نشریه علمی مهندسی فناوری اطلاعات مکانی

سال یازدهم، شماره نخست، بهار ۱۴۰۲

*Vol.11, No.1, Spring 2023*

۳۷ -۵۷

**مقاله پژوهشی**

DOR: 20.1001.1.20089635.1402.11.1.3.4

[ Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-07 ]

[ DOR: 20.1001.1.20089635.1402.11.1.3.4 ]

[ DOI: 10.61186/jgit.11.1.37 ]

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

**محسن زینل‌پور[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 روزنه 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 ونقل، گروه مهندسی نقشه‌برداری.

تلفن: ۰۳۱۳۷۹۳۵۲۹۷

*Email: h.mehrabi@eng.ui.ac.ir*

## 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 بازیابی فاز، خطای ناشی از ناهمبستگی‌ها[2]، 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[3] دارد و به فرکانس امواج وابسته می‌باشد، بیشترین تاثیر 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 تاثیرگذار بر نتایج، خطای بازیابی فاز می‌باشد[۵]. یانجان و همکاران (۲۰۱۹) با استفاده از روش جست‌وجوی پل[6]، خطاهای بازیابی فاز را در بعد مکان شناسایی و حذف نموده‌اند. در این مطالعه همچنین با استفاده از بست فاز[7] در دامنه زمان، این خطاها کاهش می‌یابند[۶]. بیگز و همکاران (۲۰۰۷) پس از بازیابی فاز با استفاده از الگوریتم سنتی برش شاخه[8][۷]، بر اساس شبکه‌ای از تداخل‌نماها، اقدام به کاهش خطای بازیابی فاز در دامنه زمان نموده‌اند[۸]. حسین و همکاران (۲۰۱۶) خطای بازیابی فاز را با استفاده از بست فاز در دامنه زمان تشخیص و کاسته‌اند[۹ و ۱۰]. از دیگر عوامل تاثیرگذار بر سری‌های زمانی تداخل‌سنجی راداری، نویز ناشی از ناهمبستگی‌ها می‌باشد. دقت تداخل‌نماها همواره تحت تاثیر 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

[1] *Interferometric synthetic aperture radar*
[2] *Decorrelation*
[3] *Dispersive*
[4] *Total Electron Content*
[5] *Multi Aperture Interferometry*
[6] *Bridging*
[7] *Phase closure*
[8] *Branch cut*



[ Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-07 ]
[ DOR: 20.1001.1.20089635.1402.11.1.3.4 ]
[ DOI: 10.61186/jgit.11.1.37 ]

پرداخته‌اند[۱۳ و ۱۴]. سمسانوف و همکاران (۲۰۱۰) بوسیله‌ی روش پشته‌بندی این اثر را کاهش داده‌اند[۱۳]. از دیگر منابع خطای بررسی‌شده می‌توان به خطای مدار ماهواره اشاره نمود. هانسن (۲۰۰۱) با برازش توابع چندجمله‌ای و هموارسازی مشاهدات، اقدام به کاهش این اثر نموده است[۱۴].

با پیشرفت روزافزون ماموریت‌های تداخل‌سنجی راداری و کوتاه‌ترشدن دوره تناوب تصاویر، امکان بررسی تغییرات تدریجی در راستای زمان با ترکیب چندین تداخل‌نما فراهم شده است[۲]. سری‌های زمانی با ترکیب چندین تداخل‌نما امکان غلبه بر ناهمبستگی‌ها و آشفتگی‌ها را فراهم می‌سازند. تولید سری‌های زمانی تداخل‌سنجی راداری در قالب حل مساله معکوس انجام می‌گیرد. مسئله معکوس در این مبحث، دستیابی به سری‌های زمانی تداخل‌سنجی راداری سرشکن‌شده با استفاده از مشاهدات تفاضلی تداخل‌نماها می‌باشد که به دو شیوه‌ی اصلی ۱- طول مبنای کوتاه (*SBAS*[۱]) ۲- پراکنش‌گرهای دائمی (*PS-InSAR*[۲]) انجام می‌شود[۱۰]. در این دو روش تمامی تداخل‌نماهای ممکن، با اعمال قیود مختلف با هدف دستیابی به سری‌های زمانی تولید می‌شوند. این قیود در روش طول مبنای کوتاه، کوتاه بودن طول مبنای مکانی و زمانی می‌باشد و این امر موجب تشکیل شبکه‌ای گسترده، شامل تصاویر پایه[۳] متعدد می‌شود[۱۰]. قیود اعمال شده در روش پراکنش‌گرهای دائمی، پایداری خصوصیات پیکسل‌های منتخب می‌باشد. در این صورت شبکه‌ای با یک تصویر پایه تشکیل می‌شود و پیکسل‌های منتخب در امر تولید سری‌های زمانی شرکت داده می‌شوند. با به کارگیری این دو روش، در نهایت سری‌های زمانی اختلاف فاز و جابه‌جایی در راستای دید ماهواره تولید می‌گردند. امروزه در سری‌های زمانی تداخل‌سنجی راداری، اثرات اتمسفر برآورد و از مشاهدات کاسته می‌شود. باقیمانده این اثر در قالب نویز در سری‌های زمانی مشاهده می‌گردد. وجود نویزهای مختلف همواره در نتایج سری‌های زمانی موثر بوده است[۱۵ و ۱۶].

در الگوریتم‌های معمول طول مبنای کوتاه و پراکنش‌گرهای دائمی، نویزهای موجود پس از حذف اثرات مختلف با اعمال فلیترهای مکانی-زمانی کاهش می‌یابند[۱۶ و ۱۷]. از نقاط ضعف فیلترهای مکانی و زمانی می‌توان به موارد ذیل اشاره کرد:۱- برخی از این فیلترها نیازمند مدل جابه‌جایی منطقه هستند[۱]. ۲- وزن‌دهی پیکسل‌ها همواره از موارد چالش برانگیز در روند این نوع از فیلترها بوده است. برای مثال در برخی از فیلترها، وزن‌دهی بر اساس توزیع گاوسی[۴] می‌باشد[۵]. 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 مدل‌های آماری[۱ و ۲] سعی در کاهش اثر اتمسفر شده است. خطای برآورد شده با استفاده از اطلاعات هواشناسی وابستگی شدیدی به مشاهدات در لحظه‌ی تصویربرداری دارد[۶]. کاهش نویز با استفاده از مدل‌های آماری نیز بر اساس ویژگی‌های منابع موثر در تداخل‌نماها انجام می‌شود. برای مثال در برخی از مدل‌های آماری از همبستگی مکانی و مستقل بودن تداخل‌نماها در راستای کاهش نویز اتمسفر استفاده می‌شود[۱]. نبود اطلاعات در مورد تمامی منابع نویز و ویژگی رفتاری آنها موجب می‌شود برخی از این اثرات بر مشاهدات باقی بماند.

