

# بررسی حساسیت به نویز مسأله بازیابی میدان جابه‌جایی سه‌بعدی حاصل از تداخل‌سنجی راداری (مطالعه موردی: به‌ترتیب زلزله‌های ۱۶ فروردین و ۲۱ آبان سال ۱۳۹۶ سفیدسنگ و ازگله)

سید ساسان بابایی<sup>۱</sup>، مسعود مشهدی حسینعلی<sup>۲\*</sup> و سمیع سمیعی اصفهانی<sup>۳</sup>

۱. دانشجوی دکتری، گروه ژئودزی، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

۲. دانشیار، گروه ژئودزی، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

۳. استادیار، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

(دریافت: ۹۸/۶/۲۷، پذیرش نهایی: ۹۸/۱۱/۱)

## چکیده

در دهه‌های اخیر فناوری تداخل‌سنجی راداری ابزاری کارا را برای اندازه‌گیری کمی تغییر شکل زمین، تحت تأثیر عوامل طبیعی و انسانی نظیر فرونشست، زلزله، زمین‌لغزش، برداشت بی‌رویه از سفره‌های آب زیرزمینی و معدن‌کاری فراهم کرده است. با این وجود ماهیت اندازه‌گیری جابه‌جایی در راستای خط دید ماهواره در این فناوری، امکان استخراج میدان جابه‌جایی سه‌بعدی سطح زمین مخصوصاً در مطالعه بسیاری از پدیده‌های زمین‌ساختی که نیازمند درک جامعی از مؤلفه‌های جابه‌جایی سه‌بعدی‌شان است را با چالش مواجه می‌کند، لذا همواره حداقل سه هندسه مستقل راداری نیاز است تا حل مسأله بازیابی میدان جابه‌جایی سه‌بعدی امکان‌پذیر شود. با این حال هندسه قطبی تصویربرداری ماهواره‌های راداری به‌نجوی است که سهم جابه‌جایی و تأثیر نویز مشاهدات بر پارامترهای مجهول (مؤلفه‌های سه‌بعدی) متفاوت می‌شود و حتی در برخی از موارد مسأله ناپایدار خواهد شد. لذا در این تحقیق حساسیت به نویز مسأله بازیابی میدان جابه‌جایی سه‌بعدی در هندسه‌های مستقل و متفاوت راداری بررسی و همچنین براساس روش همپوشانی بین مدارها در ماهواره راداری سنتینل، با استفاده از داده‌های شبیه‌سازی شده و واقعی میدان جابه‌جایی سه‌بعدی زلزله‌های به‌ترتیب ۱۶ فروردین و ۲۱ آبان سال ۱۳۹۶ سفیدسنگ و ازگله بازیابی می‌شود و کارایی این روش مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

**واژه‌های کلیدی:** تداخل‌سنجی راداری، جابه‌جایی در راستای خط دید ماهواره، مؤلفه‌های جابه‌جایی سه‌بعدی، آنالیز حساسیت به نویز، زلزله سفیدسنگ، زلزله ازگله کرمانشاه.

## ۱. مقدمه

گوناگونی نظیر ترازایی دقیق، سامانه‌های تعیین موقعیت مکانی و فناوری تداخل‌سنجی راداری اشاره کرد (سولاری و همکاران، ۲۰۱۸؛ شاو و هی، ۲۰۱۳؛ بابایی و همکاران، ۲۰۱۶). از میان روش‌های فوق، فناوری تداخل‌سنجی راداری (InSAR, Interferometric Synthetic aperture radar) با برخورداری از پوشش زمینی وسیع و پیوسته، قدرت تفکیک زمانی و مکانی زیاد و نیز دقت بالا در اندازه‌گیری به‌یکی از روش‌های مهم و قابل توجه تبدیل شده است (هنسن، ۲۰۰۱؛ ماسونت و همکاران، ۱۹۹۳؛ بملر و هارتل، ۱۹۹۸).

فناوری تداخل‌سنجی راداری از لحاظ نظری قادر است

اندازه‌گیری جابه‌جایی‌های پوسته زمین اطلاعات بسیار مفیدی را در مورد تغییرات پوسته و زمین شناسی آن در اختیار محققین قرار می‌دهد، از این رو به یکی از پژوهش‌های مهم و کاربردی در مباحث گوناگون علوم زمین تبدیل شده است. این اندازه‌گیری‌ها در پیشگیری و رفتارشناسی سوانح طبیعی از قبیل زلزله، فرونشست، زمین‌لغزش، فعالیت آتشفشان‌ها و دیگر فعالیت‌های زمین‌ساختی و حتی غیر زمین‌ساختی نظیر آزمایش‌های هسته‌ای زیرزمینی، استخراج از منابع و معادن و مانند آن نقش به‌سزایی دارند. برای انجام این اندازه‌گیری‌های ژئودتیکی و پایش تغییر شکل زمین می‌توان به روش‌های

بردار جابه‌جایی سه‌بعدی به‌ازای هر پیکسل به‌دست می‌آید.

از طرفی با توجه به این‌که سنجنده‌های راداری در مدارهای تقریباً قطبی تصویربرداری خود را انجام می‌دهند، بنابراین در صورتی‌که جابه‌جایی واقعی راستایی کاملاً شمالی و جنوبی داشته باشد، این بردار جابه‌جایی تصویر بسیار ضعیفی بر روی بردار LOS خواهد داشت؛ لذا این مؤلفه (شمالی- جنوبی) به‌سختی قابل‌نمایش است. همین مسأله باعث می‌شود که ساختار هندسی ایجادشده ناشی از عبور چند ماهواره برای بازیابی میدان جابه‌جایی سه‌بعدی، ساختاری ضعیف و حتی در برخی موارد دارای شرایط ناپایدار باشد.

در استفاده از هندسه‌های مختلف برای بازیابی میدان جابه‌جایی سه‌بعدی علاوه بر احتمال ناپایداری در مسأله، مشکل پایین بودن یا حتی صفر بودن درجه آزادی نیز وجود دارد که باعث کاهش اعتمادپذیری به نتایج می‌شود. در این‌گونه مسائل نتایج به‌شدت تحت‌تأثیر نویز مشاهدات خواهند بود و با یک تغییر کوچک در بردار مشاهدات، احتمال تغییر فاحش در پارامترهای مجهول دور از ذهن نیست ولی باین‌وجود میزان تغییرات در پارامترهای مجهول یکسان نیست و برای مؤلفه‌های مختلف متفاوت خواهد بود. لذا در این پژوهش در بخش اول ضمن بررسی پایداری یا ناپایداری مسأله بازیابی میدان جابه‌جایی سه‌بعدی، از طریق ماتریس واریانس- کوواریانس دقت بازیابی مؤلفه‌های سه‌بعدی مجهول محاسبه شده است؛ سپس ابزار آنالیز مؤلفه‌های اصلی برای بررسی دقیق حساسیت به نویز هر کدام از مؤلفه‌های میدان سه‌بعدی در وضعیتی که مسأله بد وضع و یا حتی ناپایدار است، معرفی شده است.

در بخش دوم با استفاده از داده‌های شبیه‌سازی شده ضمن پیاده‌سازی روشی مبتنی بر همپوشانی بین مدارها در ماهواره راداری سنتینل برای بازیابی مؤلفه‌های میدان سه‌بعدی، میزان حساسیت به نویز مشاهدات در نتایج میدان

تغییرات سطح زمین را با دقتی در حدود سانتی‌متر یا حتی میلی‌متر اندازه‌گیری کند، باین‌وجود دقت به‌دست‌آمده در عمل به خطای سیگنال‌های جوی و ناهمبستگی‌های زمانی و مکانی تصاویر بستگی دارد (هو و همکاران، ۲۰۱۴). علی‌رغم دقت نسبتاً خوب این تکنیک در مقایسه با سایر روش‌های ژئودتیکی که برای پایش تغییر شکل زمین بکار می‌روند، باین‌حال این تکنیک هنوز با محدودیت‌هایی همچون وجود ابهام فاز و نیاز به اطلاعات اولیه در مورد جابه‌جایی به‌منظور رفع ابهام در فاز، ناهمبستگی زمانی و مکانی و اندازه‌گیری تصویر جابه‌جایی واقعی بر روی خط دید ماهواره (به خاطر هندسه جانبی LOS, Line Of Side) (به خاطر هندسه جانبی تصویربرداری ماهواره‌های راداری) روبرو است (هنسن، ۲۰۰۱؛ رودریگز و مارتین، ۱۹۹۲).

در دهه‌های اخیر، با رشد سریع سنجنده‌های راداری و افزایش قدرت تفکیک زمانی و مکانی آنها و توسعه روش‌های آنالیز سری زمانی تداخل‌سنجی راداری و الگوریتم‌های موجود محققین زیادی سعی در بهبود محدودیت‌های پیش‌روی این فناوری کردند (براردینو و همکاران، ۲۰۰۲؛ فریتی و همکاران، ۲۰۰۱؛ هوپر و همکاران، ۲۰۰۷؛ کمپس و هنسن، ۲۰۰۴؛ ژانگ و همکاران، ۲۰۱۱). باین‌وجود، هنوز محدودیت اندازه‌گیری‌های یک‌بعدی تداخل‌سنجی راداری به‌عنوان یک نقص ذاتی به‌قوت خود باقی‌مانده است. به‌عبارتی‌دیگر، این فناوری فقط قادر است تصویر جابه‌جایی سه‌بعدی واقعی را بر روی خط دید ماهواره (که برای سادگی از این‌پس با LOS از آن یاد می‌کنیم) اندازه‌گیری کند؛ حال آن‌که در آنالیز تغییرشکل به بردارهای جابه‌جایی در راستای مؤلفه‌های مختصاتی نیاز است نه مقادیر جابه‌جایی LOS، بنابراین یکی از روش‌های مرسوم برای استخراج مؤلفه‌های سه‌بعدی جابه‌جایی واقعی اندازه‌گیری حداقل سه مشاهده راداری با هندسه‌های مختلف برای یک منطقه است که در این صورت با حل یک دستگاه سه معادله و سه مجهول،

$$D_{LOS} = U_u \cos \theta - U_e \sin \theta \cos \alpha + U_n \sin \theta \sin \alpha \quad (1)$$

در فرمول‌های بالا  $U_u$ ،  $U_e$  و  $U_n$  به ترتیب مؤلفه‌های بالا-پایین، شرقی-غربی و شمالی-جنوبی میدان جابه‌جایی سه‌بعدی واقعی،  $\alpha$  بیانگر زاویه آزیموت ماهواره،  $\theta$  بیانگر زاویه دید ماهواره نسبت به راستای نادیر هستند.

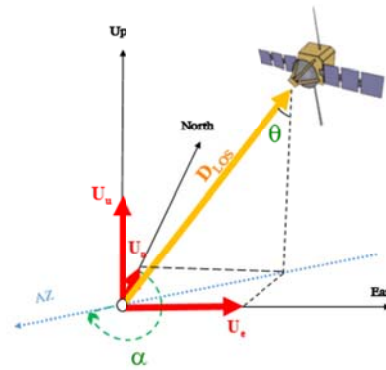
در حال حاضر ماهواره‌های راداری در مدارهای نزدیک به قطبی حرکت کرده و تصویربرداری انجام می‌دهند، بنابراین آزیموت حرکت این ماهواره‌های در مدارهای بالاگذر (۳۴۶~) یا پایین‌گذر (۱۹۰~) تقریباً ثابت است و به‌ندرت تا چند درجه تغییر می‌کند. برخلاف آزیموت، زاویه دید برای سنجنده‌های راداری مختلف متفاوت است و به گستره تصویربرداری (برد نزدیک در مقابل برد دور) و مُد تصویربرداری بستگی دارد (وان لیجن، ۲۰۱۴). لذا قدر مطلق اندازه جابه‌جایی مشاهده‌شده در جهت خط دید ماهواره به‌اندازه قابل توجهی به زاویه دید ماهواره بستگی دارد.

