

# مطالعه میدان تغییر شکل بعدلرزه‌ای زمین لرزه ۱۳۸۲ بم با استفاده از تکنیک پراکنش کننده‌های دائمی

سمانه شکرزاده<sup>۱</sup>، بهزاد وثوقی<sup>۲</sup> و معصومه آمیغ‌پی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی نقشه برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

<sup>۲</sup> دانشیار، دانشکده مهندسی نقشه برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

<sup>۳</sup> دکترا، دانشکده مهندسی نقشه برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۰۷/۲۹ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۰۱/۲۶

## چکیده

در این مقاله با استفاده از تداخل سنجی راداری، میدان تغییر شکل ناشی از حرکات بعدلرزه‌ای بم در بازه زمانی ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۰ به دست آمده است. بدین منظور از تکنیک پراکنش کننده‌های دائمی برای تولید سری زمانی جابه‌جایی‌ها استفاده شده است. این تکنیک در مواردی که نرخ جابه‌جایی در منطقه کم بوده و پیکسل‌ها دچار عدم همبستگی زمانی می‌شوند مفید است. همچنین خطای توپوگرافی باقیمانده و اثر اتمسفر را تا حدود زیادی تصحیح می‌کند. به دلیل نرخ پایین جابه‌جایی‌های بعدلرزه‌ای این تکنیک برای اندازه‌گیری تغییر شکل سطح زمین بسیار مناسب خواهد بود. بررسی نتایج تغییر شکل پس از زمین لرزه نشان می‌دهد، ماکزیمم مقدار جابه‌جایی در جهت خط دید ماهواره و خلاف جهت خط دید ماهواره، به ترتیب  $0/5 \pm 4/5$  و  $0/5 \pm 4/3$  سانتی‌متر است. بررسی میدان جابه‌جایی به دست آمده در این بازه زمانی بعد از زلزله، آهنگ کاهشی جابه‌جایی‌ها و نزدیک شدن به حالت میان لرزه‌ای را نشان می‌دهد. همچنین نتایج حاصل از مدل‌سازی حرکت بعدلرزه‌ای، نشان‌دهنده برازش توابع لگاریتمی و نمایی به میدان جابه‌جایی به‌دست آمده است.

**کلید واژه‌ها:** تداخل سنجی راداری، تکنیک پراکنش کننده‌های دائمی، اینترفروگرام، تغییر شکل پس از زمین لرزه، سری زمانی

\*نویسنده مسئول: بهزاد وثوقی

Email: vosoghi@kntu.ac.ir

## ۱- پیش‌گفتار

فازی  $40 \times 40$  کیلومتری برای هر مجموعه از داده‌های مساله استفاده کردند. به همین دلیل مقداری از طول موج‌های بلند سیگنال‌های جابه‌جایی حذف شد. در این مقاله با استفاده از مشاهدات تداخل سنجی راداری، میدان جابه‌جایی بعد لرزه‌ای (post-seismic) بم برای ۷ سال پس از زمین لرزه استخراج شده است. به همین منظور از تکنیک باز پراکنش کننده‌های دائمی و نرم‌افزار StaMPS (Stanford Method for Persistent Scatterers) برای تولید سری زمانی جابه‌جایی‌ها استفاده شده است. این روش با استفاده از یکسری فیلترها موجب کاهش خطای توپوگرافی و اتمسفر و به دست آوردن میدان جابه‌جایی دقیق تر شده است. همچنین به منظور کاهش خطای مداری از اطلاعات مداری محاسبه شده توسط دانشگاه دلف و به منظور کاهش سهم اختلاف فاز ناشی از ارتفاع از مدل رقومی SRTM استفاده شده است.

## ۲- تقسیم‌بندی چرخه زمین لرزه

چرخه زمین لرزه به سه دوره اصلی شامل لغزش‌های میان لرزه‌ای (inter-seismic)، لغزش‌های همزمان با زمین لرزه (co-seismic)، و لغزش‌های بعدلرزه‌ای تقسیم می‌شود. در لغزش‌های میان لرزه‌ای در اثر ذخیره شدن تنش در طول سالیان طولانی مقطعی از زمین دچار تغییر شکل (کرنش) می‌شود. پس از اینکه تنش ذخیره شده از مقاومت الاستیکی سنگ‌های موجود بیشتر شد، زمین لرزه و تغییر شکل همزمان با زمین لرزه رخ می‌دهد. لرزش‌های پس از زمین لرزه به تغییر شکل‌هایی گفته می‌شود که در روزها و ماه‌ها و گاهی سال‌های بعد از زمین لرزه اتفاق می‌افتد. با این حال لغزش‌های پس از زمین لرزه سرانجام منجر به بازگشت به حالت لغزش میان لرزه‌ای می‌شود. در تغییر شکل‌های بعدلرزه‌ای تنش حاصل از زمین لرزه برداشته شده است، اما حرکات لایه گوشته به دلیل خاصیت گرانشی برای رسیدن به تعادل ادامه دارد که این حرکات به پوسته فشار وارد نموده و تغییر شکل‌ها و جابجایی‌های پس از زمین لرزه را در سطح زمین ایجاد می‌کند. شکل ۲ حرکت ناشی از این چرخه زمین لرزه را نشان می‌دهد.

زمین لرزه‌ای با بزرگی گشتاوری  $6/6 M_w$  در تاریخ ۵ دی ماه ۱۳۸۲ شهر تاریخی بم را به شدت تخریب کرد. در این ناحیه زمین لرزه تاریخی بزرگی در طول ۲۰۰۰ سال پیش رخ نداده بود (Mostafazade et al., 2004; Funning et al., 2005). وقوع این زمین لرزه را در ابتدا ناشی از فعالیت گسلی می‌دانستند که تقریباً با امتداد شمال-جنوب از میان شهرهای بم و براوات عبور کرده است. اما با حل معکوس معادلات تغییر شکل در یک نیم فضای الاستیک با استفاده از اینترفروگرام‌های راداری ماهواره ENVISAT مشخص شد عامل این زمین لرزه فعالیت گسلی پنهان در زیر شهر بم بوده است که یکی از انشعابات گسل بم محسوب می‌شود (Wang et al., 2004). (Funning et al., 2005). ساز و کار کانونی گسل مسبب زمین لرزه امتدادلغز راست گرد است (شکل ۱) (Talebian & Fielding, 2004).