یکی از روش‌های آنالیز نویز سری‌های زمانی، آنالیز نویز کمترین مربعات می‌باشد[۱۸ و ۱۹]. امیری سیمکویی و همکاران (۲۰۱۳) با استفاده از آنالیز نویز چندمتغیره، سری‌های زمانی مختصات ایستگاه‌های دائمی

[۱] *Small Baseline Subset*

[۲] *Persistent Scatterer InSAR*

[۳] *Master*

[4] *Gaussian distribution*



[ Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-07 ]
[ DOR: 20.1001.1.20089635.1402.11.1.3.4 ]
[ DOI: 10.61186/jgit.11.1.37 ]

سامانه‌های ماهواره‌ای ناوبری جهانی (*GNSS*[1]) 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[2] و چندمتغیره[3] 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 شناسایی‌شده 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 همزمان مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در این مطالعه به دلیل دسترس‌نبودن 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[4] و اتورگرسیو و مناسب‌ترین مدل تابعی، تابع درجه دو انتخاب شدند[۲۱].

با توجه به اینکه نقاط پراکنش‌گرهای دائمی[5] 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 نظرداشتن 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 روزنه 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[6] می‌باشد که رابطه(۱) بیان‌گر آن است[۱۴]:

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

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 $\varphi_1$ و پیرو $\varphi_2$ می‌باشد. پس از تولید تداخل‌نما، هر پیکسل از آن را می‌توان به

[1] *Global Navigation Satellite Systems*
[2] *Univariate analysis*
[3] *Multivariate analysis*
[4] *White noise*
[5] *Persistent Scatterer*
[6] *Slave*



[ Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-07 ]
[ DOR: 20.1001.1.20089635.1402.11.1.3.4 ]
[ DOI: 10.61186/jgit.11.1.37 ]

صورت رابطه(۲) بیان نمود[۱۴ و ۲۲]:

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

در رابطه(۲) $r_m$ و $r_s$ فواصل سنسور ماهواره تا پیکسل‌های تصاویر پایه و پیرو و $\lambda$ طول موج رادیویی می‌باشند. $\varepsilon_m$ و $\varepsilon_s$ فاز ناشی از خصوصیات بازپراکنش‌گرها در تصاویر پایه و پیرو هستند که با فرض ثابت بودن در زمان‌های تصویربرداری، اختلاف آن‌ها صفر است. منابع تاثیرگذار در تداخل‌نماهای نهایی بر اساس رابطه(۳)، به شکل زیر مدل‌سازی می‌شوند. در این رابطه فاز مشاهداتی در هر پیکسل از تداخل‌نمای 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 تداخل‌نمای تفاضلی عبارت است از: مجموع اختلاف فاز ناشی از جابه‌جایی $\Delta\phi_{disp}$، اختلاف فاز ناشی از 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 ناهمبستگی‌ها $\Delta\phi_{dec}$.

### ۲-۱- الگوریتم طول مبنای کوتاه (*SBAS*)

تکنیک *SBAS* یکی از روش‌های تولید سری‌های زمانی تداخل‌سنجی راداری، جهت رصد تغییر شکل سطح زمین در گذر زمان می‌باشد. در این تکنیک به منظور کاهش ناهمبستگی‌های مکانی و زمانی، تداخل‌نماهای تفاضلی مناسب با یکدیگر ترکیب می‌شوند[۱۶]. پیش از تولید تداخل‌نماها جهت انجام فرآیند *SBAS*، ابتدا می‌بایست تصاویر پایه و پیرو هر تداخل‌نما مشخص شوند. به همین منظور ابتدا نموداری از تصویر با توجه به طول مبنای مکانی و زمانی آن ترسیم می‌شود(مطابق شکل (۱)). در این روش منظور از طول مبنای مکانی و زمانی به ترتیب، طول مبنای عمود[۲] و زمان دو تصویر هر تداخل‌نما می‌باشند. محور افقی این شکل بیانگر زمان تصویربرداری و محور عمودی آن مشخص‌کننده طول مبنای مکانی عمود هر تصویر نسبت تصویر پایه ممتاز[۳] می‌باشند. نقاط گره‌ای با توجه به حدآستانه مکانی و زمانی مدنظر، به یگدیگر متصل می‌شوند. در نهایت تولید تداخل‌نماها بر اساس شبکه‌ای از تصاویر پایه و پیرو منتخب انجام می‌شود[۱۶].

پس از تولید تداخل‌نماها و حذف آشفتگی‌ها از قبیل خطای ناشی از بازیابی فاز[۶ و ۷] و خطای مداری ماهواره [۹ و ۱۰]، پیکسل‌های منتخب در فرآیند *SBAS* شرکت داده می‌شوند. ارتباط میان فاز ناشی از جابه‌جایی در زمان‌های مختلف و مقادیر مشاهداتی در هر پیکسل از تداخل‌نما را می‌توان بر اساس رابطه(۴) بیان نمود[۱۶]:

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

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

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

در روابط(۴) تا (۶)، $\varphi$ نشان‌دهنده فاز جابه‌جایی در تصاویر مختلف و مولفه‌های سری زمانی برای هر پیکسل می‌باشد. بردارهای $IE_{m\times1} = [IE_1, IE_2, ..., IE_m]^T$ و $IS_{m\times1} = [IS_1, IS_2, ..., IS_m]^T$ به ترتیب تصاویر پایه و پیرو متناظر در هر تداخل‌نما می‌باشند. بردارهای $\varphi_{n\times1} = [\varphi_1, \varphi_2, ..., \varphi_n]^T$ و $\delta\phi_{m\times1} = [\delta\phi_1, \delta\phi_2, ..., \delta\phi_m]^T$ به ترتیب بیان‌گر فاز یک پیکسل در تداخل‌نماها و تصاویر می‌باشند.

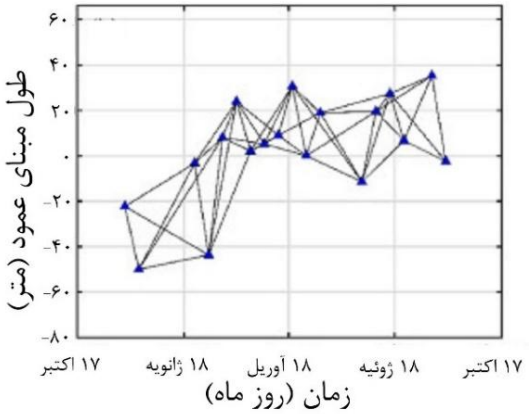
[1] *Phase unwrapping*

[۲] *Perpendicular baseline*

[۳] *Super master*



[ Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-07 ]
[ DOR: 20.1001.1.20089635.1402.11.1.3.4 ]
[ DOI: 10.61186/jgit.11.1.37 ]




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

$m$ و $n$ مشخص‌کننده تعداد تداخل‌نماها و تصاویر و $j=[1,2,...,n]$ می‌باشند. با نوشتن رابطه(۴) برای تمامی تداخل‌نماها، ماتریس طرح $A_{m\times n}$ مطابق رابطه(۵) ساخته می‌شود. وارون ماتریس $A_{m\times n}$ از روش تجذیه مقدار تکین ($SVD$[۱]) 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 روزنه مصنوعی ($SAR$[۲]) 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 $\theta_{inc}$، $\alpha$ و $\delta_{LOS}$ به ترتیب زوایای فرود، آزیموت و خطا در راستای دید ماهواره می‌باشند(مطابق شکل (۲)).

