

مروری بر روش‌های بازیابی میدان جابه‌جایی سه‌بعدی با استفاده از مشاهدات حاصل از تداخل‌سنجی راداری به همراه معرفی روشی بر اساس همپوشانی بین مدارها در ماهواره راداری سنتینل

سید ساسان بابایی^{۱*}، مسعود مشهدی حسینعلی^۲، سمیع سمیعی اصفهانی^۳

^۱ دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه خواجه‌نصیرالدین طوسی

s.sasan_babaei@email.kntu.ac.ir

^۲ دانشیار دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه خواجه‌نصیرالدین طوسی

hossainali@kntu.ac.ir

^۳ استادیار دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه تهران

s.samieiesfahany@ut.ac.ir

چکیده

فناوری تداخل‌سنجی راداری ابزاری یکه را برای اندازه‌گیری کمی تغییرشکل زمین، تحت تأثیر عوامل طبیعی (زلزله، فرونشست، رانش) و انسانی (احداث سازه‌های، حفاری، برداشت بی‌رویه از سفرهای آب زیرزمینی) فراهم می‌کند. در همین چارچوب استفاده از این فناوری امکان پایش تغییرشکل‌های بلندمدت و آنالیز پدیده‌های ژئودینامیکی را ایجاد می‌کند. با این‌وجود تکنیک تداخل‌سنجی راداری فقط قادر به اندازه‌گیری جابه‌جایی در راستای خط دید ماهواره است و تنها یک مشاهده تداخل‌سنجی قادر به استخراج میدان سه‌بعدی جابه‌جایی نیست که این خود باعث محدود کردن ظرفیت بالقوه این تکنیک در مطالعه بسیاری از پدیده‌های تکتونیکی که نیازمند درک جامعی از مؤلفه‌های جابه‌جایی سه‌بعدی‌شان است، می‌شود. هدف از این مقاله، مروری بر روش‌های اصلی بازیابی میدان جابه‌جایی سه‌بعدی با استفاده از مشاهدات تداخل‌سنجی راداری و پیشرفت‌های اخیر در این زمینه می‌باشد. در انتها ضمن معرفی روش پیشنهادی بازیابی میدان جابه‌جایی سه‌بعدی حاصل از آنالیز تصاویر ماهواره راداری سنتینل، با استفاده از چند نمونه داده‌های شبیه‌سازی شده و واقعی کارایی این روش مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

واژگان کلیدی: تداخل‌سنجی راداری، جابه‌جایی افقی و قائم، جابه‌جایی در راستای خط دید ماهواره، مؤلفه‌های سه‌بعدی جابه‌جایی.

* نویسنده رابط

۱- مقدمه

خطای سیگنال‌های اتمسفری و ناهمبستگی‌های زمانی و مکانی بستگی دارد [۳].

در دهه‌های اخیر، محققین در این حوزه با توسعه روش‌های آنالیز سری زمانی تداخل‌سنجی راداری سعی در بهبود این دو گروه از محدودیت‌ها کردند [۴-۸]. با این وجود، هنوز محدودیت اندازه‌گیری‌های یک‌بعدی تداخل‌سنجی راداری به قوت خود باقی مانده است، به عبارتی دیگر، این روش‌ها فقط قادر هستند جابه‌جایی سه‌بعدی واقعی را در جهت خط دید ماهواره (یک‌بعدی) محاسبه کنند؛ بنابراین استخراج مؤلفه‌های سه‌بعدی جابه‌جایی واقعی نیازمند اندازه‌گیری سه مشاهده راداری با هندسه‌های مختلف است که البته استفاده از این ظرفیت برای اکثر مناطق وجود ندارد و برای بیشتر مناطق حداکثر دو هندسه برداشت راداری مستقل موجود است. با فرض حذف یا نادیده گرفتن یکی از مؤلفه‌های جابه‌جایی سه‌بعدی تنها قادر به اندازه‌گیری دو مؤلفه‌ی دیگر خواهیم بود. با این وجود، زمانی که جابه‌جایی فقط در یک هندسه اندازه‌گیری شده باشد تفسیر جابه‌جایی واقعی سطح زمین باید محتاطانه صورت گیرد. برای بیشتر مناطق، روش عملی برای بازیابی میدان سه‌بعدی جابه‌جایی، ترکیب اندازه‌گیری‌های تداخل‌سنجی با مشاهدات دیگر است که می‌توانند شامل داده‌های همگن^۳ (سایر داده‌های راداری) یا داده‌های ناهمگن^۴ (مشاهدات مستقل ژئودتیکی مانند GPS) می‌باشد [۳].

درواقع امروزه بحث استخراج میدان جابه‌جایی سه‌بعدی با استفاده از اندازه‌گیری‌های راداری به‌عنوان یکی از هیجان‌انگیزترین چالش‌ها در بین محققین جوامع ژئوماتیک و سنجش‌ازدور محسوب می‌شود. در بسیاری از مطالعات، جابه‌جایی حاصل‌شده از روش تداخل‌سنجی راداری تحت عنوان جابه‌جایی قائم، بدون در نظر گرفتن سهم جابه‌جایی افقی تفسیر می‌شود [۹] یا اینکه در بسیاری از مطالعات علمی اندازه‌گیری‌های در راستای خط دید ماهواره با استفاده از زاویه دید ماهواره به جابه‌جایی در راستای قائم تصویر می‌شود، که در اینجا نیز سهم مؤلفه‌ی جابه‌جایی افقی نادیده در نظر گرفته می‌شود در این مطالعات فرض می‌شود که میدان جابه‌جایی کاملاً

بررسی و پایش میدان جابه‌جایی ناشی از تغییرشکل سطح زمین، از پژوهش‌های مهم و کاربردی در مباحث گوناگون زمین‌شناسی و ژئوفیزیکی است که در پیشگیری و رفتارشناسی سوانح طبیعی از قبیل زلزله، فرونشست، زمین‌لغزش و مانند آن نقش بسزایی دارد. در این میان می‌توان به روش‌های گوناگونی برای اندازه‌گیری‌های ژئودتیکی و پایش تغییرشکل، نظیر ترازبایی دقیق، سامانه‌های تعیین موقعیت مکانی و فناوری تداخل‌سنجی راداری اشاره کرد [۱]. از میان روش‌های فوق، فناوری تداخل‌سنجی راداری^۱ با برخورداری از پوشش زمینی وسیع و پیوسته، قدرت تفکیک زمانی و مکانی زیاد و نیز دقت بالا اندازه‌گیری به یکی از روش‌های مهم و قابل‌توجه تبدیل شده است [۲].

اگرچه فناوری تداخل‌سنجی راداری کاربرد ویژه‌ای را در پایش تغییرشکل زمین پیدا کرده است، با این وجود این تکنیک هنوز با محدودیت‌هایی همچون؛ قدرت تفکیک زمانی پایین، ناهمبستگی زمانی و مکانی، آغشته بودن اندازه‌گیری‌ها به سیگنال‌های مزاحم (تروپوسفر و یونسفر) و اندازه‌گیری یک‌بعدی جابه‌جایی در راستای خط دید ماهواره^۲ (به خاطر هندسه جانبی تصویربرداری ماهواره‌های راداری) روبرو است. قدرت تفکیک زمانی اندازه‌گیری‌های تداخل‌سنجی به دوره برداشت مجدد ماهواره‌های راداری از منطقه بستگی دارد و عموماً برای ماهواره‌هایی با قدرت تفکیک متوسط به‌صورت ماهیانه بوده (۲۴ روزه برای RADARSAT_1 و ۳۵ روزه برای ERS1/2، ENVISAT و ۴۶ روزه برای JERS1، ALOS) و برای ماهواره‌هایی با قدرت تفکیک بالا هم اکنون به چند روز بهبود پیدا کرده است (۱۱ روزه برای TerraSAR-X و ۱ تا ۱۶ روزه برای COSMO-SkyMed) ولی به طور کلی این زمان برای ماهواره‌های راداری مختلف متفاوت می‌باشد (مراجعه به جدول شماره ۱). این فناوری با وجود ناهمبستگی‌های زمانی و مکانی از لحاظ تئوری قادر است تغییرات سطح زمین را با دقتی در حدود سانتی‌متر یا حتی میلی‌متر اندازه‌گیری کند با این حال دقت به‌دست‌آمده در عمل به

^۳ homogenous data

^۴ heterogeneous data

^۱ Interferometric Synthetic aperture radar (InSAR)

^۲ Line Of Side (LOS)

جدول ۱- خلاصه‌ای از مشخصات ماهواره‌های شناخته‌شده راداری.

ماهواره	قدرت تفکیک		زاویه دید (درجه)	طول موج (سانتیمتر)
	زمانی ^۲ (روز)	مکانی ^۳ (متر)		
SEASAT	۱۷	۲۵*۲۵	۲۰-۲۶	۲۳.۵
ERS-1	۳۵.۳.۱۶۸	۳۰*۳۰	۲۰-۲۶	۵.۶۶
JERS-1	۴۴	۱۸*۱۸	۳۵	۲۳.۵
ERS-2	۳۵.۳	۳۰*۳۰	۲۰-۲۶	۵.۶۶
RADARSA T-1	۲۴	۹*۸.۹	۳۷-۴۷	۵.۶۶
ENVISAT	۳۵.۳۰	۳۰*۳۰	۱۵-۴۵	۵.۶۳
ALOS	۴۶	۱۰*۲۴	۸-۳۰	۲۳.۶
RADARSA T-2	۲۴	۰.۸*۲.۱	۲۰-۴۹	۵.۵۵
TerraSAR- X	۱۱	۱*۱.۵-۳	۲۰-۵۵	۳.۱۱
COSMO- SkyMed	۱.۴.۵.۷.۱۶	۱*۱	۲۵-۵۰	۳.۱۲
TanDEM-X	۱۱	۳۰*۳۰	۲۰-۵۵	۳.۱۱
SENTINEL -1A/B	۱۲.۶	۵*۲۰	۲۹-۴۶	۵.۵۶

۲- بازیابی میدان جابه‌جایی سه‌بعدی

تصویربرداری راداری، مؤلفه‌های مشاهداتی جابه‌جایی را در راستای دید ماهواره و در دو عبور بالاگذر^۴ و پایین‌گذر^۵ اندازه‌گیری می‌کند. جابه‌جایی در راستای خط دید ماهواره از مؤلفه‌های افقی و مؤلفه قائم میدان جابه‌جایی واقعی تشکیل می‌شود و معادله آن را به صورت زیر به فرم ماتریسی می‌توان نوشت (مرجع [۱۶] یا ص ۱۶۲ [۲]).

(۱)

$$\mathbf{D}_{\text{LOS}} = \begin{pmatrix} -\sin \theta \cos \alpha & \sin \theta \sin \alpha & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{U}_{\text{EW}} \\ \mathbf{U}_{\text{NS}} \\ \mathbf{U}_{\text{UD}} \end{pmatrix}$$

در فرمول‌های بالا $\mathbf{U}_{\text{EW}}, \mathbf{U}_{\text{NS}}, \mathbf{U}_{\text{UD}}$ به ترتیب مؤلفه‌های؛ بالا-پایین، شمالی-جنوبی و شرقی-غربی میدان جابه‌جایی سه‌بعدی واقعی، α بیانگر زاویه آزیموت ماهواره، θ بیانگر زاویه دید ماهواره نسبت به راستای نادیر هستند. زاویه دید برای سنجنده‌های راداری مختلف متفاوت می‌باشد و بستگی به گستره تصویربرداری (دامنه نزدیک^۶ در مقابل دامنه دور^۷) و مد تصویربرداری دارد (جدول شماره ۱ یا مرجع [۱۷] را ببینید). همانطور که در فرمول ۱ مشاهده

عمودی است [۱۰]. با این حال در برخی از مطالعات تصویر کردن جابه‌جایی تداخل‌سنجی در راستای قائم بدون بیان این فرضیه اعمال می‌شود [۱۱، ۱۲] این در حالی است که استفاده از این فرض فقط برای برخی از نواحی و یا قسمت‌های خاص از یک منطقه تغییرشکل یافته صحیح است (مرکز یک فرونشست کاسه‌ای). برای یک میدان جابه‌جایی واقعی تأثیر مؤلفه افقی در برخی مواقع می‌تواند حتی بیشتر از مؤلفه قائم نیز باشد، بنابراین نادیده تلقی کردن این مؤلفه می‌تواند خطای قابل توجهی را در تصویر کردن جابه‌جایی تداخل‌سنجی به جابه‌جایی قائم ایجاد کند.

آرایش‌های متفاوت آنتن رادار منجر به دو روش تداخل‌سنجی؛ عمود بر راستای پرواز (Cross-Track) و در راستای پرواز (Along-Track) می‌شود. در روش تداخل‌سنجی عمود بر راستای پرواز یا با تکرار مسیر^۱ از اطلاعات فاز حداقل دو تصویر SAR که در فواصل زمانی متفاوت از یک ناحیه به دست آمده است، استفاده می‌شود، این در حالی است که در روش دوم جابه‌جایی سطحی زمین در راستای پرواز ماهواره با استفاده از دامنه تصاویر رادار استخراج می‌شود [۱۳-۱۵]. روش‌های اصلی بازیابی میدان جابه‌جایی سه‌بعدی عمدتاً از این دو گروه مشاهده برای حل مسئله بازیابی استفاده می‌کنند.

با توجه به مسئله بازیابی میدان جابه‌جایی سه‌بعدی حاصل از اندازه‌گیری‌های تداخل‌سنجی راداری، ساختار اصلی این مقاله به سه بخش تقسیم می‌شود که در بخش اول به مرور روش‌های بازیابی میدان سه‌بعدی حاصل از فناوری تداخل‌سنجی راداری، توسعه‌ها و پیشرفت‌های حاصل شده و مقالات اصلی در این رابطه پرداخته می‌شود، در بخش دوم روش آنالیز مؤلفه‌های اصلی به منظور بررسی میزان حساسیت هر کدام از مؤلفه‌های میدان سه‌بعدی به جابه‌جایی اندازه‌گیری شده در راستای خط دید ماهواره و همچنین بررسی پایداری یا ناپایداری مسئله بازیابی پرداخته‌شده و در نهایت در بخش پایانی مقاله با استفاده از داده‌های شبیه‌سازی‌شده و واقعی روش بازیابی میدان جابه‌جایی سه‌بعدی را با استفاده از مفهوم همپوشانی بین مدارهای ماهواره راداری سنتینل معرفی و مورد ارزیابی قرار می‌دهیم.

^۱ Repeat Pass

^۲ Spatial resolution (azimuth × range)

^۳ Repeat cycle

^۴ Ascending

^۵ Descending

^۶ Near range

^۷ Far range

در فرمول‌های بالا α بیانگر زاویه آزیموت ماهواره و θ بیانگر زاویه دید ماهواره نسبت به راستای نادیر (برای مدارهای بالاگذر و پایین‌گذر) و δ, D به ترتیب بیانگر جابه‌جایی در راستای خط دید ماهواره و خطای جابه‌جایی در راستای خط دید ماهواره می‌باشند.

