

تعیین جابه‌جایی و بزرگی زلزله سال ۱۳۸۲ بم در جنوب شرقی ایران با استفاده از داده‌های ماهواره با روش تداخل‌سنجی راداری

مریم رهنمون‌فر*، رامک حیدری** و محمدرضا قیطانچی**

*سنجش از دور، دانشکده فنی، دانشگاه تهران

**مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، صندوق پستی ۶۴۶۶-۱۴۱۵۵

(دریافت: ۸۴۹، ۸، پذیرش نهایی: ۸۵، ۴، ۱۳)

چکیده

از آنجا که تصاویر راداری علاوه بر اندازه‌گیری شدت سیگنال، اطلاعات فاز را نیز با خود به همراه دارند، لذا می‌توان با استفاده از اطلاعات فاز و با روش تداخل‌سنجی (اینترفرومتری) راداری از آنها در مطالعات زمین‌لرزه استفاده کرد. در حالی که در اغلب روش‌های ژئودتیکی به اندازه‌گیری‌های مکرر زمینی برای اندازه‌گیری جابه‌جایی پوسته زمین نیاز است، روش تداخل‌سنجی راداری در ضمن ارائه پوشش زمینی وسیع، نیاز به اندازه‌گیری‌های زمینی را مرتفع می‌سازد. در این مطالعه با روش تداخل‌سنجی راداری، مدل نشان دهنده تغییرات زمین در زلزله بم (ایران) ایجاد می‌شود و مورد بررسی قرار می‌گیرد.

با استفاده از این روش بزرگی زلزله بم 6.4 و ممان لرزه‌ای آن $4/3 \times 10^{18}$ به دست آمده است.

در این مطالعه از روش به‌کارگیری ۳ تصویر رادار (از ماهواره Envisat) برای تولید اینترفروگرام استفاده شده است. تصاویر با نرم‌افزار Doris در محیط Linux پردازش شده. در نهایت با شمارش تعداد فرینج‌ها در تداخل‌نگاشت می‌توان میزان جابه‌جایی زمین و میزان بزرگی زلزله را محاسبه کرد، که این کار با گزارش‌های منتشر شده مقایسه شده است.

واژه‌های کلیدی: تداخل‌سنجی راداری، زلزله بم، تصاویر ماهواره Envisat، مدل رقومی زمین

۱ مقدمه

برای اندازه‌گیری دقیق پدیده‌های ژئوفیزیکی، زمین‌لرزه و آتشفشان استفاده کرد.

لی و گلدستاین در ۱۹۹۰ یک مدل خطا برای توپوگرافی ارائه کردند. آنها نشان دادند که حساسیت اندازه‌گیری‌های ارتفاعی با افزایش طول خط مبنا (base line) افزایش می‌یابد. (لی و گلدستاین، ۱۹۹۰).

با پرتاب ماهواره ERS-1 در ژوئیه ۱۹۹۱ تعداد زیادی از داده‌های تداخل‌سنجی راداری در باند C در دسترس محققین قرار گرفت. ماهواره ERS-1 نخستین ماهواره‌ای بود که داده‌های راداری مناسب برای تداخل‌سنجی راداری را در دسترس قرار داد. این مجموعه از داده‌ها امکان بررسی قابلیت‌ها و محدودیت‌های تداخل‌سنجی راداری را فراهم کردند.

زلزله پدیده‌ای دینامیک است و معمولاً در اثر جابه‌جایی پوسته زمین و تغییر میدان شیمیایی و فیزیکی در مرکز زلزله رخ می‌دهد. در هنگام زلزله، در اثر پدیده شکست بین منبع و محیط اطراف انتقال انرژی صورت می‌گیرد. این نوع تغییرات ممکن است اثرات فیزیکی و شیمیایی گوناگونی روی سطح زمین قبل از زلزله و یا در طول آن تولید کند و این، امکان پیش‌بینی و مطالعه زلزله را با استفاده از فن سنجش از دور، فراهم می‌کند.

روش تداخل‌سنجی راداری دیفرانسیلی را نخستین بار گابریئل و همکاران در ۱۹۸۹ با استفاده از ۳ تصویر مورد استفاده قرار دادند. طبق نظر گابریئل در تداخل‌سنجی راداری دیفرانسیلی می‌توان به دقت ۱ سانتی‌متر و حتی بهتر رسید و این بدین معنی است که می‌توان از این روش

متفاوت می‌توان نقشه جزئیات تغییرات سطح زمین با توان تفکیک چند ده متر و دقت چند میلی‌متر تهیه کرد. برای این منظور باید ابتدا دو تصویر با دقت زیر پیکسل به یکدیگر ثبت شوند. سپس با تفاضل فازهای نقاط متناظر اینترفروگرام تولید شود که به دلیل طبیعت تصویربرداری رادار با دریچه مصنوعی این تصاویر دارای اطلاعات مربوط به مقدار مطلق فاز نیست و داده‌های فاز موجود به صورت نهان شده در بازه $[0 - 2\pi]$ قرار دارد. در این مرحله بازیابی مقدار مطلق فاز با استفاده از فاز نهان شده که بازیابی فاز نامیده می‌شود صورت می‌گیرد. پس از این مراحل با دانستن پارامترهای هندسی می‌توان فازهای بازیابی شده را به اطلاعات ارتفاعی تبدیل کرد. این روش برای مطالعه تغییرات سطح زمین به‌خصوص در مواردی که نقشه‌برداری زمینی مشکل است، کاربرد دارد.

