

## استخراج میدان جابه‌جایی سه‌بُعدی با استفاده از فن تداخل‌سنجی رادار با دریچه

### مصنوعی (SAR)؛ بررسی موردی گسل بم

ساناز واجدیان<sup>۱\*</sup>، محمدرضا سراجیان<sup>۲</sup> و بابک منصوری<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری گرایش سنجش از دور، گروه مهندسی نقشه‌برداری و مقابله با سوانح طبیعی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، ایران

<sup>۲</sup> دانشیار، گروه مهندسی نقشه‌برداری و مقابله با سوانح طبیعی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، ایران

<sup>۳</sup> استادیار، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران

(دریافت: ۸۷/۶/۱۶، پذیرش نهایی: ۸۹/۷/۲۸)

#### چکیده

هدف این تحقیق استخراج سه مؤلفه اورتوگونال میدان جابه‌جایی هم‌لرزه‌ای سطح، با استفاده از تداخل‌سنجی راداری (InSAR, Interferometric Synthetic aperture radar) است. تصویربرداری راداری، مؤلفه‌های مشاهداتی جابه‌جایی را در راستای دید ماهواره و در دو عبور بالارو (Ascending) و پایین‌رو (Descending) به‌دست می‌دهد. با توجه به نزدیک به قطبی بودن (Near polar) مدار ماهواره، حساسیت مؤلفه‌های جابه‌جایی حاصل به راستای شمالی-جنوبی کم است که این امر باعث کم شدن دقت مؤلفه دگرشکلی (Deformation) محاسبه شده می‌شود. برای رفع این مشکل راهکارهای متعددی وجود دارد. در این تحقیق از تصاویر سمت-دورافت (آزیموت-دورافت (Azimuth offset)) عبور پایین‌رو استفاده شد. همچنین با توجه به تأثیر خطاهای جوی روی تصویربرداری راداری، مؤلفه‌های دگرشکلی به صورت نسبی تعیین شد و سپس با استفاده از داده‌های فرامیدانی (Far field) حاصل از تصویر هم‌چسبی، انتقال لازم برای تبدیل مقادیر نسبی به مطلق، به‌واسطه فرایندی به نام detrending محاسبه و از مؤلفه‌های محاسباتی کسر شد.

بررسی موردی این تحقیق روی زلزله بهمن ماه ۱۳۸۳ شهر بم صورت گرفته است. در این تحقیق زوج تصاویر راداری پیش‌لرزه‌ای (Pre seismic) و هم‌لرزه‌ای (Co seismic) ماهواره Envisat در عبورهای بالارو و پایین‌رو مورد بررسی قرار گرفت و تصاویر با استفاده از نرم‌افزار DORIS در محیط لینوکس پردازش شد. در پایان بازسازی میدان جابه‌جایی در محیط ویندوز با نرم‌افزار Matlab صورت پذیرفت و نتایج به‌دست آمده در این تحقیق با سایر گزارش‌های منتشر شده مقایسه شد.

واژه‌های کلیدی: رادار با دریچه مصنوعی، تداخل‌سنجی، آزیموت-دورافت، هم‌لرزه‌ای، پیش‌لرزه‌ای، بالارو، پایین‌رو

## Derivation of the complete (3d) displacement field using interferometric Synthetic Aperture Radar (SAR) technique; Case Study on the Bam fault

Vajedian, S.<sup>1</sup>, Sarajian, M. R.<sup>2</sup> and Mansouri, B.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Ph. D. Student of Remote Sensing, Department of Surveying and Geomatics Engineering, Center of Excellence in Surveying Engineering and Disaster Management, Faculty of Engineering, University of Tehran, Iran

<sup>2</sup> Associate Professor, Department of Surveying and Geomatics Engineering, Center of Excellence in Surveying Engineering and Disaster Management, University College of Engineering, University of Tehran, Iran.

<sup>3</sup> Assistant Professor, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, Tehran, Iran.

(Received: 6 Sep 2008, Accepted: 20 Oct 2010)

#### Abstract

Investigation and monitoring of the displacement field derived from deformation is among the important studies in earth science and geophysics topics, which plays a main role in the prevention and praxeology of natural disasters such as earthquake, subsidence, land slide et cetera. Here we can mention the several methods in geodetic measurement

and deformation monitoring such as spirit leveling, the positioning systems like (SLR, Satellite laser range finding), (VLBI, Very long baseline interferometer) and (GPS, Global positioning system), and Interferometric Synthetic aperture Radar (InSAR) technique. Of the above methods, the InSAR technique with the ability to generate large, continual and contiguous ground overlays, so with high spatial and temporal resolution it turns out to be one of the important techniques.

The goal of this study is derivation of a continual map for three orthogonal components of the co-seismic surface displacement field with InSAR data. The displacement components observed with radar are in the direction of satellite line of sight. The satellite LOS displacement vector has a lower sensitivity to north displacements than to the other two components of a surface displacement, i.e. east and up, due to the near-polar satellite orbits. This act caused a reduction in the accuracy of the calculated deformation components. There are several solutions to this problem and in this paper, the azimuth offset data of ascending and descending passes is used solve this problem. So as regards efficacy of atmosphere errors on radar imaging, the calculation of displacement components is relative, so with far field data derived from coherence images, the necessary shift to converting the relative values to absolute was calculated with the detrending process and reduced from the calculated deformation components.

The case study of this research is on the 2003 Bam earthquake using co-seismic and pre-seismic pairs of Envisat radar images in ascending and descending orbits. The images were processed with Doris Software in Linux systems. Finally the 3D reconstruction process was accomplished with Matlab software in Windows. The derived results in this study have compared well with other publications.

**Key words:** Synthetic Aperture Radar (SAR), Differential Interferometry, Azimuth Offset, Co seismic, Pre seismic, Ascending, Descending

## ۱ مقدمه

تبدیل شده است. در دهه‌های اخیر، تلاش گسترده‌ای به منظور اندازه‌گیری تغییرات پوسته زمین با استفاده از فن‌هایی چون ترازیابی دقیق صورت گرفته است. ترازیابی دقیق گرچه جابه‌جایی ارتفاعی سطح زمین را با دقت زیادی اندازه‌گیری می‌کند، اما با محدودیت‌های قدرت کم تفکیک مکانی و زمانی روبه‌رو است. در دو دهه اخیر، با معرفی دو فن سامانه تعیین موقعیت جهانی GPS و سامانه تصویربرداری رادار با دریچه مصنوعی (SAR)، گام بزرگی در زمینه فناوری ژئودتیک فضایی برداشته شده است. این فن‌ها، اندازه‌گیری دگرشکلی را با دقت بهتر از سانتی‌متر به دست می‌دهند. در این میان مشاهدات پیوسته GPS با دو ویژگی قدرت تفکیک مکانی کم ولی قدرت تفکیک زمانی زیاد، ابزار مفیدی برای بررسی تغییرات

بررسی و پایش میدان جابه‌جایی ناشی از دگرشکلی، 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 ژئودتیک و پایش دگرشکلی نظیر ترازیابی دقیق، سامانه‌های تعیین موقعیت (SLR, Satellite laser range finding)، (VLBI, Very long baseline interferometer)، (GPS, Global positioning system)، و فن تداخل‌سنجی راداری اشاره کرد. از میان روش‌های فوق، فن تداخل‌سنجی راداری با برخورداری بودن از پوشش زمینی وسیع، مکرر و پیوسته، و نیز قدرت تفکیک مکانی و مکانی زیاد، به یکی از فن‌های مهم و قابل توجه