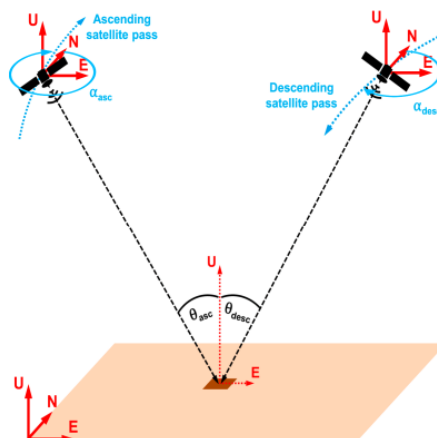
برای بازسازی میدان جابه‌جایی ناشی از تغییر شکل در هر سه راستا و جبران کمبود مشاهده سوم در روش تداخل-سنجی راداری تلاش‌های زیادی توسط محققین صورت گرفته است که از جمله مهم‌ترین این روش‌ها را می‌توان به صورت زیر دسته‌بندی نمود:

- ۱- صرف‌نظر کردن از یک یا دو مؤلفه جابه‌جایی (در صورتی که سازوکار جابه‌جایی معلوم باشد).
- ۲- استفاده از ترکیب مشاهدات در راستای خط دید ماهواره^۲ حداقل در سه هندسه مستقل (DInSAR).
- ۳- ترکیب مشاهدات در راستای خط دید ماهواره با مشاهدات در راستای آزیموت (Azimuth Offset, MAI).
- ۴- تلفیق بردارهای جابه‌جایی حاصل از GPS با مشاهدات حاصل از تداخل‌سنجی راداری.
- ۵- در نظر گرفتن مدل‌های فرضی برای تغییر شکل یا ترکیب مدل‌های ژئوفیزیکی با داده‌های تداخل‌سنجی راداری.
- ۶- همپوشانی بین برست‌ها^۳ (BOI) در داده‌های ماهواره سنتینل (Sentinel).

هر کدام از روش‌های اشاره شده در بالا که برای بازیابی میدان جابه‌جایی سه‌بعدی مورد استفاده قرار می‌گیرد دارای نقاط قوت و ضعفی هست و با توجه به منطقه مورد مطالعه، نوع تغییر شکل سطحی اتفاق افتاده در آن و همچنین با توجه به وجود سایر اطلاعات ژئودتیکی منطقه، انتخاب و مورد استفاده محققین قرار می‌گیرد. در جدول ۲ به برخی از مطالعات مختلف انجام شده در حوزه بازیابی مؤلفه‌های میدان سه‌بعدی توسط محققین مختلف پرداخته شده است.

علیرغم روش‌های اشاره شده در بالا هنوز هم مسئله بازیابی میدان سه‌بعدی سطحی در اپک‌های زمانی مورد نظر با

می‌شود با توجه به ثابت بودن تقریبی آزیموت ماهواره در سنجنده‌های مختلف، لذا اندازه‌گیری‌های در جهت خط دید ماهواره به اندازه قابل توجهی به زاویه دید ماهواره بستگی دارند؛ برای مثال، یک بردار میدان جابه‌جایی سه‌بعدی به اندازه‌ی (۲، ۳، ۴) سانتی‌متر به ترتیب در جهت شرقی-غربی، شمالی-جنوبی، و بالا-پایین برای ماهواره سنتینل با زاویه دیده دامنه نزدیک ۲۹ درجه دارای جابه‌جایی به اندازه ۲.۲ سانتی‌متر در جهت خط دید ماهواره است در صورتی که برای دامنه دور با زاویه دید ۴۶ درجه چیزی حدود ۰.۸ سانتی‌متر می‌باشد [۹].



شکل ۱- طرح کلی هندسه دید اندازه‌گیری‌های تداخل‌سنجی راداری در راستای خط دید ماهواره برای مدارهای بالاگذر و پایین‌گذر [۹].

با توجه به نزدیک به قطبی بودن مدار ماهواره، حساسیت مؤلفه‌های جابه‌جایی حاصل به راستای شمالی-جنوبی کم است که این امر باعث کم شدن دقت این مؤلفه محاسبه شده می‌شود [۱۸]. همان‌طور که اشاره شد 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 (معادله ۱)، حال آنکه برای استخراج سه مؤلفه اورتوگونال میدان جابه‌جایی سطحی یعنی مؤلفه‌های شمالی-جنوبی (U_n)، شرقی-غربی (U_e) و بالا-پایین (U_u) حداقل نیازمند سه مشاهده مستقل هستیم تا بتوانی میدان جابه‌جایی ناشی از تغییر شکل را در هر سه راستا بازسازی کنیم.

(۲)

$$\begin{cases} [U_n \sin(\alpha^{Des}) - U_e \cos(\alpha^{Des})] \sin(\theta^{Des}) + U_u \cos(\theta^{Des}) + \delta_{LOS}^{Des} = D_{LOS}^{Des} \\ [U_n \sin(\alpha^{Asc}) - U_e \cos(\alpha^{Asc})] \sin(\theta^{Asc}) + U_u \cos(\theta^{Asc}) + \delta_{LOS}^{Asc} = D_{LOS}^{Asc} \end{cases}$$

^۲ Differential Interferometric SAR (DInSAR)

^۳ Burst-Overlap Interferometry (BOI)

^۱ Near Polar

دقت بالا به عنوان یک چالش بزرگ پیشروی محققین علوم زمین قرار دارد. در ادامه این پژوهش و برای آشنایی بیشتر با هر کدام از روش‌های اشاره شده، جزییات، نقاط قوت و ضعف آن‌ها مورد بحث قرار می‌گیرد.

جدول ۲- خلاصه‌ای از تاریخچه روش‌های مورد مطالعه به منظور بازیابی مؤلفه‌های میدان سه‌بعدی جابه‌جایی حاصل از فناوری تداخل‌سنجی راداری

نویسندگان	سال	منطقه مورد مطالعه	روش مورد استفاده
فیالکو ^۱ و همکاران [۱۹]	۲۰۰۵		
فانینگ ^۲ و همکاران [۲۰]	۲۰۰۵	زلزله بم ۲۰۰۳	ترکیب مشاهدات در راستای خط دید ماهواره با مشاهدات در راستای آزیموت AZO
گنزالس ^۳ و همکاران [۲۱]	۲۰۰۹		
هو ^۴ و همکاران [۲۲]	۲۰۱۰		
گودموندسون ^۵ و همکاران [۲۳]	۲۰۰۲	آتشفشان گالپ ^۹ ۱۹۹۶	
سامسونوف ^۶ و همکاران [۲۴]	۲۰۰۷	منطقه جنوب کالیفرنیا	تلفیق بردارهای جابه‌جایی حاصل از GPS با مشاهدات حاصل از تداخل‌سنجی راداری.
گوگلیلمینو ^۷ و همکاران [۲۵]	۲۰۱۳	زلزله لاکویلا ^{۱۴} ۲۰۰۹ ایتالیا	
کاتالانو ^۸ و همکاران [۲۶]	۲۰۱۱	جزایر فیال و پیکو ^{۱۱}	
ولراس ^{۱۲} و همکاران [۲۷]	۲۰۱۷	فلات هایبلین فورلند ^{۲۴} ، سیلیس	ترکیب مشاهدات در راستای خط دید ماهواره با مشاهدات در راستای آزیموت (MAI).
یونگ ^{۱۳} و همکاران [۲۸]	۲۰۱۱	آتشفشان کیلووایا هاوایی ^{۱۴}	صرف‌نظر کردن از یک یا دو مؤلفه جابه‌جایی (در صورتی که سازوکار جابه‌جایی معلوم باشد) یا ترکیب دو مؤلفه افقی تحت یک مؤلفه.
گوملن ^{۱۳} و همکاران [۲۹]	۲۰۱۱	مناطق یخی در ایسلند	
رایت ^{۱۵} و همکاران [۳۰]	۲۰۰۴	زلزله کوه ننانا ^{۱۶}	
معتق و همکاران [۳۱]	۲۰۱۷	فرونشست دشت رفسنجان	
فورمن ^{۱۷} و همکاران [۹]	۲۰۱۹	منطقه سیدنی	ترکیب مشاهدات در راستای خط دید ماهواره در هندسه‌های مستقل.
لورنس‌گری ^{۱۸} و همکاران [۳۲]	۲۰۱۱	یخچال هنریتی ناسمیت ^{۱۹}	در نظر گرفتن مدل‌های فرضی برای تغییر شکل یا ترکیب مدل-های ژئوفیزیکی با داده‌های تداخل‌سنجی راداری.
سمیعی و همکاران [۳۳]	۲۰۰۹	فرونشست منطقه فریزلند ^{۲۰}	
جفین ^{۲۱} و همکاران [۳۴]	۱۹۹۸	یخچال رایدر ^{۲۲} در گرینلند	همپوشانی بین برست‌ها (Burst) در داده‌های ماهواره سنتینل استفاده از روش‌های: ۱- ترکیب مشاهدات در راستای خط دید ماهواره در هندسه‌های مستقل (DInSAR) ۲- استفاده از مشاهدات در راستای آزیموت (MAI & AZO) ۳- همپوشانی بین برست‌ها (BOI)
گراندین ^{۲۵} و همکاران [۳۵]	۲۰۱۶	زلزله ایلپل ^{۲۶} (شیلی)	
هی ^{۲۷} و همکاران [۳۶]	۲۰۱۸	زلزله ازگله ^{۲۸} کرمانشاه (ایران)	

^۱ Yuri Fialko	^۸ Catalao	^{۱۵} Wright	^{۲۲} Ryder, Greenland	^{۲۸} Ezgeleh earthquake, Iran
^۲ Gareth Funning	^۹ Gjalp volcano	^{۱۶} Nenana Mountain Faial	^{۲۳} Vollrath	
^۳ González	^{۱۰} L'Aquila earthquake	^{۱۷} Fuhrmann	^{۲۴} Hyblean Foreland Plateau, Sicily	
^۴ Hu, Jun	^{۱۱} Faial and Pico	^{۱۸} Laurence Gray	^{۲۵} Grandin	
^۵ Gudmundsson	^{۱۲} Jung	^{۱۹} Henrietta Nesmith	^{۲۶} Illapel earthquake, Chile	
^۶ Samsonov	^{۱۳} Gournelen	^{۲۰} Friesland	^{۲۷} He, Ping	
^۷ Guglielmino	^{۱۴} Hawaii's Kilauea	^{۲۱} Joughin		

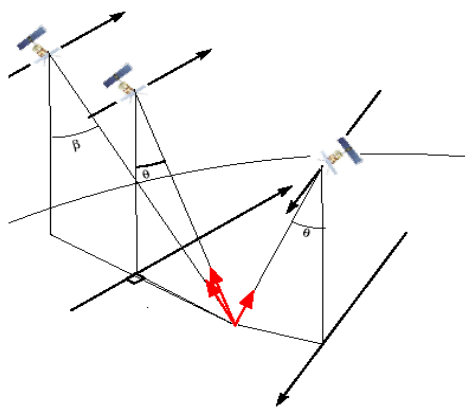
همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، به خاطر نزدیک به قطب بودن مدار ماهواره‌های راداری، بردار جابه‌جایی در راستای خط دید ماهواره کمترین حساسیت را به مؤلفه جابه‌جایی شمالی-جنوبی خواهد داشت لذا با صرف‌نظر کردن از این مؤلفه می‌توان معادله ۱ را به صورت زیر بازنویسی نمود [۹].

$$\begin{pmatrix} D_{LOS}^{Asc.} \\ D_{LOS}^{Des.} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\theta^{Asc.}) & -\cos(\alpha^{Asc.})\sin(\theta^{Asc.}) \\ \cos(\theta^{Des.}) & -\cos(\alpha^{Des.})\sin(\theta^{Des.}) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_u \\ U_e \end{pmatrix} \quad (3)$$

۲-۱- صرف‌نظر کردن از یک یا دو مؤلفه جابه‌جایی

آسان‌ترین و راحت‌ترین روش برای بازسازی میدان جابه‌جایی ارتفاعی و مسطحاتی با استفاده از مشاهدات تداخل‌سنجی راداری، صرف‌نظر کردن از یک مؤلفه جابه‌جایی مسطحاتی (مؤلفه شمالی-جنوبی یا شرقی-غربی) است، البته این امر زمانی امکان‌پذیر است که سازوکار جابه‌جایی مسطحاتی منطقه معلوم فرض شود و یا این که ترکیب این دو مؤلفه با همدیگر مدنظر قرار گرفته شود.

را با چندین زاویه دید تصویربرداری کنند، همان طور که در شکل ۳ نشان داده شده است این نوع تصویربرداری که تنوع مشاهدات LOS را به همراه دارد، باعث استحکام هندسی مشاهدات در محاسبات مربوط به بازسازی میدان جابه جایی ارتوگونال می شود.



شکل ۳- تصویری در راستای خط دید ماهواره با زاویه های دید مختلف (هندسه های مستقل).

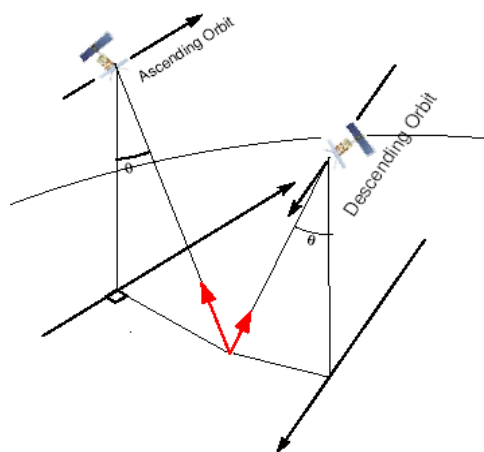
در این روش تنها با داشتن حداقل سه هندسه مستقل راداری دستگاه معادلات و مشاهدات معادله ۱ را می توان به صورت زیر نوشته و میدان جابه جایی سه بعدی را با استفاده از آن برای هر پیکسل محاسبه نمود [۳۷].

(۵)

$$y = Ax + e$$

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

در این سیستم معادله y بردار جابه جایی مشاهدات، x بردار مجهولات (مؤلفه های میدان سه بعدی واقعی) و A ماتریس ضرایب هستند. به علت تغییرات زاویه دید ماهواره برای هر پیکسل لذا ماتریس ضرایب نیز برای هر پیکسل متفاوت خواهد بود. با افزایش تعداد معادلات در دستگاه معادله ۵ می توان مسئله را با روش کمترین مربعات حل کرد. باین وجود به علت عدم وجود داده های راداری با هندسه های متفاوت از یک مکان خاص همواره این روش دارای محدودیت می باشد. علاوه بر این در صورت وجود هندسه مستقل برای ناحیه مورد مطالعه بازمهم هم زمانی تصاویر اخذ شده مسئله را کمی سخت می کند زیرا که جابه جایی های اخذ شده در راستای خط دید ماهواره در حد امکان باید در یک دوره زمانی مشابه باشند، در غیر این صورت نیاز به یک درون یابی زمانی داریم.



شکل ۲- بردارهای جابه جایی InSAR ماهواره های راداری کنونی در مدارهای قطبی قرار گرفته اند. ممکن است نواحی مفروضی از زمین هم از مدارهای بالاگذر و هم پایین گذر مشاهده شود و هر دو نقشه های تغییر طول در راستای خط دید ماهواره را تولید کنند. هرکدام از این نقشه های دربردارنده تصویری یک بعدی از میدان جابه جایی سه بعدی هستند.

