزان رخداد زلزله در مناطق جنوبی این جزیره می باشد [۳۲].

۴-۱- پردازش های سری های زمانی تداخل سنجی راداری

داده های مورد استفاده در این مطالعه، تصویر پایین گذر^۱ ماهواره ی سنتینل ۱^۲ و ۱B می باشد. شکل (۴) نمایانگر موقعیت منطقه نسبت به تصویر ماهواره سنتینل ۱ می باشد. اندازه ی تصویر پردازش شده ۵۲۱×۵۰۱ پیکسل (آزیموت × رنج) می باشد. پردازش های تولید سری های زمانی به روش طول مبنای کوتاه جدید (NSBAS^۳) و با استفاده از نرم افزار لیکسباس^۴ انجام شده است. همچنین پردازش های مربوط به آنالیز نويز کمترین مربعات در محیط پایتون انجام شده است.

در نرم افزار لیکسباس با استفاده از تداخل نماهای از پیش تولید شده، امکان تولید سری های زمانی بر اساس الگوریتم NSBAS مهیا شده است. همچنین جهت جلوگیری از اختلال در روند بازیابی فاز، به این تداخل نماها ضریب چند منظری^۵ با نسبت برد به آزیموت ۲۰ به ۴ و فیلتر گاما^۶ اعمال گردیده است [۳۴]. در این مطالعه فرآیند NSBAS با استفاده از ۱۳۹۴ تداخل نما متشکل از ۳۰۰ تصویر در بازه ی زمانی ۲۰۱۵/۱۱/۱۱ الی ۲۰۲۲/۰۶/۰۷ پیاده سازی شده است.

با تعریف حد آستانه مکانی و زمانی، شبکه ی تداخل نماها مطابق پیوست (۱) ترسیم می شود. در این شبکه، تصویر پایه ی ممتاز، تصویر ۲۰۱۵/۱۱/۱۱ می باشد. در نرم افزار لیکسباس تصحیحات اتمسفری با استفاده از مدل های خدمات برخط عمومی تصحیح اتمسفری (GACOS^۷) اعمال می شود [۳۴]. این فرآیند با برآورد تاخیر تروپوسفر در زمان های تصویربرداری و محاسبه ی تاخیر فاز در هر تصویر انجام می شود. در شکل (۵) نمونه هایی از تصحیحات مدل اتمسفری بر تداخل نماها در این مطالعه قابل نمایش می باشد. در شکل (۵-الف) تداخل نمای تصحیح نشده و شکل (۵-ب) تداخل نمای تصحیح شده نمایش داده شده اند. بازه های جابه جایی در تداخل نماهای تصحیح نشده و تصحیح شده به ترتیب برابر [۸، -۸] و [۱۶، -۲/۵] میلی متر می باشند.

پس از حذف اثر اتمسفر به روش مذکور، مسئله معکوس با استفاده از تداخل نماهای تصحیح شده حل می شود. پس از تولید سری های زمانی، از فیلترهای بالاگذر و پایین گذر جهت بهبود نتایج سری های زمانی استفاده می گردد. نتایج NSBAS مطابق شکل (۶) می باشد. این شکل بیان گر سرعت متوسط جابه جایی از تاریخ ۲۰۱۵/۱۱/۱۱ الی ۲۰۲۲/۰۶/۰۷ می باشد. سرعت متوسط جابه جایی در این منطقه در بازه ی [۱۶، -۶۲] میلی متر در سال قرار دارد و در شکل زیر، جهت نمایش مناسب آن در بازه [۲/۵، -۱۸/۵] میلی متر در سال محدود شده است.

^۱ Descending

^۲ Sentinel

^۳ New Small Baseline Subset

^۴ LiCSBAS

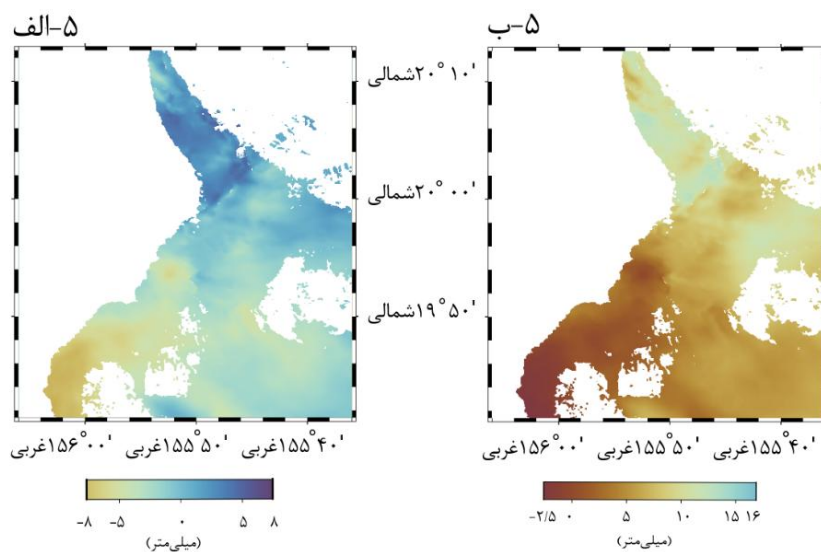
^۵ Multi looking

^۶ GAMMA

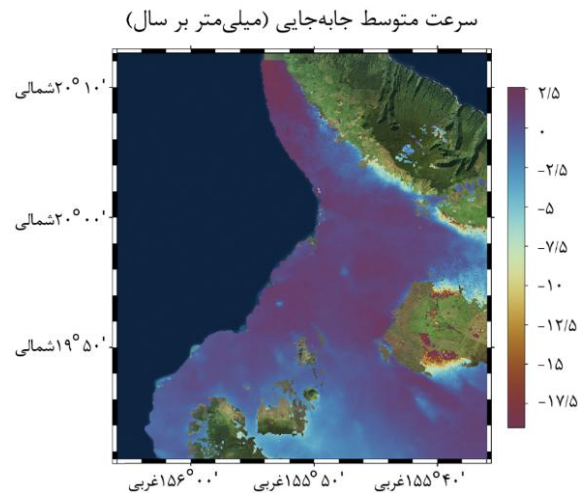
^۷ Generic Atmospheric Correction Online Service