هندسه‌های دید متفاوت، امکان بازسازی مدل جابه‌جایی سه‌بعدی که در یک زلزله رخ می‌دهد را میسر می‌سازد (فیلکو و همکاران، ۲۰۰۱)، لازم است که علاوه بر دو مشاهده فاز تداخل‌سنجی عبور بالارو و پایین‌رو از مؤلفه دیگری نیز در محاسبات استفاده شود. مؤلفه‌های عبور بالارو و پایین‌رو به دلیل نزدیکی قطبی بودن مدار ماهواره، حساس به حرکت‌های قائم و شرقی-غربی پوسته است و به مؤلفه شمالی حساسیت کمتری دارد. در حال حاضر روش‌های متعددی برای غلبه بر این محدودیت مطرح شده است. طرح‌های پیشنهادی بسیاری وجود دارد (رایت و همکاران، ۲۰۰۴) که اجرای آنها می‌تواند اندازه‌گیری‌هایی برای مؤلفه شمالی به دست دهد. از آنجاکه چنین ماهواره‌هایی نمی‌توانند در آینده‌ای قابل پیش‌بینی طراحی شوند، بهتر است که این فقدان اطلاعات با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای موجود جبران شود. در این تحقیق از داده سمت-دورآفت به منظور حل این مسئله استفاده شد. سمت-دورآفت انتقال ناشی از جابه‌جایی سطحی زمین در راستای پرواز ماهواره است که با استفاده از دامنه تصاویر رادار استخراج می‌شود. تلاش‌هایی در جهت استخراج میدان جابه‌جایی سه‌بعدی از تصاویر راداری با استفاده از داده‌های سمت-دورآفت صورت پذیرفته است. Fialko و دیگران با تلفیق سمت-دورآفت‌ها و اینترفروگرام‌ها با دو هندسه تصویربرداری متفاوت، به میدان جابه‌جایی سه‌بعدی در راستای شمال، شرق و قائم ناشی از زلزله هکتورماین (Hector mine) دست یافتند (فیلکو و همکاران، ۲۰۰۱).

در این تحقیق علاوه بر داده‌های فاز از داده‌های سمت-دورآفت عبور پایین‌رو نیز استفاده شد. هدف از به‌کارگیری این داده‌ها جبران کمبود اطلاعات در راستای شمالی-جنوبی، راستایی که تعیین دگرشکلی با دقت کمتری صورت می‌گیرد، است. با استفاده از داده‌های پیش‌گفته امکان بازسازی میدان جابه‌جایی سه‌بعدی میسر

پوسته زمین است. تولید پوشش‌های مکرر و وسیع و قدرت تفکیک مکانی زیاد تصاویر راداری و دقت قابل قبول این روش، در بررسی پدیده‌های گوناگون زمین‌شناسی همچون زلزله، نشست (subsidence)، زمین‌لغزش (Landslide) و مانند آن، ابزار نیرومندی برای محققان فراهم آورده است و منجر به اکتشاف‌هایی در زمینه مدل‌سازی سیکل زلزله شده است (فیلکو و همکاران، ۲۰۰۱).

آرایش‌های متفاوت آنتن رادار که منجر به دو روش تداخل‌سنجی "عمود بر راستای پرواز (Cross-Track)" و "در راستای پرواز (Along-Track)" می‌شود، امکان اندازه‌گیری توپوگرافی زمین و کمی کردن فرایندهای دگرشکلی پوسته را میسر می‌کند. در روش تداخل‌سنجی عمود بر راستای پرواز یا با تکرار مسیر (Repeat Pass) از اطلاعات فاز حداقل دو تصویر SAR که در فواصل زمانی متفاوت از یک ناحیه به دست آمده است، استفاده می‌شود. این روش تداخل‌سنجی امکان اندازه‌گیری میزان جابه‌جایی ناشی از دگرشکلی را میسر می‌سازد. مؤلفه فاز حاصل از تداخل‌سنجی در بردارنده اثرات توپوگرافی، دگرشکلی، جو و نوفه است. از بین اثرات فوق، توپوگرافی و دگرشکلی مؤثرترین عوامل اند. فن تفاضلی تداخل‌سنجی راداری (DInSAR)، با تفاضل‌گیری بین اینترفروگرام‌های (Interferogram) پیش‌لرزه‌ای و هم‌لرزه‌ای اثر مؤلفه توپوگرافی را از فاز تداخل‌سنجی حذف می‌کند و دگرشکلی را به منزله تنها عامل مؤثر باقی می‌گذارد.

یکی از محدودیت‌های فن تداخل‌سنجی راداری، امکان اندازه‌گیری جابه‌جایی تنها در راستای خط دید (LOS, Line Of Sight) ماهواره است. تصویربرداری رادار با ماهواره Envisat در دو عبور بالارو و پایین‌رو صورت می‌گیرد. نظر به اینکه استفاده از حداقل سه مشاهده مستقل جابه‌جایی زمینی به دست آمده از

می‌کند و با فرض داشتن نوفه سامانه، اختلاف فاز اندازه‌گیری شده  $\Delta\varphi$  می‌تواند به صورت رابطه (۲) داده شود.

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_{topo} + \Delta\varphi_{defo} + \Delta\varphi_{atm} + \Delta\varphi_{orb} + \Delta\varphi_{noise} \quad (2)$$

در رابطه (۲)  $\Delta\varphi_{topo}$  اثر مؤلفه توپوگرافی،  $\Delta\varphi_{defo}$  اثر مؤلفه دگرشکلی،  $\Delta\varphi_{atm}$  اثر مؤلفه جو،  $\Delta\varphi_{orb}$  اثر مؤلفه مداری و  $\Delta\varphi_{noise}$  اثر مؤلفه نوفه است

هدف اصلی تداخل‌سنجی تفاضلی، استخراج میزان دگرشکلی از فاز اندازه‌گیری شده کلی با حذف کردن یا کمینه کردن اثر دیگر مؤلفه‌ها است. در این میان مؤلفه حاصل از نوفه معمولاً ناچیز انگاشته می‌شود و اثر جوی نیز با استفاده از تصاویر تکراری خشی، و یا با استفاده از منابع دیگری نظیر GPS تصحیح می‌شود. پس اطلاعات اصلی حاصل از توپوگرافی و دگرشکلی است. بنابراین با معلوم بودن توپوگرافی می‌توان دگرشکلی را تعیین کرد. روشی که در آن سیگنال‌های مربوط به توپوگرافی از فاز تداخل‌سنجی حذف می‌شود، تداخل‌سنجی تفاضلی نام دارد، که در ادامه نظریه آن مورد بررسی قرار می‌گیرد.