بنابراین با استفاده از دو هندسه مستقل بالاگذر و پایین گذر از یک منطقه می توان معادله بالا را برای هر پیکسل زمینی حل نمود. حالت دوم ساده سازی به این صورت است که دو مؤلفه جابه جایی مسطحاتی را باهم ترکیب نموده و به یک مؤلفه تبدیل کنیم (U_h) که در این صورت معادله ۱ به صورت زیر بازنویسی می شود [۳۳]؛

$$\begin{pmatrix} D_{LOS}^{Asc.} \\ D_{LOS}^{Des.} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\theta^{Asc.}) & \sin(\theta^{Asc.}) \\ \cos(\theta^{Des.}) & \sin(\theta^{Des.}) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_u \\ U_h \end{pmatrix} \quad (۴)$$

روش اشاره شده فقط یک دید کلی راجع میزان جابه جایی در راستاهای قائم و افقی به محققین می دهد و برای مطالعاتی که تفکیک مؤلفه های جابه جایی افقی مهم نیست مناسب است باین حال این روش برای کاربردهای دقیق تر و بررسی ساختار دقیق جابه جایی افقی مخصوصاً در هنگام رویداد زلزله کاربردی نیست.

۲-۲- استفاده از مشاهدات در راستای خط دید

ماهواره حداقل در سه هندسه مستقل

با استفاده از سه مشاهده مستقل در راستای خط دید ماهواره، به دست آمده از هندسه های دید مختلف امکان بازسازی مدل جابه جایی سه بعدی، میسر می شود. سیستم ها راداری این توانایی را دارند که ناحیه ای مشابه از زمین

(۷)

$$\begin{pmatrix} D_{LOS}^{Asc.} \\ D_{LOS}^{Des.} \\ D_{AZO}^{Asc.} \\ D_{AZO}^{Des.} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\theta^{Asc.}) & -\cos(\alpha^{Asc.})\sin(\theta^{Asc.}) & \sin(\alpha^{Asc.})\sin(\theta^{Asc.}) \\ \cos(\theta^{Des.}) & -\cos(\alpha^{Des.})\sin(\theta^{Des.}) & \sin(\alpha^{Des.})\sin(\theta^{Des.}) \\ 0 & \sin(\alpha^{Asc.}) & \cos(\alpha^{Asc.}) \\ 0 & \sin(\alpha^{Des.}) & \cos(\alpha^{Des.}) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_u \\ U_e \\ U_n \end{pmatrix} + e$$

بنابراین با حل دستگاه معادله ۶ می‌توان جابه‌جایی سه-بعدی را برای منطقه موردنظر برآورد نمود. در استفاده از این روش علیرغم جبران کمبود معادله برای حل سه مجهول موردنظر، باید این نکته همواره مدنظر قرار بگیرد که دقت مشاهدات دو معادله‌ای که از روش **Along Track** حاصل شده است همواره خیلی کمتر از دقت جابه‌جایی‌های در راستای خط دید معادله می‌باشد ($\delta_{AZO} \gg \delta_{LOS}$) و در نظر نگرفتن وزن مناسب برای این جابه‌جایی‌ها و هم‌وزن در نظر گرفتن مشاهدات حین سرشکنی دستگاه معادله ۶ می‌تواند نتیجه مخربی در برآورد میدان جابه‌جایی سه‌بعدی داشته باشد. برای محاسبه جابه‌جایی در راستای آزیموتی دو روش توسط محققین ارائه شده است که عبارت‌اند از:

- ۱- روش آزیموت افست^۱ (**AZO**)
- ۲- روش تداخل‌سنجی چند دیافراگمی^۲ (**MAI**)

۲-۳-۱- روش آزیموت افست (**AZO**)

روش آزیموت افست با نام‌های (**Amplitude/offset/pixel**) **tracking** نیز شناخته می‌شود که تمامی این نام‌ها اشاره به همان روش آزیموت افست می‌کنند. اولین بار در محاسبه جابه‌جایی زلزله لندرز^۳ توسط [۳۹] پیشنهاد شد، که شامل یک اندازه‌گیری ساده شیفت افقی در موقعیت هر پیکسل بین دو تصویر راداری می‌باشد که این شیفت افقی با تطبیق شدت یا همدوسی پیکسل‌ها صورت می‌پذیرد [۱۵]. در واقع تناظر یابی زیر پیکسل تصاویر دامنه تکنیک پابرجایی برای به دست آوردن اطلاعاتی اضافی در زمینه جابه‌جایی‌های افقی می‌باشد. آزیموت افست شیفت‌های افقی ضروری برای تنظیم کردن (ردیف کردن) پیکسل‌های دامنه در راستای آزیموت (مؤلفه شمالی) برای

مسئله دیگر که باید در استفاده از این روش مدنظر گرفته شود وزن مشاهدات با هندسه‌های مستقل است که با یکدیگر فرق می‌کنند لذا عدم لحاظ وزن درست مشاهدات در حل دستگاه معادلات ۵ منجر به برآورد ناصحیحی از میدان جابه‌جایی سه‌بعدی زمین می‌گردد [۹].

۲-۳-۲- ترکیب مشاهدات در راستای خط دید ماهواره با مشاهدات در راستای آزیموت

تصویربرداری راداری این مکان را برای ما فراهم می‌کند که بتوانیم جابه‌جایی در راستای حرکت ماهواره یا در راستای آزیموتی (**Along Track**) را نیز محاسبه کنیم. در این روش محاسبه جابه‌جایی سطحی با استفاده از بخش دامنه سیگنال بازپراکنش شده انجام می‌شود. این روش معمولاً برای مشاهدات جابه‌جایی یخبندان‌ها و یخچال‌ها به کار می‌رود در واقع زمانی که روش تداخل‌سنجی راداری به علت همدوسی پایین بین پیکسل‌ها محدود می‌شود مثلاً زمانی که حرکت پیکسل‌ها سریع باشد یا همدوسی آن‌ها پایین باشد و یا این‌که زمان بین برداشت دو تصویر راداری خیلی زیاد باشد، این روش می‌تواند اجرایی شود. برای بیشتر نمونه‌های مطالعه شده، دقت جابه‌جایی اندازه‌گیری شده از این روش چیزی حدود ۱/۱۰ تا ۱/۳۰ قدرت تفکیک مکانی می‌باشد [۱۵، ۳۸]. هرچند که محاسبه جابه‌جایی در راستای آزیموتی با دقت خیلی کمتر از جابه‌جایی در راستای خط دید ماهواره می‌باشد ولی با این حال می‌توان از این جابه‌جایی به‌عنوان مکملی برای روش تداخل‌سنجی راداری که نسبت به مؤلفه شمالی-جنوبی (راستای آزیموتی) حساسیت کمتری دارد استفاده کرد همچنین این روش مقاومت بهتری نسبت به ناهمبستگی فاز داشته و نیازی به پروسه بازیابی فاز (به عنوان یک چالش اصلی در روش تداخل‌سنجی معمولی) در آن نمی‌باشد [۳]. در بازیابی میدان سه‌بعدی می‌توان معادله و مشاهده این روش را به‌صورت ذیل استفاده نمود [۱۶].

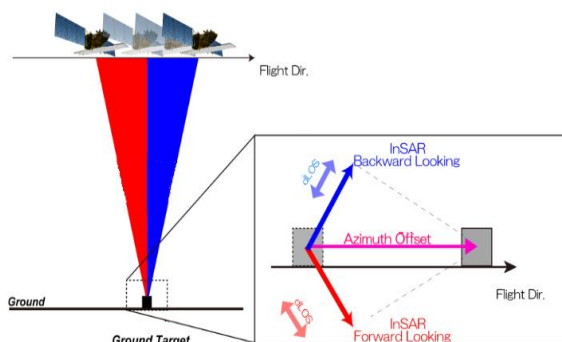
$$U_u \cos(\alpha) + U_e \sin(\alpha) + \delta_{AZO} = D_{AZO} \quad (۶)$$

در این معادله D_{AZO} جابه‌جایی در راستای آزیموتی و δ_{AZO} خطای این جابه‌جایی می‌باشد؛ بنابراین معادله ۱ را می‌توان به کمک معادله ۶ به‌صورت زیر و به شکل ماتریسی بازنویسی نمود.

^۱ Azimuth Offset (AZO)

^۲ Multiple Aperture Interferogram (MAI)

^۳ Landers earthquake



شکل ۴- هندسه روش تداخل‌سنجی چند دیافراگمی (MAI) برای تولید تصاویر دید جلو و عقب.

بنابراین برای دو اپک زمانی تصویربرداری ما چهار زیر تصویر مستقل (دو تصویر برای دید عقب و دو تصویر برای دید جلو) برای دو تصویر اصلی و فرعی خواهیم داشت که با ضرب مختلط دو تصویر ایجاد شده برای دید عقب، تداخل‌نگار دید عقب و همچنین با ضرب مختلط دو تصویر برای دید جلو، تداخل‌نگار دید جلو ایجاد می‌شوند و در نهایت با ضرب مختلط این دو تداخل‌نگار، تصویر تداخل‌نگار چند دیافراگمی (MAI) ایجاد می‌شود که در نهایت جابه‌جایی حاصل برای راستای آزیموتی با فرمول زیر قابل محاسبه می‌باشد [۱۳].

$$\phi_{MAI} = \phi_f - \phi_b = -\frac{4\pi}{\lambda} \mathbf{nx} \quad (8)$$

که در این فرمول ϕ_f و ϕ_b مربوط به فازهای تداخل-نگارهای دید جلو و عقب، x مربوط به جابه‌جایی در راستای آزیموتی، l طول مؤثر آنتن راداری و n کسری از پهنای دریچه آنتن راداری هستند. روش تداخل‌سنجی چند دیافراگمی (MAI) تحت تأثیر خطای اتمسفری نیست و این خود باعث افزایش دقت این روش است. نتایج بدست آمده از این روش دارای دقتی به مراتب بهتر از دقت روش آزیموت افست هستند ($\delta_{MAI} > \delta_{AZO}$) [۴۳].

باین حال دقت این روش شدیداً تحت تأثیر نویز موجود در تصویر راداری است (وابسته به همدوسی بین دو تصویر راداری) و با افزایش نویز تصاویر راداری دقت شدت کاهش پیدا می‌کند. به عنوان مثال؛ دقت بدست آمده برای جابه‌جایی در راستای پرواز برای پیکسلی با همدوسی ۰.۶ تقریباً برابر ۸ سانتی‌متر است [۱۳]. در سال‌های اخیر تلاش‌هایی برای بهبود دقت این روش با تصحیح خطای فاز توپوگرافی و زمین مسطح انجام شده است باین حال

زوج تصاویر راداری می‌باشد. لذا در بردارنده اطلاعاتی درباره جابه‌جایی‌های زمینی در راستای آزیموت می‌باشد. برای ماهواره‌های Envisat اندازه طول‌موج در حدود ۵.۷ سانتی‌متر و اندازه پیکسل در حدود ۴ متر می‌باشد؛ بنابراین آفست‌های آزیموت کم‌دقت‌تر از جابه‌جایی‌های در راستای خط دید ماهواره (LOS) هستند. روش آزیموت افست تحت دو الگوریتم؛ بهینه‌سازی همبستگی شدت پیکسل‌های یک مسیر ($Intensity\ tracking^1$) [۴۰، ۴۱] و بهینه‌سازی همدوسی پیکسل‌های یک مسیر ($Coherence\ tracking^2$) [۴۲] قابل پیاده‌سازی و اجرا می‌باشد. زمانی که همدوسی بین دو تصویر راداری کم باشد (در مناطق یخبندان به علت تغییرات پیوسته همدوسی جفت تصویر راداری کمتر از پنج روز خواهد بود) توصیه می‌شود از الگوریتم بهینه‌سازی همبستگی شدت پیکسل‌های استفاده شود باین حال این الگوریتم به خاطر انتخاب پنجره محاسباتی با ابعاد بزرگ باعث کاهش قدرت تفکیک مکانی می‌شود همچنین زمان لازم برای محاسبات با این الگوریتم زیاد خواهد بود [۱۵، ۱۶].

۲-۳-۲- روش تداخل‌سنجی چند دیافراگمی (MAI)

روش دیگر برای برآورد جابه‌جایی در راستای آزیموتی تحت عنوان روش تداخل‌سنجی چند دیافراگمی برای اولین بار توسط [۴۳] پیشنهاد شد. این روش از زیر دیافراگم‌های تولید شده از تصاویر راداری برای محاسبه جابه‌جایی آزیموتی استفاده می‌کند [۴۴] بدین صورت که ابتدا تصاویر خام راداری را به دو تصویر راداری جدید با اصلاح شیف‌ت داپلر آن‌ها و با تقسیم پهنای باند داپلر آن‌ها به دو قسمت مساوی تبدیل می‌کند که هر یک از این زیر تصاویرها را تصویر دید جلو^۳ و تصویر دید عقب^۴ می‌نامند. این روش تحت عنوان **split-beam SAR processing** شناخته می‌شود.

^۱ Or Cross-Correlation optimization

^۲ Or Fringe visibility algorithm

^۳ Forward-looking

^۴ Backward-looking

۲-۴- تلفیق بردارهای جابه‌جایی حاصل از GPS با مشاهدات حاصل از InSAR

منبع مهم ژئودتیکی دیگر که در تعیین مؤلفه‌های ارتوگونال جابه‌جایی سطحی در تلفیق با داده‌های تداخل-سنجی راداری می‌تواند به ما کمک کند و کمبود معادلات مشاهدات را جبران کند، داده‌های مربوط به سیستم تعیین موقعیت جهانی (GPS) و داده‌های ترازبایی می‌باشند. همان‌طور که می‌دانیم روش تداخل‌سنجی راداری نسبت به مؤلفه جابه‌جایی ارتفاعی حساسیت بیشتری دارد این در حالی است که دقت مؤلفه ارتفاعی GPS کمتر از دقت مؤلفه‌های افقی آن است بنابراین ضمن ترکیب مشاهدات راداری و GPS می‌توانیم علاوه بر افزایش دقت مؤلفه ارتفاعی GPS میدان جابه‌جایی سه‌بعدی را برای منطقه بازسازی کنیم. گودموندسون و همکاران [۲۳] برای اولین بار پیشنهاد ترکیب داده‌های تداخل‌سنجی راداری و GPS را برای تخمین مؤلفه‌های میدان سه‌بعدی جزیره ریکژنزا^۱ در ایسلند را مطرح کردند. در آن مطالعه، مشاهدات پراکنده GPS بر روی یه‌گرید منظم اندازه-گیری‌های حاصل از تداخل‌سنجی راداری درونیایی شده و روش بهینه‌سازی رگرسیون تصادفی مارکوف^۲ و الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده^۳ برای یافتن یک راه حل بهینه جهت بازبایی مؤلفه‌های میدان سه‌بعدی به کار گرفته شد، که این روش‌ها علاوه بر زمان بودن، دارای محاسبات پیچیده و زیادی نیز هستند. در سال‌های اخیر روش‌های مختلفی برای تلفیق این نوع داده‌ها و رفع عیب روش قبلی منتشر شده است، مانند استفاده از روش تئوری آماری باینسین [۲۴، ۴۶]، روش‌های بهینه‌سازی بر اساس تئوری درونیایی و روش SISTEM که هر یک از این روش‌ها دارای نقاط قوت و ضعفی نسبت به همدیگر می‌باشند. در ادامه خلاصه‌ای از روش SISTEM را تشریح می‌کنیم.

۲-۴-۱- روش SISTEM

این روش برای تلفیق اندازه‌گیری‌های ژئودتیک و نقشه‌های سرعت جابه‌جایی سطح زمین حاصل روش‌های

دقت این روش هنوز در حدود چند سانتی‌متر می‌باشد که در مقایسه با روش تداخل‌سنجی معمول قابل‌اغماض است. میزان عدم قطعیت در اندازه‌گیری جابه‌جایی در این روش به‌صورت زیر محاسبه می‌شود [۴۳].