شکل ۴: موقعیت منطقه مطالعاتی و ایستگاه های GNSS [۳۳]



شکل ۵: تاثیر تصحیح اتمسفری بر تداخل نمای حاصل از دو تصویر ۲۰۱۵/۱۲/۰۵ و ۲۰۱۵/۱۱/۱۱. شکل (الف-۵) تداخل نمای تصحیح نشده و شکل (ب-۵) تداخل نمای تصحیح شده توسط مدل اتمسفری GACOS



شکل ۶: سرعت متوسط جابه‌جایی منطقه

۲-۴- تصحیح با استفاده از آنالیز نویز کمترین

مربعات تک‌متغیره

پس از تولید سری‌های زمانی جابه‌جایی در راستای دید ماهواره SAR، مدل‌های تابعی و آماری برای هر سری زمانی ساخته می‌شوند. جهت مدل‌سازی مطلوب

مشاهدات، نیاز به داشتن همزمان مدل تابعی و آماری مناسب می‌باشد. در این مطالعه مدل‌های تابعی بررسی شده مطابق روابط (۲۳) تا (۲۶) شامل ترکیب ترند خطی و درجه دو، تابع هویساید و توابع هارمونیک می‌باشند.

$$\begin{aligned} \text{رابطه (۲۳)} \quad Y_i &= P_1 + P_2(t_i) + \sum_{j=1}^{n_j} b_j H(t_i - t_j) + \sum_{k=1}^2 [s_k \sin(2k\pi t_i) + c_k \cos(2k\pi t_i)] + e \\ \text{رابطه (۲۴)} \quad Y_i &= P_1 + P_2(t_i) + P_3(t_i)^2 + \sum_{j=1}^{n_j} b_j H(t_i - t_j) + \sum_{k=1}^2 [s_k \sin(2k\pi t_i) + c_k \cos(2k\pi t_i)] + e \\ \text{رابطه (۲۵)} \quad Y_i &= P_1 + P_2(t_i) + \sum_{k=1}^2 [s_k \sin(2k\pi t_i) + c_k \cos(2k\pi t_i)] + e \\ \text{رابطه (۲۶)} \quad Y_i &= P_1 + P_2(t_i) + P_3(t_i)^2 + \sum_{k=1}^2 [s_k \sin(2k\pi t_i) + c_k \cos(2k\pi t_i)] + e \end{aligned}$$

روابط فوق ترکیبی از ترند خطی و درجه دو، تابع هویساید، مولفه‌های متناوب و باقیمانده‌ها می‌باشند. رابطه (۲۳) و (۲۴) نمایانگر ترند خطی و درجه دو به همراه تابع هویساید و مولفه‌های متناوب می‌باشند. در رابطه (۲۵) و (۲۶) ترند خطی و درجه دو به همراه مولفه‌های متناوب حضور دارند و تابع هویساید در این مدل‌ها شرکت داده نشده است. با قرار دادن $t_R = 0$ و $n_p = 0, 1$ در رابطه (۹)، ترند خطی و درجه دو سری‌های زمانی برای هر مشاهده مدل‌سازی می‌شود.

پرش‌ها در این مطالعه با در اختیار داشتن زمان زلزله از طریق داده‌های زمین‌لرزه‌نگاری مطابق پیوست (۲) مدل‌سازی شده‌اند [۳۵]. تابع یک‌پله‌ای هویساید جهت مدل‌سازی این مولفه در زمان‌های قبل از وقوع زلزله برابر صفر و زمان‌های پس از زلزله برابر یک می‌باشد. مطالعات پیشین در زمینه سری‌های زمانی GNSS و تداخل‌سنجی راداری نشان‌دهنده وجود عوامل ژئوفیزیکی در مولفه‌های متناوب و فصلی می‌باشد. مطالعات پیشین در زمینه سری‌های زمانی GNSS

ایستگاه $GNSS$ در راستای دید ماهواره سنیتیل ۱ تصویر شوند. داده های $GNSS$ مورد استفاده، حل نهایی هستند و به دلایل مختلف از قبیل قطع شدن ارتباط ماهواره و گیرنده دارای پیوستگی زمانی نمی باشند [۳۸]. با فرض عاری بودن این نتایج از خطا، تصحیحات انجام شده در تکنیک $SBAS$ مورد ارزیابی قرار می گیرند. جدول (۱) به موقعیت ایستگاه های $GNSS$ اشاره می نماید.

زاویه فرود و آزمون متوسط ماهواره در منطقه مطالعاتی به ترتیب برابر $۳۳/۹۲۸^{\circ}$ و $۱۹۰/۷۹۸۹^{\circ}$ می باشند. با استفاده از رابطه (۷)، سری های زمانی $GNSS$ در راستای دید ماهواره سنیتیل تصویر می شوند. مطابق اشکال (۷) الی (۱۱)، نقاط قرمز رنگ نتایج $GNSS$ در راستای دید ماهواره، نقاط آبی رنگ نتایج $SBAS$ با تصحیح مدل اتمسفری و فیلترهای بالاگذر و پایین گذر، نقاط سبز رنگ نتایج فیلتر نتایج با استفاده از ماتریس نویز حاصل از آنالیز نویز کمترین مربعات تک متغیره و نقاط مشکی رنگ نتایج بدست آمده پیش از اعمال فیلترهای بالاگذر و پایین گذر می باشند. همچنین در این اشکال، رگرسیون خطی جهت نمایش روند نسبی هر روش ترسیم شده است. در اشکال (۸)، (۹) و (۱۱) که به ترتیب بیان گر رفتار ایستگاه های $MLAN$ ، $ERL2$ و $CHRS$ هستند، رگرسیون خطی، نشان دهنده نزدیک بودن روند نسبی نتایج روش های آنالیز نویز کمترین مربعات و فیلترهای بالاگذر و پایین گذر است.