### ۳ تداخل‌سنجی راداری تفاضلی

فاز اندازه‌گیری شده در فرایند تداخل‌سنجی برابر با مؤلفه خط‌مبنای موازی است. در این بخش معادلات نتیجه شده Kampes دنبال می‌شود (کمپس و همکاران، ۲۰۰۳). اگر خط‌مبنای حقیقی اینترفروگرام بصورت رابطه (۳) باشد:

$$\phi = -\frac{4\pi}{\lambda} B_{\parallel} \quad (3)$$

در رابطه (۳)  $B_{\parallel}$  تصویر خط مبنا روی راستایی به موازات خط دید ماهواره است. این مؤلفه خط‌مبنای موازی نیز نامیده می‌شود. با اعمال تصحیح مربوط به فاز مرجع، فاز به صورت رابطه (۴) درمی‌آید:

$$\phi = -\frac{4\pi}{\lambda} (B_{\parallel} - B_{\parallel 0}) \quad (4)$$

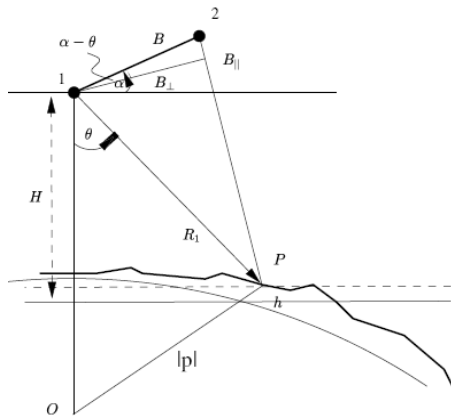
می‌شود. با توجه به اثر جو روی تصویربرداری راداری مؤلفه‌های میدان به صورت نسبی تعیین می‌شود. با استفاده از تصاویر هم‌چسبی و تعیین نقاط فرامیدانی می‌توان انتقال حاصل را حذف و میدان را به صورت مطلق محاسبه کرد. در ادامه مراحل اجرای تحقیق به تفصیل آمده است.

### ۲ تعیین دگرشکلی با استفاده از تداخل‌سنجی

فن‌های تداخل‌سنجی راداری به طور گسترده‌ای برای اندازه‌گیری‌های جابه‌جایی پوسته زمین یا حرکت اجرام سطحی در مقیاس‌های محلی در منظرهای مشاهده شده از ماهواره‌های مربوط استفاده می‌شود. اگر دو تصویر رادار از یک منطقه در زمان‌های متفاوت اخذ شود، تصویر اینترفروگرام مربوط می‌تواند تغییر موقعیت اتفاق افتاده روی منطقه را شناسایی کند. در مورد عوارض زمینی موجود در منطقه که دو بار از هندسه مشابهی تصویربرداری می‌شود، اگر مسافت رادار-زمین-رادار در هر دو تصویربرداری مساوی باشد، فازهای پخش شده بازگشتی (Backscatter) یکسان خواهد بود و به این معنا است که اختلاف بین آنها صفر خواهد بود. اگر پوسته زمین در مدت زمان بین این دو تصویربرداری حرکت کند (بالا، پایین، یا افقی) مسافت رادار-زمین-رادار تغییر می‌کند، لذا فاز تصویر دوم نیز انتقال خواهد یافت. این شیف دلالیت بر حرکت‌های زمینی دارد. میزان حرکت متناظر با نصف طول موج که به صورت رابطه (۱) محاسبه می‌شود، یک فرانتز (Fringe) در اینترفروگرام تولید می‌کند.

$$\Delta r = \frac{\lambda}{2} \quad (1)$$

با این حال خط‌مبنای عمود بر راستای پرواز هرگز نمی‌تواند صفر شود، و این امر منجر به سیگنال‌های توپوگرافی اضافی در فاز اندازه‌گیری شده کلی می‌شود. علاوه بر این با فرض اینکه سیگنال رادار از میان جو عبور



شکل ۱. نمایش مؤلفه‌های خط‌مبنا و هندسه تصویربرداری راداری.

#### ۴ اندازه‌گیری جابه‌جایی‌های سطحی پوسته با استفاده از سمت-دورآفت

تناظریابی در مقیاس کوچک‌تر از یک پیکسل (sub-pixel) برای تصاویر دامنه، فن کارایی برای به‌دست آوردن اطلاعاتی اضافی مربوط به جابه‌جایی‌های مسطحاتی زلزله‌ها است (میشل و همکاران، ۱۹۹۹؛ پلتزر و همکاران، ۱۹۹۹ و جانسن و همکاران، ۲۰۰۲). سمت-دورآفت انتقال‌های افقی لازم برای تنظیم کردن پیکسل‌های دامنه در راستای سمت (مؤلفه شمالی) زوج تصاویر راداری است. لذا در بردارنده اطلاعاتی درباره جابه‌جایی‌های زمینی در راستای سمت است. برای ماهواره‌های Envisat اندازه طول موج در حدود ۵.۷ سانتی‌متر و اندازه پیکسل در حدود ۴ متر است. بنابراین، دورآفت‌های سمت کم‌دقت‌تر از جابه‌جایی‌های LOS هستند.

گرچه این فن صحت کمتری نسبت به فن تداخل‌سنجی راداری دارد، اما می‌تواند استحکام هندسی دستگاه معادلات نوشته شده به‌منظور محاسبه مؤلفه‌های شمالی-جنوبی و شرقی-غربی جابه‌جایی را بالا ببرد و از آنجا که جابه‌جایی را در راستای سمت اندازه‌گیری می‌کند، می‌تواند در حکم مکمل فن تداخل‌سنجی راداری به کار رود. از مزایای این روش حساسیت کمتر به

در رابطه (۴)  $B_{\parallel 0}$  مؤلفه خط‌مبنا موازی برای نقطه‌ای روی سطح مرجع ( $h=0$ ) است (شکل ۱) در مورد دگرشکلی رخ داده در زمان بین دو تصویربرداری فاز اندازه‌گیری شده  $\phi'$  با خط پایه  $B'_{\parallel}$  اختلاف  $\Delta r$  در رنج را خواهد داشت. بنابراین فاز دگرشکلی به‌صورت رابطه (۵) خواهد بود:

$$\phi' = -\frac{4\pi}{\lambda}(B'_{\parallel} + \Delta r) \quad (5)$$

$B'_{\parallel}$  خط‌مبنا موازی مربوط به زوج دگرشکلی است. رابطه بین فاز زوج تداخل‌سنجی توپوگرافی و زوج تداخل‌سنجی هم‌لرزه‌ای به‌صورت رابطه (۶) است:

$$\phi' = \phi \frac{B'_{\parallel}}{B_{\parallel}} + \frac{4\pi}{\lambda} \Delta r \quad (6)$$

در رابطه (۶)  $B_{\parallel}$  خط‌مبنا موازی مربوط به زوج توپوگرافی است.

نظر به اینکه مؤلفه‌های موازی و عمودی خط پایه با زاویه دید و زاویه توجیه خط پایه بیان می‌شود و با نادیده انگاشتن اختلاف زاویه کوچک ناشی از توپوگرافی، فاز نتیجه شده را می‌توان به‌صورت رابطه (۷) نوشت:

$$\phi' = \phi \frac{B'_{\perp 0}}{B_{\perp 0}} + \frac{4\pi}{\lambda} \Delta r \quad (7)$$

در رابطه (۷)  $B'_{\perp 0}$  مؤلفه عمودی خط‌مبنا برای زوج دگرشکلی و  $B_{\perp 0}$  مؤلفه خط‌مبنا عمودی برای زوج توپوگرافی است. پس فاز ناشی شده از دگرشکلی  $\Delta r$  به‌صورت رابطه (۸) خواهد بود:

$$\phi_{\Delta r} = \phi' - \frac{B'_{\perp 0}}{B_{\perp 0}} \phi \quad (8)$$

رابطه (۸)، معادله پایه تداخل‌سنجی تفاضلی است.