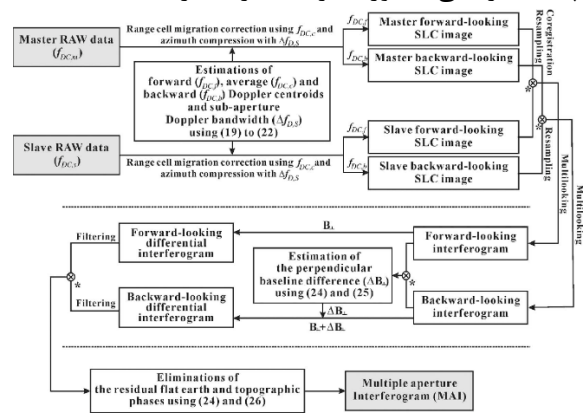
$$\sigma_x = \frac{1}{4\pi \cdot \mathbf{n}} \sigma_{\phi, MAI} \quad (9)$$

در این فرمول σ_x و $\sigma_{\phi, MAI}$ به ترتیب انحراف از معیارهای جابه‌جایی محاسبه‌شده و فاز تداخل‌نگار اندازه-گیری MAI را نشان می‌دهد که طبق فرمول زیر قابل‌محاسبه است [۱۳].

$$\sigma_{\phi, MAI} = \sqrt{\sigma_{\phi, f}^2 + \sigma_{\phi, b}^2 - 2\sigma_{\phi, fb}^2} \quad (10)$$

که $\sigma_{\phi, f}$ ، $\sigma_{\phi, b}$ و $\sigma_{\phi, fb}^2$ به ترتیب واریانس فاز تداخل-نگارهای دید جلو و عقب و کواریانس بین آن‌ها می‌باشند (برای کسب اطلاعات بیشتر در مورد نحوی محاسبه این واریانس‌ها به مرجع [۱۳، ۴۵] مراجعه کنید).

در الگوریتم زیر مراحل پیاده‌سازی روش تداخل‌سنجی چند دیافراگمی به‌صورت مرحله‌به‌مرحله ارائه شده است.



شکل ۵- الگوریتم روش تداخل‌سنجی چند دیافراگمی (MAI) [۱۳].

با توجه به مطالب ارائه‌شده درباره هر دو روش **Azimuth Offset** و **MAI** که برای محاسبه جابه‌جایی در راستای آزیموتی به کار گرفته می‌شوند، می‌توان گفت علی‌رغم دقت کم این روش‌ها (در مقایسه با روش تداخل‌سنجی معمول) باین‌حال برای مناطقی که جابه‌جایی زیادی در آن‌ها اتفاق افتاده است (در حدود متر) می‌توانند استفاده شوند.

^۱ Reykjanes Peninsula

^۲ Markov random field-based

^۳ Simulated annealing algorithm

بردار مشاهدات و مجهولات نیز به شکل زیر قابل ارائه هستند.

(۱۲)

$$\mathbf{x} = [\mathbf{U}_u \quad \mathbf{U}_e \quad \mathbf{U}_n \quad \varepsilon_{xx} \quad \varepsilon_{xy} \quad \varepsilon_{xz} \quad \varepsilon_{yx} \quad \varepsilon_{yz} \quad \varepsilon_{zx} \quad w_1 \quad w_2 \quad w_3]^T$$

$$\mathbf{l} = [\mathbf{u}_1 \quad \mathbf{u}_2 \quad \mathbf{u}_3 \quad \dots \quad \mathbf{u}_{(N)} \quad \mathbf{u}_1 \quad \dots \quad \mathbf{u}_{(M)} \quad \mathbf{D}_{LOS}^1 \quad \mathbf{D}_{LOS}^2 \quad \dots \quad \mathbf{D}_{LOS}^P]^T$$

یکی از شرط‌های مهم در سرشکنی کمترین مربعات دستگاه معادله بالا این است که قبل از سرشکنی باید مشاهدات اشتباه و خطاهای سیستماتیک کشف و حذف شوند و وزن مشاهدات مختلف در نظر گرفته شود در غیر این صورت نتایج حاصل از بازیابی میدان سه‌بعدی را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهند علاوه بر این موارد اثر میدان استرین ناهمگن نیز باید از حذف شود چراکه همان‌گونه که پیش‌تر گفته شد، روش SISTEM بر پایه تغییرشکل بی‌نهایت کوچک و میدان استرین همگن می‌باشد. نکته مهم دیگر که باید در مورد این روش مدنظر قرار گرفته شود ناپایدار بودن ماتریس ضرایب این روش است که برای حل آن نیاز به روش‌های پایدارسازی داریم. در سال‌های اخیر نسخه‌های توسعه‌یافته این روش توسط محققین ارائه شده است (برای مطالعه بیشتر رجوع شود به [۲۶، ۲۷، ۴۷]).

۲-۵- در نظر گرفتن مدل‌های فرضی برای تغییرشکل یا ترکیب مدل‌های ژئوفیزیکی با

داده‌های InSAR

علاوه بر داده‌های ژئودتیکی (GPS, LEVELING) با استفاده از داده‌ها و مدل‌های ژئوفیزیکی در تلفیق با داده‌های تداخل‌سنجی راداری نیز می‌توان میدان جابه‌جایی سه‌بعدی را بازسازی نمود از جمله داده‌های ژئوفیزیکی می‌توان به جابه‌جایی‌های محاسبه‌شده از تغییرات گرانی منطقه اشاره نمود، همچنین استفاده از مدل‌ها و فرض‌های ژئوفیزیکی نیز روشی دیگر برای این کار است. از جمله این روش‌ها می‌توان به روش ارائه‌شده در [۳۳] اشاره نمود که در ادامه به بررسی این روش می‌پردازیم.

در این روش از یک فرض ژئوفیزیکی بر مبنای رابطه بین جابه‌جایی افقی و جابه‌جایی قائم در بازسازی میدان جابه‌جایی سه‌بعدی در مناطق دارای فرونشست استفاده شده است [۴۸]. بر مبنای این فرض یک پارامتر تیلت (Tilt)

ماهورهای برای تولید بهینه نقشه‌های سه‌بعدی سطح زمین استفاده می‌شود. روش SISTEM مخفف برآورد تنسور استرین و میدان سرعت جابه‌جایی^۱ به‌طور هم‌زمان با تلفیقی از اندازه‌گیری‌های ژئودتیکی و ماهواره‌ای است، که برای اولین بار توسط گوگلیلمینو و همکاران [۲۵] پیشنهاد شد. این روش با اعمال روش کمترین مربعات وزن‌دار روی یک سیستم معادلات بر پایه تئوری استرین بی‌نهایت کوچک انجام می‌شود، در ضمن بر این موضوع تأکید می‌شود که روش SISTEM یک روش نقطه‌وار است، به این معنی که این روش در نقطه نامعلوم P مسئله کمترین مربعات وزن‌دار را با به کار بردن نقاط GPS اطراف نقطه P و فقط داده‌های InSAR منطبق بر نقطه P حل می‌کند و در نهایت روش نقطه‌وار به این موضوع اشاره دارد که برای مناطقی که داده‌های راداری اندازه‌گیری نمی‌شود روش SISTEM قابلیت برآورد میدان جابه‌جایی تلفیق‌شده را ندارد. مدل ریاضی روش SISTEM قابلیت تلفیق داده‌های از منابع غیر از GPS و InSAR را دارا می‌باشد، بنابراین داده‌های ترازیبی نیز با مدل ریاضی مرتبط به خود وارد مدل ریاضی SISTEM شده و به ما کمک می‌کند تا میدان سرعت جابه‌جایی دقیق‌تری برای مؤلفه ارتفاعی بتوانیم برآورد کنیم.

پس از توسعه مدل ریاضی SISTEM به‌منظور استفاده از داده‌های ترازیبی و تصاویر راداری از گروه‌های مختلف، ماتریس ضرایب به شکل زیر تعریف می‌شود [۲۷].

(۱۱)

$$\mathbf{A}_{(3N+M+K) \times 12} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \Delta x_{(1)} & \Delta x_{(2)} & \Delta x_{(3)} & 0 & 0 & 0 & 0 & \Delta x_{(3)} & -\Delta x_{(1)} \\ 0 & 1 & 0 & 0 & \Delta x_{(1)} & 0 & \Delta x_{(2)} & \Delta x_{(3)} & 0 & -\Delta x_{(1)} & 0 & \Delta x_{(1)} \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \Delta x_{(1)} & 0 & \Delta x_{(2)} & \Delta x_{(3)} & \Delta x_{(2)} & -\Delta x_{(1)} & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & 0 & 0 & \Delta x_{(N)} & \Delta x_{(2N)} & \Delta x_{(3N)} & 0 & 0 & 0 & 0 & \Delta x_{(3N)} & -\Delta x_{(2N)} \\ 0 & 1 & 0 & 0 & \Delta x_{(N)} & 0 & \Delta x_{(2N)} & \Delta x_{(3N)} & 0 & -\Delta x_{(N)} & 0 & \Delta x_{(N)} \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \Delta x_{(N)} & 0 & \Delta x_{(2N)} & \Delta x_{(3N)} & \Delta x_{(2N)} & -\Delta x_{(N)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \Delta x_{(1)} & 0 & \Delta x_{(2)} & \Delta x_{(3)} & \Delta x_{(2)} & -\Delta x_{(1)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \Delta x_{(M)} & 0 & \Delta x_{(2M)} & \Delta x_{(3M)} & \Delta x_{(2M)} & -\Delta x_{(M)} & 0 \\ S_x^{(1)P} & S_x^{(2)P} & S_x^{(3)P} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ S_x^{(3)P} & S_y^{(3)P} & S_z^{(3)P} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

ماتریس فوق، یک ماتریس $(3N + M + K) \times 12$ می‌باشد که N تعداد نقاط GPS به‌کاربرده شده و M تعداد نقاط ترازیبی و در نهایت K تعداد تصاویر راداری می‌باشند

^۱Simultaneous and Integrated Strain Tensor Estimation from geodetic and satellite Measurements (SISTEM)

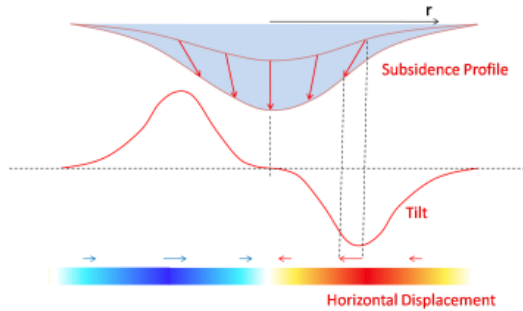
در این روابط g_x, g_y هسته گرادیانت^۲ و علامت * اپراتور کانولوشن^۳ می‌باشد.

مرحله ۴- محاسبه میدان جابه‌جایی افقی در جهت x و y با استفاده از فرمول زیر:

$$S_x = K \times S'_x, \quad S_y = K \times S'_y \quad (16)$$

مرحله ۵- درون‌یابی S_x و S_y در هر نقطه برای محاسبه جابه‌جایی‌های افقی d_n, d_e .

مرحله ۶- تکرار مراحل ۲ تا ۵ تا زمانی که d_u همگرا شود.



شکل ۶- فرونشست، جابه‌جایی افقی و تیلت [۳۳].

بنابراین با اجرای این مراحل برای یک منطقه دارای رفتار فرونشست، می‌توانیم میدان جابه‌جایی سه‌بعدی را با دقت خوبی بازسازی کنیم.

۲-۶- همپوشانی بین برستاها (Burst) در داده‌های ماهواره سنتینل (Sentinel)

پیشرفت‌های اخیر در تکنیک‌ها و پردازش راداری باعث به وجود آمدن نسل جدیدی از سنسورها شده که توانایی برداشت تصویر از قسمت وسیعی از سطح زمین را دارند این مُد تصویربرداری **wide-swath** نامیده می‌شود. این نوع تصویربرداری باعث برداشت قسمت وسیعی از سطح می‌شود و از مزیت‌های آن دوره تکرار برداشت سریع‌تر نسبت به مُدهای برداشت کلاسیک مانند مُد نواری (Strip-Map) است. در حال حاضر دو سنجنده راداری Sentinel و ALOS-2 با این نوع مُد تصویربرداری می‌کنند. باین‌حال این افزایش وسعت برداشت باعث

به‌عنوان مشتق مکانی اول پروفیل فرونشست منطقه به‌صورت معادله زیر تعیین می‌شود [۳۳].

$$\zeta = \mathbf{d}'_r = \frac{\partial}{\partial r}(\mathbf{d}_z) \quad (13)$$

بر اساس شباهت بین منحنی جابه‌جایی افقی و پارامتر تیلت کراتشچ^۱ (۱۹۸۳) یک فرض را ارائه کرد بدین‌صورت که جابه‌جایی افقی متناسب با پارامتر تیلت می‌باشد و رابطه آن را به‌صورت زیر ارائه نمود [۳۳].

$$\mathbf{d}_h = \mathbf{K} * \mathbf{d}'_r = \mathbf{K} * \frac{\partial}{\partial r}(\mathbf{d}_z) \quad \mathbf{K} = 0.33 * \mathbf{R} \quad (14)$$

در این رابطه K ضریب تناسب بین جابه‌جایی افقی و پارامتر تیلت می‌باشد که به ویژگی‌های ژئوفیزیکی و زمین‌شناسی مواد سطح زمین بستگی دارد و R شعاع منطقه فرونشست می‌باشد. از آنجایی که پارامتر تیلت را به‌عنوان اولین مشتق مکانی پروفیل فرونشست معرفی کردیم، برای محاسبه آن ابتدا لازم است تا یک سطح با استفاده از داده‌های گسترده جابه‌جایی راداری برای منطقه محاسبه کنیم (روش آنالیز سری زمانی PS این داده‌ها را برای ما فراهم می‌نماید) سپس برای این که سطح ما به‌صورت پیوسته و بر روی یک گرید منظم قرار بگیرد یک درون‌یابی (معمولاً کریجینک) بر روی داده‌ها صورت می‌گیرد. در ادامه برای بازسازی جابه‌جایی سه‌بعدی مراحل زیر انجام می‌شود [۳۳].

مرحله ۱- فرض می‌شود که جابه‌جایی افقی در هر دو راستا برابر صفر است ($d_n, d_e = 0$).

مرحله ۲- جابه‌جایی در راستای خط دید ماهواره (LOS) را با فرض ارائه‌شده در مرحله اول محاسبه می‌کنیم.