در کمتر از دو دهه قبل، تداخل سنجی راداری (InSAR) انقلابی بزرگ در زمینه مطالعات تغییر شکل پوسته زمین ایجاد کرد (Gabriel et al., 1989). تکنیک تداخل سنجی راداری، جابه‌جایی سطح زمین را با قدرت تفکیک مکانی بسیار بالایی اندازه‌گیری می‌کند. علی‌رغم مزایای تکنیک تداخل سنجی راداری، تغییر در ماهیت پراکنندگی سطح زمین با گذشت زمان و زاویه میل، به کارگیری این روش را محدود می‌کند. در پایان سال ۱۹۹۰ گروه‌های مختلفی راه‌هایی برای کاهش محدودیت‌های تداخل سنجی راداری ارائه کردند. یک روش تشکیل اینترفروگرام و معکوس کردن آنها برای استخراج جابه‌جایی افزایشی با زمان بود که روش متداول خط مبنای مکانی کوتاه نام گرفت (Lundgren et al., 2001). به دلیل محدودیت‌های روش تداخل سنجی متداول تکنیک بازپراکنش کننده‌های دائمی ارائه شد. این تکنیک در مواردی که نرخ جابه‌جایی در منطقه کم بوده و پیکسل‌ها دچار عدم همبستگی زمانی می‌شوند مفید است (Hooper, 2006).

Fielding et al. (2009) جابه‌جایی بعدلرزه‌ای را برای تقریباً ۳ سال بعد از زمین لرزه بم با روش تداخل سنجی راداری متداول استخراج کردند. آنها برای کاهش طول موج‌های بلند خطای اتمسفر و اطلاعات مداری غیر دقیق از برازش و حذف صفحه

### ۳- تکنیک پراکنش کننده‌های دائمی

پراکنش کننده‌های دائمی عوارضی هستند که ویژگی‌های پراکنشی آنها در طول زمان ثابت است و دچار عدم همبستگی زمانی نمی‌شوند. پیکسل‌هایی وجود دارند که در آنها یک پراکنش کننده در مقدار موج باز پراکنش شده در آن پیکسل غالب است و مانند یک پراکنش کننده نقطه‌ای دائم رفتار می‌کند. شکل ۳ پراکنش کننده‌هایی را که در مقدار فاز برگشتی از پیکسل شرکت دارند، نشان می‌دهد. شکل ۳- الف فاز موج راداری را اگر باز پراکنش کننده‌های درون یک پیکسل به طور تصادفی در طول زمان به اندازه قابل مقایسه با طول موج رادار حرکت کنند، نشان می‌دهد. در شکل ۳- ب بیشترین سهم فاز، مربوط به موجک باز تابش شده از پراکنش کننده دائمی است. نمودار ترسیم شده در زیر این شکل‌ها، فاز دریافتی از پیکسل را در ۱۰۰ بار تکرار نشان می‌دهد. در هر تکرار پراکنش کننده‌های درون پیکسل به طور تصادفی نسبت به هم حرکت کرده‌اند.

در این روش که تکنیک پراکنش کننده‌های دائمی نامیده می‌شود، پیکسل‌هایی پراکنش کننده دائمی هستند، که تاریخچه رفتار فازی آنها منطبق بر یک مدل فرضی از چگونگی تغییر جابه‌جایی در زمان باشد. با استفاده از تکنیک پراکنش کننده‌های دائمی امکان اندازه‌گیری جابجایی زیر سانتی‌متر وجود دارد. این تکنیک در مواردی که نرخ جابه‌جایی در منطقه کم بوده و پیکسل‌ها دچار عدم همبستگی زمانی می‌شوند مفید است. همچنین خطای توپوگرافی باقیمانده و اثر اتمسفر را تا حدود زیادی تصحیح می‌کند. به دلیل نرخ پایین جابه‌جایی‌های پس از زمین‌لرزه این تکنیک برای اندازه‌گیری تغییر شکل سطح زمین بسیار مناسب خواهد بود (Hooper, 2006). به دلیل استفاده از یک مدل تابعی برای رفتار سنجی جابه‌جایی در زمان و تشخیص پراکنش کننده دائمی، دانش تقریبی اولیه از نحوه رفتار جابه‌جایی در زمان مورد نیاز است. در روش پردازش پراکنش کننده‌های دائمی StaMPS که توسط دانشگاه Stanford ارائه شده است، با استفاده از تحلیل فاز می‌توان بسیاری از نقاط پراکنش کننده دائمی را که حتی در مناطق غیر شهری (عاری از بازتابنده‌های گوشه‌ای) قرار دارند، مشخص کرد (Hooper, 2006). در این روش به جای استفاده از یک مدل زمانی برای تغییر شکل از همبستگی مکانی اندازه‌گیری فاز استفاده می‌شود، به همین دلیل در مناطقی که جابه‌جایی دارای رفتار غیر ثابت و نامشخص است می‌توان از این روش استفاده کرد (حقیقت مهر، ۱۳۸۹).

برخلاف روش متداول خط منبای کوتاه، الگوریتم PS (Persistent Scatterers)، در سری زمانی همه اینترفروگرام‌ها را نسبت به یک تصویر پایه تشکیل می‌دهد. در این روش اینترفروگرام‌هایی که تنها در نقاط خاصی همبسته هستند و خط منبای زمانی مکانی بلند دارند بدون توجه به عدم همبستگی زمانی تشکیل می‌شوند. بنابراین توانایی تشکیل اینترفروگرام از تمام جفت تصاویر نسبت به یک تصویر مرجع وجود خواهد داشت (Hooper & Bekaert, 2012).

پس از عدم همبستگی محدودیت مهم دیگر روش تداخل سنجی راداری متداول تغییر تأخیر سیگنال به دلیل انتشار در اتمسفر است، که منجر به فاز اضافی در تصویر می‌شود. بخار آب بیشترین تأثیر را در اثر اتمسفر دارد. پس از تشکیل اینترفروگرام‌ها نسبت به یک تصویر پایه و شناسایی پیکسل PS، سیگنال مربوط به تأخیر اتمسفری با فیلتر کردن فاز نهایی سری زمانی به دست آمده برای هر پیکسل PS، تخمین زده شده و کاهش می‌یابد (Hooper, 2006).

در این روش پردازش پراکنش کننده‌های دائمی StaMPS اثر توپوگرافی با استفاده از مدل رقومی زمین حذف می‌شود. فاز باقیمانده در پیکسل  $\alpha$  در اینترفروگرام  $\alpha$  طبق رابطه زیر نمایش داده می‌شود.  $\Delta\theta_{orb,x,i}$ ,  $\Delta\theta_{def,x,i}$ ,  $\Delta\theta_{am,x,i}$  به فاصله ماهواره وابستگی دارد ولی  $\Delta\theta_{e,x,i}$ ,  $\Delta\theta_{n,x,i}$  به این فاصله غیر وابسته است.

$$\Delta\theta_{int,x,i} = \Delta\theta_{def,x,i} + \Delta\theta_{am,x,i} + \Delta\theta_{orb,x,i} + \Delta\theta_{e,x,i} + \Delta\theta_{n,x,i} \quad (1)$$

در این رابطه  $\Delta\theta_{def,x}$  تغییرات فاز با توجه به جابه‌جایی پیکسل در جهت خط دید