که این مؤلفه در جهت ساعت‌گرد از راستای شمال مثبت در نظر گرفته می‌شود،  $\lambda$  زاویه میل رادار در نقطه بازتابش و  $dlos$  خطای اندازه‌گیری است (برای مثال می‌تواند ناشی از شناخت نادقیق مدارهای ماهواره، تأخیرات جوی، هم‌چسبی کم، خطای DEM و مانند آن باشد). دورافت‌های سمت  $dazo$  تصویری از مؤلفه‌های افقی بردار جابه‌جایی نسبت به بردار راستای حرکت ماهواره (Heading) است (گنزالس و همکاران، ۲۰۰۹) (رابطه ۱۰).

$$U_n \cos \varphi + U_e \sin \varphi + \delta azo = dazo \quad (10)$$

در رابطه (۱۰)  $\delta azo$  بیانگر خطای اندازه‌گیری سمت-دورافت است. کمینه خطای اندازه‌گیری، به اندازه کسری از طول موج رادار برای اندازه‌گیری‌های LOS (فاز) و کسری از اندازه یک پیکسل برای اندازه‌گیری‌های سمت-دورافت (دامنه) است.

بعد از حذف خطاهای سامان‌مند، داده‌های به‌دست آمده از DInSAR تبدیل به سه مؤلفه هم‌لرزه‌ای  $U_i, i=1,2,3$  می‌شود. برای هر پیکسل تصویر اینترفروگرام، یک دستگاه معادلات خطی شامل دو معادله برای جابه‌جایی‌های LOS به‌دست آمده از مدارهای بالارو و پایین‌رو (رابطه ۹) و یک معادله برای سمت-دورافت حاصل از مدار پایین‌رو حل می‌شود. مؤلفه‌های شمالی، شرقی و عمودی میدان جابه‌جایی هم‌لرزه‌ای منجر به تصاویری که در شکل (شماره ۳) نشان داده شده است، می‌شود. وضعیت تصویربرداری ماهواره Envisat به‌گونه‌ای است که دورافت‌های سمت، حساس به جابه‌جایی‌های شمالی جنوبی است. حال آنکه اندازه‌گیری‌های در جهت دید ماهواره به‌شدت حساس به جابه‌جایی‌های عمودی و کمی کمتر نسبت به جابه‌جایی‌های شرقی-غربی و بسیار کمتر نسبت به جابه‌جایی‌های شمالی-جنوبی است.

ناهمبستگی تصویری، بی‌نیازی به بازیابی فاز و امکان دستیابی به میدان جابه‌جایی در ناحیه مرکزی و نزدیک به گسل، که معمولاً فرائزها از دست می‌روند، است. علاوه بر این، برآورد دورافت‌های حس‌گر (ASAR, Advanced Synthetic Aperture Radar) می‌تواند به صحتی بیش از 1/50 پیکسل در جهت برد (شرقی-غربی) و سمت (شمالی-جنوبی) برسد. به‌عبارتی صحتی معادل 14cm و 7.5 cm در این دو راستا حاصل می‌شود (ورنر و همکاران، ۲۰۰۵). با توجه به مقدار خطای این روش، فن اخیر فقط برای زلزله‌های بزرگ که سیگنال تغییرشکل‌شان بزرگ است، مناسب است.

##### ۵ بازسازی میدان جابه‌جایی سه‌بعدی

با استفاده از دو یا سه مشاهده مستقل جابه‌جایی به‌دست آمده از هندسه‌های دید متفاوت، امکان بازسازی مدل جابه‌جایی سه‌بعدی، میسر می‌شود (فیلکو و همکاران، ۲۰۰۱؛ رایت و همکاران، ۲۰۰۴). ترکیب فاز تداخل‌سنجی عبور بالارو و پایین‌رو که حساس به حرکت‌های عمودی و شرقی-غربی است و دورافت‌های سمت که حساس به حرکت‌های شمالی-جنوبی است، به‌منظور بازسازی مدل جابه‌جایی سه‌بعدی مفید است.

در این تحقیق با استفاده از دو تصویر رنج به‌دست آمده از عبور بالارو و پایین‌رو و داده سمت-دورافت مربوط به زوج تصویر عبور پایین‌رو، مؤلفه‌های اورتوگونال، میدان جابه‌جایی سه‌بعدی  $U_i(e,n)$  که  $i=n,e,u$  مختصات پایه شمال (North) (n)، شرق (East) (e) و بالا (Up) (u) است، بازیابی می‌شود. مؤلفه  $dlos$  که تصویر مؤلفه جابه‌جایی  $U_i$  در راستای خط دید ماهواره (LOS, Line of Sight) است به صورت رابطه (۹) محاسبه می‌شود (گنزالس و همکاران، ۲۰۰۹):

$$[U_n \sin \varphi - U_e \cos \varphi] \sin \lambda - U_u \cos \lambda + \delta los = dlos \quad (9)$$

در رابطه (۹)،  $\varphi$  سمت راستای حرکت ماهواره است

## ۶ بررسی موردی

منطقه مورد بررسی در این تحقیق شهر بم است. شهر بم در جنوب غربی ایران در استان کرمان در محدوده عرض جغرافیایی 29 تا 29°15' شمالی و در محدوده طول جغرافیایی 58°10' تا 58°35' شرقی قرار دارد.

## ۷ داده‌ها و فرایندهای پردازش داده

مجموعه داده مورد استفاده در این تحقیق، داده‌های اداری به‌دست آمده از ماهواره تصویربرداری Envisat است. این تصاویر برای بررسی زلزله بم به‌صورت رایگان از سوی آژانس فضایی اروپا در اختیار مجامع علمی و تحقیقاتی قرار گرفت. فهرست تصاویر مربوط در جدول ۱ آمده است. با استفاده از این تصاویر دو اینترفروگرام هم‌لرزه‌ای یکی با استفاده از تصاویر به‌دست آمده از مدارهای پایین‌رو و دیگری به‌دست آمده از مدارهای بالارو تولید شد. زوج تصاویر مربوط به اینترفروگرام هم‌لرزه‌ای عبور پایین‌رو؛ سوم دسامبر ۲۰۰۳ و هفتم ژانویه ۲۰۰۴ و زوج تصاویر هم‌لرزه‌ای مربوط به عبور بالارو؛ شانزدهم نوامبر ۲۰۰۳ و بیست و پنجم ژانویه ۲۰۰۴ است (جدول ۱). هر دو اینترفروگرام به وضوح طرح تغییر شکل هم‌لرزه‌ای زلزله بم را نشان می‌دهد. فرائزهای ناشی از توپوگرافی برای اینترفروگرام عبور بالارو با استفاده از اطلاعات ارتفاعی رقومی به‌دست آمده از (SRTM, Shuttle radar topography mission) و برای اینترفروگرام پایین‌رو از اینترفروگرام‌های پیش‌لرزه‌ای به‌دست آمده، محاسبه شد و در آخر اثرات آن از روی اینترفروگرام‌های مربوط حذف شد.

جدول ۱. مشخصات تصاویر استفاده شده در این تحقیق.

شماره مدار	تاریخ
عبور بالارو	
8956	Nov. 16 <sup>th</sup> 2003
9958	Jan. 25 <sup>th</sup> 2004
عبور پایین‌رو	
6687	Jun. 11 <sup>th</sup> 2003
9192	Dec. 3 <sup>th</sup> 2003
9693	Jan. 7 <sup>th</sup> 2004

## ۸ مراحل پردازشی تداخل‌سنجی راداری

اولین مرحله از مراحل پردازشی تداخل‌سنجی، انتخاب تصاویر مناسب است. پس از این مرحله دو تصویر راداری (SLC, Single look complex) انتخاب شده درحکم زوج هم‌لرزه‌ای وارد نرم‌افزار (DORIS, Address-Site) می‌شود. این زوج مربوط به مشاهدات صورت گرفته قبل و بعد از زلزله است. مجموعه تصاویر استفاده شده در این تحقیق در جدول ۱ آمده است.