رابطه(۷)

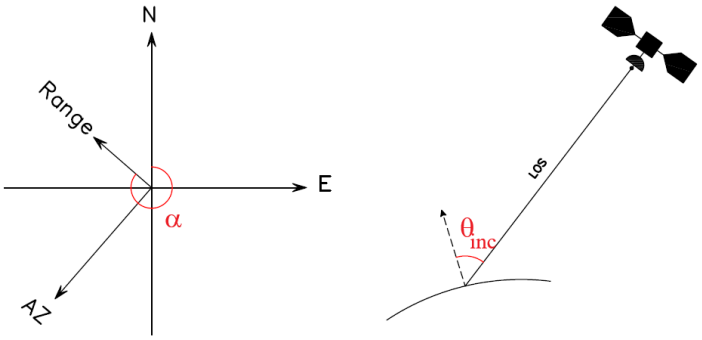
$$d_{LOS}=\sin(\theta_{inc})\left[U_n\sin(\alpha)+U_e\cos(\alpha)\right]+U_u\cos(\theta_{inc})+\delta_{LOS}$$

[۱] *Singular Value Decomposition*

[۲] *Synthetic Aperture Radar*



[ Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-07 ]
[ DOR: 20.1001.1.20089635.1402.11.1.3.4 ]
[ DOI: 10.61186/jgit.11.1.37 ]




**شکل۲: آزیموت راستای دید ماهواره *SAR* و زاویه فرود در مدار پایین‌گذر**

## ۳- آنالیز نویز کمترین مربعات تک‌متغیره

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

### ۳-۱- مدل تابعی

مدل تابعی مجموعه‌ای از معادلات می‌باشد که ارتباط میان مشاهدات و مجهولات را بیان می‌نماید. یکی از انواع مدل‌های تابعی جهت توصیف سری‌های زمانی، مدل خط سیر[۱] می‌باشد. این مدل از مجموع ترند، پرش و حرکات تناوبی تشکیل می‌شود. با تعریف ترند $x_{trend}$ سعی در توصیف حرکات نسبی سری زمانی می‌شود. بسته به تغییرات سری زمانی و با توجه به منطقه مورد مطالعه و مشاهدات، می‌توان از توابع خطی و غیرخطی جهت مدل‌سازی این مولفه استفاده نمود. مولفه $x_{jumps}$، نقش توصیف پرش‌ها و تغییرات تند موجود در مدل را بر عهده دارند. دیگر مولفه حاضر، $x_{cycles}$ می‌باشد که بیان‌گر حرکات متناوب و فصلی است. در کنار مولفه‌های مذکور مولفه‌ی خطا $e$ موجود در سری زمانی نیز حاضر می‌باشد. برای درک بیشتر این مدل، به بررسی مولفه‌های مذکور در رابطه(۸) پرداخته می‌شود[۲۶]:

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

مولفه $x_{trend}$ نقش مدل‌سازی ترند را بیان می‌کند و تابعی‌ست که با توصیف حرکت نسبی مشاهدات سری زمانی، به تمام مشاهدات برازش داده می‌شود. رابطه(۹) بیان‌گر تابعی چند جمله‌ای جهت مدل‌سازی ترند می‌باشد[۲۶]:

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

مولفه $x_{jumps}$ نقش مدل‌سازی حرکات تند را در سری‌های زمانی برعهده دارد. مطابق شکل (۳) با تعریف تابع یکه پله‌ای هویساید[۲] $H(t - t_j)$ در زمان معلوم $t_j$، این حرکات توصیف می‌گردند. پرش‌ها می‌توانند از نوع طبیعی و غیر طبیعی باشند. پرش‌های طبیعی ناشی از عواملی همانند لرزه‌ها، حرکات پوسته زمین و ... و پرش‌های غیرطبیعی ناشی از عواملی همانند تغییرات آنتن *GNSS* در سری‌های زمانی *GNSS*، خطاهای انسانی و ... می‌باشد[۲۷ و ۲۸]. پرش‌های موجود در داده‌ها را می‌توان به صورت رابطه(۱۰) بیان نمود[۲۶]:

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

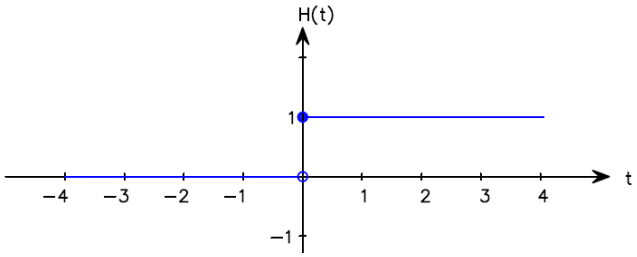
مولفه سوم $x_{cycles}$ می‌باشد که شامل مولفه‌های متناوب و فصلی است. جهت مدل‌سازی این حرکات، می‌توان از تابع هارمونیک استفاده نمود[۱۹ و ۲۶].

[۱] *Trajectory*

[۲] *Heaviside*



[ Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-07 ]
[ DOR: 20.1001.1.20089635.1402.11.1.3.4 ]
[ DOI: 10.61186/jgit.11.1.37 ]




**شکل۳: تابع هویساید**

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

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

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

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

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 $\tau_k$ 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)، مولفه‌های $Q$، $Q_k$ و $\sigma_k$ به ترتیب 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 $f_0$. و $P_0$. تعریف می‌شود. در این رابطه $k$ ضریب طیفی‌ست و عموما در بازه‌ی[۱, ۳-] 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 رندوم‌واک[۵]، تولید می‌شود[۱۹ و ۳۰]. جهت مدل‌سازی نویز سفید می‌توان از ماتریس همانی $Q_w = I_{m\times m}$ استفاده نمود. جهت مدل‌سازی ماتریس

---

۱ *Power law*

۲ *Power spectrum*

۳ *Classic white noise*

۴ *Flicker noise*

۵ *Random walk noise*



[ Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-07 ]
[ DOR: 20.1001.1.20089635.1402.11.1.3.4 ]
[ DOI: 10.61186/jgit.11.1.37 ]

کوفاکتور نویز فلیکر می‌توان از رابطه(۱۶) استفاده نمود[۱۸]:

رابطه(۱۶)

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

در رابطه(۱۶) $Q_{ij}^{f}$ مولفه سطر $i$ام و ستون $j$ام ماتریس کوفاکتور نویز فلیکر، $i$ و $j$ مولفه‌های سری و $\tau=|t_i-t_j|$ می‌باشد. جهت مدل‌سازی ماتریس کوفاکتور نویز رندوم‌واک از رابطه(۱۷) استفاده می‌شود[۱۸]:

رابطه(۱۷)

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

در رابطه(۱۷) $m$ تعداد مولفه‌های سری زمانی، $f_s$ فرکانس نمونه‌برداری و $T$ بازه زمانی نمونه‌برداری بر حسب سال می‌باشند.