در مقابل با بررسی شکل (۷) که نشان دهنده رفتار ایستگاه $MAHU$ است، مشاهده می شود که رگرسیون خطی در دو حالت قبل و بعد از فیلترهای بالاگذر و پایین گذر از نتایج متناظر در حالت آنالیز نویز کمترین مربعات تک متغیره به نتایج ایستگاه های $GNSS$ نزدیک تر است. با این وجود مطابق جدول (۲) ریشه میانگین مربعات خطا ($RMSE$) آنالیز نویز کمترین مربعات تک متغیره بهتر از دو حالت ذکر شده است. با توجه به نکات ذکر شده می توان به این نتیجه رسید که

بیانگر وجود مولفه های سالانه و نیم سالانه در این مشاهدات دارند [۲۰]. همچنین مطابق مطالعات انجام شده در زمینه سری های زمانی تداخل سنجی راداری، مولفه های سالانه در این مشاهدات استخراج شده اند [۳۶ و ۳۷]. با توجه به رویکرد اصلی این مطالعه در زمینه ی شناسایی مدل آماری مناسب، با فرض وجود مولفه های سالانه و نیم سالانه دامنه ی آنها با استفاده از تابع هارمونیک به روش کمترین مربعات ($LS-HE$) مدل سازی می شوند. جهت ساخت مدل آماری، از نویزهای رنگی و ترکیب آنها استفاده شده است. با فرض وجود نویز سفید در تمامی مدل ها و همچنین مطابق رابطه (۱۴)، مدل های نویز را می توان به صورت روابط (۲۷) تا (۳۰) نوشت:

$$\begin{cases} Q_y = Q_w & \text{رابطه (۲۷)} \\ Q_y = Q_w + Q_f & \text{رابطه (۲۸)} \\ Q_y = Q_w + Q_{rw} & \text{رابطه (۲۹)} \\ Q_y = Q_w + Q_f + Q_{rw} & \text{رابطه (۳۰)} \end{cases}$$

مطابق آنالیز نویز به روش کمترین مربعات ابتدا با استفاده از قانون توان، ماتریس های نویز سفید، فلیکر و رندوم واک ساخته می شوند. در ادامه با استفاده از روش $LS-VCE$ ، مولفه های واریانس کواریانس هر مدل برآورد می گردد. در نهایت بهترین مدل نویز از میان مدل های ساخته شده با استفاده از روش MLE مشخص می گردد. نتایج بدست آمده حاکی از این است که در تمامی پیکسل ها روابط (۲۳) و (۲۷) به عنوان مناسب ترین مدل های تابعی و آماری انتخاب شدند. در ادامه نتایج پیکسل های شامل ایستگاه های $GNSS$ بررسی شده اند.

۴-۳- ارزیابی نتایج با استفاده از سری های زمانی ایستگاه های دائمی $GNSS$

ایستگاه های بررسی شده مطابق شکل (۴) شامل $CHRS$ ، $MAHU$ ، $MLAN$ ، $ERL2$ و $NIHO$ می باشند [۳۸]. جهت مقایسه نتایج می بایست نتایج

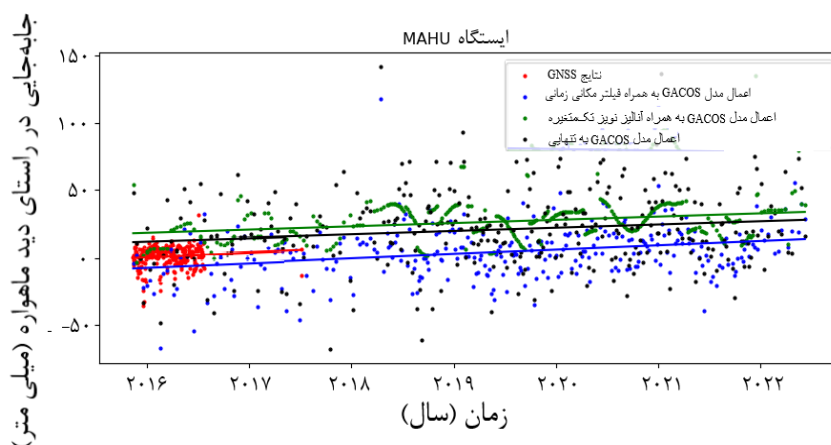
^۱ Least Squares Harmonic Estimation

حالت دیگر به رگرسیون خطی داده‌های *GNSS* نزدیک‌تر است. همچنین در این ایستگاه، پیش از اعمال فیلترهای بالاگذر و پایین‌گذر پراکندگی سری زمانی از دو حالت دیگر بیشتر است.

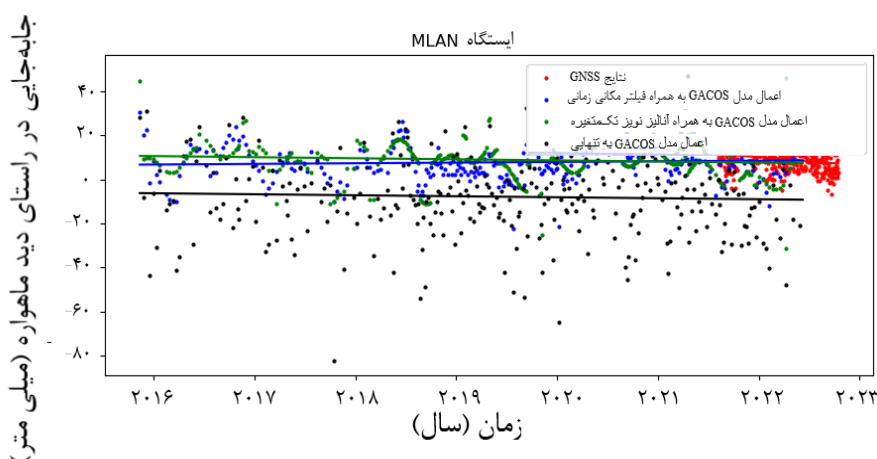
با استفاده از آنالیز نویز کمترین مربعات تک‌متغیره، از پراکندگی مشاهدات کاسته می‌شود. در شکل (۱۰) که نشان‌دهنده رفتار ایستگاه *NIHU* است، رگرسیون خطی آنالیز نویز کمترین مربعات تک‌متغیره از دو