بعد از انتخاب زوج تصویر مناسب برای پردازش، در مرحله بعد محدوده منطقه مورد بررسی از روی زوج تصاویر انتخاب شده استخراج می‌شود. هر تصویر SLC حس گر ASAR دارای ابعاد پیکسلی در حدود ۲۶ متر در راستای رنج و ۵.۱۶۷ متر در راستای سمت است.

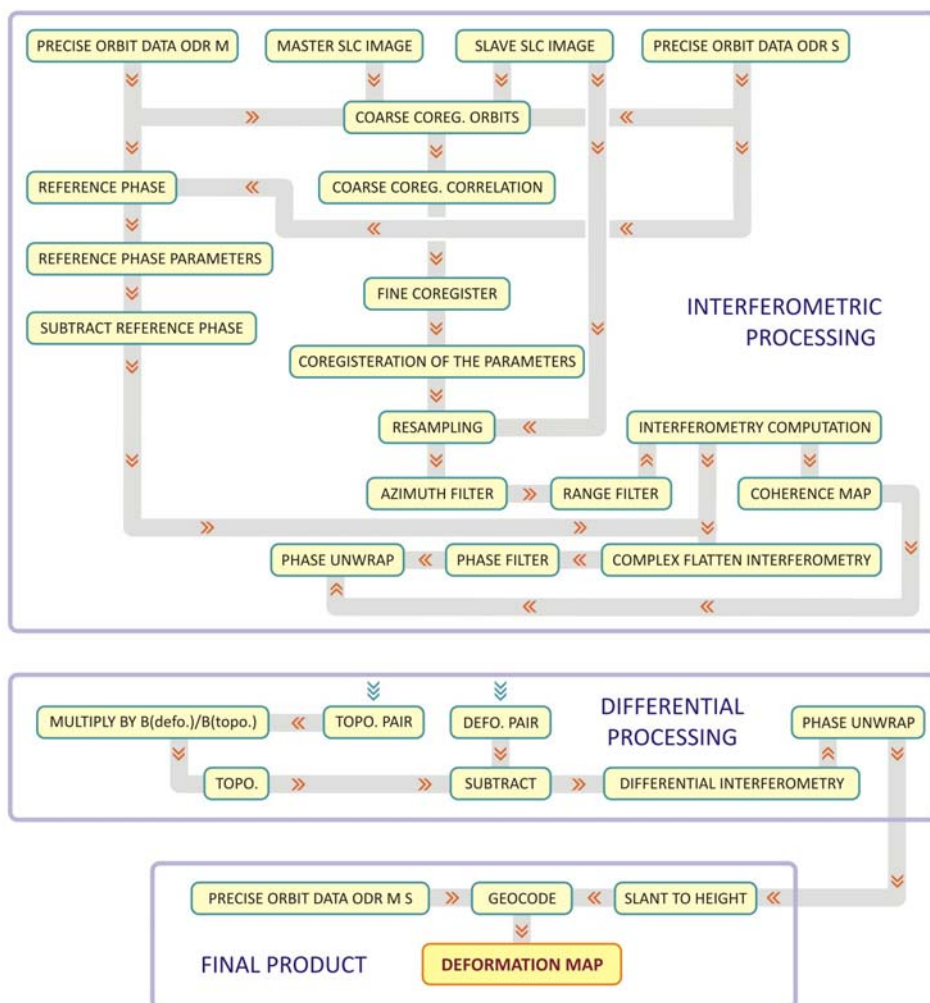
در ادامه هر تصویر با نرم‌افزار DORIS خوانده و به قالب (فرمت) داخلی نرم‌افزار تبدیل می‌شود. به دنبال آن فرایند میانگین‌گیری با استفاده از کرنل‌هایی با ابعاد متفاوت دید چندگانه (Multi-looking) روی تصاویر Slave و Master اجرا می‌شود تا پیکسل‌های مربعی با ابعاد تقریبی ۲۰ متر در هر دو راستا حاصل شود. در این فرایند داده‌ها در هر دو راستا میانگین‌گیری می‌شوند. فرایند دید چندگانه در کاهش نوفه نقطه‌ای (Speckle) محصولات تداخل‌سنجی نیز مؤثر است. برای مجموعه داده بم فاکتور میانگین‌گیری ۱ در راستای رنج و ۵ در راستای سمت در نظر گرفته شد.

پردازش تصاویر راداری شامل مراحل خواندن تصاویر راداری، استفاده از پارامترهای مداری، ثبت دو تصویر نسبت به یکدیگر، نمونه‌برداری مجدد تصویر Slave، فیلتر کردن در راستاهای رنج و سمت، تولید اینترفروگرام، حذف مؤلفه زمین مسطح است. این مراحل برای زوج پیش‌لرزه‌ای (تصاویر 11<sup>th</sup> Jun. 2003 و 3<sup>th</sup> Dec. 2003) و هم‌لرزه‌ای (تصاویر 3<sup>th</sup> Dec. 2003 و 7<sup>th</sup> Jan. 2004) عبور پایین‌رو به‌طور جداگانه اجرا می‌شود و درنهایت

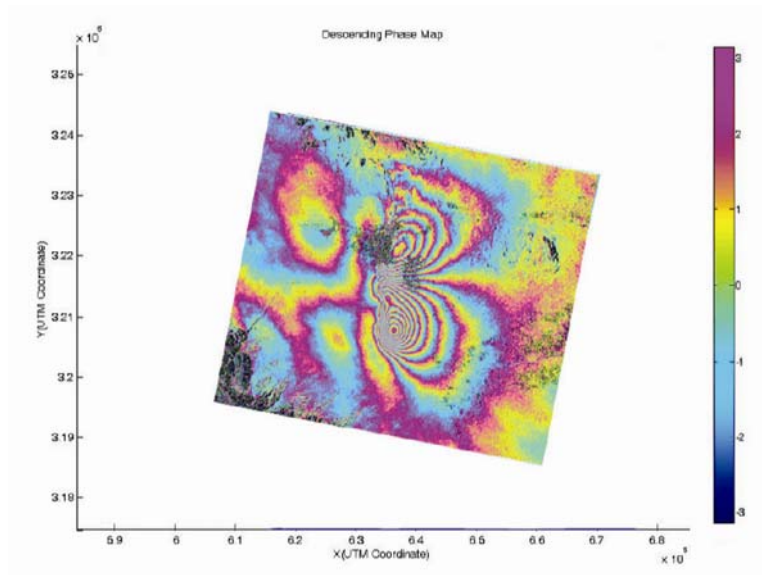
در مراحل تداخل سنجی برای زوج تصاویر عبور بالارو برای حذف اثر توپوگرافی از روی اینترفروگرام عبور پایین رو از روش دو عبوره استفاده شد. در این روش از اطلاعات رقومی ارتفاعی (DEM, Digital Elevation Model) ۹۰ متری منطقه به دست آمده از SRTM، برای حذف مؤلفه توپوگرافی استفاده شد. تصویر فاز دگرشکلی محاسبه شده برای عبور پایین رو و بالارو در شکل ۲ و ۳ نمایش داده شده است. در این تصاویر فرانژهای ناشی از دگرشکلی نمایان است. هریک از این فرانژها جابه جایی ۲۸ سانتی متر پوسته زمین را نشان می دهد.