### ۳-۴- برآورد مولفه‌های ماتریس واریانس کواریانس با استفاده از برآورد مولفه واریانس کمترین مربعات (*LS-VCE*[۱])

پس از ساخت ماتریس کوفاکتور نویز مطابق بخش ۳-۳ و جایگذاری در رابطه(۱۴)، می‌بایست $\underline{\hat{\sigma}}$را با استفاده از روش *LS-VCE* مطابق رابطه(۱۸) برآورد نمود[۱۸ و ۳۱]:

رابطه(۱۸)

$$\underline{\hat{\sigma}}=N^{-1}\underline{l}$$

در رابطه(۱۸)، $N_{p\times p}$ ماتریس نرمال و $\underline{l}$ بردار مشاهدات می‌باشند که عناصر آن از روابط(۱۹) تا (۲۱) بدست می‌آیند:

رابطه(۱۹)

$$n_{ij}=\frac{1}{2}tr(Q_jQ_y^{-1}P_A^{\perp}Q_iQ_y^{-1}P_A^{\perp})$$

رابطه(۲۰)

$$l_i=\frac{1}{2}\underline{\hat{e}}^TQ_y^{-1}Q_iQ_y^{-1}\underline{\hat{e}}$$

رابطه(۲۱)

$$P_A^{\perp}=I-A(A^TQ_y^{-1}A)^{-1}A^TQ_y^{-1}$$

در روابط(۱۹) تا (۲۱)، $i$ و $j$ مولفه‌های سطری و ستونی $i,j=1,2,\dots,p$، $\underline{\hat{e}}$ بردار باقیمانده‌های ظاهری، $P_A^{\perp}$ تصویرگر قائم، $A$ ماتریس طرح و $Q$ ماتریس واریانس کواریانس می‌باشد. در نهایت ماتریس واریانس کواریانس مولفه‌های برآورد شده برابر با $C_{\hat{\sigma}}=N^{-1}$ می‌باشد.

### ۳-۵- آزمون بیشینه درستنمایی (*MLE*[۲])

یکی از روش‌های موجود جهت انتخاب مناسب‌ترین مدل مشاهداتی، آزمون *MLE* می‌باشد. بر این اساس، تابع درست‌نمایی[۳] مناسب ترین مدل، دارای مقدار بیشینه است. با فرض نرمال بودن تابع چگالی احتمال برآورد درست‌نمایی به صورت رابطه(۲۲) است[۳۱]:

رابطه(۲۲)

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

در رابطه(۲۲)، $m$ تعداد مشاهدات سری زمانی، $\underline{\hat{e}}$ بردار باقیمانده‌های برآوردشده و $Q_y$ ماتریس واریانس کواریانس می‌باشد که در این مطالعه ماتریس نویز برآوردشده می‌باشد.

## ۴- پیاده‌سازی و نتایج

منطقه مطالعاتی در این مطالعه، شمال غربی جزیره هاوایی می‌باشد. این جزیره یکی از زلزله خیزترین مناطق جهان می‌باشد. در این منطقه سالانه به طور متوسط هزاران زمین‌لرزه رخ می‌دهد. بزرگای برخی از این زلزله‌ها به قدری کوچک می‌باشد که تنها توسط لرزه‌نگارها و ابزار دقیق قابل اندازه گیری هستند. طبق اطلاعات زمین‌لرزه‌نگاری از سال ۱۸۲۳ میلادی تاکنون به طور متوسط سالانه ۱۰۰ زمین لرزه به بزرگای حدود

[۱] *Least Squares Variance Component Estimation*

[۲] *Maximum Likelihood Estimation*

[۳] *Likelihood*



[ Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-07 ]
[ DOR: 20.1001.1.20089635.1402.11.1.3.4 ]
[ DOI: 10.61186/jgit.11.1.37 ]

۳، ۱۰ زمین‌لرزه به بزرگای حدود ۴ و ۱ زمین‌لرزه 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 زمین‌لرزه به بزرگای ۷ رخ داده است. همچنین بیشترین میزان رخداد زلزله در مناطق جنوبی این جزیره می‌باشد[۳۲].

### ۴-۱- پردازش‌های سری‌های زمانی تداخل‌سنجی راداری

داده‌های مورد استفاده در این مطالعه، تصویر پایین‌گذر[۱] ماهواره‌ی سنتینل[۲] ۱$A$ و ۱$B$ می‌باشد. شکل(۴) نمایانگر موقعیت منطقه نسبت به تصویر ماهواره سنتیل۱ می‌باشد. اندازه‌ی تصویر پردازش شده ۵۰۱×۵۲۱ پیکسل (آزیموت ×رنج) می‌باشد. پردازش‌های تولید سری‌های زمانی به روش طول مبنای کوتاه جدید (*NSBAS*[۳]) و با استفاده از نرم‌افزار لیکسباس[۴] انجام شده است. همچنین پردازش‌های مربوط به آنالیز نویز کمترین مربعات در محیط پایتون انجام شده است.

در نرم افزار لیکسباس با استفاده از تداخل‌نماهای از پیش تولیدشده، امکان تولید سری‌های زمانی بر اساس الگوریتم *NSBAS* مهیا شده است. همچنین جهت جلوگیری از اختلال در روند بازیابی فاز، به این تداخل‌نماها 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 تداخل‌نما متشکل از ۳۰۰ تصویر در بازه‌ی زمانی ۲۰۱۵/۱۱/۱۱ الی ۲۰۲۲/۰۶/۰۷ پیاده سازی شده است.

با تعریف حدآستانه مکانی و زمانی، شبکه‌ی تداخل‌نماها مطابق پیوست (۱) ترسیم می‌شود. در این شبکه، تصویر پایه‌ی ممتاز، تصویر ۲۰۱۵/۱۱/۱۱ می‌باشد. در نرم‌افزار لیکسباس تصحیحات اتمسفری با استفاده از مدل‌های خدمات برخط عمومی تصحیح اتمسفری (*GACOS*[۷]) اعمال می‌شود[۳۴]. این فرآیند با برآورد تاخیر تروپوسفر در زمان‌های تصویربرداری و محاسبه‌ی تاخیر فاز در هر تصویر انجام می‌شود. در شکل(۵) نمونه‌هایی از تصحیحات مدل اتمسفری بر تداخل‌نماها در این مطالعه قابل نمایش می‌باشد. در شکل (۵-الف) تداخل‌نمای تصحیح‌نشده و شکل (۵-ب) تداخل‌نمای تصحیح‌شده نمایش داده شده‌اند. بازه‌های جابه‌جایی در تداخل‌نماهای تصحیح‌نشده و تصحیح‌شده به ترتیب برابر [۸, ۸-] و [۱۶, ۲/۵-] میلی‌متر می‌باشند.