ماهواره،  $\Delta\theta_{am,x,i}$  فاز مربوط به اختلاف در تأخیر اتمسفری بین دو گذر،  $\Delta\theta_{orb,x,i}$  مؤلفه خطای مداری،  $\Delta\theta_{n,x,i}$  مؤلفه نویز و  $\Delta\theta_{e,x,i}$  باقیمانده فاز توپوگرافی نسبت به خطا در مدل رقومی زمین است.

$$\bar{\Delta\theta}_{int,x,i} = \bar{\Delta\theta}_{def,x,i} + \bar{\Delta\theta}_{am,x,i} + \bar{\Delta\theta}_{orb,x,i} + \bar{\Delta\theta}_{n,x,i} \quad (2)$$

نماد بار میانگین نمونه هر مؤلفه و  $\bar{\Delta\theta}_n$  میانگین نمونه  $\Delta\theta_e + \Delta\theta_n$  است و مقداری کوچک فرض می‌شود. با تفاضل دو معادله خواهیم داشت:

$$\Delta\theta_{int,x,i} - \bar{\Delta\theta}_{int,x,i} = \Delta\theta_{e,x,i} + \Delta\theta_{n,x,i} - \bar{\Delta\theta}'_{n,x,i} \quad (3)$$

$\Delta\theta'_n$  مجموع اختلاف میانگین هر مؤلفه و مقدار پیکسل  $\Delta\theta_{def}$ ،  $\Delta\theta_{am}$  و  $\Delta\theta_{orb}$  به اضافه  $\bar{\Delta\theta}_n$  است. خطای فاز به دلیل عدم قطعیت در مدل رقومی زمین متناسب با خط منبای عمودی است، بنابراین خواهیم داشت:

$$\Delta\theta_{e,x,i} = B \Delta\theta_{\perp,x,i} K_{e,x} \quad (4)$$

$K_{e,x}$  ثابت تناسب است که در نهایت به رابطه زیر خواهیم رسید.

$$\Delta\theta_{int,x,i} - \bar{\Delta\theta}_{int,x,i} = B \Delta\theta_{\perp,x,i} K_{e,x} + \Delta\theta_{n,x,i} + \bar{\Delta\theta}'_{n,x,i} \quad (5)$$

با استفاده از تمام اینترفروگرام‌ها می‌توان  $K_{e,x}$  در کمترین مربعات را محاسبه کرد که تنها ترم وابسته به خط منباست.  $\gamma_x$  کمی برای بیان فاز باقیمانده برای هر پیکسل است و با رابطه زیر تعریف می‌شود که  $\Delta\hat{\theta}_{e,x,i}$  تخمینی از  $\Delta\theta_{e,x,i}$  است و N تعداد اینترفروگرام‌های در دسترس می‌باشد.

$$\gamma_x = 1/N \sum_{i=1}^N \exp(j(\Delta\theta_{int,x,i} - \bar{\Delta\theta}_{int,x,i} - \Delta\hat{\theta}_{e,x,i})) \quad (6)$$

به دلیل این که الگوریتم نیازمند فاز PS برای محاسبه میانگین هر مؤلفه است، با هیچ شناختی از مکان پیکسل‌های PS شروع می‌کنیم و با الگوی تکراری مکان آنها را مشخص می‌کنیم. با تعیین حد آستانه‌ای مناسب ابتدا PSهای کاندیدا مشخص و برای هر کاندیدا PS میانگین نمونه از کاندیداهای محلی طبق رابطه ۳ کم می‌شود.  $K_{e,x}$  تخمین زده و  $\gamma_x$  محاسبه می‌شود. در مرحله آخر پیکسل PS بر مبنای  $\gamma_x$  تعیین خواهد شد (Hooper, 2006).

### ۴- استخراج میدان جابه‌جایی حرکات بعدلرزه‌ای بم

در تغییر شکل‌های بعدلرزه‌ای تنش حاصل از زمین‌لرزه برداشته شده است، اما به دلیل خاصیت گرانیوی گویسته برای رسیدن به تعادل به پوسته فشار وارد می‌شود و تغییر شکل‌ها و جابه‌جایی‌های بعدلرزه‌ای را ایجاد می‌کند. حرکت بعدلرزه‌ای، از رفتار ویسکوالاستیک که وابسته به زمان است پیروی می‌کند، در نتیجه نیاز به تشکیل سری زمانی از جابه‌جایی خواهیم داشت. بدین منظور جهت تولید نقشه‌های جابه‌جایی به صورت سری زمانی از روش کمترین مربعات استفاده می‌شود. در این روش نقشه‌های جابه‌جایی نسبت به تاریخ تصویر پایه و به صورت سری تهیه می‌شوند. در واقع هر اینترفروگرام جابه‌جایی سطح زمین را در بازه زمانی بین دو عبور ماهواره بدست می‌دهد و در این راستا ما به مشاهداتی بیشتر از مجهولات می‌رسیم. برای رسیدن به جواب که عبارتست از جابه‌جایی در تاریخ‌های تصویر برداری، از تکنیک کمترین مربعات استفاده می‌شود. در این تکنیک معادله مشاهده عبارتست از:

$$L = Ax \quad (7)$$

که  $L^T = [l_1, l_2, \dots, l_n]$  بردار مشاهدات بوده و هر عضو آن در واقع جابه‌جایی تعیین شده بین دو تصویر و تصویر پایه (master) و پیرو (slave) است. ماتریس A یا ماتریس طرح شامل عناصر ۰، ۱ و -۱ است (معادلات مشاهدات خطی هستند) و ماتریس  $x^T = [x_1, x_2, \dots, x_n]$  مجهولات را شامل می‌شود که هر عنصر آن نقشه جابه‌جایی مربوط به زمان اخذ تصویر است. با توجه به بیشتر بودن تعداد مشاهدات نسبت به مجهولات جواب از طریق حل کمترین مربعات و از رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$x = (A^T A)^{-1} A^T L \quad (8)$$

میدان جابه‌جایی به دست آمده است. از طرفی دقت میدان جابه‌جایی به دست آمده حائز اهمیت می‌باشد.

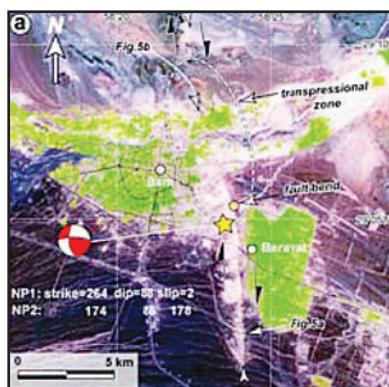
#### ۵- بررسی میدان جابه‌جایی به دست آمده

به منظور بررسی بیشتر دو نقطه در منطقه بالاآمدگی و یک نقطه در منطقه فرونشست انتخاب شده است. برای نقطه‌ای با مختصات ( $28^{\circ} 58' 48''$ ،  $58^{\circ} 22' 48''$ ) در محدوده منطقه (A) که در شکل ۷ نشان داده شده است و در نظر گرفتن سه نقطه دیگر در همسایگی آن، منحنی تغییرات جابه‌جایی رسم شده است. تابع لگاریتمی برازش داده شده بر منحنی نشانه کاهش نرخ جابه‌جایی و رسیدن به زمان تعادل (relaxation time) می‌باشد. جابه‌جایی نقطه در جهت خط دید ماهواره مثبت است و همچنین حرکت پس از زلزله از تابع لگاریتمی پیروی می‌کند. نتایج حاصل از مدل‌سازی در شکل ۱۱ نشان داده شده است. همین روش را برای نقطه‌ای با مختصات ( $28^{\circ} 59' 13''$ ،  $58^{\circ} 22' 26''$ ) در منطقه (A) پیاده کرده و منحنی حاصل، رسم شده که در شکل ۱۲ نشان داده شده است.