تفاضل بین اینترفروگرامها محاسبه می شود. به دنبال تفاضل گیری اینترفروگرامها، اینترفروگرامهای به دست آمده زمین مرجع (Geo referencing) می شوند. اجرای این مراحل در سیستم عامل لینوکس صورت گرفت. چارت ۱، مراحل پردازشی DInSAR را نشان می دهد. این چارت براساس روش تفاضلی سه عبوره است. در این روش پس از پردازش تداخل سنجی روی هر دو زوج پیش لرنزهای و هم لرنزهای، به منظور حذف اثر توپوگرافی از روی اینترفروگرام هم لرنزهای اینترفروگرام زوج پیش لرنزهای از آن کم می شود تا اینترفروگرام دگرشکلی حاصل شود.

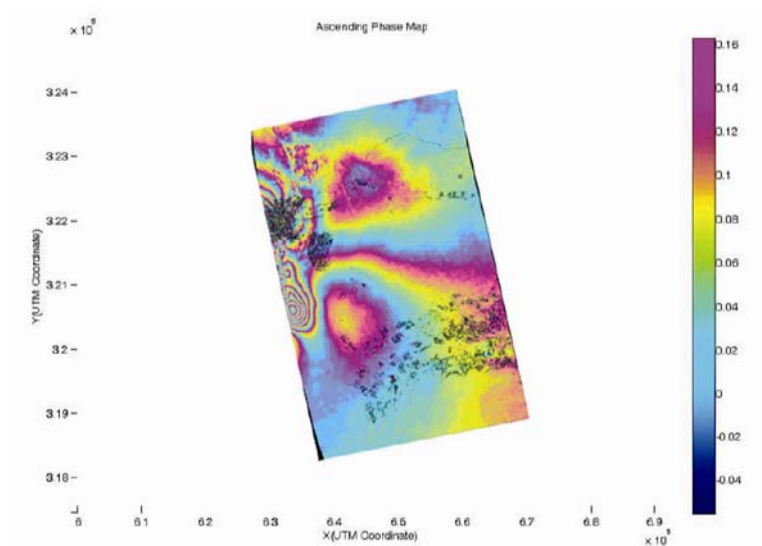
چارت ۱. مراحل پردازشی InSAR.







شکل ۲. تصویر فاز به‌دست آمده از مرحله تفاضل‌گیری فاز.



شکل ۳. تصویر فاز دگرشکلی مربوط به عبور بالاگذر. این اینترفروگرام با استفاده از روش تداخل‌سنجی دو عبوره به‌دست آمده است.

### ۹ محاسبه تصویر سمت-دورآفت

با استفاده از ضرایب چندجمله‌ای به‌دست آمده از مرحله ثبت هندسی دقیق، تصویر سمت-دورآفت محاسبه می‌شود. لازم به ذکر است که دورآفت محاسبه شده از این چندجمله‌ای علاوه بر جابه‌جایی ناشی از دگرشکلی هم‌لرزه‌ای، دربردارنده انتقال تصویر نیز هست. لذا انتقال بین تصاویر که با استفاده از اطلاعات دقیق مداری در

مرحله محاسبات پارامترهای مداری محاسبه شده است، باید از دورآفت محاسبه شده کسر شود. به‌دلیل اینکه برای تشکیل این تصویر (سمت-دورآفت) تنها جابه‌جایی‌های در راستای سمت ماهواره (راستای پرواز) در نظر گرفته می‌شود، تصویر محاسبه شده سمت-دورآفت نام‌گذاری می‌شود. جدول ۲ انتقال‌های محاسبه شده در نرم‌افزار Doris را برای هر زوج نشان می‌دهد.

جدول ۲. تفاضل گیری انتقال‌های محاسبه شده با استفاده از اطلاعات مداری دقیق و مقادیر هم‌چسبی بین تصاویر برای زوج‌های پردازش شده. همه مقادیر برحسب پیکسل هستند.

Computation Using	Orbits		Correlation		Difference		
	Pair	Azimuth	Range	Azimuth	Range	Azimuth	Range
Pre-seismic(Des)		212	18	213	19	1	1
Co-seismic(Asc)		14262	17	14265	17	3	0
Co-seismic(Des)		-1124	-35	-1124	-36	0	-1

تصاویر فاز و یا AZO کسر می‌شود. تصویر حاصل نسبت سیگنال به نوفه زیادی دارد. شکل ۴ تصاویر فاز عبور بالارو و پایین‌رو و تصویر سمت-دورآفت را قبل و بعد از مرحله Detrending حذف ترند نشان می‌دهد.

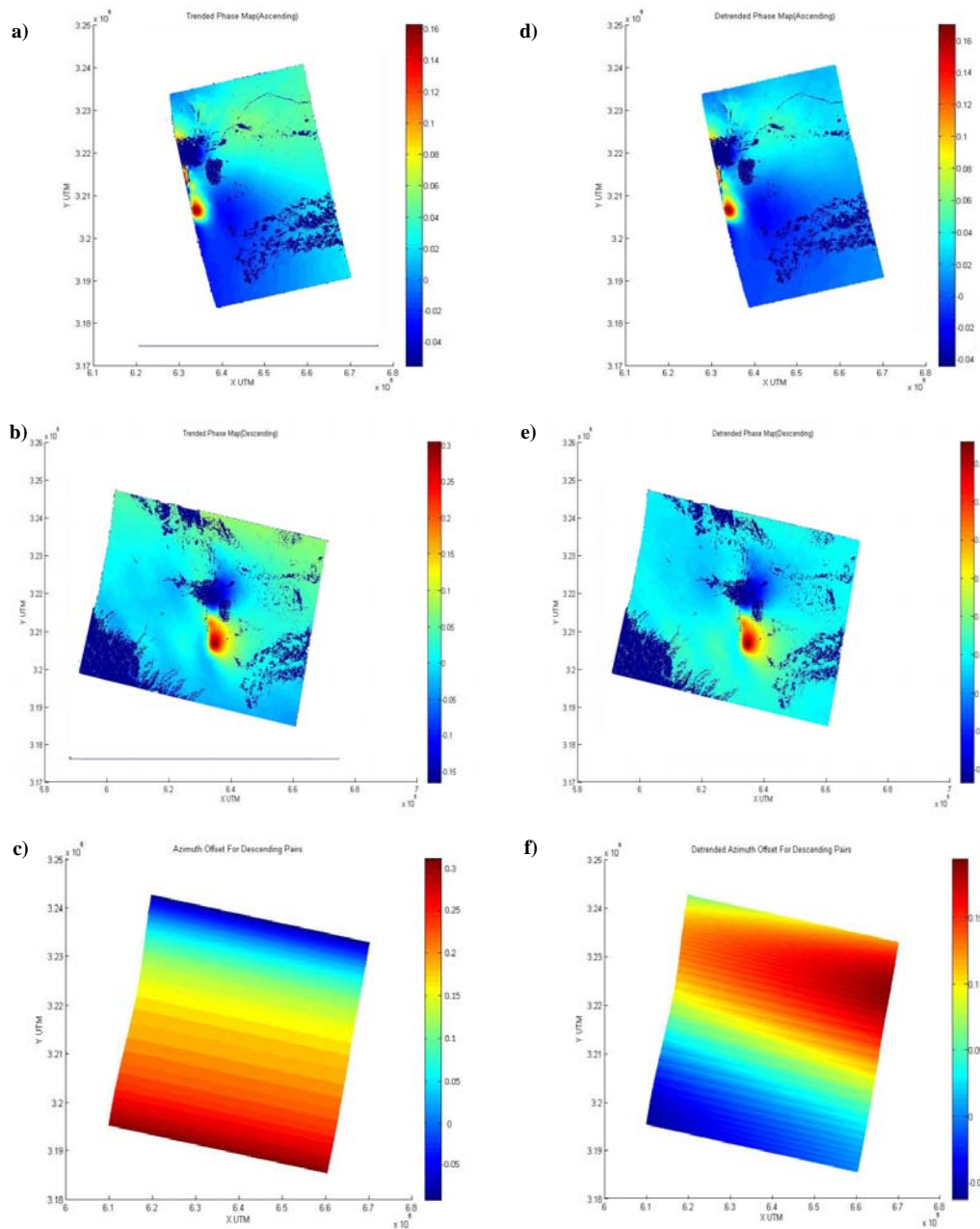
تطابق نداشتن اندازه‌گیری‌ها که باعث نسبی بودن جابه‌جایی‌های محاسبه شده می‌شود، ناشی از خطای جوی و دقیق نبودن اطلاعات مداری است. این منطبق نبودن با محاسبه منطبق نبودن داده و صفحه برازش داده شده در منطقه دور از زلزله و انتظار داشتن مقادیر جابه‌جایی ناچیز در مناطق دور، برآورد می‌شود. جذر میانگین مربعی این نبود تطابق داده و صفحه پیش گفته (به عبارتی انتقال بین مقادیر جابه‌جایی نسبی و مطلق) در حکم برآوردی برای نبود تطابق داده به کار می‌رود. این مقادیر در جدول ۳ آمده است.