پس از حذف اثر اتمسفر به روش مذکور، مسئله معکوس با استفاده از تداخل‌نماهای تصحیح‌شده حل می‌شود. پس از تولید سری‌های زمانی، از فیلترهای بالاگذر و پایین‌گذر جهت بهبود نتایج سری‌های زمانی استفاده می‌گردد. نتایج *NSBAS* مطابق شکل(۶) می‌باشد. این شکل بیان‌گر سرعت متوسط جابه‌جایی از تاریخ ۲۰۱۵/۱۱/۱۱ الی ۲۰۲۲/۰۶/۰۷ می‌باشد. سرعت متوسط جابه‌جایی در این منطقه در بازه‌ی [۱۶, ۶۲-] میلی‌متر در سال قرار دارد و در شکل زیر، جهت نمایش مناسب آن در بازه [۲/۵, ۱۸/۵-] میلی‌متر در سال محدود شده است.

---

[۱] *Descending*

[۲] *Sentinel*

[۳] *New Small Baseline Subset*

[۴] *LiCSBAS*

[۵] *Multi looking*

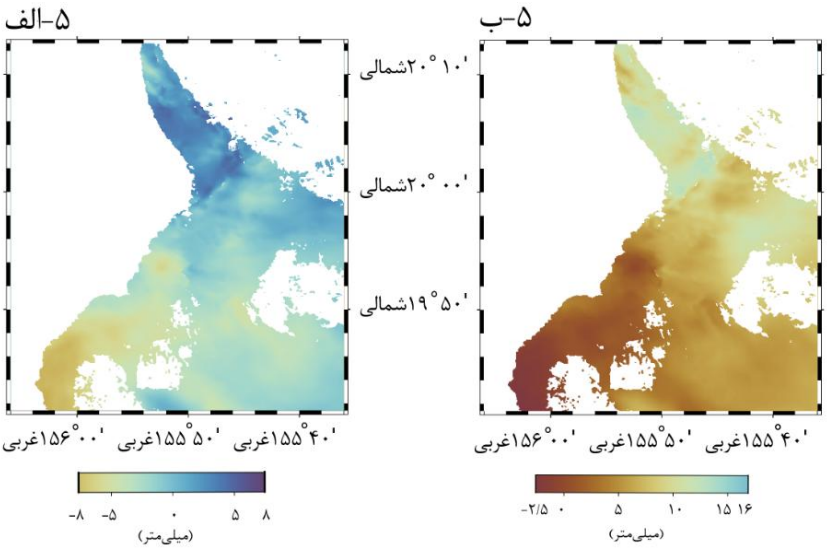
[۶] *GAMMA*

[۷] *Generic Atmospheric Correction Online Service*



[ Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-07 ]
[ DOR: 20.1001.1.20089635.1402.11.1.3.4 ]
[ DOI: 10.61186/jgit.11.1.37 ]

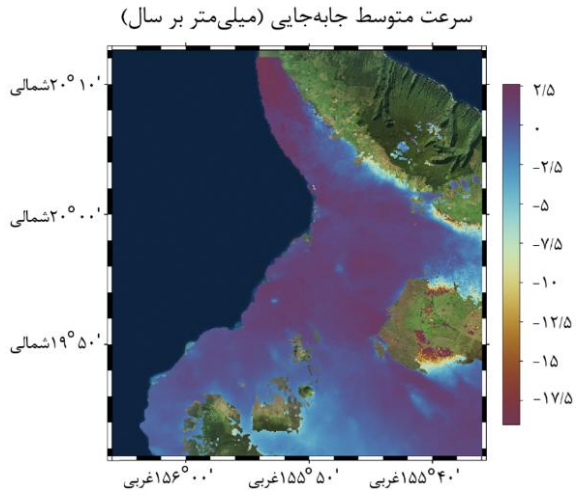
**شکل ۴: موقعیت منطقه مطالعاتی و ایستگاه‌های *GNSS*[۳۳]**




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



[ Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-07 ]
[ DOR: 20.1001.1.20089635.1402.11.1.3.4 ]
[ DOI: 10.61186/jgit.11.1.37 ]




**شکل ۶: سرعت متوسط جابه‌جایی منطقه**

### ۴-۲- تصحیح با استفاده از آنالیز نویز کمترین مربعات تک‌متغیره

پس از تولید سری‌های زمانی جابه‌حایی 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 بررسی‌شده مطابق روابط(۲۳) تا (۲۶) شامل ترکیب ترند خطی و درجه دو، تابع هویساید و توابع هارمونیک می‌باشند.

رابطه(۲۳)
$$Y_i = P_1 + P_2(t_i) + \sum_{j=1}^{n_j} b_j H(t_i - t_j) + \sum_{k=1}^{2} [s_k \sin(2k\pi t_i) + c_k \cos(2k\pi t_i)] + e$$

رابطه(۲۴)
$$Y_i = P_1 + P_2(t_i) + P_3(t_i)^2 + \sum_{j=1}^{n_j} b_j H(t_i - t_j) + \sum_{k=1}^{2} [s_k \sin(2k\pi t_i) + c_k \cos(2k\pi t_i)] + e$$

رابطه(۲۵)
$$Y_i = P_1 + P_2(t_i) + \sum_{k=1}^{2} [s_k \sin(2k\pi t_i) + c_k \cos(2k\pi t_i)] + e$$

رابطه(۲۶)
$$Y_i = P_1 + P_2(t_i) + P_3(t_i)^2 + \sum_{k=1}^{2} [s_k \sin(2k\pi t_i) + c_k \cos(2k\pi t_i)] + e$$

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 $t_R$=۰ و $n_p$=۰,۱ 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 یکه پله‌ای 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*



[ Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-07 ]
[ DOR: 20.1001.1.20089635.1402.11.1.3.4 ]
[ DOI: 10.61186/jgit.11.1.37 ]

بیانگر وجود مولفه‌های سالانه و نیم‌سالانه در این مشاهدات دارند[۲۰]. همچنین مطابق مطالعات انجام شده در زمینه سری‌های زمانی تداخل‌سنجی راداری، مولفه‌های سالانه در این مشاهدات استخراج شده‌اند[۳۶ و ۳۷]. با توجه به رویکرد اصلی این مطالعه در زمینه‌ی شناسایی مدل آماری مناسب، با فرض وجود مولفه‌های سالانه و نیم‌سالانه دامنه‌ی آنها با استفاده از تابع هارمونیک به روش کمترین مربعات (*LS-HE*[۱]) مدل‌سازی می‌شوند. جهت ساخت مدل آماری، از نویزهای رنگی و ترکیب آن‌ها استفاده شده است. با فرض وجود نویز سفید در تمامی‌مدل‌ها و همچنین مطابق رابطه(۱۴)، مدل‌های نویز را می‌توان 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، ماتریس‌های نویز سفید، فلیکر و رندوم‌واک ساخته می‌شوند. در ادامه با استفاده از روش *LS-VCE*، مولفه‌های واریانس کواریانس هر مدل برآورد می‌گردد. در نهایت بهترین مدل نویز از میان مدل‌های ساخته‌شده با استفاده از روش *MLE* مشخص می‌گردد. نتایج بدست‌آمده حاکی از این است که در تمامی پیکسل‌ها روابط(۲۳) و (۲۷) به عنوان مناسب‌ترین مدل‌های تابعی و آماری انتخاب شدند. در ادامه نتایج پیکسل‌های شامل ایستگاه‌های *GNSS* بررسی شده‌اند.