جدول ۱: موقعیت ایستگاه‌های دائمی *GNSS*

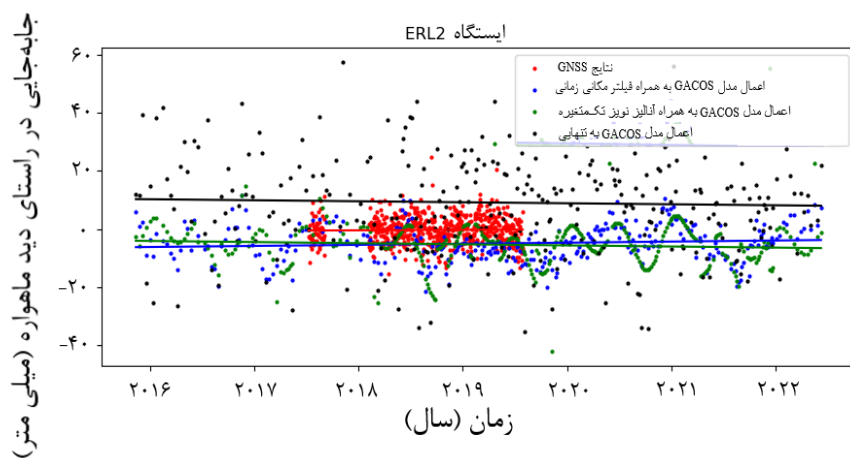
نام ایستگاه	<i>MAHU</i>	<i>MLAN</i>	<i>ERL2</i>	<i>NIHO</i>	<i>CHRS</i>
طول جغرافیایی	-۱۵۵٫۸۹۴۷	-۱۵۵٫۸۶۳۹	-۱۵۵٫۹۲۶۸	-۱۵۵٫۷۵۸۹	-۱۵۶٫۰۵۶۷
عرض جغرافیایی	۲۰٫۱۹۱۹	۱۹٫۹۴۲۴	۱۹٫۸۵۲۳	۱۹٫۸۱۷۸	۱۹٫۷۲۳۰



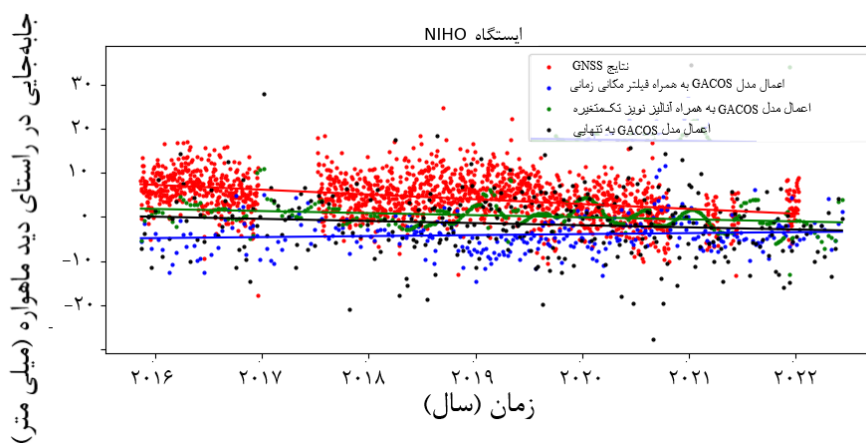
شکل ۷: تصحیحات مختلف در ایستگاه *MAHU*. نقاط قرمز نشان‌دهنده نتایج *GNSS*، نقاط آبی نشان‌دهنده نتایج تحت فیلترهای بالاگذر و پایین‌گذر، نقاط سبز نتایج تحت تاثیر ماتریس وزن آنالیز نویز تک‌متغیره و نقاط مشکی رنگ نشان‌دهنده نتایج پیش از اعمال فیلتر



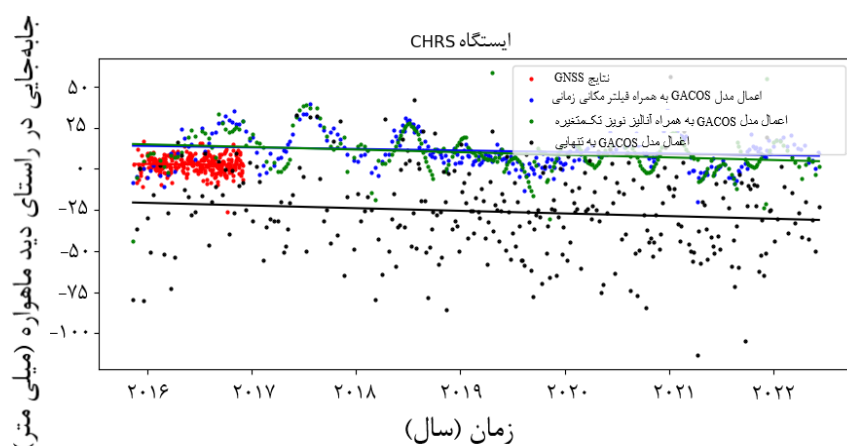
شکل ۸: تصحیحات مختلف در ایستگاه *MLAN*



شکل ۹: تصحیحات مختلف در ایستگاه ERL2



شکل ۱۰: تصحیحات مختلف در ایستگاه NIHO



شکل ۱۱: تصحیحات مختلف در ایستگاه CHRS

اعمال شده موجب بهبود دقت سری‌های زمانی شده‌اند. فرآیند فیلتر با استفاده از فیلترهای بالاگذر و پایین‌گذر به طور متوسط به میزان ۲۸٪ بهبود داشته است. میزان بهبود با استفاده از ماتریس نویز کمترین مربعات تک‌متغیره به طور متوسط ۴۳٪ می‌باشد. در ایستگاه *NIHO* اعمال فیلترهای بالاگذر و پایین‌گذر باعث کاهش بهبود به میزان ۳۹٪ شده است. به تبع آن می‌توان عنوان داشت در صورت استفاده از این نوع فیلترها، امکان از دست رفتن اطلاعات صحیح وجود دارد. لازم به ذکر می‌باشد که ماتریس نویز حاصل از آنالیز کمترین مربعات تک‌متغیره به صورت مجزا برای هر پیکسل بدست آمده است و تنها همبستگی زمانی سری‌ها در آن‌ها اعمال گردیده است. این در حالی‌ست که فیلترهای بالاگذر و پایین‌گذر در راستای مکانی و زمانی اعمال می‌شوند.