تأثیر مهم دیگری که ماهیت قطبی بودن مدار ماهواره راداری بر جابه‌جایی LOS دارد، حساسیت کم این مشاهده به جابه‌جایی در راستای مؤلفه شمالی-جنوبی است. در واقع سهم این مؤلفه از جابه‌جایی اندازه‌گیری شده بسیار اندک است که این امر باعث کم شدن دقت محاسبه این مؤلفه می‌شود (هنسن، ۲۰۰۱؛ گو و همکاران، ۲۰۱۷). تداخل‌سنجی راداری با استفاده از دو عبور بالاگذر و پایین‌گذر برای یک منطقه، دو معادله مشاهده در راستای خط دید ماهواره برای هر پیکسل اندازه‌گیری می‌کند (شکل ۲-الف)، حال آن‌که برای استخراج سه مؤلفه متعامد میدان جابه‌جایی سطحی یعنی مؤلفه‌های شمالی-جنوبی ( $U_n$ )، شرقی-غربی ( $U_e$ ) و بالا-پایین ( $U_u$ ) حداقل به سه مشاهده مستقل نیاز است (شکل ۲-ب).

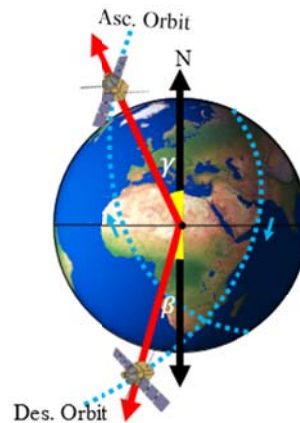
سه‌بعدی بازیابی شده بررسی شده است. بخش پایانی مقاله به بازیابی میدان سه‌بعدی زلزله‌های سال ۱۳۹۶ سفیدسنگ و ازگله با روش ذکرشده پرداخته و در انتها با توجه به نتایج خروجی کارایی این روش مورد ارزیابی قرار گرفته است.

## ۲. مسأله بازیابی میدان جابه‌جایی سه‌بعدی

تصویربرداری راداری، مؤلفه‌های مشاهداتی جابه‌جایی را در راستای دید ماهواره و در دو عبور بالاگذر (Ascending) و پایین‌گذر (Descending) اندازه‌گیری می‌کند (شکل ۱). جابه‌جایی در راستای خط دید ماهواره یا LOS از مؤلفه‌های افقی و قائم میدان جابه‌جایی واقعی تشکیل می‌شود و معادله آن را به‌صورت رابطه ۱ می‌توان نوشت (فیالکو و همکاران، ۲۰۰۱؛ ۱۶۲؛ هنسن، ۲۰۰۱).



(الف)



(ب)

شکل ۱. اندازه‌گیری جابه‌جایی در راستای خط دید ماهواره. الف) تجزیه بردار جابه‌جایی بر روی خط دید ماهواره به جابه‌جایی سه‌بعدی واقعی، ب) هندسه مدارهای بالا و پایین‌گذر.

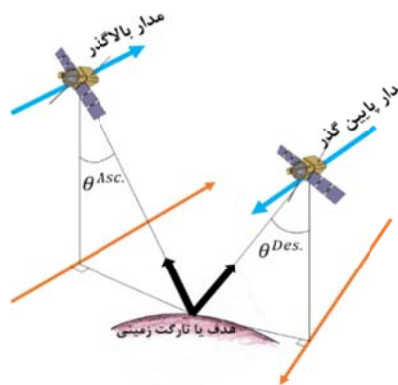
$$\begin{pmatrix} D_{LOS}^{Des.} \\ D_{LOS}^{Asc.} \\ D_{LOS}^{Asc.} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta^{Des.} & -\sin \theta^{Des.} \cos \alpha^{Des.} & \sin \theta^{Des.} \sin \alpha^{Des.} \\ \cos \theta^{Asc.} & -\sin \theta^{Asc.} \cos \alpha^{Asc.} & \sin \theta^{Asc.} \sin \alpha^{Asc.} \\ \cos \theta^{Asc.} & -\sin \theta^{Asc.} \cos \alpha^{Asc.} & \sin \theta^{Asc.} \sin \alpha^{Asc.} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_u \\ U_e \\ U_n \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \delta_{LOS}^{Des.} \\ \delta_{LOS}^{Asc.} \\ \delta_{LOS}^{Asc.} \end{pmatrix} \quad (2)$$

معادلات مستقل است، در صورتی که در مبحث تداخل سنجی راداری همواره مشکل پایین بودن تعداد مشاهدات و درجه آزادی وجود دارد و به سختی می توان مناطقی از زمین پیدا کرد که همزمان توسط چندین هندسه مستقل راداری تصویربرداری شده اند.

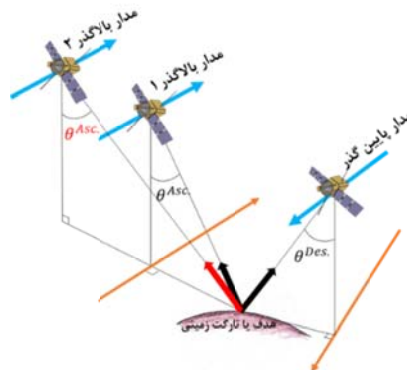
۳. سهم مؤلفه های جابه جایی سه بعدی از جابه جایی در راستای خط دید ماهواره برای مدارهای پایین و بالا گذر

در این بخش سهم مؤلفه های جابه جایی سه بعدی از مشاهده جابه جایی LOS اندازه گیری شده بررسی می شود. همان طور که پیش تر در مورد آن بحث شد، محققان زیادی با تکیه بر این موضوع که میزان حساسیت مشاهدات راداری به راستای شمالی-جنوبی کم است، به دنبال روش هایی برای اندازه گیری جابه جایی در راستای آزیموتی بوده اند تا این حساسیت کم را جبران کنند. در کار پژوهشی که توسط گو و همکاران (۲۰۱۷) انجام شد، ضریب یا سهم هر یک از مؤلفه های شمالی-جنوبی، شرقی-غربی و بالا-پایین به جابه جایی LOS برای مدارهای بالاگذر و پایین گذر با استفاده از رابطه ۱ به صورت شکل ۳ ارائه شده است (گو و همکاران، ۲۰۱۷). همان طور که در این شکل نشان داده شده است، جابه جایی بالا-پایین (منحنی آبی رنگ) بیشترین سهم را دارد؛ که البته با افزایش زاویه دید اندازه آن در هر دو مسیر به تدریج کاهش یافته است. سهم مؤلفه شرقی-غربی از ۲۰ درصد شروع شده و با رفتاری معکوس برای مدارهای بالاگذر و پایین گذر (منحنی نیلی رنگ)، تا ۹۰ درصد با تغییر زاویه دید ماهواره تغییر کرده است. باین وجود سهم مؤلفه شمال-جنوبی برای هر دو مدار و زوایای دید مختلف (۱۵ تا ۵۵ درجه) تقریباً ثابت و از ۶ تا ۲۰ درصد تغییر کرده است.

در فرم ماتریسی بالا  $\delta, D$  به ترتیب بیانگر جابه جایی در راستای LOS و خطای اندازه گیری این جابه جایی هستند.



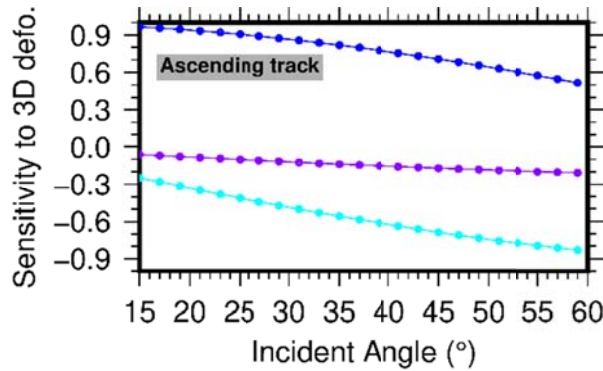
(الف)



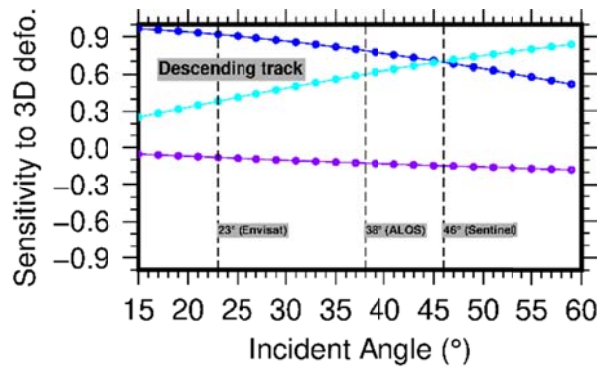
(ب)

شکل ۲. هندسه تصویربرداری راداری. الف) تصویربرداری جابه جایی بر روی دو امتداد بالا و پایین گذر ب) تصویربرداری جابه جایی بر روی دو امتداد بالاگذر و یک امتداد پایین گذر.

دستگاه معادلات ۲ حداقل تعداد معادلات را برای حل مسئله بازیابی میدان جابه جایی سه بعدی فراهم می کند، باین حال در اینجا درجه آزادی صفر است و نتایج به دست آمده از این دستگاه معادلات نتایج قابل اعتمادی نخواهند بود؛ مخصوصاً زمانی که ماتریس ضرایب آن دارای رفتار ناپایدار باشد که در این صورت پارامترهای مجهول به شدت وابسته به نویز موجود در مشاهدات خواهند بود. یکی از راه های افزایش اعتمادپذیری نتایج افزایش تعداد



(الف)



(ب)

شکل ۳. محاسبه ضریب یا سهم مؤلفه‌های جابه‌جایی سه‌بعدی از جابه‌جایی LOS نسبت به زوایای دید مختلف برای مدارهای الف) بالاگذر و ب) پایین‌گذر. برای محاسبه این ضرایب آزمایشات ماهواره در مسیر بالاگذر ۳۴۶ درجه و در مسیر پایین‌گذر ۱۹۰ درجه فرض شده است. خط‌چین‌های قائم نشان‌دهنده زوایای دید ماهواره‌های Envisat (۲۳ درجه)، ALOS (۳۸ درجه) و Sentinel (۴۶ درجه) هستند (گو و همکاران، ۲۰۱۷).

دارای اختلافی در حدود یک تا دو درجه هستند که این خود باعث اختلاف کوچکی در سهم جابه‌جایی‌های شرقی-غربی و شمالی-جنوبی در مدارهای بالا و پایین‌گذر شده است (جدول ۱).

به‌طور کلی همان‌طور که در بخش ۲ ذکر شد، آزمایشات ماهواره‌های راداری در دو مدار بالاگذر و پایین‌گذر تقریباً ثابت است، با این حال این آزمایشات نسبت به محور شمالی جنوبی زمین کاملاً متقارن نبوده (شکل ۱-ب) و

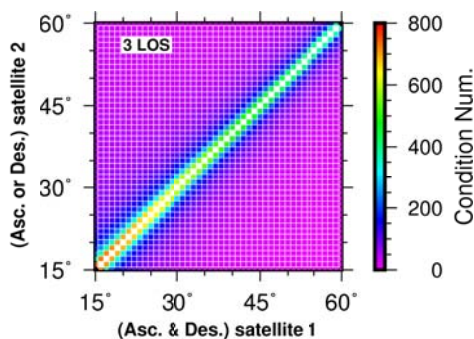
جدول ۱. سهم مؤلفه‌های جابه‌جایی سه‌بعدی از جابه‌جایی LOS برای چند نمونه از ماهواره‌های راداری.