مرحله ۳- محاسبه میدان جابه‌جایی و مشتق‌های اول آن در جهت‌های x و y (S'_x, S'_y) با استفاده از فرمول زیر بر روی یک گرید منظم از داده‌ها.

$$(15)$$

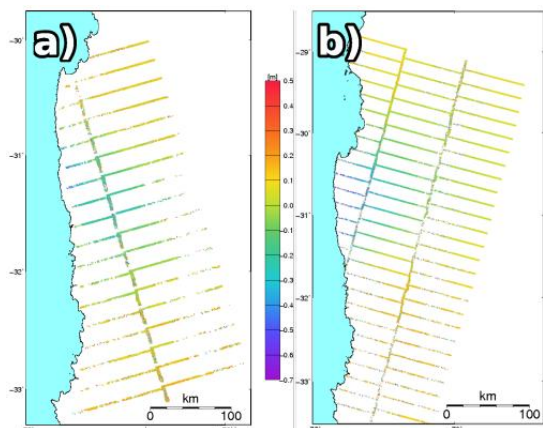
$$S'_x(x,y) = \frac{d}{dx} S(x,y) = g_x * S(x,y) \quad g_x = \frac{1}{8 \times \text{gridsize}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

$$S'_y(x,y) = \frac{d}{dy} S(x,y) = g_y * S(x,y) \quad g_y = \frac{1}{8 \times \text{gridsize}} \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix}$$

^۲ Gradient kernels
^۳ Convolution operator

^۱ Kratzsch

در این معادله Δx_{az} جابه‌جایی در راستای آزیموتی برحسب سانتی‌متر و $\Delta \psi_{ovl}$ اختلاف بین زاویه‌های دید جلو و عقب (حدوداً ۱ درجه) و $\Delta \phi_{ovl}$ اختلاف فاز بین دید جلو و عقب در دو اپک تصویربرداری می‌باشد. لازم به ذکر است که هر فرینج کامل اختلاف فاز $\Delta \phi_{ovl}$ تقریباً برابر ۱۳۰ سانتی‌متر جابه‌جایی در راستای آزیموتی می‌باشد.



شکل ۸- جابه‌جایی حاصل از همپوشانی بین برست‌ها تصاویر راداری سنتینل پایین‌گذر و بلاگذر [۵۰].

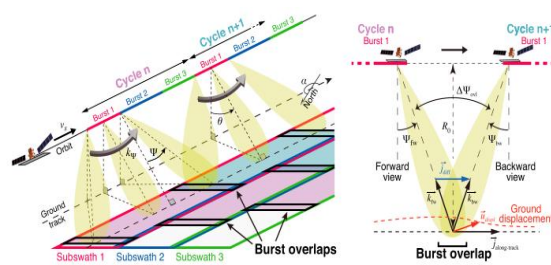
۳- دقت مؤلفه‌های اصلی بازبایی شده میدان

جابه‌جایی سه‌بعدی

همان‌طور که پیش‌تر در مورد آن بحث کردیم محققان زیادی با تکیه بر این موضوع که میزان حساسیت جابه‌جایی به راستای شمالی-جنوبی کم هست به دنبال روش‌های برای اندازه‌گیری جابه‌جایی در راستای آزیموتی بوده تا این حساسیت کم را جبران کنند. در کار پژوهشی که توسط گو^۲ و همکاران (۲۰۱۷) ارائه شد میزان حساسیت هر سه مؤلفه شمالی-جنوبی، شرقی-غربی و بالا-پایین برای مدارهای بالاگذر و پایین‌گذر مانند شکل ۹ ارائه شد [۱۸]. همان‌طور که در این شکل ملاحظه می‌کنیم بیشترین حساسیت مربوط به جابه‌جایی بالا-پایین (منحنی آبی‌رنگ) است که البته با افزایش زاویه دید میزان این حساسیت در هر دو مسیر به تدریج کاهش می‌یابد. حساسیت مؤلفه شرقی-غربی از ۲۰ درصد شروع شده و تا ۹۰ درصد با تغییر زاویه دید ماهواره، تغییر می‌کند البته با رفتاری معکوس برای مسیرهای بالاگذر و پایین‌گذر (منحنی نیلی‌رنگ) با این وجود میزان حساسیت

کاهش قدرت تفکیک در راستای آزیموتی شده و به مراتب تشخیص جابه‌جایی‌ها در جهت آزیموتی در روش‌های **Along-Track** را با مشکل روبرو می‌کند.

در تصویربرداری **Wide-Swath** که در تصاویر راداری سنتینل انجام می‌شود هر تصویر در راستای رنج به سه قسمت تقسیم می‌شود که هر قسمت را یک **Sub-swaths** نامیده می‌شود و هر یک از این **Sub-swaths** خود به شش قسمت مساوی با نام برست **Burst** تقسیم می‌شوند [۴۹]. به منظور اجتناب از وجود گپ بین برست‌ها در هنگام تصویربرداری یک محدوده کوچک از برست‌ها دارای همپوشانی خواهند بود بنابراین پیکسل‌های داخل این محدوده با دو زاویه دید جلو و عقب مختلف برداشت می‌شوند اختلاف بین این زاویه دید که با عنوان **Squint angle** نیز شناخته می‌شود چیزی حدود ۱ درجه برای ماهواره سنتینل می‌باشد (متناظر با ۱۰ درصد از طول یک برست در راستای آزیموتی) این قسمت مشترک در برست‌ها را **Burst Overlay** نام‌گذاری می‌کنند (شکل ۶) [۳۵].



شکل ۷- هندسه تصویربرداری در سنجنده سنتینل (سمت چپ)،

مفهوم همپوشانی بین برست‌ها و زاویه **Squint** [۳۵].

با استفاده از همین مفهوم همپوشانی بین برست‌ها، اولین بار گراندین^۱ و همکاران در سال ۲۰۱۵ موفق به استخراج میدان جابه‌جایی در راستای آزیموتی با دقتی بهتر از روش‌های **MAI** و **Azimuth offset** شدند [۳۵]. برای این منظور با تقسیم کردن قسمت مشترک برست‌ها به دو دید عقب و جلو و با توجه به جدایی حدوداً ۱ درجه‌ای بین این دو زاویه دید، جابه‌جایی آزیموتی در قسمت فصل مشترک دو برست را به صورت زیر فرموله کردند.

$$\Delta \phi_{ovl} = (\Delta \phi_{fw} - \Delta \phi_{bw}) = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta x_{az} \times \Delta \psi_{ovl} \quad (17)$$

^۲ QU Chunyan

^۱Grandin

بعدی استخراج شده از روش تداخل سنجی راداری مورد بررسی قرار می گیرد.

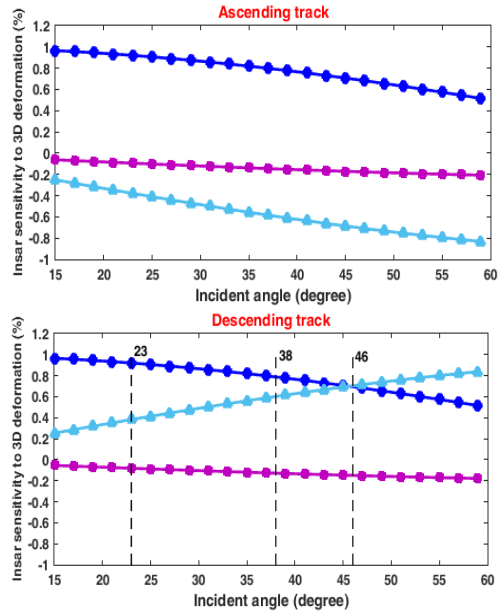
تحلیل مؤلفه های اصلی یا (**Principal Component Analysis-PCA**) یک تکنیک آمار ریاضی است که کاربرد فراوانی دارد از جمله کاهش ابعاد یا حجم داده ها از طریق بررسی ساختار ماتریس واریانس کواریانس داده ها، برای این کار ترکیب های خطی خاصی از متغیرهای تصادفی مورد نظر تشکیل می شود و آنالیزهای آماری بر مبنای این ترکیب ها صورت می گیرد، این ترکیب ها مؤلفه های اصلی یا **Principal Component** ها نامیده می شوند [۵۳].

قضیه: اگر Σ ماتریس واریانس-کواریانس متغیر تصادفی ویژه این ماتریس باشند آنگاه $\text{trace}(\Sigma) = \sum_{i=1}^p \text{var}(y_i)$ بطوریکه $y_i = e_i^T x$ باشد؛ بنابراین بر اساس این قضیه سهم مؤلفه های اصلی i ام در کل تغییرات داده ها ($\text{trace}(\Sigma)$) برابر است با معادله [۵۳، ۵۴]:

$$\frac{\lambda_i}{\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_p} \quad (18)$$

بنابراین اولین مؤلفه اصلی از بیشترین سهم در تغییرات داده ها برخوردار است. ضمناً سهم مؤلفه های اصلی بعدی به تدریج کاهش می یابد؛ بنابراین از این روش می توان برای تشخیص تقریبی مناسب از یک ماتریس استفاده کرد. با محاسبه مؤلفه های اصلی ماتریس نرمال عملاً می توان گفت که مجهولات مدل ریاضی گروه های مستقلی را تشکیل می دهند بطوریکه هر گروه متناظر با یکی از مؤلفه های اصلی است. می دانیم مؤلفه های اصلی که متناظر با مقادیر ویژه نزدیک به صفرند از سهم کمتری در تغییرات کل داده ها برخوردارند، از طرف دیگر مقادیر ویژه نزدیک به صفر به عدد شرط بزرگی برای ماتریس نرمال در یک دستگاه معادلات نرمال منتهی می شوند. از آنجاکه 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 حساس اند.

در راستای شمال-جنوبی تقریباً برای هر دو مسیر و زوایای دید مختلف ثابت بوده و به ندرت تا ۱۰ درصد تغییر می کند، این میزان حساسیت برای هر دو مسیر بالاگذر و پایین گذر رفتاری تقریباً یکسان دارد و از ۶ تا ۲۰ درصد برای زوایای دید مختلف (۱۵ تا ۵۵ درجه) تغییر می کند.



شکل ۹- محاسبه میزان حساسیت جابه جایی **LOS** به زوایای دید مختلف برای مدارهای یا مسیرهای پایین گذر (سمت راست) و بالاگذر (سمت چپ) برای محاسبه این حساسیت ها آزمون ماهواره در مسیر بالاگذر ۳۴۶ درجه و در مسیر پایین گذر ۱۹۰ درجه فرض شده است. خط چین های قائم نشان دهنده زوایای دید ماهواره های **Envisat** (۲۳ درجه)، **ALOS** (۳۸ درجه) و **Sentinel** (۴۶ درجه) می باشند. در زاویه دید ۴۶ درجه میزان حساسیت برای مسیر پایین گذر در راستای شمال-جنوبی و بالا-پایین برابر و تقریباً برابر ۰.۷ معادل ۷۰ درصد می باشد [۱۸].

به طور کلی و با توجه به مطالعه پیشین آزمون ماهواره های راداری در دو جهت بالاگذر و پایین گذر تقریباً ثابت بوده و به ترتیب چیزی حدود ۳۴۶ و ۱۹۰ درجه می باشد باین حال ماهواره های راداری دارای زاویه دیدهای مختلفی می باشند و این زاویه دید از ۱۵ تا ۶۰ درجه می تواند تغییر کند با این فرضیات دوباره به مسئله حساسیت مؤلفه های اورتوگونال جابه جایی بازمی گردیم و با ابزارهای دقیق تر به بررسی این موضوع می پردازیم. یکی از ابزارهایی که در مورد موضوع آنالیز حساسیت پارامترهای مدل زیاد مورد توجه محققین، مخصوصاً پژوهشگران علوم ژئوماتیک است روش آنالیز مؤلفه های اصلی یا (**PCA**) می باشد [۵۱، ۵۲] که در ادامه درباره آن بحث کرده و چگونگی استفاده آن برای بررسی آنالیز حساسیت میدان های جابه جایی سه-

۳-۱- آنالیز حساسیت میدان جابه‌جایی LOS به

مؤلفه‌های اورتوگونال با روش PCA

همان‌طور که در بخش ۳ عنوان شد، با استفاده از آنالیز مؤلفه‌های اصلی می‌توان حساسیت پارامترهای یک مدل ریاضی و سهم هر کدام از پارامترها در تغییرات کل داده‌ها بررسی نمود. با این حساب اگر به معادله ۱ برگردیم و با استفاده از روش استفاده از مشاهدات در راستای خط دید ماهواره (LOS) حداقل در سه هندسه مستقل سعی در بازیابی میدان جابه‌جایی سه‌بعدی کنیم می‌توان مفهوم آنالیز حساسیت را با استفاده از تکنیک PCA بر روی ماتریس ضرایب مدل برای زاویه دیدهای مختلف (آزیموت ثابت) پیاده‌سازی کنیم.

فرض کنید از یک منطقه خاص سه هندسه راداری مستقل داریم (دو مدار بالاگذر و پایین گذر برای ماهواره ۱ و یک مدار پایین گذر برای ماهواره دوم)، با این فرض می‌توانیم دستگاه معادله زیر را برای بازیابی میدان سه-بعدی تشکیل دهیم.

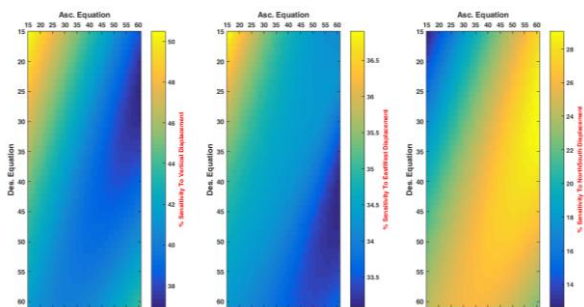
(۱۹)

$$\begin{bmatrix} \cos(\theta_i^{\text{Sat1}}) & -\cos(\alpha_{\text{Asc}}^{\text{Sat1}})\sin(\theta_i^{\text{Sat1}}) & \sin(\alpha_{\text{Asc}}^{\text{Sat1}})\sin(\theta_i^{\text{Sat1}}) \\ \cos(\theta_i^{\text{Sat1}}) & -\cos(\alpha_{\text{Des}}^{\text{Sat1}})\sin(\theta_i^{\text{Sat1}}) & \sin(\alpha_{\text{Des}}^{\text{Sat1}})\sin(\theta_i^{\text{Sat1}}) \\ \cos(\theta_j^{\text{Sat2}}) & -\cos(\alpha_{\text{Des}}^{\text{Sat2}})\sin(\theta_j^{\text{Sat2}}) & \sin(\alpha_{\text{Des}}^{\text{Sat2}})\sin(\theta_j^{\text{Sat2}}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D_{\text{Asc}}^{\text{LOS-Sat1}} \\ D_{\text{Des}}^{\text{LOS-Sat1}} \\ D_{\text{Des}}^{\text{LOS-Sat2}} \end{bmatrix}$$

that $\theta_i^{\text{Sat1}}, \theta_j^{\text{Sat1}} = (15^\circ, \dots, 60^\circ)$

حال با اعمال تکنیک PCA روی ماتریس ضرایب معادله ۱۹ می‌توانیم برای زوایای دید مختلف (متناظر با دو ترکیب ماهواره مختلف انتخابی) درصد حساسیت بازیابی پارامترهای مجهول را برآورد کنیم (شکل ۱۰). علاوه بر این می‌توانیم به ازای زوایای دید مختلف عدد شرط ماتریس ضرایب مدل را نیز در هر مرحله محاسبه کنیم با این کار می‌توانیم درباره پایداری یا ناپایداری مسئله بازیابی میدان سه‌بعدی با روش استفاده از مشاهدات در راستای خط دید ماهواره حداقل در سه هندسه مستقل نیز اظهار نظر کنیم.

طبق تعریف در صورتی که عدد شرط ماتریس ضرایب یک دستگاه معادلات هم‌زمان مقدار بزرگی شود انتظار می‌رود که در صورت وجود یا اعمال تغییر کوچکی به بردار مقادیر معلوم (مشاهدات)، تغییر فاحشی در بردار مجهولات ایجاد گردد یا به عبارتی در صورت بزرگ شدن عدد شرط ماتریس ضرایب یک دستگاه معادلات هم‌زمان احتمال ناپایداری مسئله وجود دارد.