پس از بدست آوردن نتایج فوق، مطابق جدول (۲)، می‌توان *RMSE* روش‌های اعمال شده را با داده‌های *GNSS* مقایسه نمود. این فرآیند با فرض ناچیزبودن خطای نتایج *GNSS* و در زمان‌های موجود انجام می‌شود. لازم به توضیح می‌باشد که جهت بررسی پیکسل شامل ایستگاه *GNSS*، از مقادیر پیکسل‌های مجاور به شعاع ۲۰۰ متر میانگین‌گیری می‌شود. کمترین میزان *RMSE* نتایج حاصل از تصحیح به کمک فیلترهای بالاگذر و پایین‌گذر، ۸/۷ میلی‌متر و بیشترین مقدار آن ۲۵/۵ میلی‌متر می‌باشد. با بررسی نتایج با استفاده از آنالیز نویز تک‌متغیره، کمترین میزان *RMSE* برابر ۶/۲ میلی‌متر و بیشترین میزان آن ۱۶/۲ میلی‌متر می‌باشد. پس از محاسبه *RMSE*، می‌توان میزان بهبود هر روش را نسبت نتایج فیلترنشده برآورد نمود. مطابق جدول (۳) نتایج حاکی از این است که در سه ایستگاه از پنج ایستگاه بررسی شده، تمامی تصحیحات

جدول ۲: *RMSE* نتایج در ایستگاه‌های مختلف

نام ایستگاه	<i>MAHU</i>	<i>MLAN</i>	<i>ERL2</i>	<i>NIHO</i>	<i>CHRS</i>
<i>RMSE</i> نتایج حاصل از اعمال مدل اتمسفری و فیلترهای بالاگذر و پایین‌گذر (<i>mm</i>)	۲۵/۵	۱۰/۹	۸/۷	۱۰/۶	۱۸/۰
<i>RMSE</i> نتایج حاصل از اعمال مدل اتمسفری و سرشکنی با استفاده از ماتریس نویز آنالیز کمترین مربعات تک‌متغیره (<i>mm</i>)	۱۵/۱	۱۴/۲	۹/۹	۶/۲	۱۶/۲
<i>RMSE</i> نتایج حاصل از اعمال مدل اتمسفری پیش از اعمال فیلترهای بالاگذر و پایین‌گذر (<i>mm</i>)	۲۷/۹	۳۰/۶	۱۸/۸	۷/۶	۳۴/۴

جدول ۳: تصحیحات در ایستگاه‌های مختلف

نام ایستگاه	<i>MAHU</i>	<i>MLAN</i>	<i>ERL2</i>	<i>NIHO</i>	<i>CHRS</i>
درصد بهبود نتایج حاصل از اعمال مدل اتمسفری و فیلترهای بالاگذر و پایین‌گذر	۹٪	۶۴٪	۵۴٪	-۳۹٪	۴۸٪
درصد بهبود نتایج حاصل از اعمال مدل اتمسفری و سرشکنی با استفاده از ماتریس نویز آنالیز کمترین مربعات تک‌متغیره	۴۶٪	۵۴٪	۴۷٪	۱۸٪	۵۳٪

۴-۴- آنالیز نویز تک متغیره در پیکسل های شامل

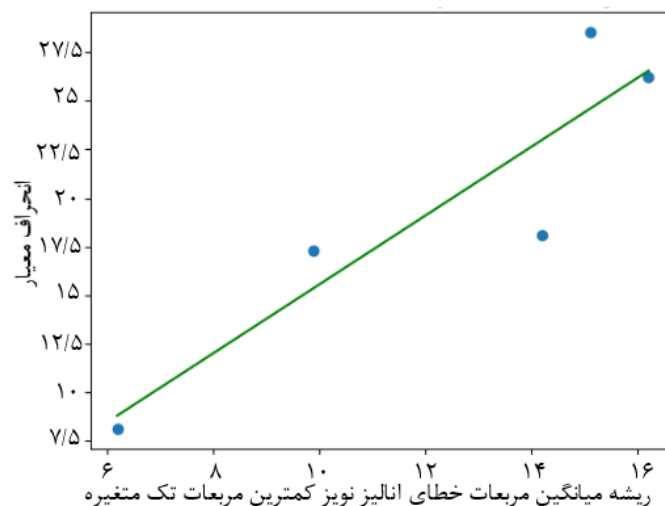
ایستگاه های GNSS

پس از انتخاب مدل تابعی و آماری مناسب، مشاهدات با استفاده ماتریس واریانس کواریانس مربوطه، باز تولید می شود. در این مطالعه مناسب ترین مدل تابعی رابطه (۲۳) شامل ترند خطی، تابع هویساید و تابع هارمونیک و مناسب ترین مدل آماری رابطه (۲۷) شامل نویز سفید انتخاب شدند. در ادامه $\hat{\sigma}$ در هر پیکسل با استفاده از رابطه (۱۸) محاسبه می شود. مقادیر $\hat{\sigma}$ و انحراف معیار متناظر آن در هر پیکسل مطابق جدول (۴) می باشد. مطابق این جدول، نویز شناسایی

شده در ایستگاه NIHO کمترین و در ایستگاه MAHU بیشترین میزان آن می باشد. با بررسی انحراف معیار $\hat{\sigma}$ و RMSE روش آنالیز نویز کمترین مربعات در هر ایستگاه، می توان به ارتباط این دو مولفه پی برد. مطابق شکل (۱۲) همبستگی RMSE آنالیز نویز کمترین مربعات و انحراف معیار متناظر آن برابر ۰/۹۱ می باشد و این میزان، نشان دهنده همبستگی بالای این دو مولفه است. با توجه به همبستگی این دو مولفه، می توان به این نکته اشاره نمود که در صورت بررسی و شناسایی مدل آماری مناسب تر، انتظار می رود نتایج مطلوب تری حاصل شود.