ماهواره	مدار	زاویه دید (درجه)	$U_u$	$U_e$	$U_n$
ENVISAT	بالاگذر	۲۳	۰/۹۲۰۵	-۰/۰۹۴۷	-۰/۳۷۸۹
ENVISAT	پایین‌گذر	۲۳	۰/۹۲۰۵	-۰/۰۸۸۸	۰/۳۸۰۵
ALOS	بالاگذر	۳۸	۰/۸۲۹۲	-۰/۱۳۵۶	-۰/۵۴۲۲
ALOS	پایین‌گذر	۳۸	۰/۸۲۹۲	-۰/۱۲۷۱	۰/۵۴۴۵
Sentinel	بالاگذر	۴۶	۰/۶۹۵۰	-۰/۱۷۴۴	-۰/۶۹۷۶
Sentinel	پایین‌گذر	۴۶	۰/۶۹۵۰	-۰/۱۶۳۵	۰/۷۰۰۵

در رابطه ۳ به ازای زوایای دید مختلف (آزموت ثابت) عدد شرط ماتریس ضرایب مدل ( $A$ ) در هر مرحله محاسبه می‌شود، با این کار می‌توان درباره پایداری یا ناپایداری مسئله بازیابی میدان سه‌بعدی حاصل از مشاهدات LOS حداقل در سه هندسه مستقل اظهارنظر کرد. طبق تعریف در صورتی که عدد شرط ماتریس ضرایب یک دستگاه معادلات همزمان مقدار بزرگی شود انتظار می‌رود که با اعمال تغییر کوچکی در بردار مقادیر معلوم (مشاهدات)، تغییر فاحشی در بردار مجهولات ایجاد شود یا به عبارت دیگر در صورت بزرگ شدن عدد شرط ماتریس ضرایب یک دستگاه معادلات همزمان احتمال ناپایداری مسئله وجود دارد.

عدد شرط ( $cond(A)$ ) در واقع نشان‌دهنده صحت نتایج در حل یک دستگاه معادله خطی همزمان است. طبق تعریف؛ یک سیستم معادله همزمان، در صورتیکه عدد شرط آن نزدیک به ۱ باشد ( $cond(A) \approx 1$ ) به عنوان یک سیستم معادله خوش‌وضع تلقی می‌شود. در غیر این صورت هرچقدر که این عدد شرط از ۱ فاصله می‌گیرد ( $cond(A) \gg 1$ ) احتمال بد وضع بودن این سیستم معادله افزایش می‌یابد. عدد شرط یک دستگاه معادله همزمان به صورت نسبت بزرگ‌ترین به کوچک‌ترین مقدار ویژه (بردار مقادیر ویژه  $\lambda$ ) ماتریس ضرایب این دستگاه معادله تعریف می‌شود (تارانتولا، ۲۰۰۵).

$$cond(A) = \frac{\max(\lambda)}{\min(\lambda)} \quad (۴)$$



شکل ۴. عدد شرط ماتریس ضرایب دستگاه معادلات همزمان ۳ به ازای زوایای دید مختلف. اعداد شرط روی قطر اصلی به دلیل مقادیر خیلی بزرگ (به سمت بی‌نهایت) حذف شده‌اند.

بنابراین با توجه به مطالب بالا می‌توان گفت در مسئله بازیابی میدان جابه‌جایی سه‌بعدی با استفاده از مشاهدات در LOS در هندسه‌های مستقل، ماتریس ضرایب دستگاه معادلات ۲ تنها وابسته به زاویه دید این هندسه‌های مستقل است. علی‌رغم این که برای بسیاری از هندسه‌های مستقل، دستگاه معادلات ۲ دارای رفتاری خوش‌وضع (پایدار) است، با این حال در برخی موارد این دستگاه معادلات به خاطر سهم اندک مؤلفه شمالی-جنوبی از جابه‌جایی در راستای خط دید ماهواره و همچنین برابری تقریبی سهم جابه‌جایی‌های شرقی-غربی و شمالی-جنوبی در مسیرهای بالا و پایین‌گذر، دارای رفتاری ناپایدار است که به پایداری نیاز دارد. علاوه بر این با توجه به این که در حالت ناپایداری یا بد وضع بودن ماتریس ضرایب محاسبه معکوس این ماتریس همراه با خطا خواهد بود؛ لذا ماتریس وارینانس-کووارینانس مجهولات به درستی محاسبه نمی‌شود، پس نمی‌توان در مورد دقت مجهولات یا میزان حساسیت آنها به نویز ورودی اظهارنظر کرد. توجه شود که در اینجا منظور از حساسیت میزان پایداری در محاسبه مقادیر مجهول با تغییر در نویز ورودی مشاهدات است و متفاوت از سهم مجهولات از جابه‌جایی مشاهده شده مذکور در ابتدای بخش است.

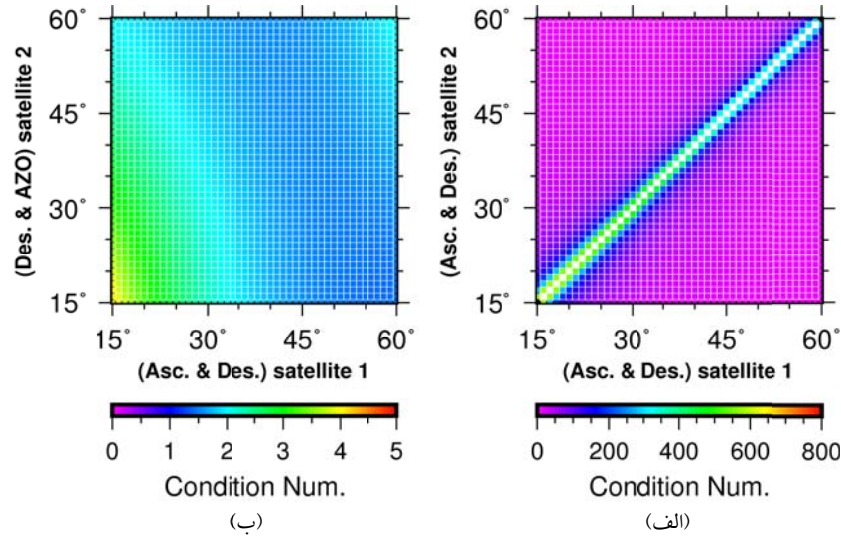
#### ۴. آنالیز حساسیت به نویز مؤلفه‌های جابه‌جایی

##### سه‌بعدی

فرض کنید از یک منطقه خاص سه هندسه راداری مستقل وجود دارد (مدار بالا و پایین‌گذر برای ماهواره اول و مدار پایین‌گذر برای ماهواره دوم)، با این فرض می‌توان ماتریس ضرایب مسئله بازیابی میدان سه‌بعدی را به صورت زیر تشکیل داد.

$$\begin{pmatrix} \cos \theta_i^{Sat.1} & -\sin \theta_i^{Sat.1} \cos \alpha_{Asc.}^{Sat.1} & \sin \theta_i^{Sat.1} \sin \alpha_{Asc.}^{Sat.1} \\ \cos \theta_i^{Sat.1} & -\sin \theta_i^{Sat.1} \cos \alpha_{Des.}^{Sat.1} & \sin \theta_i^{Sat.1} \sin \alpha_{Des.}^{Sat.1} \\ \cos \theta_j^{Sat.2} & -\sin \theta_j^{Sat.2} \cos \alpha_{Des.}^{Sat.2} & \sin \theta_j^{Sat.2} \sin \alpha_{Des.}^{Sat.2} \end{pmatrix} \quad A$$

$$that; \theta_i^{Sat.1}, \theta_j^{Sat.2} = (15^\circ, 16^\circ, \dots, 60^\circ) \quad (۳)$$



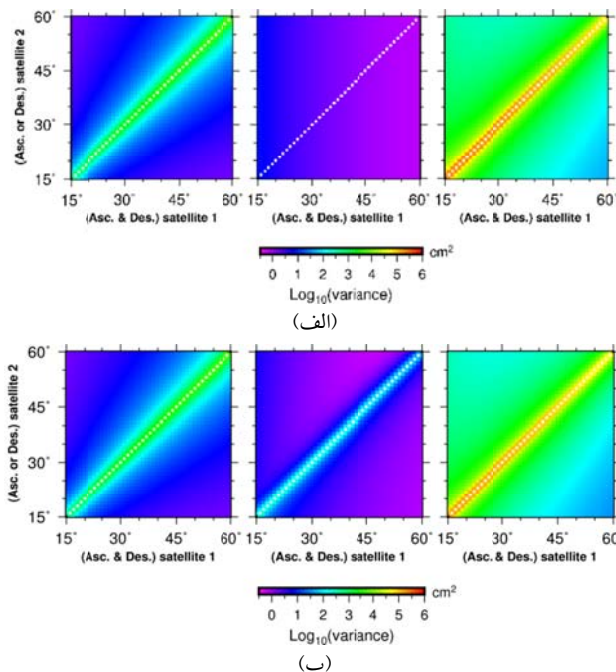
شکل ۵. محاسبه عدد شرط ماتریس ضرایب دستگاه معادلات همزمان ۵، زمانی که (الف) چهار معادله مشاهده مستقل راداری وجود داشته باشد، (ب) سه معادله مستقل به‌علاوه یک معادله مشاهده در جهت آزیموتی  $(D_{ZAO} = U_e \sin \alpha + U_n \cos \alpha)$  وجود داشته باشد.

شکل ۵ نیز وضعیت عدد شرط ماتریس ضرایب را برای حالتی که چهار معادله مستقل راداری یا حالتی که سه معادله مستقل به‌علاوه یک معادله مربوط به جابه‌جایی آزیموتی وجود دارد، نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل‌ها مشخص است تغییرات عدد شرط برای چهار هندسه مستقل تقریباً برابر با حالت سه هندسه مستقل است و به‌ندرت تغییر می‌کند. این در صورتی است که در حالت سه هندسه مستقل به‌علاوه یک معادله مربوط به جابه‌جایی آزیموتی عدد شرط به‌شدت کاهش می‌یابد و به‌ندرت از چهار بیشتر می‌شود، بنابراین در این حالت سیستم معادلات از پایداری بالاتری برخوردار خواهد بود. در مسأله بازیابی میدان جابه‌جایی سه‌بعدی با استفاده از هندسه‌های مختلف، دقت مجهولات به‌طور مستقیم وابسته به ماتریس ضرایب مسأله  $(A)$  است، این ماتریس نقش تعیین‌کننده‌ای در محاسبه ماتریس وارینانس-کووارینانس مجهولات ایفا می‌کند. برای بررسی این موضوع و آنالیز دقت مجهولات در هندسه‌های مختلف راداری، ماتریس وارینانس-کووارینانس مجهولات  $(\Sigma_x = (A^T P A)^{-1})$  با فرض ماتریس وزن یگه برای مشاهدات  $(P)$  محاسبه شده است (شکل ۶).

در شکل ۴ عدد شرط ماتریس ضرایب به‌ازای زوایای دید مختلف محاسبه‌شده است، در این شکل اعداد شرط برای عناصر روی قطر اصلی (معادل با زوایای دید برابر برای دو هندسه مختلف راداری) مقادیر بزرگی هستند، بنابراین برای نمایش بهتر اعداد شرط خارج قطر اصلی، این مقادیر از روی قطر اصلی حذف شده‌اند.

همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌کنید بیشترین مقدار عدد شرط چیزی حدود ۷۳۰ می‌باشد که این مقدار متناظر با زوایای دید بسیار نزدیک به هم دو هندسه راداری مختلف است (نزدیک به قطر اصلی)؛ و با دور شدن از قطر اصلی میزان عدد شرط ماتریس ضرایب کاهش پیدا می‌کند که این امر متناظر با انتخاب دو هندسه راداری با زوایای دید کاملاً متفاوت است. به‌عنوان مثال با ۱۰ درجه اختلاف در زاویه دید سنجنده‌های راداری در دو هندسه مختلف، میزان عدد شرط از ۷۳۰ به ۱۰۰ کاهش پیدا می‌کند. با مقایسه اعداد شرط مختلف واضح است که ماتریس ضرایب رابطه ۳ در اغلب اوقات علی‌رغم این که از حالت ایده‌آل (یعنی زمانی که عدد شرط یک باشد) فاصله دارد، با این‌وجود یک دستگاه معادلات پایدار است و نیازی به حل آن با روش‌های پایداری‌سازی نیست.