#### ۱۰ حذف ترند از داده‌های فاز و سمت-دورآفت

به منظور حذف خطاهای ناشی از نادقیق بودن اطلاعات مداری ماهواره‌ای، لازم است ضمن اجرای فرایند حذف ترند (Detrending) از روی تصاویر صورت گیرد. برای عملی ساختن این فرایند از نقاط دورمیدانی استفاده می‌شود. در اینجا از ۴ نقطه استفاده شد، این نقاط در محدوده‌هایی دور از گسل که مؤلفه جابه‌جایی ناچیز پیش‌بینی می‌شود، انتخاب شد. برای اطمینان حاصل کردن از این امر، تصاویر هم‌چسبی نیز به کار گرفته شد. با استفاده از این تصاویر ابتدا با انتخاب حد آستانه ۰.۸ نواحی با هم‌چسبی کم از تصویر حذف شد و نواحی انتخاب نقاط دورمیدانی محدود به نواحی باقی‌مانده روی تصویر شد. با در نظر گرفتن مقادیر فاز و یا سمت-دورآفت محاسبه شده روی این چهار نقطه، صفحه‌ای روی آن برازش داده می‌شود. صفحه برازش داده شده از کل

جدول ۳. جذر میانگین مربعی انتقال بین مقادیر جابه‌جایی نسبی و مطلق در راستای خط دید ماهواره برای اینترفروگرام‌های بالارو و پایین‌رو و در راستای شمال برای تصویر سمت-دورآفت.

جذر میانگین مربعی (متر)	داده
0.0045	اینترفروگرام عبور بالارو
0.0036	اینترفروگرام عبور پایین‌رو
0.116	سمت-دورآفت عبور پایین‌رو



شکل ۴. نمایش اینترفروگرام‌های عبور بالارو (a)، پایین‌رو (b)، تصویر سمت-دورآفت (c) بعد از حذف ترند و تصاویر فاز عبور بالارو (d)، پایین‌رو (e) و تصویر سمت قبل از اجرای فرایند حذف ترند (f).

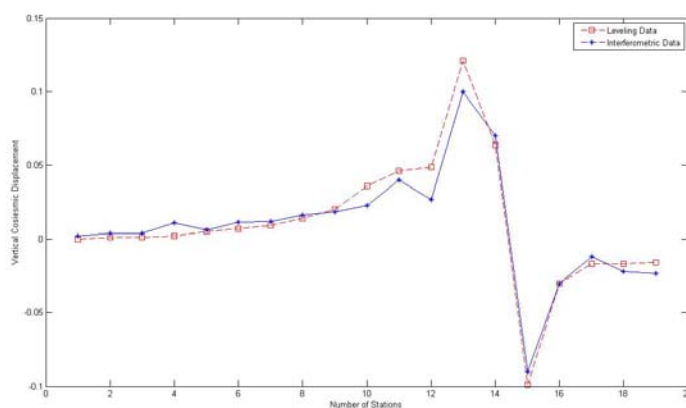
ترازیابی شامل ۹ ایستگاه است. این ترازیابی ۴۰ روز بعد از زلزله انجام شده است. در جدول ۴ مختصات مربوط به ایستگاه‌ها و همچنین جابه‌جایی‌های هم‌لرزه‌ای قائم نسبت به روستای درزین آمده است. نمودار ترسیم شده در شکل ۵ مقادیر جابه‌جایی هم‌لرزه‌ای محاسبه شده از ترازیابی

۱۱ استفاده از داده ترازیابی دقیق به منظور ارزیابی دگرشکلی محاسبه شده با استفاده از داده‌های ترازیابی دقیق به دست آمده از سوی سازمان نقشه‌برداری، مؤلفه فاز دگرشکلی حاصل از اینترفروگرام عبور پایین‌رو مورد ارزیابی قرار گرفت. مسیر

با تلفیق مشاهدات به دست آمده در راستاهای متفاوت و با روابط پیش گفته در بخش ۴ میدان جابه جایی سه بُعدی زمین محاسبه می شود. شکل ۶ جابه جایی افقی و قائم محاسبه شده را نشان می دهد.

دقیق و اینترفروگرام عبور بالارو را نشان می دهد. همین طور که مشاهده می شود اختلاف بین این دو اندازه گیری ناچیز است (معتق و همکاران، ۲۰۰۶).

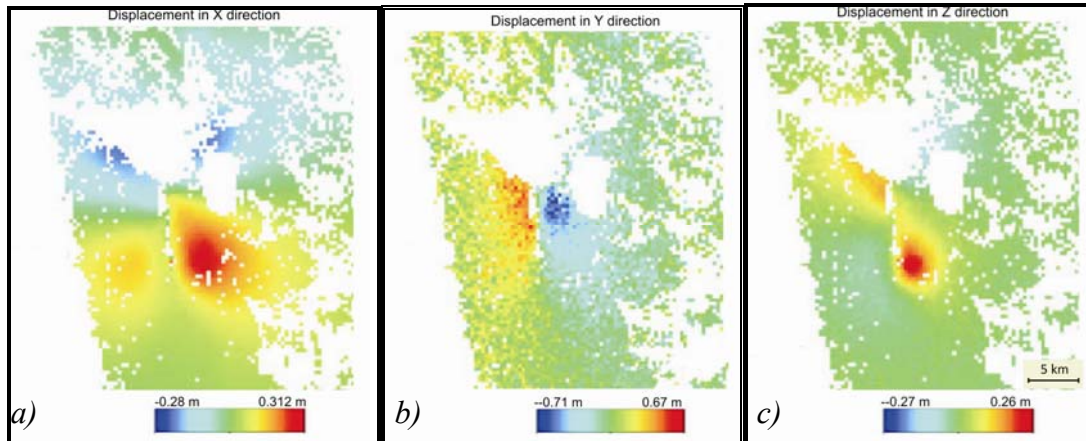
۱۲ استخراج میدان جابه جایی سه بُعدی با تلفیق داده های تداخل سنجی راداری و سمت-دورافت برای منطقه مورد بررسی



شکل ۵. مقایسه جابه جایی های هم لرزه ای ارتفاعی به دست آمده از ترازبایی دقیق و فن تداخل سنجی راداری، محور Y جابه جایی های هم لرزه ای قائم را (بر حسب متر) نشان می دهد.