جدول ۴: مقدار $\hat{\sigma}$ در پیکسل های حاوی ایستگاه های GNSS

نام ایستگاه	MAHU	MLAN	ERL2	NIHO	CHRS
$\hat{\sigma} (mm)$	۵۴۷۸	۸۸۰	۷۳۸	۳۶	۳۹۲۱
انحراف معیار (mm)	۲۸،۵۶	۱۸،۰۸	۱۷،۳۰	۸،۱۱	۲۶،۲۷



شکل ۱۲: همبستگی RMSE روش آنالیز نویز کمترین مربعات تک متغیره و انحراف معیار نویز برآورد شده

۴- بحث و نتیجه گیری

نادیده گرفتن تاثیر نویزها و آشفتگی های موجود در سری های زمانی تداخل سنجی راداری، باعث اختلال در نتایج می گردد. در این مطالعه مشاهده می شود که

استفاده از مدل های اتمسفری در برخی موارد جهت حذف نویزهای موجود کافی نمی باشد. هدف اصلی در این مطالعه، فیلتر سری های زمانی تداخل سنجی راداری با در نظر داشتن مدل تابعی و آماری مناسب می باشد.

کمترین مربعات تک‌متغیره، به طور متوسط ۴۳٪ بهبود دقت حاصل شده است. این در حالی است که با استفاده از فیلترهای بالاگذر و پایین‌گذر نتایج به میزان ۲۸٪ بهبود داشته‌اند. لازم به ذکر است در ایستگاه *NIHO*، اعمال فیلترهای بالاگذر و پایین‌گذر باعث کاهش بهبود به میزان ۳۹٪ شده است. همچنین در تصحیح سری‌های زمانی با استفاده از ماتریس نویز آنالیز تک‌متغیره، کاهش بهبود در سری‌های زمانی مشاهده نگردید و پراکندگی سری زمانی کاهش یافته است. در مقابل در صورت استفاده از فیلترهای بالاگذر و پایین‌گذر، امکان از دست رفتن اطلاعات صحیح وجود دارد.

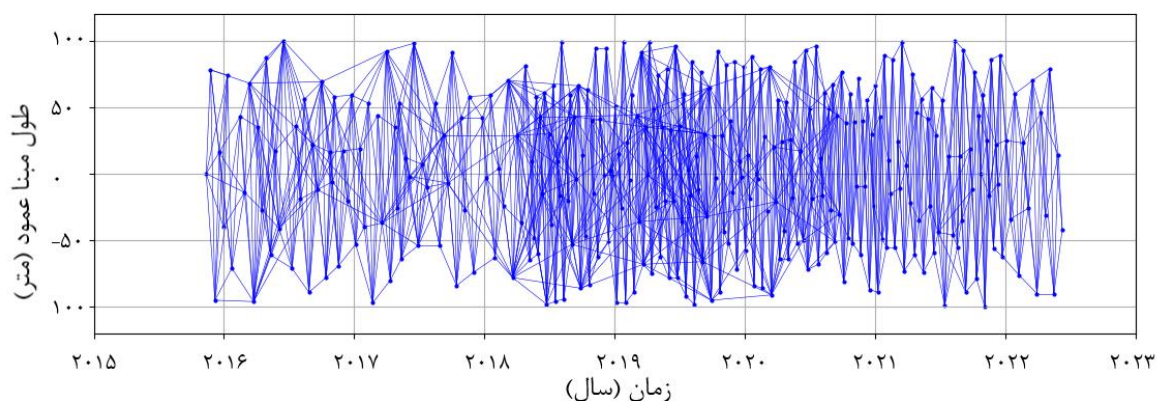
تشکر و قدردانی

با تشکر از داوران محترم که نظرات مفید ایشان موجب بهبود کیفیت این مطالعه گردید. با تشکر از سامانه لیکسیاس که امکان پردازش‌های لازم تداخل‌سنجی راداری در آن فراهم شده است.

این روند با برآورد مدل آماری با استفاده از آنالیز نویز کمترین مربعات تک‌متغیره انجام می‌شود. به همین منظور ابتدا سری‌های زمانی نهایی تداخل‌سنجی راداری به همراه اعمال تصحیحات اتمسفری با استفاده از مدل *GACOS* تولید شده‌اند. در ادامه سری‌های زمانی نهایی با استفاده از روش فیلترهای بالاگذر و پایین‌گذر و ماتریس نویز آنالیز کمترین مربعات تک‌متغیره، فیلتر می‌شوند. این روند در فیلترهای بالاگذر و پایین‌گذر در راستای مکان و زمان و در روش آنالیز نویز کمترین مربعات تک‌متغیره، در راستای زمان اعمال می‌شود. جهت آنالیز نویز کمترین مربعات تک‌متغیره، ابتدا مدل‌های تابعی و آماری مختلف ساخته شدند. سپس با استفاده از آزمون *MLE*، مدل تابعی و آماری شامل ترند خطی با حضور تابع هویساید، تابع هارمونیک و نویز سفید به عنوان مناسب‌ترین مدل‌ها انتخاب شدند. در نهایت سری‌های زمانی توسط این مدل بازتولید شدند. نتایج حاصل از این فرآیند با فیلترهای بالاگذر و پایین‌گذر و سری‌های زمانی *GNSS* مقایسه شدند. نتایج حاکی از این است که با استفاده از ماتریس نویز

پیوست

پیوست ۱:



پیوست ۱: شبکه تداخل‌نماها بر اساس طول مبنا مکانی و زمانی

پیوست ۲:

پیوست ۲: تاریخ وقوع زلزله در منطقه مطالعاتی

تاریخ وقوع						
۲۰۲۲/۰۶/۲۳	۲۰۲۱/۱۱/۲۴	۲۰۲۰/۰۴/۰۷	۲۰۱۹/۰۴/۱۹	۲۰۱۸/۰۸/۱۵	۲۰۱۷/۰۳/۱۸	۲۰۱۶/۰۳/۲۱
۲۰۲۲/۰۵/۱۶	۲۰۲۱/۱۰/۱۸	۲۰۱۹/۱۲/۰۳	۲۰۱۹/۰۴/۱۴	۲۰۱۸/۰۷/۰۸	۲۰۱۷/۰۳/۱۵	۲۰۱۶/۰۳/۲۰
۲۰۲۲/۰۵/۰۵	۲۰۲۱/۰۸/۲۶	۲۰۱۹/۱۱/۰۹	۲۰۱۹/۰۳/۰۳	۲۰۱۸/۰۳/۱۰	۲۰۱۷/۰۲/۱۷	۲۰۱۵/۱۱/۱۶
۲۰۲۲/۰۴/۱۹	۲۰۲۱/۰۶/۲۱	۲۰۱۹/۱۱/۰۸	۲۰۱۹/۰۲/۱۷	۲۰۱۸/۰۲/۱۵	۲۰۱۷/۰۱/۰۵	
۲۰۲۲/۰۴/۰۶	۲۰۲۱/۰۵/۲۶	۲۰۱۹/۱۰/۲۱	۲۰۱۹/۰۲/۰۶	۲۰۱۷/۱۲/۲۶	۲۰۱۶/۱۲/۱۰	
۲۰۲۲/۰۳/۲۹	۲۰۲۱/۰۴/۰۷	۲۰۱۹/۰۹/۲۲	۲۰۱۹/۰۱/۱۹	۲۰۱۷/۱۱/۲۵	۲۰۱۶/۱۲/۰۹	
۲۰۲۱/۱۲/۳۱	۲۰۲۰/۰۸/۲۰	۲۰۱۹/۰۹/۱۴	۲۰۱۸/۱۱/۰۵	۲۰۱۷/۱۰/۰۱	۲۰۱۶/۱۱/۱۶	
۲۰۲۱/۱۲/۱۴	۲۰۲۰/۰۵/۲۷	۲۰۱۹/۰۵/۲۶	۲۰۱۸/۰۹/۲۸	۲۰۱۷/۰۷/۲۴	۲۰۱۶/۰۹/۰۴	
۲۰۲۱/۱۲/۰۴	۲۰۲۰/۰۵/۱۹	۲۰۱۹/۰۵/۰۱	۲۰۱۸/۰۹/۲۷	۲۰۱۷/۰۵/۱۶	۲۰۱۶/۰۶/۰۹	

مراجع

- [1] Y. Cao, Z. Li, J. Wei, J. Hu, M. Duan, and G. Feng, "Stochastic modeling for time series InSAR: with emphasis on atmospheric effects," *Journal of Geodesy*, vol. 92, no. 2, pp. 185-204, 2018.
- [2] P. Agram and M. Simons, "A noise model for InSAR time series," *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol. 120, no. 4, pp. 2752-2771, 2015.
- [3] 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, 2009.
- [4] W. D. Barnhart and R. B. Lohman, "Characterizing and estimating noise in InSAR and InSAR time series with MODIS," *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, vol. 14, no. 10, pp. 4121-4132, 2013.
- [5] W. Gong, F. J. Meyer, S. Liu, and R. F. Hanssen, "Temporal filtering of InSAR data using statistical parameters from NWP models," *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, vol. 53, no. 7, pp. 4033-4044, 2015.
- [6] Z. Yunjun, H. Fattahi, and F. Amelung, "Small baseline InSAR time series analysis: Unwrapping error correction and noise reduction," *Computers & Geosciences*, vol. 133, p. 104331, 2019.
- [7] R. M. Goldstein, H. A. Zebker, and C. L. J. R. s. Werner, "Satellite radar interferometry: Two-dimensional phase unwrapping," vol. 23, no. 4, pp. 713-720, 1988.
- [8] J. Biggs, T. Wright, Z. Lu, and B. J. G. J. I. Parsons, "Multi-interferogram method for measuring interseismic deformation: Denali Fault, Alaska," vol. 170, no. 3, pp. 1165-1179, 2007.
- [9] E. Hussain, A. Hooper, T. J. Wright, R. J. Walters, and D. P. J. J. o. G. R. S. E. Bekaert, "Interseismic strain accumulation across the central North Anatolian Fault from iteratively unwrapped InSAR measurements," vol. 121, no. 12, pp. 9000-9019, 2016.
- [10] M. Dalaison and R. Jolivet, "A Kalman filter time series analysis method for InSAR," *Journal of Geophysical Research:*