شکل ۶. واریانس مؤلفه‌های میدان سه‌بعدی محاسبه‌شده از طریق رابطه ۳ به‌ازای هندسه‌های مختلف به‌ترتیب از چپ به راست مربوط به واریانس مؤلفه‌های بالا-پایین، شرقی-غربی، شمالی-جنوبی. الف) به‌ازای آزمون‌های ۱۹۰ و ۳۴۶ درجه به‌ترتیب برای مدار پایین و بالاگذر، ب) به‌ازای آزمون‌های ۱۹۰ و ۳۵۰ درجه به‌ترتیب برای مدار پایین و بالاگذر.

همان‌طور که قبلاً اشاره شد زمانی که عدد شرط ماتریس ضرایب بزرگ باشد مسأله رفتاری بد وضع را نشان می‌دهد و یا حتی در برخی مواقع ناپایدار خواهد شد. در این وضعیت ماتریس واریانس-کوواریانس مجهولات با دقت محاسبه نمی‌شود و یا حتی در برخی موارد امکان محاسبه آن وجود نخواهد داشت لذا در این صورت آنالیز دقت یا حساسیت به نویز مشاهدات از طریق این ماتریس به‌درستی انجام نخواهد شد، بنابراین برای انجام این کار به ابزار دیگری نیاز است.

یکی از ابزارهایی که در مورد موضوع آنالیز حساسیت پارامترهای مدل زیاد مورد توجه محققین (مخصوصاً پژوهشگران علوم ژئوماتیک) قرار می‌گیرد، روش آنالیز مؤلفه‌های اصلی یا (PCA, Principal Component Analysis) است (هوتلینگ، ۱۹۳۳؛ پیرسون، ۱۹۰۱). در واقع تحلیل مؤلفه‌های اصلی یک تکنیک آمار ریاضی است که کاربرد فراوانی از جمله کاهش ابعاد یا حجم داده‌ها از طریق بررسی ساختار ماتریس واریانس-کوواریانس داده‌ها دارد، برای این کار ترکیب‌های خطی

برای نمایش بهتر و هم مقیاس کردن واریانس مجهولات در شکل ۶، تغییرات آن به‌صورت لگاریتم در مبنای ده  $(\log_{10}(\sigma))$  رسم شده است، به‌عنوان مثال رنگ بنفش که بازه  $[-0.5, 0]$  را نشان می‌دهد دارای واریانس  $[0.3, 1]$  سانتی‌متر مربع است و رنگ آبی  $[0, 1]$  نیز بیان‌کننده واریانس  $[1, 10]$  سانتی‌متر مربع خواهد بود. همان‌طور که در شکل ۶-الف مشخص است، مؤلفه شمالی-جنوبی به‌ازای زاویه‌های دید مختلف بیشترین واریانس را دارد و این نشان‌دهنده این است که این مؤلفه به‌شدت وابسته به خطای مشاهدات است و همواره دقت برآورد پایین‌تری نسبت به دو مؤلفه دیگر دارد. در بین دو مؤلفه باقی‌مانده دیگر پایداری به نویز یا دقت برآورد مؤلفه شرقی-غربی در اکثر مواقع بهتر از مؤلفه بالا-پایین است. شکل ۶-ب واریانس مجهولات را به‌ازای آزمون‌های متقارن نسبت به محور شمالی جنوبی زمین  $(\gamma - \beta = 0^\circ)$  نشان می‌دهد، نکته قابل توجه در مقایسه واریانس مؤلفه شرقی-غربی این شکل با شکل ۶-الف، بهبود قابل توجه در محاسبه واریانس این مؤلفه مخصوصاً در اطراف قطر اصلی است.



مشاهدات) مرتب‌شده‌اند، از ضریب همبستگی بین هر یک از  $x$ ها با مؤلفه‌های اصلی متناظر با مقادیر ویژه نزدیک به صفر استفاده می‌شود؛ به طوری که متغیر با بیشترین همبستگی دارای حساسیت بالاتری نسبت به تغییرات ورودی مسأله است و بالعکس. بنابراین با اعمال تکنیک PCA روی ماتریس نرمال  $\underline{N} = (\underline{A}^T \underline{P} \underline{A})$  (به علت این که همیشه امکان استفاده از ماتریس وارینانس-کوواریانس  $\underline{\Sigma}$  وجود ندارد) می‌توان برای زوایای دید مختلف (متناظر با دو ترکیب ماهواره مختلف انتخابی) که احتمال ناپایداری مسأله در آنها وجود دارد، درصد حساسیت به نویز پارامترهای ورودی جهت بازیابی پارامترهای مجهول را برآورد کرد.

#### ۵. بازسازی میدان جابه‌جایی سه‌بعدی با روش

##### همپوشانی بین مدارها

پرداختن به مسائل آنالیز حساسیت به نویز بازیابی مؤلفه‌های متعامد میدان جابه‌جایی و بررسی عدد شرط ماتریس ضرایب دستگاه معادلات همزمان آن این مفهوم را در ذهن تداعی می‌کند که بازیابی میدان جابه‌جایی سه‌بعدی با روش استفاده از سه هندسه مستقل، در اکثر مواقع یک مسأله خوش‌وضع بوده و امکان این بازیابی وجود دارد، فقط کافی است که زوایای دید ماهواره‌ها اندکی با یکدیگر اختلاف داشته باشند. البته هرچقدر این اختلاف بیشتر باشد اعتمادپذیری به نتایج افزایش می‌یابد. موضوع دوم این است که پیشرفت‌های اخیر در تکنیک‌ها و پردازش راداری باعث به وجود آمدن نسل جدیدی از سنسورها شده است که توانایی برداشت تصویر از قسمت وسیعی از سطح زمین را دارند. این نوع تصویربرداری که نمونه آن را در ماهواره سنتینل می‌توان مشاهده کرد، باعث می‌شود که سنجنده راداری یک منطقه را در جهت رنج خود با زاویه‌های دید مختلف برداشت کند. به‌عنوان مثال در تصاویر راداری سنجنده سنتینل هر Sub-swaths با زاویه دید خاصی مشاهده می‌شود (شکل ۷).

خاصی از متغیرهای تصادفی موردنظر تشکیل می‌شود و آنالیزهای آماری بر مبنای این ترکیب‌ها صورت می‌گیرد؛ این ترکیب‌ها مؤلفه‌های اصلی‌ها نامیده می‌شوند (مشهدی حسینی، ۲۰۰۶).

قضیه ۱: اگر  $\underline{\Sigma}$  ماتریس وارینانس-کوواریانس متغیر تصادفی  $\underline{x} = [x_1, x_2, x_3, \dots, x_p]^T$   $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_p \geq 0$  مقادیر ویژه و  $e_h = [e_{1h}, e_{2h}, \dots, e_{ph}]^T$  بردارهای ویژه متعامد این ماتریس باشند، آنگاه:

$$y_h = e_h^T \underline{x} = e_{1h}x_1 + e_{2h}x_2 + \dots + e_{ph}x_p; \quad h = 1, \dots, p$$

مؤلفه‌های اصلی ماتریس  $\underline{\Sigma}$  می‌باشند، به طوری که؛

$$Var(y_h) = \lambda_h \quad ; \quad Cov(y_k, y_h) = 0 \text{ if } h \neq k$$

قضیه ۲: برای  $(h = 1, 2, \dots, p)$  مؤلفه اصلی؛

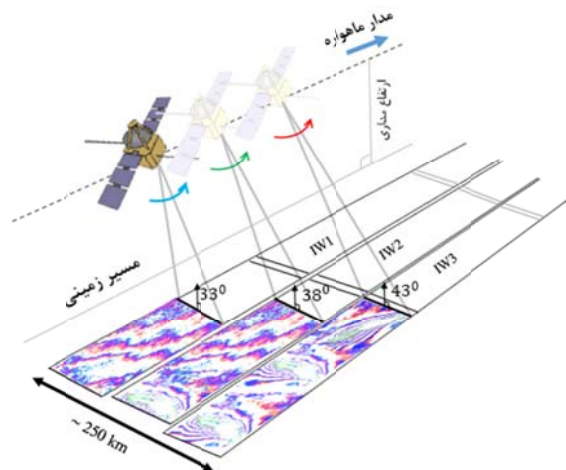
$$\{y_1 = e_1^T \underline{x}, y_2 = e_2^T \underline{x}, \dots, y_p = e_p^T \underline{x}\}$$

از ماتریس وارینانس-کوواریانس  $\underline{\Sigma}$ ، ضریب همبستگی بین متغیر تصادفی  $x_j$  و مؤلفه اصلی  $y_h$  به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$Cor(x_j, y_h) = e_{jh} \sqrt{\lambda_h} / \sigma_j; \quad \{j = 1, 2, \dots, p\} \quad (5)$$

در این رابطه  $\sigma_j$  جذر عنصر  $j$ ام روی قطر اصلی ماتریس  $\underline{\Sigma}$ ،  $\lambda_h$  مقدار ویژه  $h$ ام و  $e_{jh}$  مؤلفه  $j$ ام بردار ویژه  $h$ ام هستند.

طبق قضیه ۲ با محاسبه مؤلفه‌های اصلی ماتریس  $\underline{\Sigma}$  عملاً می‌توان گفت که مجهولات مدل ریاضی گروه‌های مستقلی را تشکیل می‌دهند، به طوری که هر گروه متناظر با یکی از مؤلفه‌های اصلی است. مقادیر ویژه نزدیک به صفر به عدد شرط بزرگی برای ماتریس نرمال در یک دستگاه معادلات نرمال منتهی می‌شوند. از آنجا که کران بالای تغییرات جواب کمترین مربعات متناسب با عدد شرط ماتریس نرمال یا حتی مجذور آن است، در چنین شرایطی حداقل برخی از پارامترهای مدل نسبت به تغییرات پارامترهای ورودی احتمالاً حساس‌اند؛ بنابراین برای رسیدن به دسته‌بندی از پارامترهای مجهول که در آن پارامترها یا مؤلفه‌های بردار مجهولات  $\underline{x}$  برحسب میزان حساسیت به تغییرات مقادیر معلوم مسأله (نویز روی



شکل ۷. هندسه تصویربرداری در ماهواره سنتینل (برداشت یک تصویر با زاویه‌های دید مختلف).

هندسه‌ها اختلاف زمانی زیادی در برداشت وجود دارد که خود باعث برآورد میدان جابه‌جایی سه‌بعدی بایاس برای یک‌زمان خاص می‌شود. بنابراین با موازی‌سازی دو موضوع قبل این امکان وجود دارد که بتوان از تصاویر فقط یک سنجنده سنتینل میدان سه‌بعدی را با دقت خوبی بازسازی کرد. البته تئوری روش همپوشانی بین مدارها قبلاً توسط (کتلار و همکاران، ۲۰۰۷؛ رایت و همکاران، ۲۰۰۴) مطرح شده بود ولی به‌علت نبود یا محدودیت برای سنجنده‌هایی که این قابلیت را داشته باشند، زیاد مورد توجه قرار نگرفته و یا این که فقط در نواحی خاص قابل پیاده‌سازی بوده است.

در ادامه برای پیاده‌سازی بازیابی میدان سه‌بعدی از طریق همپوشانی بین مدارها (که از این به بعد تحت عنوان (OOI, Orbit Overlap Interferometry) نام‌گذاری می‌شود) در ماهواره سنتینل ابتدا یک شبیه‌سازی در منطقه سفیدسنگ مشهد (که در ۱۶ فروردین ۹۶ زلزله‌ای به بزرگای ۶/۱ اتفاق افتاد) انجام می‌شود. سپس در بخش‌های بعدی با داده‌های واقعی میدان سه‌بعدی حاصل از این زلزله و زلزله ازگله کرمانشاه بازیابی می‌شود.