برای نقطه‌ای با مختصات ( $29^{\circ} 02' 48''$ ،  $58^{\circ} 21' 25''$ ) در محدوده منطقه (B) که در شکل ۷ نشان داده شده است و در نظر گرفتن چهار نقطه دیگر در همسایگی آن، منحنی تغییرات جابه‌جایی رسم شده است. تابع لگاریتمی برازش داده شده بر منحنی نشانه کاهش نرخ جابه‌جایی و رسیدن به زمان تعادل (relaxation time) است. جابه‌جایی نقطه در خلاف جهت خط دید ماهواره است و همچنین حرکت بعدلرزه‌ای از تابع لگاریتمی پیروی می‌کند (شکل ۱۳).

#### ۶- نتیجه‌گیری

به دلیل نرخ پایین جابه‌جایی‌های بعدلرزه‌ای تکنیک پراکنش‌کننده‌های دائمی برای اندازه‌گیری تغییر شکل سطح زمین بسیار مناسب است. نتایج حاصل از مدل‌سازی حرکت بعدلرزه‌ای، نشان‌دهنده برازش توابع لگاریتمی و نمایی به میدان جابه‌جایی به دست آمده است. به دلیل آهنگ کاهشی تابع لگاریتمی، بررسی میدان جابه‌جایی به دست آمده در بازه زمانی ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۰ بعد از زلزله، آهنگ کاهشی جابه‌جایی‌ها و نزدیک شدن به حالت میان‌لرزه‌ای را نشان می‌دهد. بیشترین مقدار جابه‌جایی در جهت خط دید ماهواره و خلاف جهت خط دید ماهواره، به ترتیب  $0/5 \pm 4/5$  و  $0/5 \pm 3/4$  سانتی‌متر است.



شکل ۱- ساز و کار کانونی گسل شمالی- جنوبی بم (Fu et al., 2004).

در این رابطه P ماتریس وزن مشاهدات است. ماتریس وزن عکس ماتریس وریانس کوریانس است که از مجذور خطای مربعی متوسط میدان جابه‌جایی دور از گسل، که تغییرات جابه‌جایی بسیار ناچیز دارد محاسبه شده است.

#### ۴-۱. معرفی داده‌های راداری مورد استفاده در تحقیق

داده‌های راداری ENVISAT ASAR (باند C دارای طول موج ۵۶ میلی‌متر) استفاده شده در این مطالعه شامل ۱۲ شکل گذر پایین (Descending track)، با شماره مسیر ۱۲۰ در بازه زمانی ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۰ است که از آژانس فضایی اروپا (ESA) (European Space Agency) تهیه شد. مشخصات این گذر در جدول ۱ نشان داده شده است.

به منظور پردازش داده‌های راداری، تاریخ تصویر پایه بر اساس پیشینه‌سازی همبستگی مکانی، زمانی و داپلر در تاریخ ۲۰۰۵/۱۲/۰۷ تعیین شده است. تشکیل اینترفروگرام‌ها نسبت به تصویر پایه صورت گرفت و خط مبنای مکانی عمودی (Perpendicular baseline)، و خط مبنای زمانی (Temporal baseline)، تمام تصاویر نسبت به تصویر پایه محاسبه شد. این اطلاعات در جدول ۲ آورده شده است.

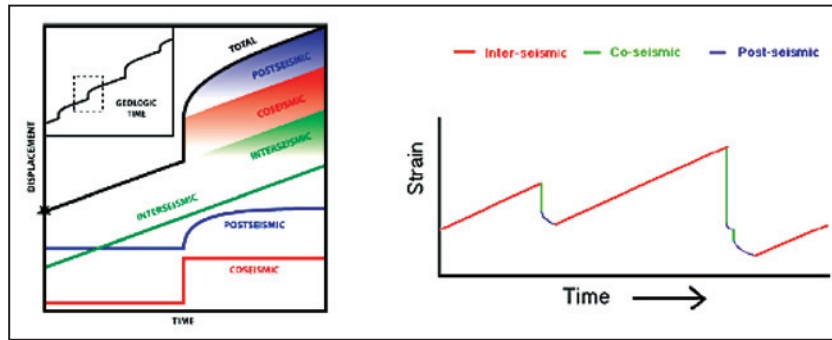
به دلیل در اختیار قرار ندادن اطلاعات مداری محاسبه شده توسط دانشگاه Delft (ODR) از سال ۲۰۰۸ به بعد، برای حذف خطاهای مداری باید از اطلاعات مدارهای اولیه POR (preliminary orbits) و یا مدارهای دقیق VOR (precise orbits) استفاده کرد. مدارهای اولیه سازمان فضایی اروپا پس از سه روز در دسترس قرار می‌گیرد، ولی مدارهای دقیق پس از شش هفته در دسترس کاربر قرار دارد. در این پروژه به دلیل نبود داده‌های مداری ODR برای تصاویر با تاریخ‌های ۲۰۰۹/۰۵/۲۰، ۲۰۰۸/۰۴/۳۰، و ۲۰۱۰/۰۸/۱۸ از داده‌های مداری دقیق VOR که از سازمان فضایی اروپا دریافت شده است، استفاده شد.

#### ۴-۲. تشکیل سری زمانی و استخراج میدان جابه‌جایی

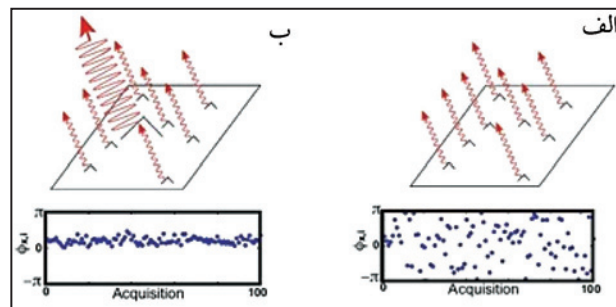
سری زمانی جابه‌جایی‌های به دست آمده، متشکل از ۱۱ اینترفروگرام است که در شکل ۶ نشان داده شده است. در شکل ۷ که جابه‌جایی در جهت خط دید ماهواره (Line Of Sight) را در تاریخ ۲۰۰۷/۰۷/۲۵ یعنی سه سال بعد از زلزله نشان می‌دهد، مختصات گسل بم (استخراج شده توسط Jackson & Bouchon (2006) با مشاهدات GPS) مشخص شده است. گسل مسبب زمین‌لرزه با شماره (1) و گسل قدیمی بم که در ابتدا تصور می‌شد که منجر به زمین‌لرزه شده است با شماره (2) در شکل مشخص شده است. همانطور که در تصویر مشخص است، محدوده (A) در جنوب گسل مسبب زمین‌لرزه بم جابه‌جایی مثبت در جهت خط دید ماهواره و محدوده (B) از منطقه در امتداد گسل جابه‌جایی در خلاف جهت خط دید ماهواره اتفاق افتاده است.