- Solid Earth*, vol. 125, no. 7, p. e2019JB019150, 2020.
- [11] Y. Cao, Z. Li, and F. J. J. o. G. Amelung, "Mapping ground displacement by a multiple phase difference-based InSAR approach: with stochastic model estimation and turbulent troposphere mitigation," vol. 93, no. 9, pp. 1313-1333, 2019.
- [12] R. F. Hanssen, "Stochastic modeling of time series radar interferometry," in *IGARSS 2004. 2004 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2004, vol. 4: IEEE, pp. 2607-2610.
- [13] S. Samsonov, "Topographic correction for ALOS PALSAR interferometry," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 48, no. 7, pp. 3020-3027, 2010.
- [14] R. F. Hanssen, *Radar interferometry: data interpretation and error analysis*. Springer Science & Business Media, 2001.
- [15] A. Ferretti, C. Prati, and F. Rocca, "Analysis of permanent scatterers in SAR interferometry," in *IGARSS 2000. IEEE 2000 International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Taking the Pulse of the Planet: The Role of Remote Sensing in Managing the Environment. Proceedings (Cat. No. 00CH37120)*, 2000, vol. 2: IEEE, pp. 761-763.
- [16] P. Berardino, G. Fornaro, R. Lanari, and E. Sansosti, "A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms," *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, vol. 40, no. 11, pp. 2375-2383, 2002.
- [17] A. Ferretti, C. Prati, and F. Rocca, "Permanent scatterers in SAR interferometry," *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, vol. 39, no. 1, pp. 8-20, 2001.
- [18] A. R. Amiri-Simkooei, C. C. Tiberius, and P. J. Teunissen, "Assessment of noise in GNSS coordinate time series: methodology and results," *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol. 112, no. B7, 2007.
- [19] A. Amiri-Simkooei, "Noise in multivariate GNSS position time-series," *Journal of Geodesy*, vol. 83, no. 2, pp. 175-187, 2009.
- [20] A. J. J. o. G. R. S. E. Amiri-Simkooei, "On the nature of GNSS draconitic year periodic pattern in multivariate position time series," vol. 118, no. 5, pp. 2500-2511, 2013.
- [21] B. Tahmasebi, A. R. Amiri-Simkooei, M. Dehghani, and M. Momeni, "Evaluation of Noise in Deformation Time Series Extracted by Small Baseline Interferometry," (in eng), *Journal of Geomatics Science and Technology, Research* vol. 4, no. 4, pp. 83-92, 2015.(persian)
- [22] Z. Lu and D. Dzurisin, "InSAR imaging of Aleutian volcanoes," in *InSAR imaging of Aleutian volcanoes*: Springer, 2014, pp. 87-345.
- [23] S. Li, W. Xu, and Z. Li, "Review of the SBAS InSAR Time-series algorithms, applications, and challenges," *Geodesy and Geodynamics*, 2021.
- [24] Y. Fialko, M. Simons, and D. Agnew, "The complete (3-D) surface displacement field in the epicentral area of the 1999 Mw7. 1 Hector Mine earthquake, California, from space geodetic observations," *Geophysical research letters*, vol. 28, no. 16, pp. 3063-3066, 2001.
- [25] J. O. Ogundare, *Understanding least squares estimation and geomatics data analysis*. John Wiley & Sons, 2018.
- [26] J.-P. Montillet and M. S. Bos, *Geodetic time series analysis in earth sciences*. Springer, 2019.
- [27] J.-P. Montillet, S. Williams, A. Koulali, and S. McClusky, "Estimation of offsets in GNSS time-series and application to the detection of earthquake deformation in the far-field," *Geophysical Journal International*, vol. 200, no. 2, pp. 1207-

- 1221, 2015.
- [28] A. Amiri-Simkooei, M. Hosseini-Asl, J. Asgari, and F. Zangeneh-Nejad, "Offset detection in GNSS position time series using multivariate analysis," *GNSS solutions*, vol. 23, no. 1, pp. 1-12, 2019.
- [29] Dong, Danan, et al. "Anatomy of apparent seasonal variations from GPS-derived site position time series." *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 107.B4 (2002): ETG-9.
- [30] S. J. J. o. G. Williams, "The effect of coloured noise on the uncertainties of rates estimated from geodetic time series," vol. 76, no. 9-10, pp. 483-494, 2003.
- [31] A. Amiri-Simkooei, "Least-squares variance component estimation: theory and GNSS applications," 2007.
- [32] USGS. "Kilauea Volcano." USGS. <https://www.usgs.gov/volcanoes/kilauea> (accessed 8/20/2022, 2022).
- [33] Google Earth. "Hawwaii Islands." Google Earth. <https://earth.google.com> (accessed 8/20/2022, 2022).
- [34] Y. Morishita, M. Lazecky, T. J. Wright, J. R. Weiss, J. R. Elliott, and A. Hooper, "LiCSBAS: An open-source InSAR time series analysis package integrated with the LiCSAR automated Sentinel-1 InSAR processor," *Remote Sensing*, vol. 12, no. 3, p. 424, 2020.
- [35] USGS. "earthquakes." USGS. <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/map> (accessed 7/11/2022, 2022).
- [36] Tomás, Roberto, et al. "Using wavelet tools to analyse seasonal variations from InSAR time-series data: a case study of the Huangtupo landslide." *Landslides* 13 (2016): 437-450.
- [37] Reinosch, Eike, et al. "InSAR time series analysis of seasonal surface displacement dynamics on the Tibetan Plateau." *The Cryosphere* 14.5 (2020): 1633-1650.
- [38] G. Blewitt, W. C. Hammond, and C. Kreemer, "Harnessing the GNSS data explosion for interdisciplinary science," *Eos*, vol. 99, no. 10.1029, p. 485, 2018.



Filtering Radar Interferometry Time Series with Univariate Least Squares Noise Matrix Analysis

Mohsen Zeynalpour¹, Hamid Mehrabi^{2*}, Ali Reza Amiri-simkooie³

1- Ms.c of geodesy, Department of Geomatics, Faculty of Civil Engineering and Transportation, University of Isfahan

2- Assistant professor, Department of Geomatics, Faculty of Civil Engineering and Transportation, University of Isfahan

3- Professor, Department of Geomatics, Faculty of Civil Engineering and Transportation, University of Isfahan

Abstract

Human life is always affected by various natural events such as earthquakes, volcanoes, subsidence, etc. One of the suitable tools for investigating and analyzing these hazards is synthetic aperture radar interferometry. This geodetic technique has the capability of resolving the displacement of the Earth's crust and analyzing the deformation through phase differences of radar images. The main advantage of the InSAR is the high temporal and spatial resolution. Analogous to the other geodetic methods, the accuracy of the result depends on the modeling of observational disturbances and noises. Despite the progress in recent decades, these disorders have received little attention. The case study is the northwest of Hawaii Island. In this study, filtering and reducing the turbulence in time series is based on the most appropriate functional model and stochastic model. This process is done using the MLE test. In this study, functional models include trend, cyclic, and offset. The statistical models also include white noise, flicker, and random walk, whose components are identified through univariate least squares noise analysis. The time series are reproduced through the best functional and statistical models. The results indicate that the best model is the linear trend with the presence of cyclic, offset, and white noise for all pixels. By implementing the univariate least squares noise analysis method, the accuracy of the results improved on average by 43%. In addition, applying both high-pass and low-pass filters resulted in an average improvement of 28%.

Key words: Time series of radar interferometry, univariate least squares noise analysis, high-pass and low-pass filters.