۵-۱. بازسازی میدان جابه‌جایی سه‌بعدی شبیه‌سازی شده

#### با روش OOI

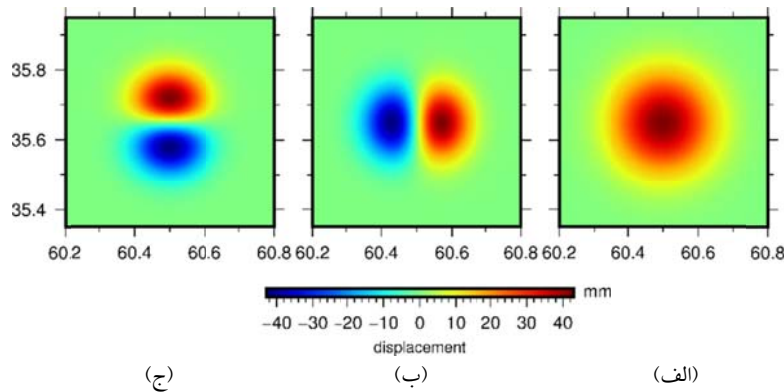
برای ایجاد این میدان جابه‌جایی سه‌بعدی شبیه‌سازی شده

بررسی مدارهای تصویربرداری در این ماهواره نشان می‌دهد که بین مدارها یک ناحیه (مخصوصاً در عرض‌های بالای زمین) همپوشانی وجود دارد؛ در واقع منظور از همپوشانی یعنی ناحیه مشترکی که توسط مدارهای بالاگذر یا پایین‌گذر مجاور پوشش داده می‌شود. با این تفاسیر برای اکثر مناطق می‌توان داده‌های دو مدار بالاگذر مجاور و یک مدار پایین‌گذر یا دو مدار پایین‌گذر مجاور و یک مدار بالاگذر را داشت و با توجه به زاویه دید مختلف (تقریباً ۱۰ درجه اختلاف) در ناحیه مشترک مدارهای مجاور، همواره می‌توان فقط با استفاده از تصاویر راداری ماهواره سنتینل سه هندسه مستقل را ایجاد کرد که این خود می‌تواند در بازسازی میدان سه‌بعدی جابه‌جایی کمک‌کننده باشد. این مطلب می‌تواند دو دستاورد اصلی به‌دنبال داشته باشد؛ اول این که مشکل اصلی در پیدا کردن سه هندسه راداری مستقل برای بازسازی میدان سه‌بعدی که در اکثر مناطق وجود داشت را با این روش مرتفع کرده و دوم این که اختلاف زمانی برداشت دو مدار مجاور در حدود چند روز است (۱ تا ۳ روز). بنابراین سه هندسه مستقلی که در این روش ایجاد می‌شود، دارای اختلاف زمانی بسیار اندکی هستند و بازسازی جابه‌جایی سه‌بعدی برای آنها معنی‌دارتر است. این در حالی است که در حالت عادی اگر از یک منطقه سه هندسه راداری مختلف وجود داشته باشد، بین این

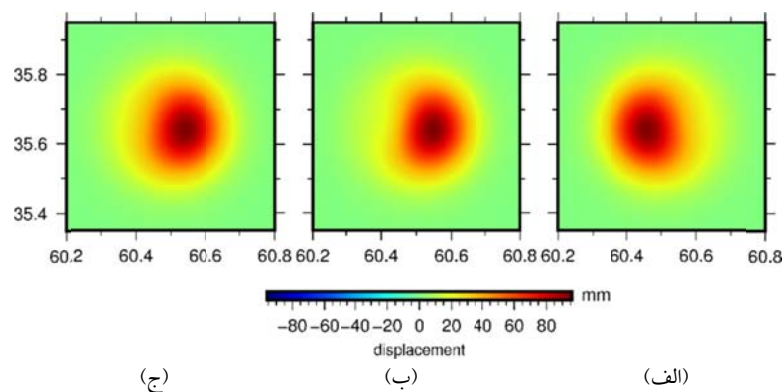
همپوشانی مدارها، از فصل مشترک سه مسیر ماهواره (شامل دو مدار مجاور پایین‌گذر و یک مدار بالاگذر) استفاده شده است. با توجه به شکل ۱۳-الف می‌توان گفت که قسمت مشترک بین مدارها در مسیر پایین‌گذر سمت راست با زاویه دید ۴۴ درجه و آزیموت ۱۹۰ درجه، برای مدار پایین‌گذر سمت چپ با زاویه دید ۳۳ درجه و آزیموت ۱۹۰ درجه و در مدار بالاگذر سمت راست با زاویه دید ۳۳ درجه و آزیموت ۳۴۶ درجه برداشت می‌شود؛ بنابراین سه هندسه مستقل را خواهیم داشت. پس می‌توان با این تکنیک میدان سه‌بعدی را بازیابی کرد. در ادامه برای هر مدار با توجه به آزیموت، زاویه دید و توپوگرافی هر پیکسل، مؤلفه‌های میدان سه‌بعدی به راستای خط دید ماهواره در آن مدار تصویر شده است تا جابه‌جایی‌های شبیه‌سازی‌شده LOS تولید شوند (شکل ۹).

از نرم‌افزار متلب استفاده شده است و مؤلفه‌های جابه‌جایی بالا-پایین، شرقی-غربی و شمالی-جنوبی را در هندسه منطقه مورد مطالعه در محدوده طول جغرافیایی ۶۰/۲ تا ۶۰/۸ و عرض جغرافیایی ۳۵/۳ تا ۳۵/۹ درجه و بر روی یک شبکه گرید منظم تولید شده‌اند (شکل ۸).

پس از تولید مؤلفه‌های جابه‌جایی شبیه‌سازی‌شده در موقعیت منطقه مورد مطالعه آنها در راستای خط دید ماهواره در هندسه مداری موردنظر با توجه به توپوگرافی سطح زمین تصویر می‌شوند. پیش از این کار مدارهای دارای همپوشانی در منطقه‌ای به‌عنوان مشاهدات مستقل انتخاب شدند. با توجه به شکل مسیر حرکت مداری ماهواره‌های سنتینل در منطقه (شکل ۱۳-الف)، علی‌رغم این‌که بخشی از منطقه با چهار هندسه مستقل قابل مشاهده است (حل مسأله با یک درجه آزادی)، با این وجود به دلیل افزایش ابعاد منطقه



شکل ۸. شبیه‌سازی مؤلفه‌های میدان جابه‌جایی سه‌بعدی در منطقه سفیدسنگ، الف) جابه‌جایی مؤلفه بالا-پایین، ب) جابه‌جایی مؤلفه شرقی-غربی، ج) جابه‌جایی مؤلفه شمالی-جنوبی.

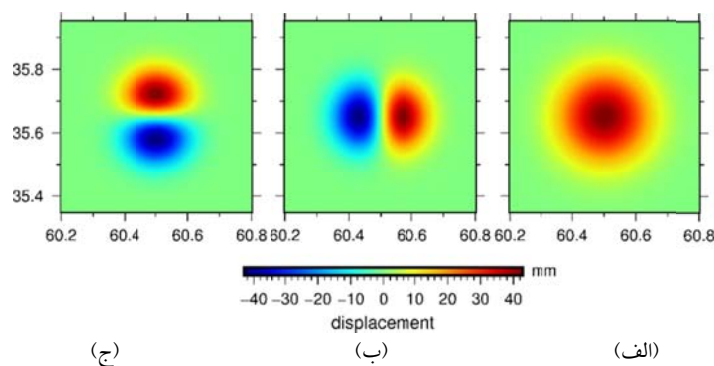


شکل ۹. شبیه‌سازی میدان جابه‌جایی LOS با استفاده از مؤلفه‌های سه‌بعدی جابه‌جایی برای هر سه مدار مستقل. الف) مدار بالاگذر سمت راست، ب) مدار پایین‌گذر سمت راست، ج) مدار پایین‌گذر سمت چپ.

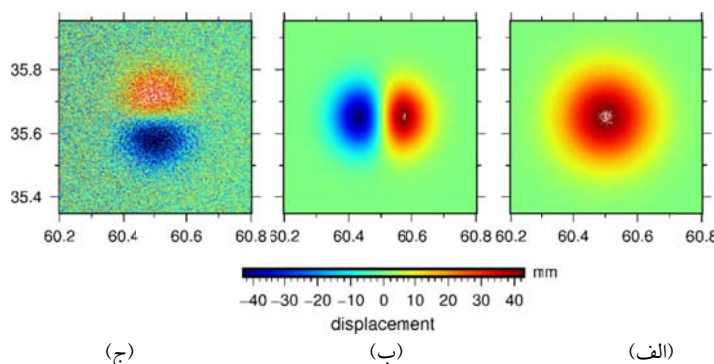
تأثیرگذار باشند. علاوه بر این همان‌طور که پیش‌تر ذکر شد، زمانی که عدد شرط ماتریس ضرایب یک دستگاه معادلات همزمان نسبتاً بزرگ باشد و مسأله رفتار بد وضعی داشته باشد، با یک تغییر جزئی در ماتریس ضرایب یا بردار مشاهدات، یک تغییر فاحش در پارامترهای مجهول مدل ایجاد می‌شود. با این حال برای بررسی این دو موضوع و تأثیر آن بر نتایج نهایی یک نویز تصادفی با مرتبه  $0/1$  جابه‌جایی LOS به مشاهدات هر سه مسیر اضافه شده و میدان جابه‌جایی سه‌بعدی مجدداً برآورد شده است (شکل ۱۱). در این مسأله خاص عدد شرط ماتریس ضرایب حدود ۸۵ است که علی‌رغم مناسب بودن و خوش‌وضع مسأله، با این حال نسبت به حالت ایده‌ال که عدد شرط ۱ است فاصله دارد، بنابراین انتظار می‌رود با افزایش دامنه نویز در مشاهدات، بازسازی مؤلفه‌های جابه‌جایی سه‌بعدی دچار اعوجاج شوند.

پس از ساخت میدان‌های جابه‌جایی LOS برای هر سه مدار مستقل و با کمک گرفتن از دستگاه معادلات و مشاهدات همزمان ۲، مؤلفه‌های متعامد میدان سه‌بعدی برآورد شده‌اند. نکته‌ای که در این ساختار مستقل باید به آن توجه شود این است که عدد شرط ماتریس ضرایب در این مسأله چیزی حدود ۸۵ است که نشان‌دهنده عدم سینگولاریتی معکوس ماتریس ضرایب و پایداری مسأله است. همان‌طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود با روش ارائه شده می‌توان میدان جابه‌جایی سه‌بعدی در منطقه را بازسازی کرد که الگویی مشابه میدان جابه‌جایی سه‌بعدی شبیه‌سازی شده واقعی دارد.

با توجه به این که در حالت واقعی و ایده‌ال جابه‌جایی‌های LOS تحت تأثیر نویزهای متفاوتی می‌باشند و همواره بیان‌کننده جابه‌جایی واقعی سطح زمین نیستند، بنابراین این نویزها می‌توانند در مخدوش کردن نتیجه بازیابی میدان جابه‌جایی سه‌بعدی تا حدودی



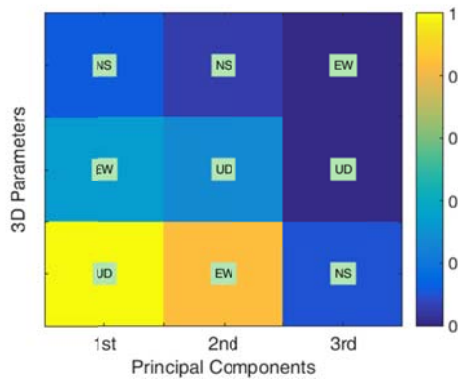
شکل ۱۰. بازسازی مؤلفه‌های میدان جابه‌جایی سه‌بعدی با روش همپوشانی بین مدارها، (الف) جابه‌جایی مؤلفه بالا-پایین، (ب) جابه‌جایی مؤلفه شرقی-غربی، (ج) جابه‌جایی مؤلفه شمالی-جنوبی.



شکل ۱۱. بازسازی مؤلفه‌های میدان جابه‌جایی سه‌بعدی پس از اعمال نویز با مرتبه  $0/1$  به مشاهدات LOS، (الف) جابه‌جایی مؤلفه بالا-پایین، (ب) جابه‌جایی مؤلفه شرقی-غربی، (ج) جابه‌جایی مؤلفه شمالی-جنوبی.