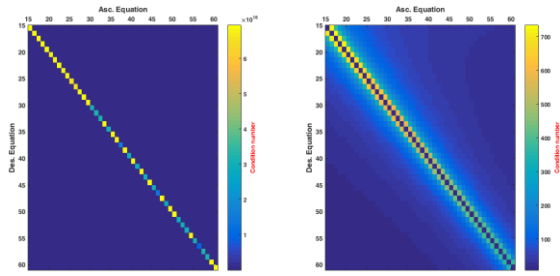


شکل ۱۰- محاسبه درصد حساسیت هر یک از مؤلفه‌های اورتوگونال جابه‌جایی به زوایای دید مختلف و با ثابت گرفتن آزیموت مدار ماهواره‌ها (برای مدار صعودی ۳۵۰ درجه و مدار نزولی ۱۹۰ درجه).

همان‌طور که در شکل ۱۰ ملاحظه می‌کنیم، چند تفسیر بسیار مهم را می‌توان نتیجه گرفت. اول این که به ترتیب مؤلفه بالا-پایین جابه‌جایی بیشترین حساسیت را به جابه‌جایی در راستای خط دید ماهواره دارد و بیشترین سهم را از این جابه‌جایی دریافت می‌کند (۵۰ درصد برای زاویه دید ۱۵ تا ۲۰ درجه در هر دو مدار) سپس مؤلفه شرقی-غربی با بیشترین حساسیت ۳۷ درصد (برای زاویه دید ۱۵ تا ۲۰ درجه در هر دو مدار) و در نهایت مؤلفه شمالی-جنوبی با بیشترین حساسیت ۲۸ درصد را می‌توان مشاهده نمود. دوم اینکه میزان حساسیت به ازای زوایای دید مختلف به صورت پیوسته در هر سه مؤلفه جابه‌جایی در حال تغییر است، مخصوصاً برای مؤلفه شمال-جنوبی این مقدار از ۱۰ تا ۳۰ درصد تغییر می‌کند. سومین نتیجه مهمی که می‌توان از این آنالیز فهمید، این است که می‌توانیم برای مناطقی که جابه‌جایی غالب آن در جهت خاصی مشخص است می‌توان از تصاویر راداری با زوایای دید خاصی که در آن جهت خاص بیشترین حساسیت را دارند استفاده نمود. چهارمین نکته‌ای که درباره شکل ۱۰ وجود دارد به این صورت است که با احترام به تحقیقات پیشین که حساسیت و سهم مؤلفه شمالی-جنوبی را همیشه کمتر از سایر مؤلفه‌ها در نظر گرفته‌اند، می‌توان گفت این حساسیت در برخی از زوایای دید خاص معادل حساسیت مؤلفه شرقی-غربی می‌شود (به‌عنوان مثال زاویه دید ۶۰ درجه در مدار بالاگذر و ۴۰ درجه در مدار پایین گذر).

همان‌طور که در شکل ۱۱ سمت راست مشاهده می‌کنید بیشترین مقدار عدد شرط چیزی حدود ۷۰۰ می‌باشد که این مقدار متناظر با زوایای دید مخالف اما بسیار نزدیک به هم دو هندسه راداری مختلف است (نزدیک به قطر اصلی متمرکزند) و هرچقدر از قطر اصلی دور می‌شویم میزان عدد شرط ماتریس ضرایب کاهش پیدا می‌کند که این امر متناظر 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 ۷۰۰ به ۱۰۰ کاهش پیدا می‌کند. پیام دومی که این شکل می‌تواند داشته باشد تأکید بر این موضوع است که دستگاه معادلات ۱۹ در اغلب اوقات یک دستگاه معادلات پایدار بوده و نیازی به حل آن با روش‌های پایدارسازی نیست.

پرداختن به مسائل آنالیز حساسیت بازبایی مؤلفه‌های اورتوگونال میدان جابه‌جایی و بررسی عدد شرط ماتریس ضرایب دستگاه معادلات هم‌زمان آن این مفهوم را در ذهن تداعی می‌کند که بازبایی میدان سه‌بعدی جابه‌جایی با روش استفاده از سه هندسه مستقل، در اکثر مواقع یک مسئله خوش وضع است و در بیشتر مواقع این بازبایی امکان‌پذیر است 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 همان‌طور که در بخش ۲-۶ به آن پرداختیم پیشرفت‌های اخیر در تکنیک‌ها و پردازش راداری باعث به وجود آمدن نسل جدیدی از سنسورها شده که توانایی برداشت تصویر از قسمت وسیعی از سطح زمین را دارند این نوع تصویربرداری که نمونه آن را در ماهواره سنتینل می‌توان مشاهده نمود، باعث می‌شود که سنجنده راداری یک منطقه برداشت در جهت رنج خود را با زاویه‌های دید مختلف نگاه کند. به‌عنوان مثال در تصاویر راداری سنجنده سنتینل هر برست (Burst) با زاویه دید خاصی مشاهده می‌شود (شکل ۱۲).



شکل ۱۱- محاسبه عدد شرط ماتریس ضرایب دستگاه معادلات هم‌زمان ۱۹ به ازای زوایای دید مختلف. شکل سمت راست با حذف عناصر عدد شرط روی قطر اصلی تصویر رسم شده است.

در شکل ۱۱ عدد شرط ماتریس ضرایب به ازای زوایای مختلف محاسبه شده است. همان‌طور که در شکل سمت چپ مشاهده می‌شود عدد شرط فقط برای عناصر روی قطر اصلی معادل با زوایای دید برابر برای دو هندسه مختلف راداری مقدار بزرگی می‌باشد، باین‌وجود در این شکل به علت مقادیر بزرگ اعداد شرط روی قطر اصلی سایر عناصر خارج قطر اصلی به علت این‌که مقدار بسیار کوچکی با آن‌ها دارند به یکرنگ نمایش داده شده‌اند بنابراین این شکل درک درسی از مقادیر اعداد شرط خارج قطر اصلی نمی‌تواند ارائه کند لذا در شکل سمت راست با حذف عناصر روی قطر اصلی شکل را با اعداد باقی‌مانده دوباره ترسیم و مقیاس‌گذاری می‌کنیم.

عدد شرط در واقع نشان دهنده صحت نتایج در حل یک دستگاه معادله خطی هم‌زمان است، طبق تعریف یک سیستم معادله هم‌زمان، به عنوان یک سیستم معادله خوش وضع^۱ تلقی می‌شود اگر عدد شرط آن نزدیک به ۱ باشد $\text{cond}(\mathbf{A}) \approx 1$ در غیر این‌صورت هرچقدر که این عدد شرط از یک فاصله می‌گیرد $\text{cond}(\mathbf{A}) \gg 1$ احتمال بد وضع^۲ بودن این سیستم معادله افزایش می‌یابد. در واقع عدد شرط یک دستگاه معادله هم‌زمان به صورت؛ نسبت بزرگترین به کوچکترین مقدار ویژه^۳ ماتریس ضرایب یک دستگاه معادله هم‌زمان تلقی می‌شود [۵۵].

$$\text{cond}(\mathbf{A}) = \frac{\max(\text{svd}(\mathbf{A}))}{\min(\text{svd}(\mathbf{A}))} \quad (20)$$

^۱ Well-conditioned

^۲ ill-conditioned

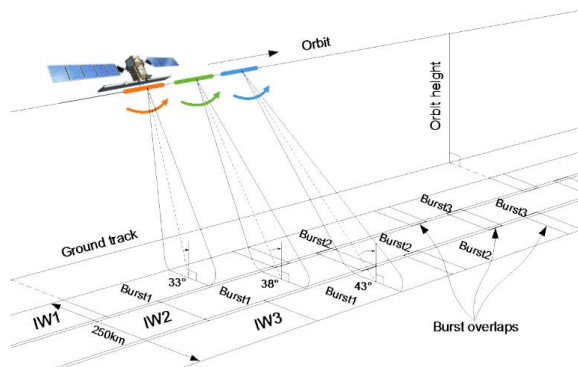
^۳ Singular value decomposition (svd)

بررسی مدارهای تصویربرداری در این ماهواره نشان می‌دهد که بین مدارها یک ناحیه همپوشانی وجود دارد که در عرض‌های بالایی این میزان همپوشانی افزایش می‌یابد؛ بنابراین برای بیشتر مناطق این همپوشانی بین مدارها وجود خواهد داشت در واقع منظور از همپوشانی یعنی ناحیه مشترکی که توسط مدارهای بالاگذر کناری پوشش داده می‌شوند و همچنین قسمت مشترکی که توسط مدارهای پایین گذر پوشش داده می‌شود.

با این تفاسیر برای اکثر مناطق می‌توان داده‌های دو مدار بالاگذر کناری و یک مدار پایین‌گذر یا دو مدار پایین‌گذر کناری و یک مدار بالاگذر را داشته باشیم و با توجه به زاویه دید مختلف (تقریباً ۱۰ درجه اختلاف) در ناحیه مشترک مدارهای مجاور یکسان، همواره می‌توان فقط با استفاده از تصاویر راداری ماهواره سنتینل سه هندسه مستقل را داشته باشیم که این خود می‌تواند در بازسازی میدان سه‌بعدی جابه‌جایی به ما کمک کند، این مطلب می‌تواند دو دستاورد اصلی را برای ما به دنبال داشته باشد. اول این‌که مشکل اصلی در پیدا کردن دو هندسه راداری مستقل برای بازسازی میدان سه‌بعدی که در اکثر مناطق وجود داشت را با این روش مرتفع می‌کنیم دوم این‌که اختلاف زمانی برداشت دو مدار مجاور در حدود چند روز است (۱ تا ۳ روز) بنابراین سه هندسه مستقلی که در این روش پیدا کرده‌ایم 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 داشت بین این هندسه‌ها اختلاف زمانی زیادی در برداشت وجود داشت که خود باعث برآورد میدان جابه‌جایی ناصحیحی برای یک‌زمان خاص بود.

۴- بازسازی میدان جابه‌جایی سه‌بعدی با روش همپوشانی بین مدارها (Orbit-Overlap)

همان‌طور که در بخش ۳ ذکر شد، مناطق مختلف جهان با توجه به پوشش سراسری ماهواره سنتینل همواره توسط دو مدار بالاگذر و یک مدار پایین‌گذر و یا بالعکس پوشش داده می‌شوند که با استفاده از این موضوع و دستگاه معادلات ۱۹ می‌توان میدان سه‌بعدی جابه‌جایی آن منطقه را بازسازی نمود. برای پیاده‌سازی این موضوع



شکل ۱۲- هندسه تصویربرداری در ماهواره سنتینل (Sentinel)

با موازی‌سازی دو موضوع قبل این امکان وجود دارد که بتوان از تصاویر فقط یک سنجنده سنتینل میدان سه‌بعدی را با دقت خوبی بازسازی نمود، درک این موضوع نیازمند دانش بیشتر در مورد چگونگی تصویربرداری در این ماهواره و اطلاعات درباره مسیرها یا مدارهای حرکت این ماهواره می‌باشد که در بخش بعدی به آن پرداخته شده است.

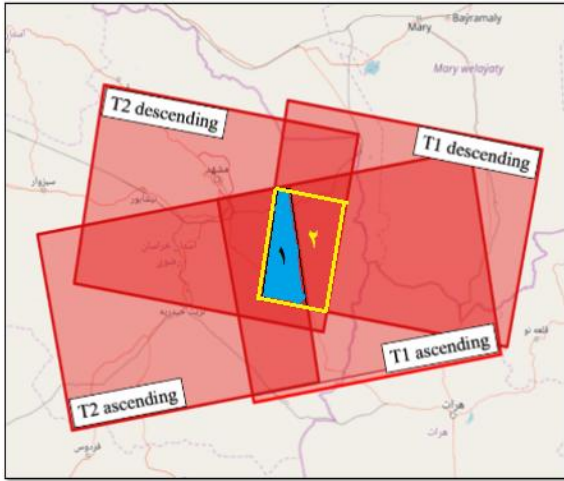
۳- مروری بر چگونگی تصویربرداری در ماهواره سنتینل (sentinel)

ماهواره سنتینل در آوریل ۲۰۱۴ به فضا فرستاده شد تا تصاویر مختلف را برای محققین علوم زمین تهیه کند. این ماهواره در سه مُد مختلف Strip Map (SM), Extra Wide Swath (EW) و Interferometric wide Swath (IW) تصویربرداری می‌کند برای اطلاعات بیشتر در مورد این سه مُد تصویربرداری به جدول زیر مراجعه کنید [۴۹].

جدول ۳- اطلاعات مربوط به مُدهای مختلف تصویربرداری در ماهواره سنتینل-۱

مُد تصویربرداری	عرض برداشت (کیلومتر)	قدرت تفکیک در جهت رنج و آزیموت (متر)	زاویه دید (درجه)
SM	۸۰	۵*۵	۱۸.۳*۴۶.۸
IW	۲۵۰	۵*۲۰	۲۱.۹*۴۶
EW	۴۰۰	۲۰*۴۰	۱۸.۹*۴۷

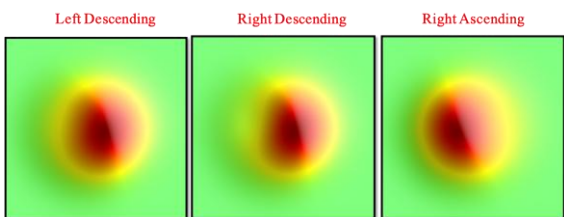
از بین مُدهای مختلف تصویربرداری در جدول ۳ چیزی که در فناوری تداخل‌سنجی راداری مورد استفاده قرار می‌گیرد مُد تصویربرداری IW است. در حال حاضر سنجنده سنتینل قسمت بزرگی از سطح زمین را پوشش می‌دهد و دوره تکرار مدارهای این ماهواره ۱۲ الی ۶ روزه می‌باشد.



شکل ۱۴- همپوشانی بین مدارها در ماهواره سنتینل در منطقه سنگ سفید- خراسان رضوی.

با توجه به شکل ۱۴ می‌توان گفت که قسمت مشترک بین مدارها در مسیر پایین‌گذر سمت راست با زاویه دید ۴۴ درجه و آزیموت ۱۹۰ درجه، برای مسیر پایین‌گذر سمت چپ با زاویه دید ۳۳ درجه و آزیموت ۱۹۰ درجه و در مسیر بالاگذر سمت راست با زاویه دید ۳۳ درجه و آزیموت ۳۴۶ درجه برداشت می‌شود؛ بنابراین سه هندسه مستقل را خواهیم داشت پس می‌توانیم با این تکنیک میدان سه‌بعدی را بازیابی کنیم.

در ادامه با توجه به آزیموت، زاویه دید و توپوگرافی هر پیکسل در هر مسیر، مؤلفه‌های میدان سه‌بعدی را به راستای خط دید ماهواره در آن مسیر تصویر می‌کنیم تا جابه‌جایی‌های شبیه‌سازی‌شده در راستای خط دید ماهواره را ایجاد کنیم (شکل ۱۵).



شکل ۱۵- شبیه‌سازی میدان جابه‌جایی در راستای خط دید ماهواره LOS با استفاده از مؤلفه‌های سه‌بعدی جابه‌جایی.