### ۴-۳- ارزیابی نتایج با استفاده از سری‌های زمانی ایستگاه‌های دائمی *GNSS*

ایستگاه‌های بررسی شده مطابق شکل (۴) شامل *MAHU*، *MLAN*، *ERL۲*، *NIHO* و *CHRS* می‌باشند[۳۸]. جهت مقایسه نتایج می‌بایست نتایج ایستگاه *GNSS* در راستای دید ماهواره سنتینل۱ تصویر شوند. داده‌های *GNSS* مورد استفاده، حل نهایی هستند و به دلایل مختلف از قبیل قطع شدن ارتباط ماهواره و گیرنده دارای پیوستگی زمانی نمی‌باشند[۳۸]. با فرض عاری‌بودن این نتایج از خطا، تصحیحات انجام شده در تکنیک *SBAS* مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. جدول (۱) به موقعیت ایستگاه‌های *GNSS* اشاره می‌نماید.

زاویه فرود و آزیموت متوسط ماهواره در منطقه مطالعاتی به ترتیب برابر $۳۳٫۹۲۸^{\circ}$ و $۱۹۰٫۷۹۸۹^{\circ}$ می‌باشند. با استفاده از رابطه(۷)، سری‌های زمانی *GNSS* در راستای دید ماهواره سنتینل تصویر می‌شوند. 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 تک‌متغیره و نقاط مشکی رنگ نتایج بدست آمده پیش از اعمال فیلترهای بالاگذر و پایین گذر می‌باشند. همچنین در این اشکال، رگرسیون خطی جهت نمایش روند نسبی هر روش ترسیم شده است. در اشکال (۸)، (۹) و (۱۱) که به ترتیب بیان‌گر رفتار ایستگاه‌های *MLAN*، *ERL۲* و *CHRS* هستند، رگرسیون خطی، نشان‌دهنده نزدیک بودن روند نسبی نتایج روش‌های آنالیز نویز کمترین مربعات و فیلترهای بالاگذر و پایین‌گذر است.

در مقابل با بررسی شکل (۷) که نشان‌دهنده رفتار ایستگاه *MAHU* است، مشاهده می‌شود که رگرسیون خطی در دوحالت قبل و بعد از فیلترهای بالاگذر و پایین‌گذر از نتایج متناظر در حالت آنالیز نویز کمترین مربعات تک‌متغیره به نتایج ایستگاه‌های *GNSS* نزدیک‌تر است. با این وجود مطابق جدول(۲) ریشه میانگین مربعات خطا *(RMSE)* آنالیز نویز کمترین مربعات تک‌متغیره بهتر از دو حالت ذکر شده است. با توجه به نکات ذکر شده می‌توان به این نتیجه رسید که

[۱] *Least Squares Harmonic Estimation*

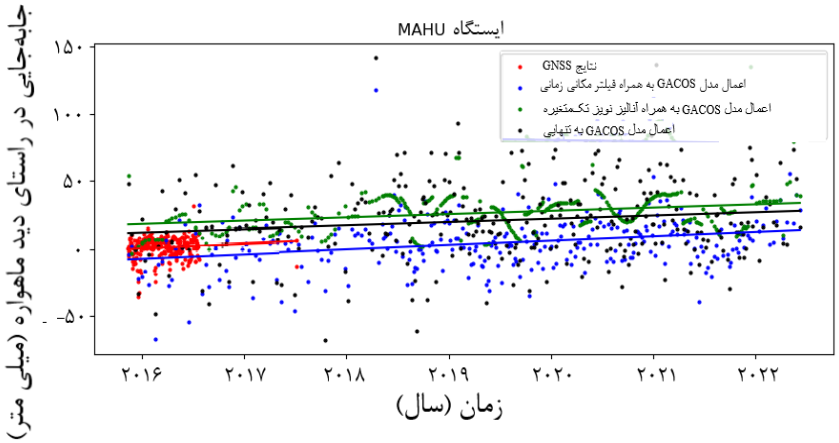


[ Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-07 ]
[ DOR: 20.1001.1.20089635.1402.11.1.3.4 ]
[ DOI: 10.61186/jgit.11.1.37 ]

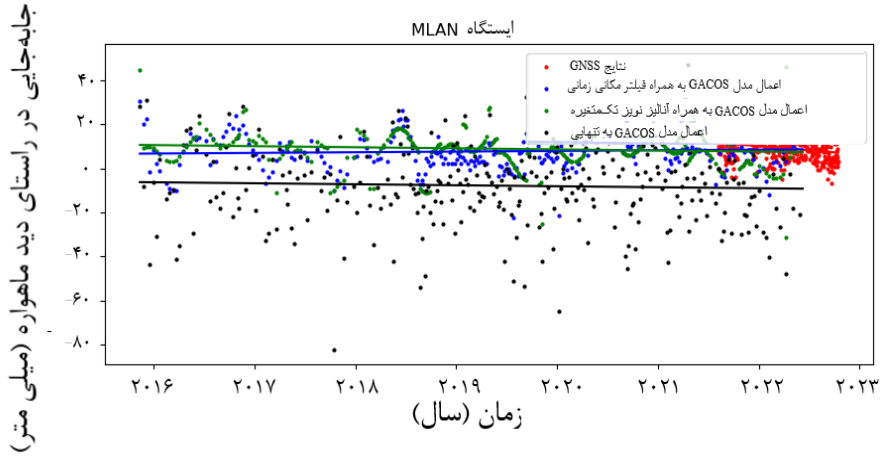
با استفاده از آنالیز نویز کمترین مربعات تک‌متغیره، از پراکندگی مشاهدات کاسته می‌شود. در شکل(۱۰) که نشان‌دهنده رفتار ایستگاه *NIHU* است، رگرسیون خطی آنالیز نویز کمترین مربعات تک‌متغیره از دو حالت دیگر به رگرسیون خطی داده‌های *GNSS* نزدیک‌تر است. همچنین در این ایستگاه، پیش از اعمال فیلترهای بالاگذر و پایین‌گذر پراکندگی سری زمانی از دو حالت دیگر بیشتر است.