می‌کند.

برای این مثال خاص علاوه بر آنالیز دقت انجام‌شده (رابطه ۶)، با استفاده از مفهوم آنالیز مؤلفه‌های اصلی حساسیت به نویز نیز برای هر یک از مجهولات از طریق رابطه ۵ محاسبه می‌شود. همان‌طور که قبلاً گفته شد مجهولی که دارای بیشترین همبستگی با مؤلفه اصلی متناظر با کوچک‌ترین مقدار ویژه است، از بالاترین حساسیت به نویز ورودی مشاهدات برخوردار می‌باشد. شکل ۱۲ مقادیر همبستگی را به‌ازای هر یک از مؤلفه‌های اصلی نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل ملاحظه می‌شود مؤلفه اصلی سوم متناظر با کوچک‌ترین مقدار ویژه (3rd) به ترتیب دارای بیشترین همبستگی؛ ابتدا با مؤلفه شمالی-جنوبی سپس مؤلفه بالا-پایین و در نهایت مؤلفه شرقی-غربی است.



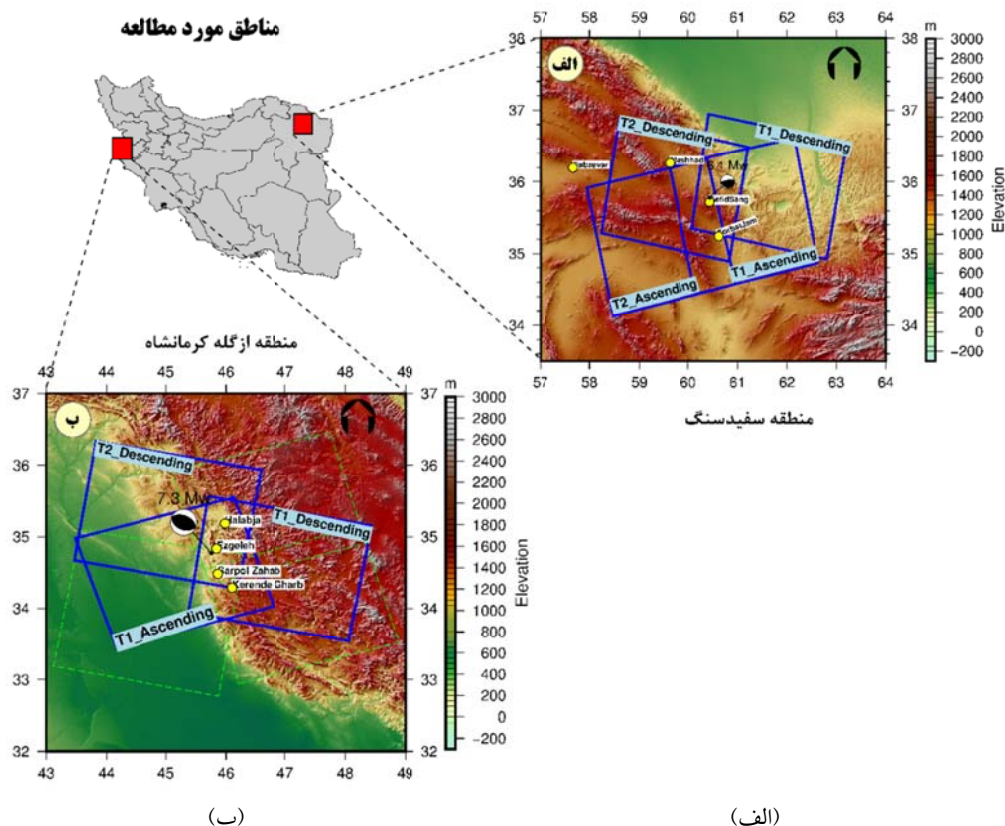
شکل ۱۲. انجام آنالیز حساسیت با روش PCA برای هندسه مورد استفاده در مسأله میدان شبیه‌سازی‌شده.

نتیجه مهمی که از این شبیه‌سازی می‌توان گرفت، این است که در صورت استفاده از روش OOI می‌توان مؤلفه‌های میدان جابه‌جایی را در غیاب یا تعدیل عوامل نویز موجود در تداخل‌نگار با دقت قابل قبولی بازسازی کرد. در ادامه این بازسازی با استفاده از داده‌های واقعی در دو منطقه نشان داده شده در شکل زیر انجام می‌شود.

همان‌طور که انتظار می‌رفت با اعمال نویز با مرتبه ۰/۱ بازسازی مؤلفه‌ها دچار اعوجاج شده است (شکل شماره ۱۱). نکته جالب توجه این است که همان‌طور که با تکنیک آنالیز مؤلفه‌های اصلی در شکل ۱۲ نشان داده شده است، به علت حساسیت بالای مؤلفه شمال-جنوبی به نویز جابه‌جایی LOS، بازسازی در این مؤلفه نسبت به سایر مؤلفه‌ها با خطای بیشتری مواجه شده است و جدایی زیادی با الگوی جابه‌جایی واقعی دارد. در صورتی که واریانس پارامترهای برآورد شده به ترتیب برای مؤلفه‌های بالا-پایین، شرقی-غربی و شمالی-جنوبی  $\sigma_{Uu}^2$ ،  $\sigma_{Ue}^2$  و  $\sigma_{Un}^2$  در نظر گرفته شود و خطای مشاهدات LOS به ترتیب برای مدار بالاگذر و دو مدار پایین‌گذر  $\sigma_{d_{Des,1}}^2$ ،  $\sigma_{d_{Asc,1}}^2$  و  $\sigma_{d_{Des,2}}^2$  فرض شود (اگر کواریانس بین مشاهدات صفر باشد)، بنابراین واریانس مؤلفه‌های برآورد شده در این شبیه‌سازی بدون در نظر گرفتن کواریانس بین مشاهدات در راستای خط دید ماهواره و فقط با لحاظ واریانس آنها به صورت زیر خواهد بود.

$$\begin{cases} \sigma_{Uu}^2 = 8.15\sigma_{d_{Des,1}}^2 + 13.25\sigma_{d_{Des,2}}^2 + 0.000001\sigma_{d_{Asc,1}}^2 \\ \sigma_{Ue}^2 = 0.544\sigma_{d_{Des,1}}^2 + 0.0228\sigma_{d_{Des,2}}^2 + 0.6144\sigma_{d_{Asc,1}}^2 \\ \sigma_{Un}^2 = 446.37\sigma_{d_{Des,1}}^2 + 509.26\sigma_{d_{Des,2}}^2 + 19.76\sigma_{d_{Asc,1}}^2 \end{cases} \quad (۶)$$

همان‌طور که در رابطه ۶ مشخص است، مؤلفه شمالی-جنوبی نسبت به دو مؤلفه دیگر به شدت وابسته به خطای مشاهدات LOS است. مؤلفه بالا-پایین پایداری بالاتری در برابر نویز مدار بالاگذر نسبت به مدارهای پایین‌گذر (مشاهدات LOS اول و دوم) دارد و این به خاطر وجود دو مشاهده LOS پایین‌گذر است که تقریباً هندسه‌های مشابهی دارند و شرایطی ناپایدار برای مسأله ایجاد می‌کنند. همچنین بالاترین پایداری یا کمترین حساسیت به نویز مشاهدات مربوط به مؤلفه شرقی-غربی است که از هندسه‌های مخالف تصویربرداری پایین و بالاگذر استفاده



شکل ۱۳. موقعیت مکانی مناطق مورد مطالعه (مربع‌های قرمز رنگ). الف) همپوشانی بین مدارها در ماهواره سنتینل در منطقه سفیدسنگ- خراسان رضوی، ب) همپوشانی بین مدارها در ماهواره سنتینل در منطقه ازگله- کرمانشاه.

سفیدسنگ، ۴۷ کیلومتری فریمان، ۷۵ کیلومتری تربت جام و ۸۶ کیلومتری مشهد تخمین زده شده است. برای برآورد مؤلفه‌های متعامد جابه‌جایی در هر سه راستا از روش تداخل‌سنجی همپوشانی بین مدارها ماهواره سنتینل (OOI) در این منطقه استفاده شد. با بررسی وضعیت مدارهای ماهواره سنتینل در این محدوده (شکل ۱۳-الف) سه مدار مستقل برای استفاده در این روش شناسایی شدند که در جدول ۲ جزئیات کامل این سه مدار ارائه شده است.

۲-۵. بازسازی میدان جابه‌جایی سه‌بعدی با روش OOI برای زلزله سفیدسنگ شبکه‌های لرزه‌نگاری وابسته به مرکز لرزه‌نگاری کشور ساعت ۱۰:۳۰ روز چهارشنبه مورخ ۱۳۹۶/۱/۱۶ زمین‌لرزه‌ای با بزرگای ۶/۱ (Mw) در عمق ۱۰ کیلومتری زمین را در منطقه شهر سفیدسنگ از توابع شهرستان فریمان واقع در استان خراسان رضوی ثبت و تعیین مکان کردند. مرکز این زلزله در فاصله ۳۰ کیلومتری

جدول ۲. اطلاعات مربوط به مدارهای پوشش‌دهنده زلزله سفیدسنگ.

مدار	زمان برداشت تصویر اصلی	زمان برداشت تصویر فرعی	زیر تصویر	زاویه دید (درجه)	آزیموت (درجه)
Left Des.	۲۰۱۷۰۳۳۰	۲۰۱۷۰۴۱۱	IW1	۳۳/۸	۱۹۰
Right Des.	۲۰۱۷۰۳۲۵	۲۰۱۷۰۴۰۶	IW3	۴۳/۸	۱۹۰
Right Asc.	۲۰۱۷۰۳۲۴	۲۰۱۷۰۴۰۵	IW1	۳۳/۹	۳۴۶



۲۰۱۹؛ ژو و همکاران، ۲۰۱۸) مراجعه کنید.

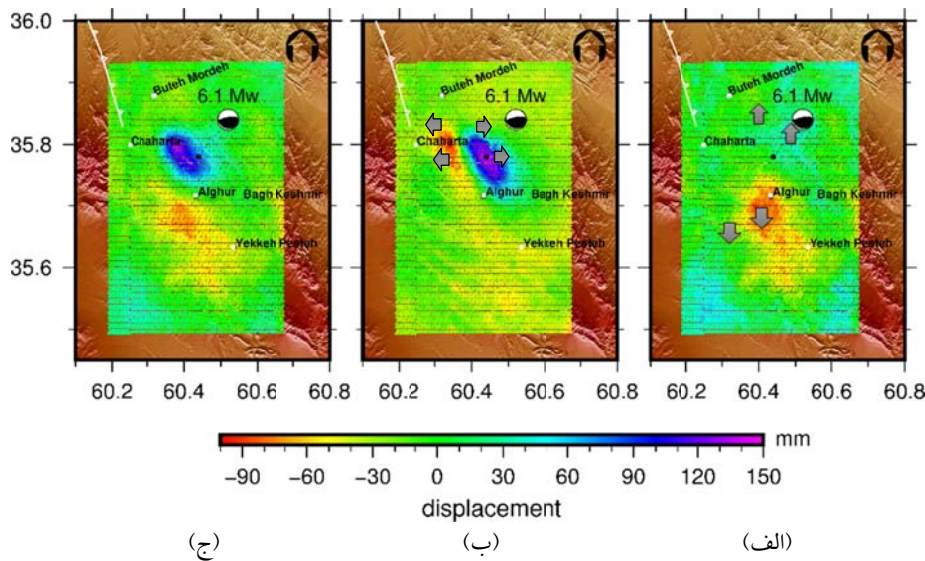
### ۳-۵. بازسازی میدان جابه‌جایی سه‌بعدی با روش OOI

برای زلزله ازگله کرمانشاه

دومین منطقه مورد مطالعه در این پژوهش منطقه ازگله کرمانشاه است. در این منطقه و در شامگاه یکشنبه ۲۱ آبان ۱۳۹۶ در نزدیکی ازگله، استان کرمانشاه و مجاور مرز ایران و عراق، زمین‌لرزه‌ای با بزرگای  $7/3$  (Mw) طبق اطلاعات مرکز لرزه‌نگاری ایران ثبت و احساس شد که یکی از بزرگ‌ترین زمین‌لرزه‌های ایران در دهه‌های اخیر محسوب می‌شود. مختصات رومرکزی این زلزله برابر با طول جغرافیایی  $45/96$  و عرض جغرافیایی  $34/91$  و عمق آن  $19$  کیلومتر طبق گفته مرکز زمین‌شناسی و لرزه‌نگاری آمریکا (USGS) می‌باشد. برای برآورد مؤلفه‌های متعامد جابه‌جایی در هر سه راستا از روش تداخل‌سنجی همپوشانی بین مدارها ماهواره سنتینل (OOI) در این منطقه استفاده شده است. با بررسی وضعیت مدارهای ماهواره سنتینل در این محدوده (شکل ۱۳-ب) سه مدار مستقل برای استفاده در روش مورد نظر شناسایی شد که در جدول ۳ جزئیات کامل این سه مسیر ارائه شده است.