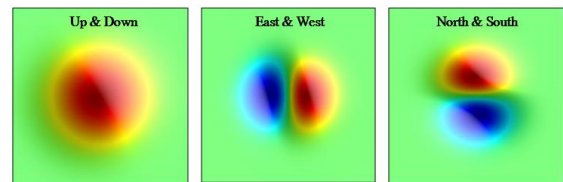
۴-۳- مرحله سوم: بازیابی مؤلفه‌های میدان سه-بعدی با میدان LOS شبیه‌سازی شده

پس از ساخت میدان‌های جابه‌جایی LOS برای هر سه مدار مستقل و با کمک گرفتن از دستگاه معادلات و

ابتدا یک شبیه‌سازی در منطقه سفیدسنگ مشهد که در فروردین ۹۶ زلزله‌ای به بزرگای ۶.۱ اتفاق افتاد انجام می‌شود. برای انجام این شبیه‌سازی مراحل زیر انجام شد.

۴-۱- مرحله اول: ایجاد یک میدان جابه‌جایی سه‌بعدی شبیه‌سازی شده

برای ایجاد این میدان جابه‌جایی سه‌بعدی شبیه‌سازی‌شده از نرم‌افزار متلب استفاده می‌کنیم 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 می‌کنیم (شکل ۱۳).



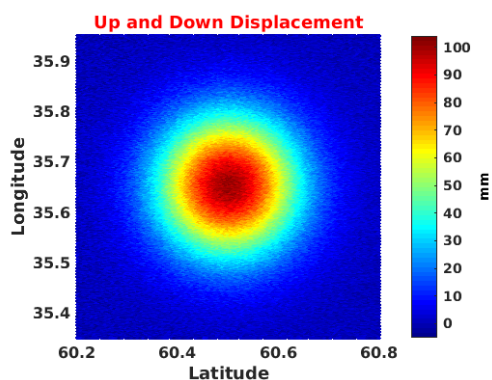
شکل ۱۳- شبیه‌سازی مؤلفه‌های میدان جابه‌جایی سه‌بعدی در منطقه سفیدسنگ.

۴-۲- مرحله دوم: تصویر مؤلفه‌های میدان سه‌بعدی به راستای LOS

پس از تولید مؤلفه‌های جابه‌جایی شبیه‌سازی‌شده در موقعیت منطقه مورد مطالعه باید این مؤلفه‌های جابه‌جایی را در راستای خط دید ماهواره و با هندسه مداری مورد نظر و همچنین توپوگرافی سطح زمین تصویر کنیم. پیش‌ازین کار باید بررسی کنیم که در منطقه‌ای که انتخاب نموده‌ایم چه مدارهایی دارای همپوشانی هستند و می‌توان از داده‌های آن‌ها به‌عنوان مشاهدات مستقل استفاده نمود. با توجه به شکل مسیر حرکت مداری ماهواره‌های سنتینل در منطقه، همان‌طور که در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود، علیرغم این‌که بخشی از منطقه با چهار هندسه مستقل قابل مشاهده است (منطقه آبی) که این باعث حل مسئله با درجه آزادی بیشتر است، با این‌وجود به خاطر افزایش منطقه همپوشانی مدارها از فصل مشترک سه مسیر ماهواره (کادر زردرنگ) که شامل دو مدار مجاور پایین‌گذر و یک مدار بالاگذر است استفاده می‌شود.

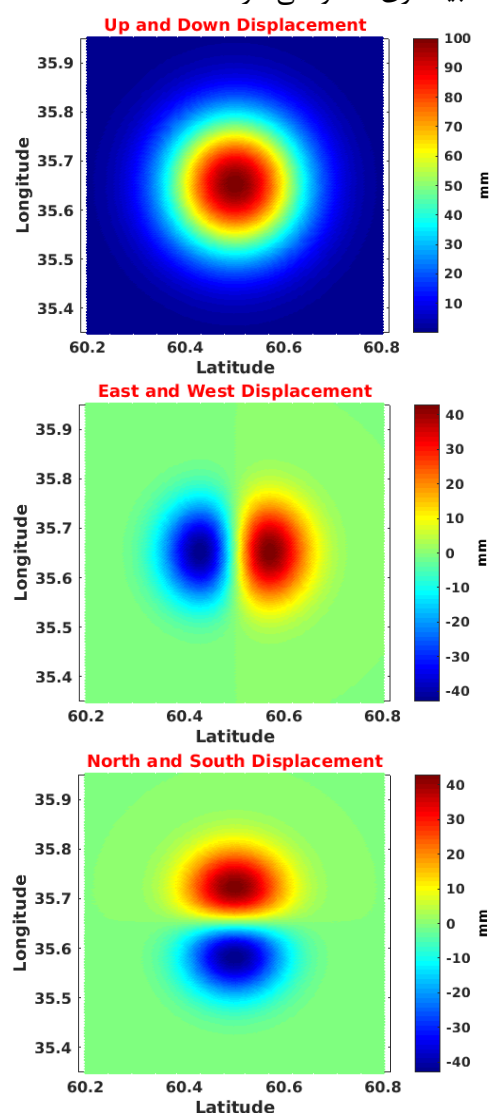
۴-۴- مرحله چهارم: اعمال نویز به مشاهدات LOS و بازسازی مجدد مؤلفه‌های سه‌بعدی

با توجه به این‌که در حالت واقعی و ایده‌آل جابه‌جایی-های LOS تحت تأثیر نویزهای متفاوتی می‌باشند و همواره بیان‌کننده جابه‌جایی واقعی سطح زمین نیستند، بنابراین این نویز می‌تواند در مخدوش کردن نتیجه بازیابی میدان جابه‌جایی سه‌بعدی تا حدودی تأثیرگذار باشد. علاوه بر این همان‌طور که پیش‌تر ذکر شد زمانی که عدد شرط ماتریس ضرایب یک دستگاه معادلات هم‌زمان نسبتاً بزرگ باشد و مسئله رفتار بد وضعی داشته باشد، با یک تغییر جزئی در ماتریس ضرایب یا بردار مشاهدات، یک تغییر فاحش در پارامترهای مدل ایجاد می‌شود. باین‌حال برای بررسی این دو موضوع و تأثیر آن بر نتایج نهایی در یک نویز رندوم با مرتبه ۰.۱ جابه‌جایی‌ها به مشاهدات جابه‌جایی LOS هر سه مسیر اضافه می‌کنیم و میدان جابه‌جایی سه‌بعدی را مجدداً برآورد می‌کنیم (شکل ۱۷). در این مسئله خاص عدد شرط ماتریس ضرایب حدود ۸۵ است که علی‌رغم مناسب بودن و خوش وضعی مسئله، باین‌حال نسبت به حالت ایدال که عدد شرط ۱ است فاصله دارد بنابراین ما انتظار داریم با افزایش دامنه نویز بر مشاهدات، بازسازی مؤلفه‌های جابه‌جایی سه‌بعدی دچار اعوجاج شوند.



مشاهدات هم‌زمان ۱۶ مؤلفه‌های اورتوگونال میدان سه‌بعدی را برآورد می‌کنیم. نکته‌ای که در این ساختار مستقل باید به آن توجه شود این است که با توجه به شکل‌های ۱۰ و ۱۱ درصد حساسیت در راستای مؤلفه‌های بالا-پایین، شرقی-غربی و شمالی-جنوبی به ترتیب ۴۳٪، ۳۵٪ و ۲۶٪ می‌باشد، همچنین عدد شرط ماتریس ضرایب در این مسئله چیزی حدود ۸۵ است که نشان‌دهنده عدم سینگلاریتی معکوس ماتریس ضرایب و پایداری مسئله است.

همان‌طور که در شکل ۱۶ مشاهده می‌شود با روش ارائه‌شده ما قادر به بازسازی میدان جابه‌جایی سه‌بعدی در منطقه شده‌ایم که الگویی مشابه میدان جابه‌جایی سه‌بعدی شبیه‌سازی شده واقعی دارد.



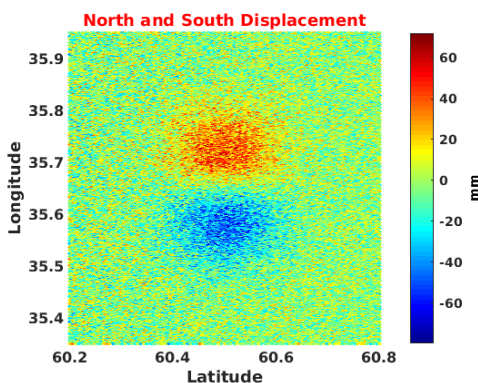
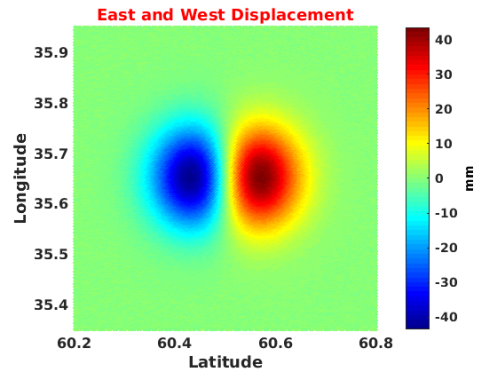
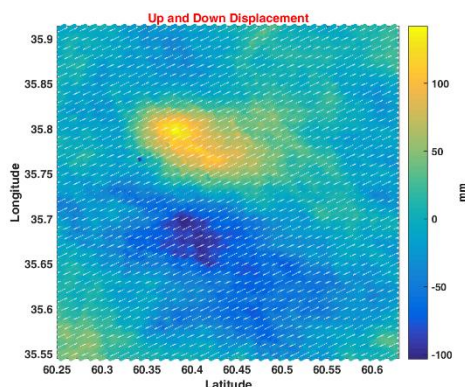
شکل ۱۶- بازسازی مؤلفه‌های میدان جابه‌جایی سه‌بعدی با روش همپوشانی بین مدارها.

زمین‌لرزه‌ای را با بزرگی ۶ ریشتر حوالی شهر سفیدسنگ واقع در استان خراسان رضوی ثبت و تعیین مکان کردند. مرکز این زلزله در فاصله ۳۰ کیلومتری سفیدسنگ، ۴۷ کیلومتری فریمان، ۷۵ کیلومتری تربت‌جام و ۸۶ کیلومتری مشهد به عمق ۱۰ کیلومتر تخمین زده شده است. برای برآورد مؤلفه‌های اورتوگونال جابه‌جایی در هر سه راستا از روش تداخل‌سنجی هم‌پوشانی بین مدارها ماهواره سنتینل (OOI) در این منطقه استفاده می‌کنیم. با بررسی وضعیت مدارهای ماهواره سنتینل در این محدوده سه مدار مستقل برای استفاده در روش موردنظر شناسایی می‌شود که در جدول ۴ جزئیات کامل این سه مسیر ارائه شده است.

جدول ۴- 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

بنابراین با تشکیل جفت تداخل‌نگارهای مربوط به هر تاریخ سه میدان جابه‌جایی LOS خواهیم داشت که می‌توانیم با استفاده از آن مؤلفه‌های سه‌بعدی میدان منطقه را بازیابی کنیم (شکل ۱۸). برای حذف فاز مربوط به توپوگرافی از مدل ارتفاع رقومی SRTM3 با قدرت تفکیک ۹۰ متر استفاده می‌کنیم.



شکل ۱۷- بازسازی مؤلفه‌های میدان جابه‌جایی سه‌بعدی پس از اعمال نویز با مرتبه ۰.۱ به مشاهدات LOS.

همان‌طور که انتظار می‌رفت با اعمال نویز با مرتبه ۰.۱ بازسازی مؤلفه‌ها دچار آشفتگی شد. نکته جالب‌توجه این است که همان‌طور که انتظارش را داشتیم به علت حساسیت کم مؤلفه شمال-جنوبی به جابه‌جایی LOS بازسازی در این مؤلفه نسبت به سایر مؤلفه‌ها با خطای بیشتری مواجه شده است و جدایی زیادی با الگوی جابه‌جایی واقعی دارد.

نتیجه مهمی که این شبیه‌سازی می‌توان گرفت، این است که در صورت استفاده از روش فوق که از این به بعد آن را تحت عنوان **Orbit Overlap Interferometry (OOI)** می‌شناسیم، می‌توانیم مؤلفه‌های میدان جابه‌جایی را در غیاب یا تعدیل عوامل نویز موجود در تداخل‌نگار با دقت قابل قبولی بازسازی کنیم. در ادامه این بازسازی را برای چند نمونه از مناطق مورد مطالعه با داده‌های واقعی انجام می‌دهیم.

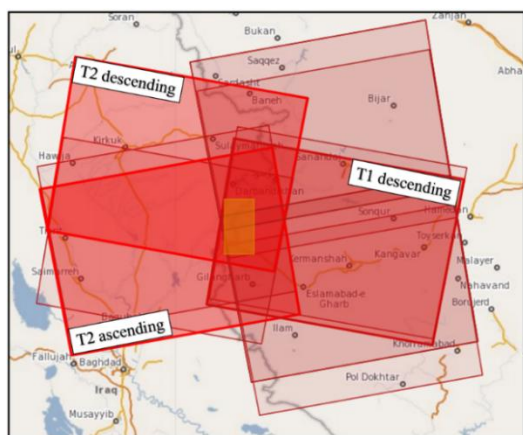
۵- بازسازی میدان جابه‌جایی سه‌بعدی با روش OOI برای زلزله سفیدسنگ

شبکه‌های لرزه‌نگاری وابسته به مرکز لرزه‌نگاری کشور ساعت ۱۰:۳۰ روز چهارشنبه مورخ ۱۳۹۶/۱/۱۶

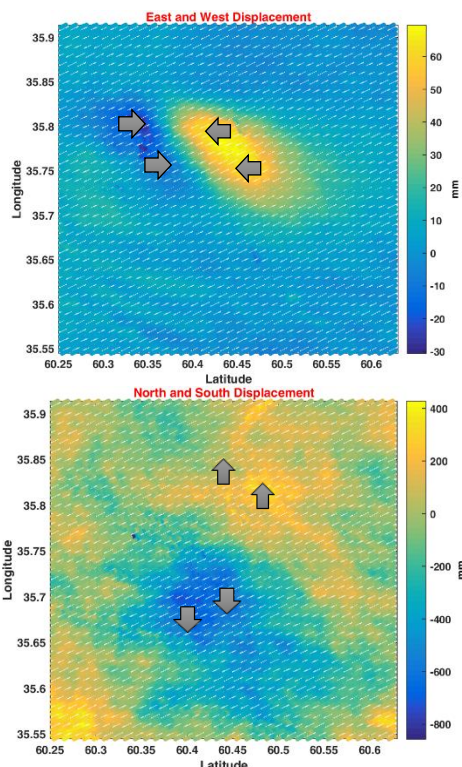
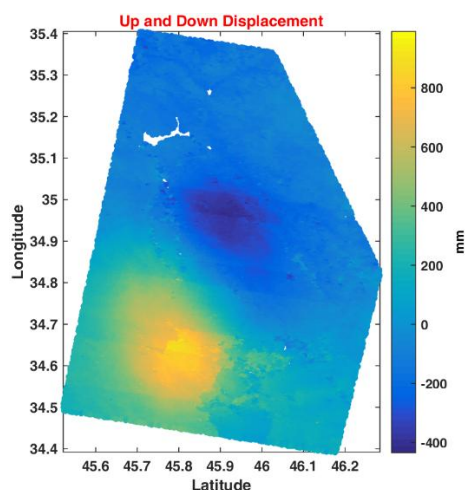
جدول ۵- اطلاعات مربوط به مدارهای پوشش دهنده زلزله ازگله کرمانشاه.

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 تداخل‌نگارهای مربوط به هر تاریخ سه میدان جابه‌جایی LOS خواهیم داشت که می‌توانیم با استفاده از آن مؤلفه‌های سه‌بعدی میدان منطقه را بازیابی کنیم (شکل ۲۰).