**جدول ۱: موقعیت ایستگاه‌های دائمی *GNSS***

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



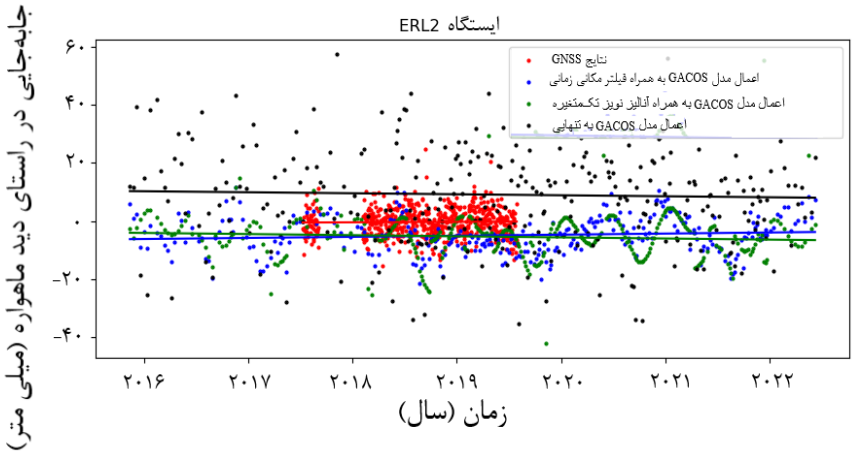

**شکل ۷: تصحیحات مختلف در ایستگاه *MAHU*. (نقاط قرمز نشان‌دهنده نتایج *GNSS*، نقاط آبی نشان‌دهنده نتایج تحت تاثیر فیلترهای بالاگذر و پایین گذر، نقاط سبز نتایج تحت تاثیر ماتریس وزن آنالیز نویز تک‌متغیره و نقاط مشکی رنگ نشان‌دهنده نتایج پیش از اعمال فیلتر)**



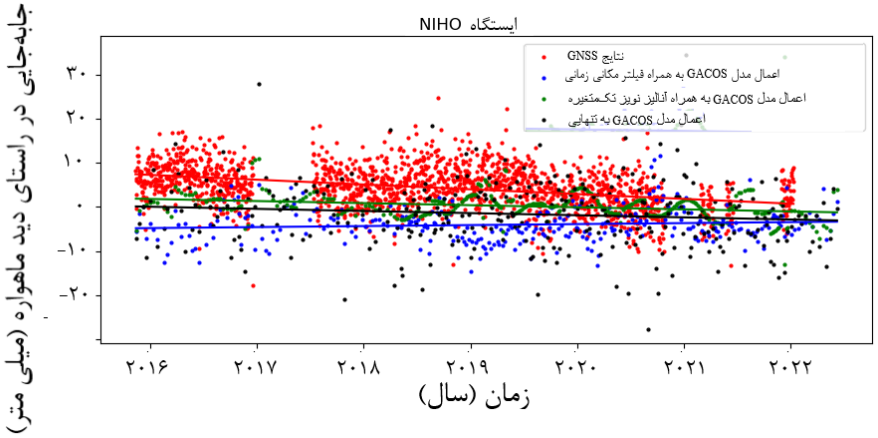

**شکل ۸: تصحیحات مختلف در ایستگاه *MLAN***



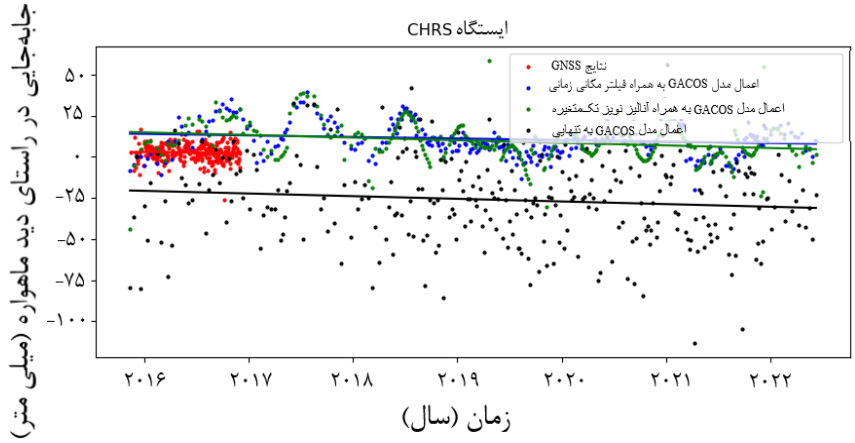
[ Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-07 ]
[ DOR: 20.1001.1.20089635.1402.11.1.3.4 ]
[ DOI: 10.61186/jgit.11.1.37 ]




**شکل ۹: تصحیحات مختلف در ایستگاه *ERL2***




**شکل ۱۰: تصحیحات مختلف در ایستگاه *NIHO***




**شکل ۱۱: تصحیحات مختلف در ایستگاه *CHRS***



[ Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-07 ]
[ DOR: 20.1001.1.20089635.1402.11.1.3.4 ]
[ DOI: 10.61186/jgit.11.1.37 ]

پس از بدست آوردن نتایج فوق، مطابق جدول (۲)، می‌توان *RMSE* روش‌های اعمال‌شده 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 پایین گذر، 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 محاسبه‌ی *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 بررسی‌شده، تمامی تصحیحات اعمال‌شده 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.

**جدول ۲: *RMSE* نتایج در ایستگاه‌های مختلف**

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

**جدول ۳: تصحیحات در ایستگاه‌های مختلف**

| نام ایستگاه | *MAHU* | *MLAN* | *ERL2* | *NIHO* | *CHRS* |
|---|---|---|---|---|---|
| درصد بهبود نتایج حاصل از اعمال مدل اتمسفری و فیلترهای بالاگذر و پایین گذر | 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٪ |



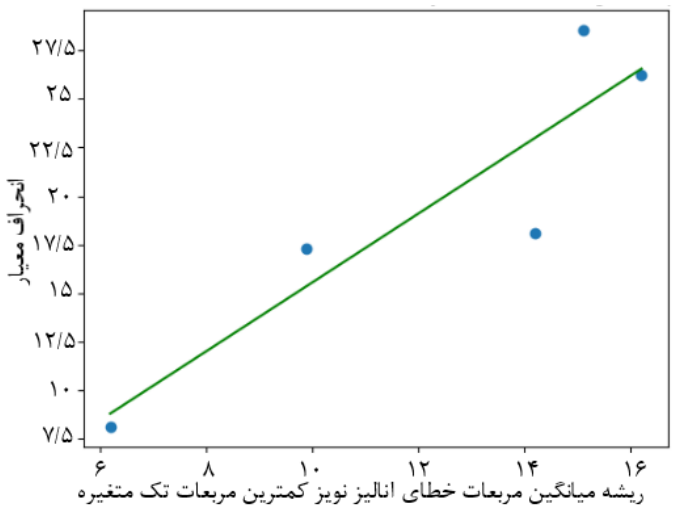
[ Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-07 ]
[ DOR: 20.1001.1.20089635.1402.11.1.3.4 ]
[ DOI: 10.61186/jgit.11.1.37 ]