به دلیل نرخ پایین تغییر شکل بعدلرزه‌ای بررسی خطاهای دخیل در اینترفروگرام شامل خطای مداری، فاز ناشی از تأخیر اتمسفری و خطا در مدل رقومی باید در اینترفروگرام کاهش داده شود. روش پراکنش‌کننده‌های دائمی با استفاده از یکسری از فیلترهای بالاگذر و پایین‌گذر خطاهای اتمسفری را کاهش می‌دهد. همچنین با استفاده از یک مدل رقومی اختلاف فاز ناشی از توپوگرافی را به میزان زیادی تصحیح می‌کند. در شکل ۸ میدان جابه‌جایی بعدلرزه‌ای ۵ دی ماه ۱۳۸۲ برای اینترفروگرام در تاریخ ۲۰۱۰/۰۸/۱۸ به دست آمده است. در شکل ۸-الف اینترفروگرام بدون کاهش خطای مداری، خطا در مدل رقومی و تأخیر اتمسفری است. در شکل ۸-ب اینترفروگرام حاصل از کاهش خطای ناشی از تأخیر اتمسفری نشان داده شده است. در شکل ۸-ج اینترفروگرام حاصل از کاهش خطای مداری و مدل رقومی زمین و نیز در شکل ۸-د اینترفروگرام حاصل از کاهش کلیه خطاها شامل خطای مداری، مدل رقومی و تأخیر اتمسفری، نمایش داده شده است. در شکل ۹ نیز نرخ سالیانه جابه‌جایی و تغییر شکل سطحی نشان داده شده است.

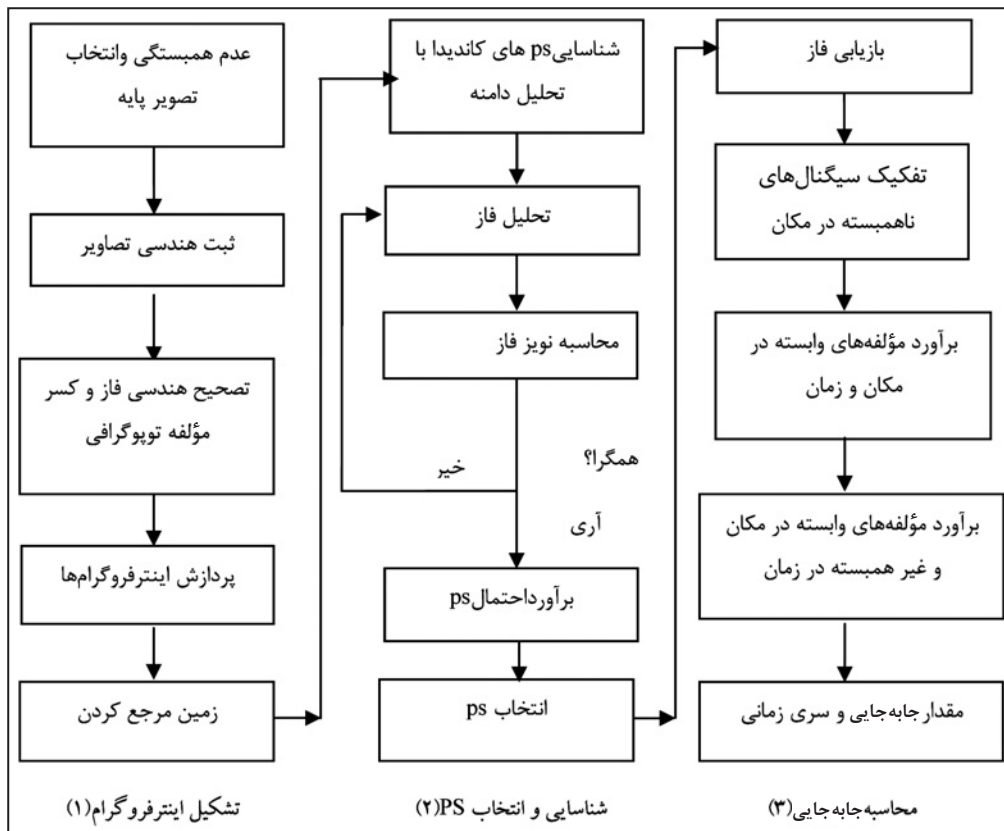
شکل ۱۰ نشان‌دهنده انحراف معیار بدست آمده از میدان جابه‌جایی است که به مراتب کوچکتر از میدان جابه‌جایی به دست آمده بوده و نمایانگر معنادار بودن



شکل ۲- نمودار تغییر شکل های چرخه زمین لرزه در طول زمان.

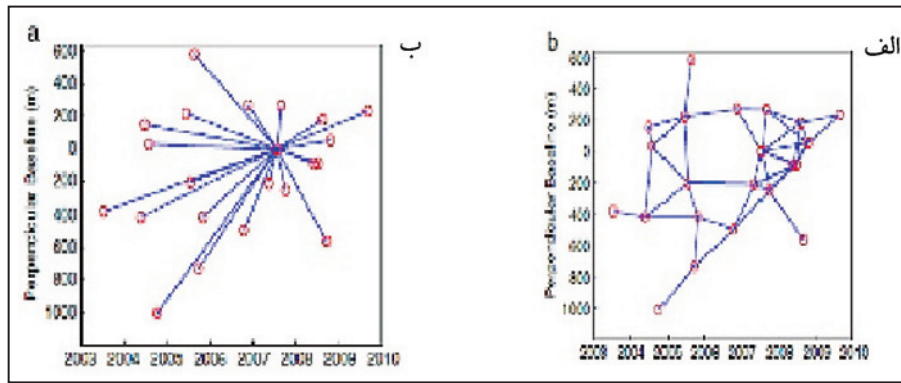


شکل ۳- پراکنش کننده‌هایی را که در مقدار فاز برگشتی از پیکسل شرکت دارند. (الف) پیکسل بدون پراکنش کننده دائمی (ب) پیکسل دارای پراکنش کننده دائمی (Hooper, 2006).