شکل ۱۹- همپوشانی بین مدارها در ماهواره Sentinel در منطقه ازگله- کرمانشاه.



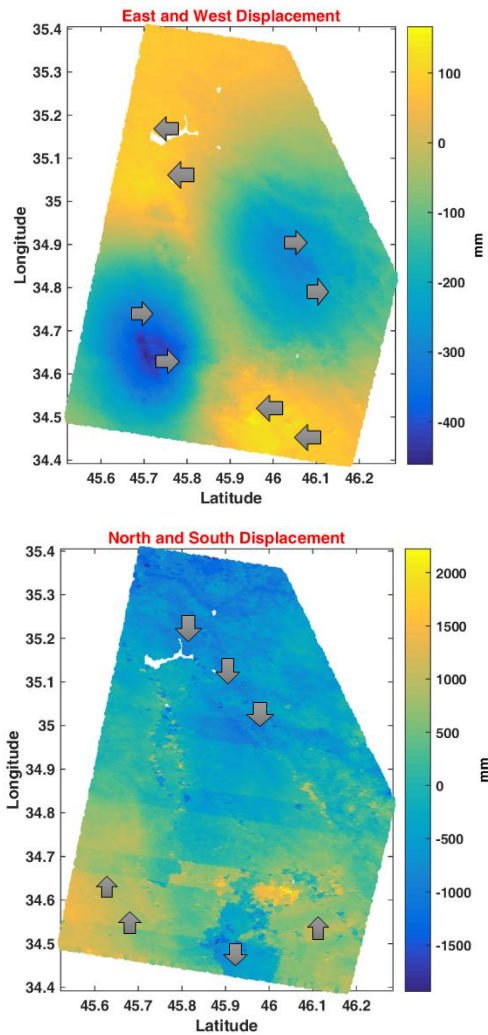
شکل ۱۸- بازسازی مؤلفه‌های میدان جابه‌جایی سه‌بعدی زلزله سفید سنگ خراسان با روش OOI.

۶- 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 در نزدیکی مرز ایران و عراق، زمین‌لرزه‌ای به بزرگی ۷.۳ 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 ۴۵.۹۶ و عرض جغرافیایی ۳۴.۹۱ و عمق آن ۱۹ کیلومتر طبق گفته مرکز زمین‌شناسی و لرزه‌نگاری آمریکا (USGS) می‌باشد.

برای برآورد مؤلفه‌های اورتوگونال جابه‌جایی در هر سه راستا از روش تداخل‌سنجی هم‌پوشانی بین مدارها ماهواره سنتینل (OOI) در این منطقه استفاده می‌کنیم. با بررسی وضعیت مدارهای ماهواره سنتینل در این محدوده (شکل ۱۹) سه مدار مستقل برای استفاده در روش موردنظر شناسایی می‌شود که در جدول ۵ جزئیات کامل این سه مسیر ارائه شده است.

جابه‌جایی دریافت می‌کند (۵۰ درصد برای زاویه دید ۱۵ تا ۲۰ درجه در هر دو مدار) سپس مؤلفه شرقی-غربی با بیشترین حساسیت ۳۷ درصد (برای زاویه دید ۱۵ تا ۲۰ درجه در هر دو مدار) و در نهایت مؤلفه شمالی-جنوبی با بیشترین حساسیت ۲۸ درصد را دارا می‌باشد. دوماً اینکه میزان حساسیت به ازای زوایای دید مختلف به صورت پیوسته در هر سه مؤلفه جابه‌جایی در حال تغییر است، مخصوصاً برای مؤلفه شمال-جنوبی این مقدار از ۱۰ تا ۳۰ درصد تغییر می‌کند و نتیجه سوم اینکه با بررسی عدد شرط ماتریس ضرایب دستگاه معادلات و مشاهدات در مسئله بازیابی میدان سه‌بعدی می‌توان مشاهده کرد که این مسئله در بیشتر حالات (بجز زمانی که زوایای دید دو هندسه برابرند) یک مسئله خوش وضع 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 اختلاف 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، به بررسی قابلیت و کارایی این روش با داده‌های شبیه‌سازی شده و واقعی پرداختیم. نتایج نشان دادند که در غیاب مؤلفه‌های نویز این روش به‌خوبی می‌تواند در بازسازی مؤلفه‌های میدان سه‌بعدی مورد استفاده قرار گیرد ولی با افزایش نویز در مشاهدات، مسئله رفتاری بد وضع را نشان داده و نتایج نهایی (مخصوصاً برای در مؤلفه سوم) را دچار اغتشاش می‌کند.



شکل ۲۰- بازسازی مؤلفه‌های میدان جابه‌جایی سه‌بعدی زلزله از گله کرمانشاه با روش OOI.

۶- نتیجه‌گیری

در این تحقیق با توجه به اهمیت شناخت و اندازه‌گیری مؤلفه‌های میدان جابه‌جایی سه‌بعدی سطحی زمین، روش‌های موجود جهت بازیابی این میدان با استفاده از اندازه‌گیری‌های حاصل از تداخل‌سنجی راداری که در دهه‌های اخیر توسعه یافته‌اند به تفصیل مرور شد. سپس در ادامه با توجه به روش آنالیز مؤلفه‌های اصلی در مورد حساسیت بازیابی هر کدام از مؤلفه‌های میدان جابه‌جایی با در نظر گرفتن اندازه‌گیری‌های مربوط به سه هندسه مستقل راداری بحث شد، نتایج نشان می‌دهد که اولاً مؤلفه بالا-پایین جابه‌جایی بیشترین حساسیت را به جابه‌جایی در راستای خط دید ماهواره دارد و بیشترین سهم را از این

- [1] Babace, S., Z. Mouavi, and M. Roostaei, 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*, 2016. 5 :(4)p. 95-111.
- [2] Hanssen, R.F., *Radar interferometry: data interpretation and error analysis*. Vol. 2. 2001: Springer Science & Business Media.
- [3] Hu, J., et al., Resolving three-dimensional surface displacements from InSAR measurements: A review. *Earth-Science Reviews*, 2014. 133: p. 1-17.
- [4] Berardino, P., et al., A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2002. 40(11): p. 2375-2383.
- [5] Ferretti, A., C. Prati, and F. Rocca, Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, 2001. 39(1): p. 8-20.
- [6] Hooper, A., P. Segall, and H. Zebker, Persistent scatterer interferometric synthetic aperture radar for crustal deformation analysis, with application to Volc6n Alcedo, Gal6pagos. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2007. 112(B7).
- [7] Kampes, B.M. and R.F. Hanssen, Ambiguity resolution for permanent scatterer interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2004. 42(11): p. 2446-2453.
- [8] Zhang, L., X. Ding, and Z. Lu, Modeling PSInSAR time series without phase unwrapping. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011. 49(1): p. 547-556.
- [9] Fuhrmann, T. and M.C. Garthwaite, Resolving Three-Dimensional Surface Motion with InSAR: Constraints from Multi-Geometry Data Fusion. *Remote Sensing*, 2019. 11(3): p. 241.
- [10] Gao, M., et al., Regional Land Subsidence Analysis in Eastern Beijing Plain by InSAR Time Series and Wavelet Transforms. *Remote Sensing*, 2018. 10(3): p. 365.
- [11] Sun, H., et al., Monitoring land subsidence in the southern part of the lower Liaohe plain, China with a multi-track PS-InSAR technique. *Remote Sensing of Environment*, 2017. 188: p. 73-84.
- [12] Zhou, C., et al., Insar time-series analysis of land subsidence under different land use types in the eastern Beijing plain, China. *Remote Sensing*, 2017. 9(4): p. 380.
- [13] Jung, H.-S., J.-S. Won, and S.-W. Kim, An improvement of the performance of multiple-aperture SAR interferometry (MAI). *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009. 47(8): p. 2859-2869.
- [14] Pepe, A. and F. Calr, A Review of Interferometric Synthetic Aperture RADAR (InSAR) Multi-Track Approaches for the Retrieval of Earth's Surface Displacements. *Applied Sciences*, 2017. 7(12): p. 1264.
- [15] Strozzi, T., et al., Glacier motion estimation using SAR offset-tracking procedures. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2002. 40(11): p. 2384-2391.
- [16] Fialko, Y., 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*, 2001. 28(16): p. 3063-3066.
- [17] Van Leijen, F.J., *Persistent scatterer interferometry based on geodetic estimation theory*. 2014.
- [18] Qu, C., et al., Relationships between InSAR Seismic Deformation and Fault Motion Sense, Fault Strike, and Ascending/Descending Modes. *Acta Geologica Sinica (English Edition)* :(1)91 .2017 ,(p. 93-108.
- [19] Fialko, Y., et al., Three-dimensional deformation caused by the Bam, Iran, earthquake and the origin of shallow slip deficit. *Nature*, 2005. 435(7040): p. 295.
- [20] Funning, G.J., et al., Surface displacements and source parameters of the 2003 Bam (Iran) earthquake from Envisat advanced synthetic aperture radar imagery. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2005. 110(B9).
- [21] Gonz6lez, P.J., J. Fernandez, and A.G. Camacho, Coseismic three-dimensional displacements determined using SAR data: theory and an application test. *Pure and Applied Geophysics*, 2009. 166(8-9): p. 1403-1424.
- [22] Hu, J., et al., Inferring three-dimensional surface displacement field by combining SAR interferometric phase and amplitude information of ascending and descending orbits. *Science China Earth Sciences*, 2010. 53(4): p. 550-560.
- [23] Gudmundsson, S., et al., Three-dimensional glacier surface motion maps at the Gjalp eruption site, Iceland, inferred from combining InSAR and other ice-displacement data. *Annals of Glaciology*, 2002. 34: p. 315-322.

- [24] Samsonov, S., et al., Application of DInSAR-GPS optimization for derivation of fine-scale surface motion maps of Southern California. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007. 45(2) : (p. 512-521).
- [25] Guglielmino, F., et al., 3D displacement maps of the 2009 L'Aquila earthquake (Italy) by applying the SISTEM method to GPS and DInSAR data. *Terra nova*, 2013. 25(1): p. 79-85.
- [26] Catalro, J., et al., Merging GPS and atmospherically corrected InSAR data to map 3-D terrain displacement velocity. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011. 49(6): p. 2354-2360.
- [27] Vollrath, A., et al., Decomposing DInSAR time-series into 3-D in combination with GPS in the case of low strain rates: An application to the Hyblean Plateau, Sicily, Italy. *Remote Sensing*, 2017. 9(1): p. 33.
- [28] Jung, H.-S., et al., Mapping three-dimensional surface deformation by combining multiple-aperture interferometry and conventional interferometry: Application to the June 2007 eruption of Kilauea volcano, Hawaii. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2011. 8(1): p. 34-38.
- [29] Gourmelen, N., et al., Ice velocity determined using conventional and multiple-aperture InSAR. *Earth and Planetary Science Letters* : (2-1)307 .2011 ,p. 156-160.
- [30] Wright, T.J., B.E. Parsons, and Z. Lu, Toward mapping surface deformation in three dimensions using InSAR. *Geophysical Research Letters*, 2004. 31(1).
- [31] Motagh, M., et al., Quantifying groundwater exploitation induced subsidence in the Rafsanjan plain, southeastern Iran, using InSAR time-series and in situ measurements. *Engineering Geology*, 2017. 218: p. 134-151.
- [32] Gray, L., Using multiple RADARSAT InSAR pairs to estimate a full three-dimensional solution for glacial ice movement. *Geophysical Research Letters*, 2011. 38(5).
- [33] Samieie-Esfahany, S., et al. On the effect of horizontal deformation on InSAR subsidence estimates. in *Proceedings of the Fringe 2009 Workshop*, Frascati, Italy. 2009.
- [34] Joughin, I.R., R. Kwok, and M.A. Fahnestock, Interferometric estimation of three-dimensional ice-flow using ascending and descending passes. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1998. 36(1): p. 25-37.
- [35] Grandin, R., et al., Three-dimensional displacement field of the 2015 Mw8. 3 Illapel earthquake (Chile) from across-and along-track Sentinel-1 TOPS interferometry. *Geophysical Research Letters*, 2016. 43(6): p. 2552-2561.
- [36] He, P., et al., High-quality three-dimensional displacement fields from new-generation SAR imagery: application to the 2017 Ezgeleh, Iran, earthquake. *Journal of Geodesy*, 2018: p. 1-19.
- [37] Dai, K., et al., Extracting vertical displacement rates in Shanghai (China) with multi-platform SAR images. *Remote Sensing*, 2015. 7(8): p. 9542-9562.
- [38] Simons, M. and P. Rosen, Interferometric synthetic aperture radar geodesy. 2007.
- [39] Michel, R., J.P. Avouac, and J. Taboury, Measuring ground displacements from SAR amplitude images: Application to the Landers earthquake. *Geophysical Research Letters*, 1999 : (7)26 .p. 875-878.
- [40] Gray, A., et al., Velocities and flux of the Filchner Ice Shelf and its tributaries determined from speckle tracking interferometry. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2001. 27(3): p. 193-206.
- [41] Rott, H., et al., Mass fluxes and dynamics of Moreno glacier, southern Patagonia icefield. *Geophysical research letters*, 1998. 25(9): p. 1407-1410.
- [42] Derauw, D. DInSAR and coherence tracking applied to glaciology: the example of Shirase Glacier. in *Proc. FRINGE*. 1999. Citeseer.
- [43] Bechor, N.B. and H.A. Zebker, Measuring two-dimensional movements using a single InSAR pair. *Geophysical research letters*, 2006. 33(16).
- [44] Barbot, S., Y. Hamiel, and Y. Fialko, Space geodetic investigation of the coseismic and postseismic deformation due to the 2003 Mw7. 2 Altai earthquake: Implications for the local lithospheric rheology. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2008. 113(B3).
- [45] Rodriguez, E. and J. Martin. Theory and design of interferometric synthetic aperture radars. in *IEE Proceedings F (Radar and Signal Processing)*. 1992. IET.
- [46] Samsonov, S. and K. Tiampo, Analytical optimization of a DInSAR and GPS dataset for derivation of three-dimensional surface motion. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2006. 3(1): p. 107-111.
- [47] Hu, J., et al., Three-dimensional surface displacements from InSAR and GPS measurements with variance component estimation. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2012. 9(4): p. 754-758.
- [48] Denkevich, E., O. Konovalov, and M. Zhuravkov, Experimental and numerical investigation the divergence of horizontal and vertical displacement in longwall mining, in *Geomechanics and*

- Geodynamics of Rock Masses. 2018, CRC Press. p. 781-784.
- [49] Torres, R., et al., GMES Sentinel-1 mission. Remote Sensing of Environment, 2012. 120: p. 9-24.
- [50] Spaans, K.H., Near-real time volcano monitoring and modelling using radar interferometry. 2016, University of Leeds.
- [51] Hotelling, H., Analysis of a complex of statistical variables into principal components. Journal of educational psychology, 1933. 24(6): p. 417.
- [52] Pearson, K., 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, 1901. 2(11): p. 559-572.
- [53] Hossainali, M.M., A Comprehensive Approach to the Analysis of the 3D-Kinematics of Deformation. 2006, Technische Universität.
- [54] Schwarz, C., P. Ackert, and R. Mauermann, Principal component analysis and singular value decomposition used for a numerical sensitivity analysis of a complex drawn part. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018. 94(5-8): p. 2255-2265.
- [55] Tarantola, A., Inverse problem theory and methods for model parameter estimation. Vol. 89. 2005: siam.