بنابراین با تشکیل جفت تداخل‌نگارهای مربوط به هر تاریخ سه مشاهده مستقل جابه‌جایی LOS خواهیم داشت که می‌توان با استفاده از آنها مؤلفه‌های سه‌بعدی میدان جابه‌جایی منطقه را بازیابی کرد (شکل ۱۴). برای حذف فاز مربوط به توپوگرافی از مدل ارتفاع رقومی SRTM3 با قدرت تفکیک  $90$  متر استفاده شده است.

همان‌طور که در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود، میدان جابه‌جایی مؤلفه بالا-پایین، بالاآمدگی به ماکزیمم اندازه  $15$  سانتی‌متر را در شمال شرقی ناحیه فرونشسته (با ماکزیمم اندازه  $5/5$  سانتی‌متر) نشان می‌دهد. همچنین در میدان جابه‌جایی شرقی-غربی یک حرکت با مقدار بیشینه‌ای به اندازه  $13$  سانتی‌متر در جهت شرق وجود دارد که در موقعیت جنوب شرقی منطقه دارای حرکت به سمت غرب به اندازه  $6/5$  سانتی‌متر واقع شده است. مؤلفه شمالی-جنوبی نیز یک حرکت غالب به سمت جنوب را نشان می‌دهد که البته به‌خاطر وجود نویز در تداخل‌نگار و بیشترین اثر آن بر روی این مؤلفه، تفسیر این جابه‌جایی باید محتاطانه صورت گیرد. برای کسب اطلاعات بیشتر در مورد گسل مسبب این زلزله و پارامترهای این گسل به‌مراجعه (افلاکی و همکاران، ۲۰۱۹؛ سو و همکاران،



شکل ۱۴. بازسازی مؤلفه‌های میدان جابه‌جایی سه‌بعدی زلزله سفیدسنگ خراسان با روش OOI. الف) میدان جابه‌جایی حاصل برای مؤلفه شمالی-جنوبی، ب)

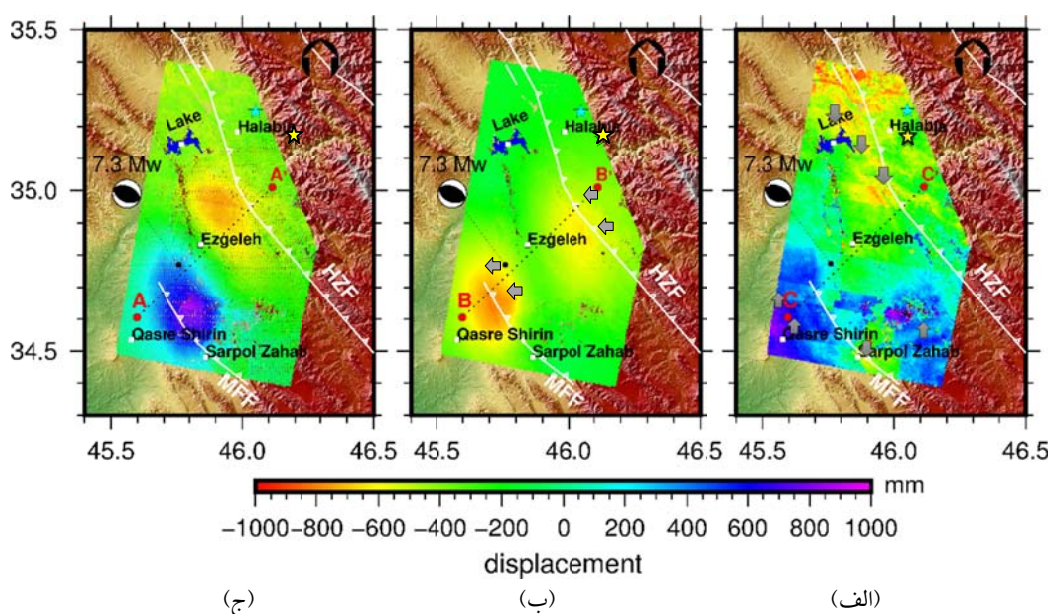
میدان جابه‌جایی حاصل برای مؤلفه شرقی-غربی، ج) میدان جابه‌جایی حاصل برای مؤلفه بالا-پایین.



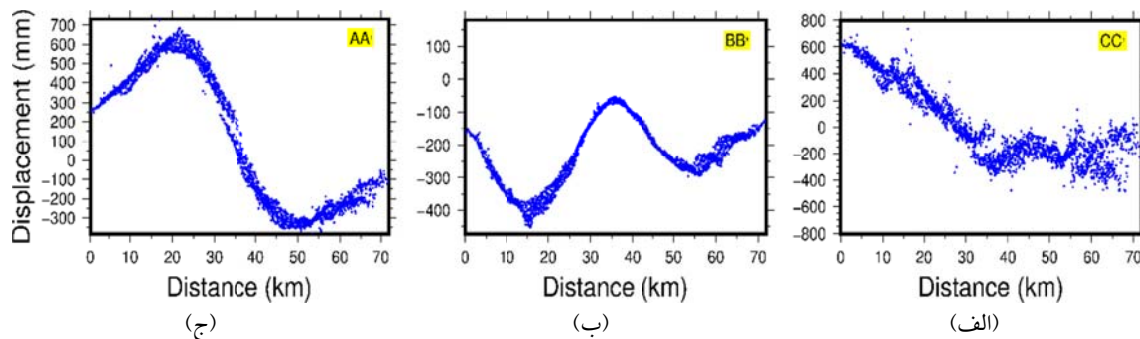
جدول ۳. اطلاعات مربوط به مدارهای پوشش دهنده زلزله ازگله کرمانشاه.

مدار	زمان برداشت تصویر اصلی	زمان برداشت تصویر فرعی	زیر تصویر	زاویه دید (درجه)	آزیموت (درجه)
Left Des.	۲۰۱۷۱۱۱۲	۲۰۱۷۱۱۲۴	IW1	۳۴/۰۱	۱۹۰
Right Des.	۲۰۱۷۱۱۰۷	۲۰۱۷۱۱۱۹	IW3	۴۴/۰۲	۱۹۰
Right Asc.	۲۰۱۷۱۱۱۱	۲۰۱۷۱۱۲۳	IW3	۴۳/۹۳	۳۴۶

بنابراین با تشکیل جفت تداخل نگارهای مربوط به هر تاریخ، سه مشاهده مستقل LOS ایجاد شده است که می توان با استفاده از آنها مؤلفه های سه بعدی میدان جابه جایی منطقه را بازیابی کرد (شکل ۱۵).



شکل ۱۵. بازسازی مؤلفه های میدان جابه جایی سه بعدی زلزله ازگله کرمانشاه با روش OOI. ستاره زرد رنگ در شکل ها نشان دهنده موقعیت نقطه رفرنس است. الف) میدان جابه جایی حاصل برای مؤلفه شمالی-جنوبی، ب) میدان جابه جایی حاصل برای مؤلفه شرقی-غربی، ج) میدان جابه جایی حاصل برای مؤلفه بالا-پایین.



شکل ۱۶. پروفیل جابه جایی در راستای مقاطع مشخص شده در شکل ۱۵، الف) پروفیل جابه جایی شمالی-جنوبی در راستای مقطع 'CC'، ب) پروفیل جابه جایی شرقی-غربی در راستای مقطع 'BB'، ج) پروفیل جابه جایی بالا-پایین در راستای مقطع 'AA'.

کوواریانس مسأله و روش آنالیز مؤلفه‌های اصلی در مورد حساسیت بازیابی هرکدام از مؤلفه‌های میدان جابه‌جایی به نویز داده‌های ورودی با در نظر گرفتن اندازه‌گیری‌های مربوط به سه هندسه مستقل راداری بحث شد. نتایج نشان می‌دهد که اولاً مؤلفه شمالی-جنوبی جابه‌جایی بیشترین حساسیت را به نویز داده‌های ورودی و کمترین سهم را از جابه‌جایی در راستای خط دید ماهواره دارد. سپس مؤلفه شرقی-غربی و بالا-پایین دارای حساسیت به نویز تقریباً یکسانی هستند، هرچند برای برخی زوایای خاص میزان این حساسیت به نویز برای مؤلفه بالا-پایین بیشتر خواهد شد. دوماً این که میزان حساسیت به نویز به‌ازای زوایای دید مختلف به‌صورت پیوسته در هر سه مؤلفه جابه‌جایی (مخصوصاً برای مؤلفه شمال-جنوبی) در حال تغییر است. سوماً این که با بررسی عدد شرط ماتریس ضرایب دستگاه معادلات مشاهدات در مسأله بازیابی میدان سه‌بعدی نشان داده شد که این مسأله در بیشتر حالات (به‌جز زمانی که زوایای دید دو هندسه برابرند یا اختلاف بسیار جزئی دارند) یک مسأله خوش‌وضع و پایدار است و نیازی به حل آن با روش‌های پایدارسازی نیست. سپس در ادامه پژوهش با توجه به بحث‌های انجام‌شده و یادآوری این نکته که در ماهواره راداری سنتینل تصویربرداری هر sub-swath در زوایای دید مختلف انجام می‌شود (با اختلافی معمولاً ۱۰ درجه)، لذا می‌توان از مفهوم همپوشانی بین مدارها (حداقل سه هندسه متفاوت با زوایای دید مختلف) برای بازیابی میدان جابه‌جایی سه‌بعدی در اکثر مناطق استفاده کرد و در نهایت به بررسی قابلیت و کارایی این روش با داده‌های شبیه‌سازی‌شده و واقعی پرداخت.

نتایج نشان دادند که در غیاب مؤلفه‌های نویز این روش به‌خوبی می‌تواند در بازسازی مؤلفه‌های میدان سه‌بعدی مورد‌استفاده قرار گیرد ولی با افزایش نویز در مشاهدات، مسأله رفتاری بد وضع را نشان می‌دهد و نتایج نهایی (مخصوصاً مؤلفه سوم) را دچار اغتشاش می‌کند. برای کارهای آینده پیشنهاد می‌شود که آنالیز حساسیت مسأله بازیابی میدان جابه‌جایی سه‌بعدی با روش‌های ریاضی

با بررسی میدان جابه‌جایی سه‌بعدی محاسبه‌شده برای این زلزله و مراجعه به مقالات مرتبط در مورد آن (هی و همکاران، ۲۰۱۸؛ واجدیان و همکاران، ۲۰۱۸؛ یانگ و همکاران، ۲۰۱۹) می‌توان گسل شیب‌لغز MFF را به‌عنوان گسل اصلی مسبب آن معرفی کرد، طبق گزارش‌های مطرح‌شده در مورد پارامترهای گسل مسبب زلزله (فنگ و همکاران، ۲۰۱۸؛ هی و همکاران، ۲۰۱۸؛ واجدیان و معتق، ۲۰۱۸)، شیب این گسل (زاویه Fault dip) تقریباً ۱۷ درجه گزارش‌شده است، لذا در اینجا یک گسل رانندگی با شیب خیلی ناچیز وجود دارد که این باعث می‌شود بالا رفتگی و پایین رفتگی بر روی فرادیواره (Hanging wall) این گسل اتفاق بیفتد، این در حالی است که انتظار می‌رود میزان بالاآمدگی بیشتر از پایین رفتگی در فرادیواره باشد که این موضوع به‌خوبی در میدان جابه‌جایی بالا-پایین قابل‌مشاهده است (میزان جابه‌جایی آبی‌رنگ در مقابل جابه‌جایی قرمزرنگ در شکل ۱۵-ج). علاوه بر این، وجود دو میدان جابه‌جایی افقی به‌سمت غرب (شکل ۱۵-ب) نیز با فرض انجام‌شده در مورد گسل مسبب زلزله همخوانی کامل دارد. به‌خاطر نویز بالا در مؤلفه سوم میدان جابه‌جایی نمی‌توان در مورد صحت این جابه‌جایی اظهارنظر کرد و احتمال می‌رود بیشتر این جابه‌جایی سهم مؤلفه نویز باشد. باین‌حال، تأثیر نویز به‌صورت تصادفی است و انتظار می‌رود میدان حاصل از آن همبستگی مکانی نداشته باشد، این در حالی است که میدان محاسبه‌شده دارای همبستگی است که می‌توان این همبستگی را تأثیر فاز جوی که بر روی تداخل‌نگار دارای رفتار همبسته مکانی است، تلقی کرد.