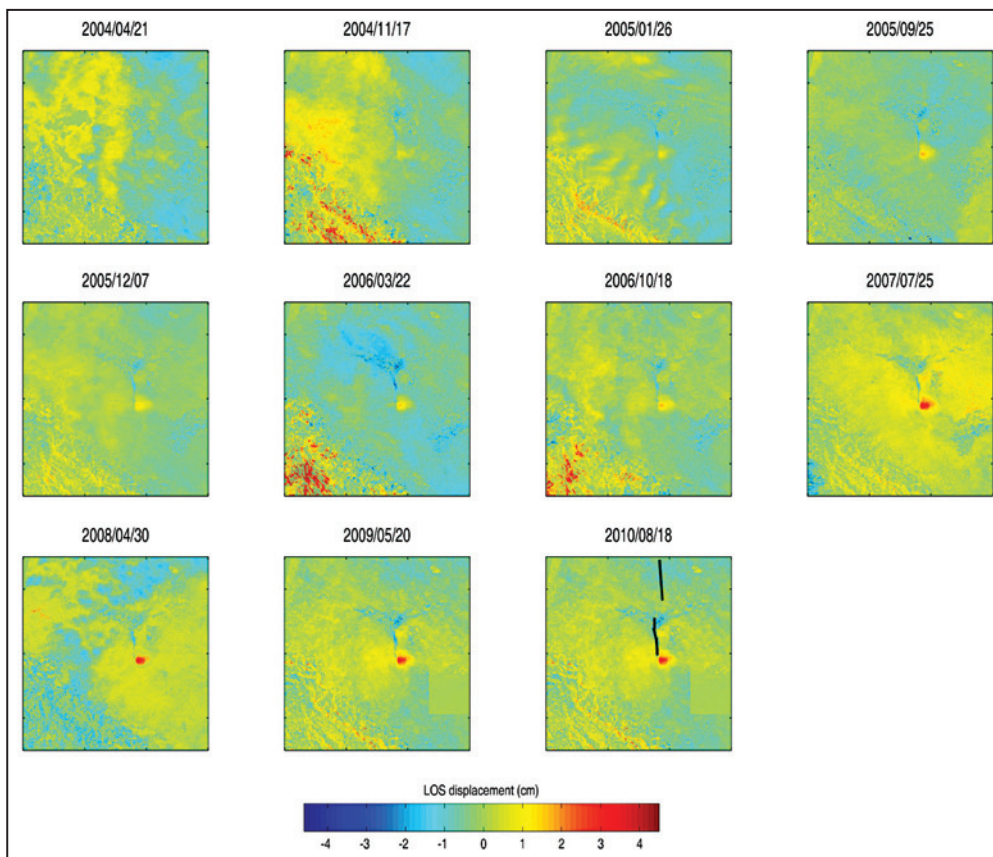


شکل ۴- مراحل اصلی پردازش الگوریتم StaMPS.



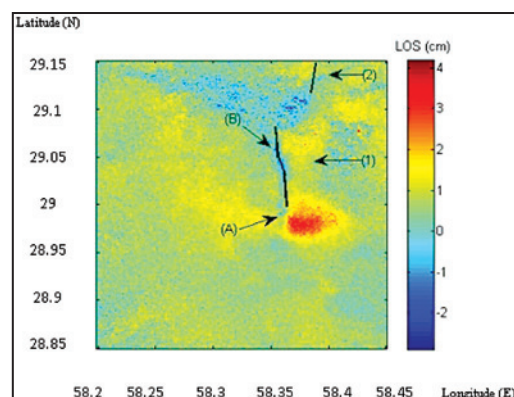


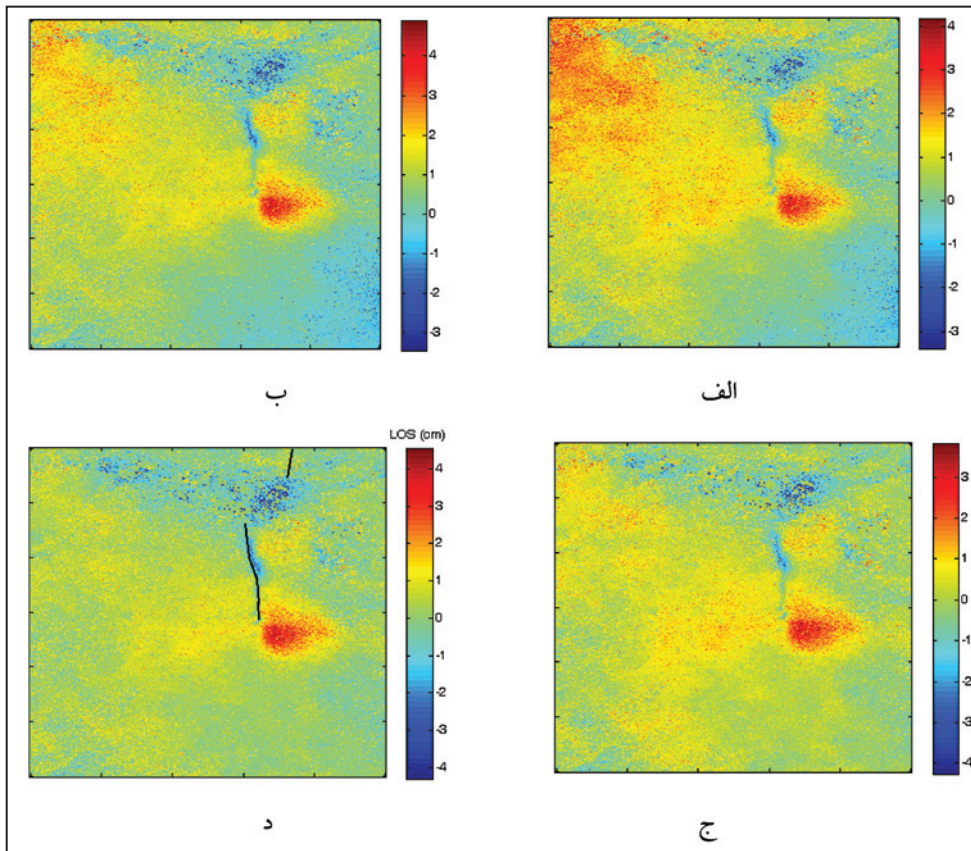
شکل ۵- نمایش خط میناها برای الف) روش خط مینا کوتاه؛ و ب) روش پراکنش کننده ثابت. دایره‌ها نشان دهنده تصاویر و خطوط نمایش اینترفروگرام‌های تشکیل شده است (Hooper & Bekaert., 2012).