### ۴-۴- آنالیز نویز تک‌متغیره در پیکسل‌های شامل ایستگاه‌های GNSS

پس از انتخاب مدل تابعی و آماری مناسب، مشاهدات با استفاده ماتریس واریانس کواریانس مربوطه، باز تولید می‌شود. در این مطالعه مناسب‌ترین مدل تابعی رابطه(۲۳) شامل ترند خطی، تابع هویساید و تابع هارمونیک و مناسب‌ترین مدل آماری رابطه (۲۷) شامل نویز سفید انتخاب شدند. در ادامه $\widehat{\sigma}$ در هر پیکسل با استفاده از رابطه (۱۸) محاسبه می‌شود. مقادیر $\widehat{\sigma}$ و انحراف معیار متناظر آن در هر پیکسل مطابق جدول(۴) می‌باشد. مطابق این جدول، نویز شناسایی شده در ایستگاه *NIHO* کمترین و در ایستگاه *MAHU* بیشترین میزان آن می‌باشد. با بررسی انحراف معیار $\widehat{\sigma}$ و *RMSE* روش آنالیز نویز کمترین مربعات در هر ایستگاه، می‌توان به ارتباط این دو مولفه پی‌برد. مطابق شکل(۱۲) همبستگی *RMSE* آنالیز نویز کمترین مربعات و انحراف معیار متناظر آن برابر ۰٫۹۱ می‌باشد و این میزان، نشان‌دهنده همبستگی بالای این دو مولفه است. با توجه به همبستگی این دو مولفه، می‌توان به این نکته اشاره نمود که در صورت بررسی و شناسایی مدل آماری مناسب‌تر، انتظار می‌رود نتایج مطلوب‌تری حاصل شود.

**جدول ۴: مقدار $\widehat{\sigma}$ در پیکسل‌های حاوی ایستگاه‌های GNSS**

| نام ایستگاه | *MAHU* | *MLAN* | *ERL2* | *NIHO* | *CHRS* |
|---|---|---|---|---|---|
| $\widehat{\sigma}$ (*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 تک‌متغیره و انحراف معیار نویز برآورد شده**

### ۴- بحث و نتیجه‌گیری

نادیده‌گرفتن تاثیر نویزها و آشفتگی‌های موجود در سری‌های زمانی تداخل‌سنجی راداری، باعث اختلال در نتایج می‌گردد. در این مطالعه مشاهده می‌شود که استفاده از مدل‌های اتمسفری در برخی موارد جهت حذف نویزهای موجود کافی نمی‌باشد. هدف اصلی در این مطالعه، فیلتر سری‌های زمانی تداخل‌سنجی راداری با در نظرداشتن مدل تابعی و آماری مناسب می‌باشد.



[ Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-07 ]
[ DOR: 20.1001.1.20089635.1402.11.1.3.4 ]
[ DOI: 10.61186/jgit.11.1.37 ]

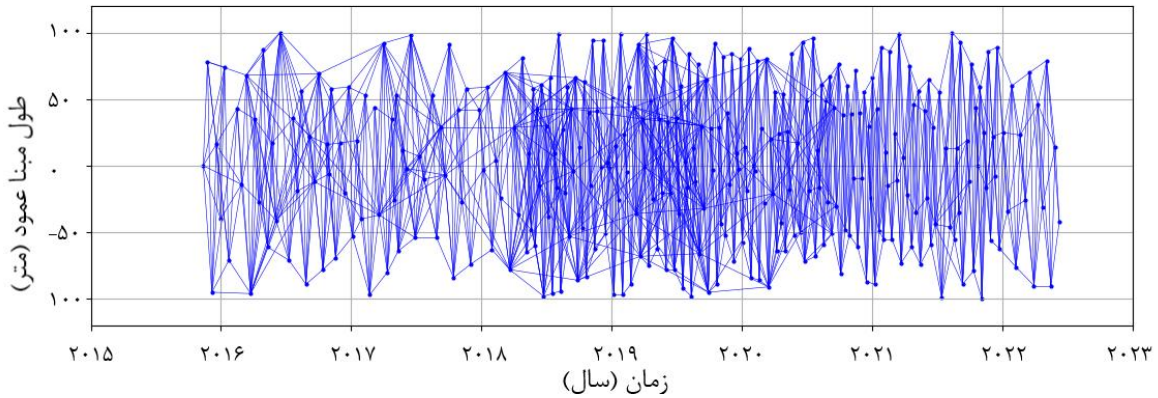
این روند با برآورد مدل آماری با استفاده از آنالیز نویز کمترین مربعات تک‌متغیره انجام می‌شود. به همین منظور ابتدا سری‌های زمانی نهایی تداخل‌سنجی راداری به همراه اعمال تصحیحات اتمسفری با استفاده از مدل *GACOS* تولید شده‌اند. در ادامه سری‌های زمانی نهایی با استفاده دو روش فیلترهای بالاگذر و پایین‌گذر و 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 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 لیکسباس که امکان پردازش‌های لازم تداخل‌سنجی راداری در آن فراهم شده است.

## پیوست

**پیوست ۱:**




**پیوست ۱: شبکه تداخل‌نماها بر اساس طول مبنای مکانی و زمانی**



[ Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-07 ]
[ DOR: 20.1001.1.20089635.1402.11.1.3.4 ]
[ DOI: 10.61186/jgit.11.1.37 ]

**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:*




[ Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-07 ]
[ DOR: 20.1001.1.20089635.1402.11.1.3.4 ]
[ DOI: 10.61186/jgit.11.1.37 ]

*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-*



[ Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-07 ]
[ DOR: 20.1001.1.20089635.1402.11.1.3.4 ]
[ DOI: 10.61186/jgit.11.1.37 ]

*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.*



[ Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-07 ]
[ DOR: 20.1001.1.20089635.1402.11.1.3.4 ]
[ DOI: 10.61186/jgit.11.1.37 ]

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

*Journal of Geospatial Information Technology*
**Vol.11, No.1, Spring 2023**

***Research Paper***

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

***Mohsen Zeynalpour [1], Hamid Mehrabi [2]*, Ali Reza Amiri-simkooie [3]***

*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.*

***Correspondence Address:*** *Department of Geomatics, Faculty of Civil and Transportation Engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran.*
***Tel :*** *+98 31 37935297.*
***Email****: h.mehrabi@eng.ui.ac.ir*



[ Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-07 ]
[ DOR: 20.1001.1.20089635.1402.11.1.3.4 ]
[ DOI: 10.61186/jgit.11.1.37 ]