جدول ۴. مختصات جغرافیایی ایستگاه های ترازبایی و جابه جایی قائم به دست آمده نسبت به روستای درزین (معتق و همکاران، ۲۰۰۶).

Station	Latitude (°)	Longitude (°)	Height (m)	Vertical displacement (m)
Darzin	29.2233	58.085	1394.995	0
1	29.21	58.1017	1367.3142	0.001
2	29.1983	58.1216	1340.205	0.001
3	29.19	58.1366	1319.569	0.002
4	29.1783	58.1533	1299.853	0.005
5	29.165	58.1733	1272.935	0.007
6	29.1583	58.19	1243.367	0.009
7	29.1533	58.21	1219.327	0.014
8	29.1467	58.2283	1201.122	0.02
9	29.14	58.2483	1181.738	0.036
10	29.135	58.2667	1161.404	0.046
11	29.1183	58.27	1153.586	0.049
12	29.1	58.3133	1114.165	0.121
13	29.085	58.3533	1075.207	0.064
14	29.0783	58.3733	1046.35	-0.099
15	29.0583	58.4166	983.381	-0.03
16	29.0517	58.4417	954.112	-0.017
17	29.0283	58.505	897.214	-0.017
18	29.0217	58.5233	882.559	-0.016



شکل ۶. نمایش میدان جابه‌جایی سه‌بعدی؛ (a) میدان جابه‌جایی افقی در راستای E (مولفه شرقی-غربی)، (b) میدان جابه‌جایی افقی در راستای N (مولفه شمالی-جنوبی)، (c) میدان جابه‌جایی افقی در راستای H (قائم)، میدان جابه‌جایی فقط برای محدوده هم‌پوشانی عبور بالارو و پایین‌رو محاسبه می‌شود.

دگرشکلی استخراج شده از تصاویر راداری در عین داشتن دقت مکانی زیاد و به دلیل توان تفکیک زمانی مناسب، روش مطلوبی برای پایش پیوسته تغییرات سطحی در یک دوره زمانی مشخص است. این امر به‌خصوص در مقایسه با روش‌های لرزه‌نگاری نمود بیشتری پیدا می‌کند، چرا که این‌گونه روش‌ها از نظر زمان‌بری و مشکلات اجرایی (دشواری‌های عملیات زمینی و در برخی موارد آسیب رسیدن به محل مورد بررسی) روش‌های دشوارتری به حساب می‌آیند. با پیشرفت فن DInSAR و افزایش کاربرد آن در آینده نزدیک می‌توان گفت که این روش رقیب مناسبی برای فن‌های لرزه‌نگاری خواهد بود. حتی می‌توان گفت در زمینه پایش پیوسته دگرشکلی می‌باید فن DInSAR را بدون رقیب دانست. با این اوصاف اطلاع از نحوه به‌کارگیری تصاویر راداری برای مقاصد پایش دگرشکلی در کشورمان امری ضروری و شایان توجه است که در بخش‌های اولیه این تحقیق به بررسی این مطلب پرداخته شده است.

#### منابع

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, 234 from space

#### ۱۳ نتیجه‌گیری

استفاده از سنجش از دور ماهواره‌ای به دلیل پوشش وسیع و بهنگام بودن آن (توان تفکیک زمانی مناسب) می‌تواند روش مناسبی برای بررسی سازوکار لرزه‌ای زلزله باشد. این تحقیق با استفاده از فن تفاضلی تداخل‌سنجی راداری که از جمله فن‌های نوظهور اما کارآمد در زمینه پایش دگرشکلی است، به بررسی و تعیین میدان جابه‌جایی ناشی از لغزش گسل در منطقه بم پرداخت. برای این منظور همه مراحل پردازشی تداخل‌سنجی تفاضلی راداری (DInSAR) از انتخاب زوج تصاویر تا بازیابی فاز اینترفروگرام دگرشکلی صورت گرفت. با توجه به اینکه مولفه شمالی - جنوبی استخراج شده از تصاویر راداری دقت کمتری نسبت به مؤلفه‌های دیگر دارد، با به‌کارگیری تصویر سمت-دورآفت دقت مؤلفه پیش‌گفته بهبود یافت (فانینگ و همکاران، ۲۰۰۵).

ارزیابی نتایج به‌دست آمده از فن تداخل‌سنجی با فن ترازبازی دقیق نشان داد که فن DInSAR ضمن تأمین پوشش مکانی وسیع و زمانی مطلوب از دقت مکانی زیادی برای کشف بردارهای جابه‌جایی نیز برخوردار است.

- geodetic observations, *Geophysical Research Letters* **28**(16) 2353063–3066.
- Funning, G. J., Parsons, B., Wright, T. J., Jackson, J. A. and Fielding, E. J., 2005, Surface displacements and source parameters of the 2003 Bam, Iran earthquake from Envisat Advanced Synthetic Aperture Radar imagery, *J. Geophys. Res.*, **110** (B9), B09406, doi:10.1029/2004JB003338.
- González, P. J., Camacho, A.G. and Fernández, J., 2009, "Co-seismic three dimensional displacements determined using SAR data: theory and an application test". *Pure and Applied Geophysics*, **166**, 8/9, doi:10.1007/s00024-009-0500-7.
- Jonsson, S., Zebker, H., Segall, P. and Amelung, F., 2002, Fault slip distribution of the 1999 Mw 7.1 Hector Mine earthquake, California, estimated from satellite radar and GPS measurements, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **92**, 1377– 1389.
- Kampes, B., Hanssen, R. F. and Perski, Z., 2003, Radar Interferometry with Public Domain Tools, in: *Fringe 2003*, Italy, December, 2003.
- Michel, R., Avouac, J. P. and Taboury, J., 1999, Measuring ground displacements from SAR amplitude images: Application to the Landers earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, **26**, 875–878.
- Motagh, M., Klotz, J., Tavakoli, F., Djamour, Y., Arabi, S., Wetzell, H. U., Zschau, J., 2006, Combination of precise leveling and InSAR data to constrain source parameters of the Mw = 6.5, 26 December 2003 Bam earthquake, *Pure and Applied Geophysics*, **163**, 1, 1-18.
- Peltzer, G., Crampe', F. and King, G., 1999, Evidence of nonlinear elasticity of the crust from the Mw 7.6 Mani (Tibet) earthquake, *Science*, **286**, 272–276.
- Werner, C., Wegmüller, U., Strozzi, T. and Wiesmann, A., 2005, Precision estimation of local offsets between pairs of SAR SLCs and detected SAR images, in: *International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Seoul, Korea.
- Wright, T. J., Parsons, B. E. and Lu, Z., 2004, Toward mapping surface deformation in three dimensions using InSAR, *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L01607, doi:10.1029/2003GL018827.