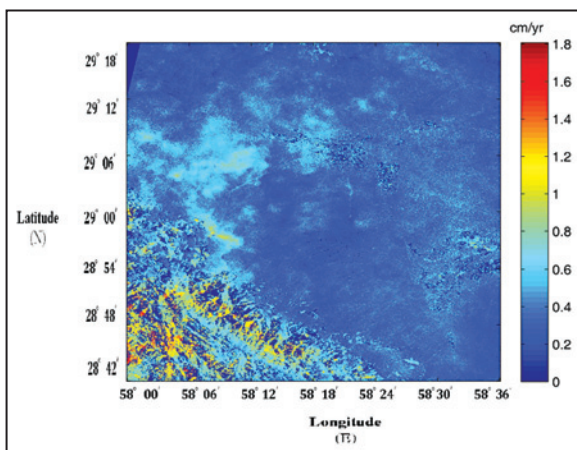
شکل ۶- اینترفروگرام‌های استخراج شده از سری زمانی خطوط سیاه در تصویر آخر، گسل‌های منطقه بم را نشان می‌دهند.

شکل ۷- میدان جابه‌جایی بعد لرزه‌ای ۵ دی ماه ۱۳۸۲، اینترفروگرام مربوط به تاریخ ۲۵/۰۷/۲۰۰۷ است (جابه‌جایی در جهت خط دید ماهواره است).

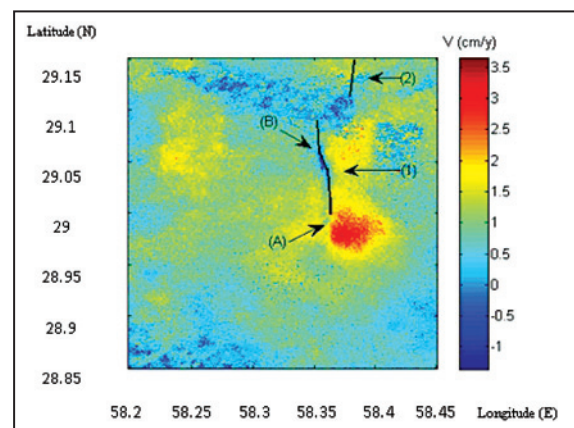




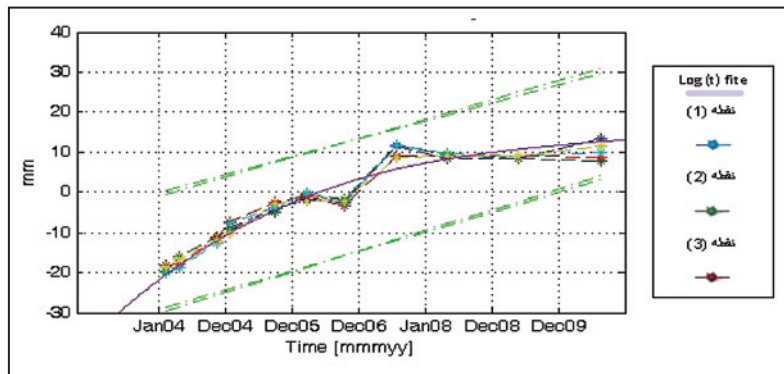
شکل ۸- میدان جابه‌جایی بعدلرزه‌ای ۵ دی ماه ۱۳۸۲، اینترفروگرام مربوط به تاریخ ۲۰۱۰/۰۸/۱۸ است. الف) اینترفروگرام بدون کاهش خطای مداری، خطا در مدل رقومی و تأخیر اتمسفر؛ ب) اینترفروگرام حاصل از کاهش خطای ناشی از تأخیر اتمسفر؛ ج) اینترفروگرام حاصل از کاهش خطای مداری و مدل رقومی زمین؛ د) اینترفروگرام حاصل از کاهش کلیه خطاها شامل خطای مداری، مدل رقومی و تأخیر اتمسفری، خطوط نشان‌دهنده موقعیت گسل مسبب زمین‌لرزه بم و گسل قدیمی بم است.



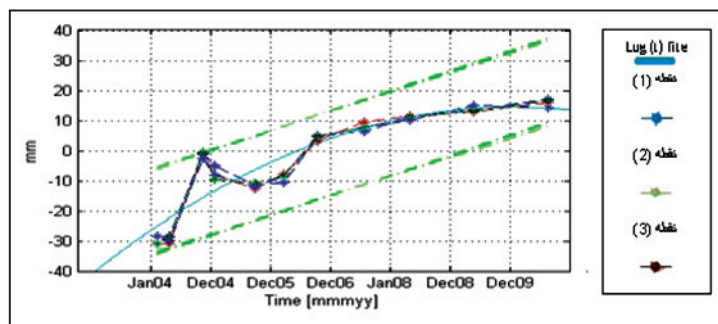
شکل ۱۰- انحراف معیار سالیانه تغییر شکل پس از زمین‌لرزه ۵ دی ماه ۱۳۸۲ در منطقه بم.



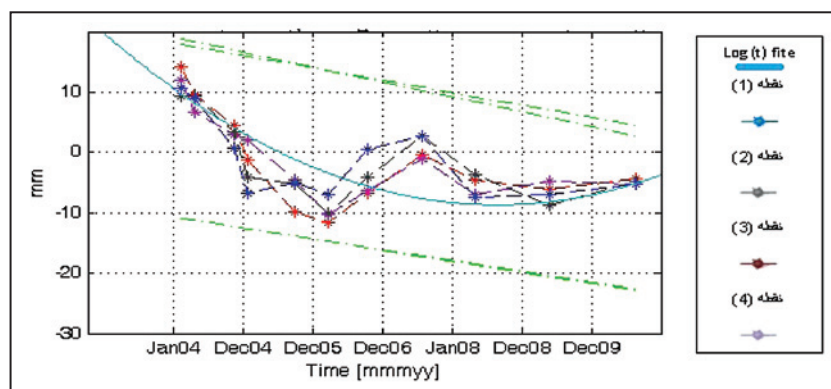
شکل ۹- نرخ سالیانه تغییر شکل پس از زمین‌لرزه ۵ دی ماه ۱۳۸۲ در منطقه بم



شکل ۱۱- منحنی تغییرات جابه‌جایی برای نقطه‌ای با مختصات ( $28^{\circ} 58' 48''$ ،  $58^{\circ} 22' 48''$ ) و منحنی تغییرات جابه‌جایی برای سه نقطه در نزدیکی این نقطه نیز رسم شده است. منحنی لگاریتمی به داده‌ها برازش داده شده است.



شکل ۱۲- منحنی تغییرات جابه‌جایی برای نقطه‌ای با مختصات ( $28^{\circ} 59' 13''$ ،  $58^{\circ} 22' 26''$ ) و منحنی تغییرات جابه‌جایی برای سه نقطه در نزدیکی این نقطه نیز رسم شده است. منحنی لگاریتمی به داده‌ها برازش داده شده است.



شکل ۱۳- منحنی تغییرات جابه‌جایی برای نقطه‌ای با مختصات ( $29^{\circ} 02' 48''$ ،  $58^{\circ} 21' 25''$ ) و منحنی تغییرات جابه‌جایی برای چهار نقطه در نزدیکی این نقطه نیز رسم شده است. منحنی لگاریتمی به داده‌ها برازش داده شده است.