## ۶. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این تحقیق با توجه به اهمیت شناخت و اندازه‌گیری مؤلفه‌های میدان جابه‌جایی سه‌بعدی سطحی زمین، به‌بررسی مسأله بازیابی میدان جابه‌جایی سه‌بعدی با استفاده از ترکیب هندسه‌های مستقل راداری پرداخته شده است. سپس در ادامه با توجه به ساختار ماتریس واریانس-

دیگر همچون؛ روش تئوری اغتشاشات، روش برآورد مرتبه اول تغییرات، روش تحلیل حساسیت واریانس مینا یا به‌طور کلی روش‌های آنالیز حساسیت محلی و کلی انجام شود.

#### مراجع

- Aflaki, M., Mousavi, Z., Ghods, A., Shabaniyan, E., Vajedian, S. and Akbarzadeh, M., 2019, The 2017 M w 6 Sefid Sang earthquake and its implication for the geodynamics of NE Iran. *Geophysical Journal International*, 218(2), 1227-1245 .
- Babaei, S., Mouavi, Z. and Roostaei, M., 2016, Time Series Analysis of SAR Images Using Small Baseline Subset (SBAS) and Persistent Scatterer (PS) Approaches to Determining Subsidence Rate of Qazvin Plain. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 5(4), 95-111 .
- Bamler, R. and Hartl, P., 1998, Synthetic aperture radar interferometry. *Inverse problems*, 14(4), R1 .
- Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R. and Sansosti, E., 2002, A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(11), 2375-2383 .
- Feng, W., Samsonov, S., Almeida, R., Yassaghi, A., Li, J., Qiu, Q., Zheng, W., 2018, Geodetic Constraints of the 2017 Mw7. 3 Sarpol Zahab, Iran Earthquake, and Its Implications on the Structure and Mechanics of the Northwest Zagros Thrust-Fold Belt. *Geophysical Research Letters*, 45(14), 6853-6861 .
- Ferretti, A., Prati, C. and Rocca, F., 2001, Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(1), 8-20 .
- Fialko, Y., Simons, M. and Agnew, D., 2001, 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*, 28(16), 3063-3066 .
- Hanssen, R. F., 2001, *Radar interferometry: data interpretation and error analysis (Vol. 2)*: Springer Science & Business Media.
- He, P., Wen, Y., Xu, C. and Chen, Y., 2018, High-quality three-dimensional displacement fields from new-generation SAR imagery: application to the 2017 Ezgeleh, Iran, earthquake. *Journal of Geodesy*, 1-19 .
- Hooper, A., Segall, P. and Zebker, H., 2007, Persistent scatterer interferometric synthetic aperture radar for crustal deformation analysis, with application to Volcán Alcedo, Galápagos. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 112(B7).
- Hotelling, H., 1933, Analysis of a complex of statistical variables into principal components. *Journal of educational psychology*, 24(6), 417 .
- Hu, J., Li, Z., Ding, X., Zhu, J., Zhang, L. and Sun, Q., 2014, Resolving three-dimensional surface displacements from InSAR measurements: A review. *Earth-Science Reviews* 17-1, 131.
- Kampes, B. M. and Hanssen, R. F., 2004, Ambiguity resolution for permanent scatterer interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 42(11), 2446-2453 .
- Ketelaar, G., Van Leijen, F., Marinkovic, P. and Hanssen, R., 2007, Multi-track PS-InSAR datum connection. Paper presented at the 2007 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium.
- Mashhadi-Hossainali, M., 2006, *A Comprehensive Approach to the Analysis of the 3D-Kinematics of Deformation*. Technische Universität.
- Massonnet, D., Rossi, M., Carmona, C., Adragna, F., Peltzer, G., Feigl, K. and Rabaute, T., 1993, The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry. *Nature*, 356(6433) 364.
- Pearson, K., 1901, LIII. On lines and planes of closest fit to systems of points in space. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 2(11), 559-572 .
- Qu, C., Shan, X., Zhao, D., Zhang, G. and Song, X., 2017, Relationships between InSAR Seismic Deformation and Fault Motion Sense, Fault Strike, and Ascending/Descending Modes. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 91(1), 93-108 .
- Rodriguez, E. and Martin, J., 1992, Theory and design of interferometric synthetic aperture radars. Paper presented at the IEE Proceedings F (Radar and Signal Processing).
- Solari, L., Del Soldato, M., Bianchini, S., Ciampalini, A., Ezquerro, P., Montalti, R., Moretti, S., 2018, From ERS 1/2 to Sentinel-1: subsidence monitoring in Italy in the last two decades. *Frontiers in Earth Science*, 6, 149 .
- Solaro, G., Imperatore, P. and Pepe, A., 2016, Satellite SAR Interferometry for Earth's Crust Deformation Monitoring and Geological Phenomena Analysis *Geospatial Technology*

- Environmental and Social Applications: IntechOpen.
- Su, Z., Yang, Y.-H., Li, Y.-S., Xu, X.-W., Zhang, J., Zhou, X. and Zhang, S.-M., 2019, Coseismic displacement of the 5 April 2017 Mashhad earthquake (Mw 6.1) in NE Iran through Sentinel-1A TOPS data: New implications for the strain partitioning in the southern Binalud Mountains. *Journal of Asian Earth Sciences*, 169, 244-256 .
- Tarantola, A., 2005, Inverse problem theory and methods for model parameter estimation (Vol. 89): siam.
- Vajedian, S. and Motagh, M., 2018, Coseismic displacement analysis of the 12 November 2017 Mw 7.3 Sarpol-e Zahab (Iran) earthquake from SAR Interferometry, burst overlap interferometry and offset tracking. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 4 (2018), Nr. 3, 4(3), 205-209 .
- Vajedian, S., Motagh, M., Mousavi, Z., Motaghi, K., Fielding, E., Akbari, B. and Darabi, A., 2018, Coseismic deformation field of the MW 7.3 12 November 2017 Sarpol-e Zahab (Iran) earthquake: A decoupling horizon in the northern Zagros Mountains inferred from InSAR observations. *Remote Sensing*, 10(10), 1589 .
- Van Leijen, F. J., 2014, Persistent scatterer interferometry based on geodetic estimation theory .
- Wright, T. J., Parsons, B. E. and Lu, Z., 2004, Toward mapping surface deformation in three dimensions using InSAR. *Geophysical Research Letters*, 31(1).
- Xiao, R. and He, X., 2013, GPS and InSAR time series analysis: deformation monitoring application in a hydraulic engineering resettlement zone, Southwest China. *Mathematical problems in engineering*, 2013.
- Xu, G., Xu, C. and Wen, Y., 2018, Sentinel-1 observation of the 2017 Sangsefid earthquake, northeastern Iran: Rupture of a blind reverse-slip fault near the Eastern Kopeh Dagh. *Tectonophysics*, 731, 131-138.
- Yang, C., Han, B., Zhao, C., Du, J., Zhang, D. and Zhu, S., 2019, Co-and post-seismic Deformation Mechanisms of the MW 7.3 Iran Earthquake (2017) Revealed by Sentinel-1 InSAR Observations. *Remote Sensing*, 11(4), 418 .
- Zhang, L., Ding, X. and Lu, Z., 2011, Modeling PSInSAR time series without phase unwrapping. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 49(1), 547-55 .

## Investigation of sensitivity to noise in the three-dimensional displacement field retrieval problem, generated by radar interferometry (Case study: Sefidsang and Ezgeleh earthquakes of 21 March and 12 November 2017, respectively)

Babaei, S. S.<sup>1</sup>, Mashhadi-Hossainali, M.<sup>2\*</sup> and Samie Esfahany, S.<sup>3</sup>

1. Ph.D. Student, Department of Geodesy, Faculty of Geodesy and Geomatics Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran
2. Associate Professor, Department of Geodesy, Faculty of Geodesy and Geomatics Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran
3. Assistant Professor, Department of Surveying and Geomatics Engineering, Faculty of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

(Received: 18 Sep 2019, Accepted: 21 Jan 2020)

### Summary

In recent decades, Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) technology has been an efficient tool in quantitatively measuring of the earth's deformation, influenced by natural and human factors, such as the overexploitation of water from underground aquifers, mining, subsidence, earthquake, and landslide. However, in the nature of the displacement measurement in the satellite's line of sight (LOS) in this technology, the possibility of extracting a three-dimensional displacement field has faced challenges. Especially in the study of many tectonic phenomena requiring a comprehensive understanding of the three-dimensional displacement components. Therefore, at least three independent radar geometries or InSAR-derived LOS displacements are always needed to solve the problem of retrieval of the three-dimensional (3D) displacement field. However, the polar geometry of imaging radar satellites is such that the contribution of the displacement and effect of the noise of the observations on the estimated parameters (Three-dimensional components) will be different, even in some cases, the problem will be unstable. Therefore, in this research, the noise sensitivity of the three-dimensional displacement field retrieval problem in independent and differential radar geometries is investigated and also based on the orbit overlapping method in the Sentinel radar satellite, using simulated and real data, the three-dimensional displacement of the Sefidsang and Ezgeleh earthquakes of 21 March and 12 November 2017 respectively is retrieved and the efficiency of this method is evaluated. In fact, in this study, considering the importance of knowing and measuring the components of the 3D surface displacement field, the problem of three-dimensional displacement field retrieval was investigated using a combination of independent radar geometries. Then, according to the variance-covariance matrix structure of the problem and the principal component analysis (PCA) method, the sensitivity of recovering each component of the displacement field to the input data noise by taking measurements of three independent radar geometries was discussed. The results show that the north-south displacement component has the highest sensitivity to the input data noise and has the least contribution of displacement along with the satellite LOS. Then the east-west and up-down components have approximately the same sensitivity to noise, although, for some specific incidence angles, the sensitivity to noise for the up-down component will be increased. Also, the condition number of the design matrix in the 3D field retrieval problem show that in most cases (except when the incidence angles of the two geometries are equal or have very slight differences), it is a well-established and stable problem and there is no need to solve it with regularization method. In the second part of the paper, remembering that in the Sentinel radar satellite, each sub-swath is imaged at different angles (with a difference of about 10 degrees), so the concept of overlap between the orbits (at least three different geometries) can be used to retrieve the 3D displacement field in most regions. The feasibility and efficiency of this method were evaluated with real and simulated data. The results showed that in the absence of noise components, the orbit overlap interferometry (OOI) method could be well used in 3D field reconstruction.

**Keywords:** radar interferometric, line of sight (LOS), three-dimensional displacement components, noise sensitivity analysis, Sefidsang earthquake, Ezgeleh earthquake.

\* Corresponding author:

hossainali@kntu.ac.ir