جدول ۱- مشخصات کلی تصاویر.

شماره مسیر	زاویه آزیموت (درجه)	زاویه دید (درجه)	سنجنده
۱۲۰	۱۲۰	۲۳	ASAR



جدول ۲ - مشخصات اینترفروگرام‌های پردازش شده

مدار	تاریخ تصویربرداری	خط مبنای مکانی $B_{\perp}$ (m)	خط مبنای زمانی (day)
۱۰۱۹۴	۲۰۰۴/۰۲/۱۱	۷۰/۰۷	-۶۶۵
۱۱۱۹۶	۲۰۰۴/۰۴/۲۱	۳۵۲/۴	-۵۹۵
۱۴۲۰۲	۲۰۰۴/۱۱/۱۷	-۱۸۶/۲	-۳۸۵
۱۵۲۰۴	۲۰۰۵/۰۱/۲۶	۵۹/۲	-۳۱۵
۱۸۷۱۱	۲۰۰۵/۰۹/۲۵	۹۲/۴	-۷۰
۱۹۷۱۳	۲۰۰۵/۱۲/۰۷	۰	۰
۲۱۲۱۶	۲۰۰۶/۰۳/۲۲	۲۳۸/۳	۱۰۵
۲۴۲۲۲	۲۰۰۶/۱۰/۱۸	-۲۶۵/۹	۳۱۵
۲۸۲۳۰	۲۰۰۷/۰۷/۲۵	۲۴/۳	۵۹۵
۳۲۲۳۸	۲۰۰۸/۰۴/۳۰	-۸۰/۷	۸۷۵
۳۷۷۴۹	۲۰۰۹/۰۵/۲۰	-۳۵/۹	۱۲۶۰
۴۴۲۶۲	۲۰۱۰/۰۸/۱۸	-۲۲/۴	۱۷۱۵

### کتابخانه مهندسی نقشه برداری

حقیقت‌مهر، پ.، ۱۳۸۹ - مطالعه فرونشست زمین ناشی از استخراج آبهای زیرزمینی و چاه‌های نفتی به کمک تداخل سنجی راداری، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده نقشه برداری، رشته مهندسی عمران - نقشه برداری - سنجش از دور.

### References

- Fielding, Eric J., Lundgren, Paul R., bürgmann, R., & Funning Gareth, J., 2009- Shallow fault-zone dilatancy recovery after the 2003 Bam earthquake in Iran, LETTERS, nature, vol. 458 p.1-15.
- Fu, B., Ninomiya, Y., Lei, X., Toda, S. & Awata, Y., 2004- Mapping active fault associated with the 2003 Mw Bam (SE Iran) earthquake with ASTER 3D image. Remote Sensing of Environment, v. 92, p. 153-157.
- Funning, Gareth J. Parsons, B. & Wright, Tim, J., 2005 -Surface displacements and source parameters of the 2003 Bam (Iran) earthquake from Envisat advanced synthetic aperture radar imagery, Science direct, Journal of Geophysical Research, vol 110.
- Gabriel, A. K., Goldstein, R. M., Zebker, H. A., 1989- Mapping small elevation changes over large areas: differential radar interferometry, Journal of Geophysical Research 94 (B7), p. 9183-9191.
- Hooper, A. & Bekaert, D., 2012- Recent advances in SAR interferometry time series analysis for measuring crustal deformation, The International Journal of Integrated Solid Earth Sciences, v.514-517, p.1-13.
- Hooper, A., 2006- Persistent Scatterer Radar Interferometry for Crustal Deformation Studies and Modeling of Volcanic Deformation, PH.D. thesis, Stanford University.
- Jackson, J. & Bouchon, M., 2006- Seismotectonic, rupture process, and earthquake-hazard aspects of 2003 December 26 Bam, Iran, earthquake. Geophysical Journal International, v.166, p.1270-1292.
- Lundgren, P., Usai, S., Sansosti, E., Lanari, R., Tesaro, M., Fornaro, G. & Berardino, P., 2001- Modeling surface deformation observed with synthetic aperture radar interferometry, at Campi Flegrei caldera. Journal of Geophysical Research 106 (B9), 19,355-19,366.
- Mostafazadeh, M., Farahbod, M., Mokhtari, M. & Allamehzadeh, M., 2004- Seismological Aspect of 26 December 2003 Bam Earthquake, J. Seismol. Earthq./ Engin. Special Issue on Bam earthquake, p. 15-21.
- Talebian, M. & Fielding, E., 2004 -The 2003 Bam (Iran) earthquake: Rupture of a blind strike-slip fault, Geophysical Research Letters, VOL. 31.
- Wgna, R., XIA, Y., Grosser, H., Wetzel, H.-U., Zschau, J. & Kaufmann, H., 2004- The 2003 Bam (SE Iran) earthquake: Precise source parameters from satellite radar Interferometry, Geophys. J. Int. 159, p. 917-922.



# Studying 2003 Bam Post-Seismic Deformation field Based on the Persistent Scatterer Radar Interferometry Technique (StaMPS)

S. Shokrzade <sup>1</sup>, B. Voosoghi <sup>2\*</sup> & M. Amighpey <sup>3</sup>

<sup>1</sup> M. Sc., K.N.Toosi University of Technology, Faculty of Geodesy & Geomatics Eng., Tehran, Iran

<sup>2</sup> Associate Professor, K.N.Toosi University of Technology, Faculty of Geodesy & Geomatics Eng., Tehran, Iran

<sup>3</sup> Ph.D., K.N.Toosi University of Technology, Faculty of Geodesy & Geomatics Eng., Tehran, Iran

Received: 2012 October 20

Accepted: 2013 April 15

## Abstract

In this paper, the Bam post-seismic annual deformations in period from 2004 to 2010 have been obtained using synthetic aperture radar interferometry. The time series of deformations have been constructed using Persistent Scatterer Radar Interferometry technique. When displacements rate in the area are low and the pixels are with temporal decorrelation, this technique is more effective. The technique also largely reduces the topography residuals and atmospheric delay. Because of the low rates of post-seismic displacements, this technique is very useful for measuring such earth surface displacements. The results illustrate that the maximum amount of uplift and subsidence displacements for Line Of Sight (LOS) direction during 2004 to 2010 after the earthquake are  $4.5 \pm 0.5$  and  $-4.3 \pm 0.5$  centimeter, respectively. Comparison of displacement fields demonstrates that the displacements reduction rates are approaching to the co-seismic phase. In addition, the results of post-seismic modeling proves that displacements field, follows exponential or logarithmic function.

**Keywords:** Radar Interferometry, Post-seismic Deformations, Persistent Scatterer Technique, Interferogram, Time Series.

For Persian Version see pages 209 to 216

\*Corresponding author: B. Voosoghi; E-mail:vosoghi@kntu.ac.ir