در حالی که در اغلب روش‌های ژئودتیکی اندازه‌گیری جابه‌جایی پوسته زمین از قبیل مثلث‌بندی، سه‌پهلوی بندی، ترازیابی، VLBI و سامانه موقعیت‌سنجی جهانی به نقشه‌برداری‌های مکرر زمینی برای اندازه‌گیری جابه‌جایی پوسته زمین نیاز است، روش تداخل‌سنجی راداری در ضمن پوشش دادن منطقه وسیعی از زمین، احتیاج به نقشه‌برداری زمینی ندارد. از طرف دیگر در مقایسه با فونوی همچون سامانه موقعیت‌سنجی جهانی و ترازیابی که اندازه‌گیری نقطه‌ای به‌دست می‌دهند، این روش ضمن اینکه بیان دوبعدی از تغییرات سطح را عملی می‌سازد، وسعتش نسبت به روش‌های نقطه‌ای نیز بیشتر است.

هدف از این تحقیق بررسی کارایی تداخل‌سنجی راداری در مطالعه زلزله و تعیین بزرگی آن است. منطقه مورد مطالعه منطقه‌ای در بم است که در زلزله پنجم دی ماه ۱۳۸۲ ساعت ۵ و ۲۶ دقیقه و ۵۲ ثانیه صبح به وقت محلی دچار ویرانی شدیدی شد. بدین‌منظور تصاویر ماهواره‌ای (ماهواره Envisat) برای تولید مدل رقومی

با پرتاب ماهواره ERS-2 در آوریل ۱۹۹۵ داده‌های راداری با اختلاف زمانی یک روز از داده‌های ERS-1 در اختیار قرار گرفت.

از آن زمان به بعد، تعداد زیادی از محققان به بررسی جنبه‌های گوناگون تداخل‌سنجی راداری با استفاده از داده‌های ماهواره‌های ERS-1 و ERS-2 پرداختند.

اگرچه تحقیقات اولیه با روش تداخل‌سنجی راداری روی برآورد توپوگرافی تأکید داشتند. اما در سال‌های اخیر تحقیقات وسیعی روی استفاده از این فن برای اندازه‌گیری حرکت و تغییرات سطح زمین با استفاده از ماهواره‌های RADARSAT، JERS-1 و ERS-1,2 صورت گرفته است. مجموعه این تحقیقات را مسونت و فایگل در سال ۱۹۹۸ مرور شده است. (مسونت، ۱۹۹۵ و مسونت و فایگل، ۱۹۹۸).

کارهای زیادی در مورد زلزله بم با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری در جهان صورت گرفته است. از جمله می‌توان به کار فیلدینگ و همکاران اشاره داشت که روی شکستگی‌ها و مناطق خرد شده بر اثر این زلزله کار کرده‌اند. (فیلدینگ و همکاران، ۲۰۰۴). همچنین اولین کاری که در این مورد به چاپ رسید، کار طالبیان و همکاران بود. (طالبیان و همکاران، ۲۰۰۴).

امروزه اغلب ماهواره‌های سنسجش از دور در محدوده مرئی عمل می‌کنند و خورشید تأمین‌کننده انرژی آنهاست، در حالی که ماهواره‌های راداری خود تأمین‌کننده انرژی خود هستند، به صورت فعال، زمین را مورد تابش قرار می‌دهند و امواج بازگشتی را ضبط می‌کنند. بنابراین امکان تصویربرداری در شب با این تصاویر وجود دارد و در ضمن چون طول موج رادار (معمولاً یک میلی‌متر تا یک متر) حدود ۱۰۰۰۰۰ برابر بلندتر از طول موج امواج مرئی است امکان تصویربرداری در شرایط ابری نیز با این تصاویر وجود دارد.

در این روش با تفاضل اطلاعات فاز در دو عبور

جهت دید است. بنابراین:

$$\Delta\phi_{13} = \frac{4\pi}{\lambda} b_{\Pi} \quad (3)$$

$$\Delta\phi_{12} = \frac{4\pi}{\lambda} a_{\Pi} \quad (4)$$

$$\frac{\Delta\phi_{12}}{\Delta\phi_{13}} = \frac{a_{\Pi}}{b_{\Pi}} \quad (5)$$

که در این معادله a_{Π} و b_{Π} مؤلفه‌های موازی خط مبنا هستند.

فرض کنیم که سطح زمین در مشاهده سوم تغییر کرده است. بنابراین برای تداخل‌نگاشت دوم، علاوه بر اختلاف فاز مربوط به توپوگرافی، فاز اضافی هم مربوط به جابه‌جایی سطح Δr وجود دارد. بنابراین:

$$\Delta\phi_{23} = \frac{4\pi}{\lambda} (b_{\Pi} + \Delta r) \quad (6)$$

با حذف اثر توپوگرافی با کم کردن دو تداخل‌نگاشت به دست آمده داریم:

$$\Delta\phi_{13} - \frac{b_{\Pi}}{a_{\Pi}} \Delta\phi_{12} = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta r \quad (7)$$

پس از به دست آوردن تداخل‌نگاشت و محسوب داشتن این نکته که هر فرینج برابر اختلاف فاز 2π است، داریم:

$$\Delta\phi = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta r \Rightarrow 2\pi = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta r \Rightarrow \Delta r = \frac{\lambda}{2} \quad (8)$$

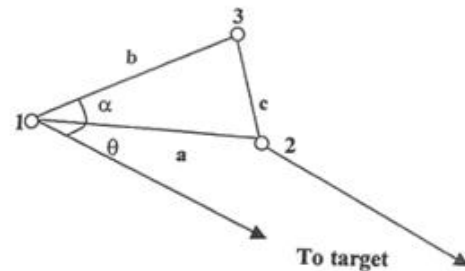
می‌توان با شمردن تعداد فرینج‌ها و ضرب آنها در نصف طول موج جابه‌جایی سطح زمین را محاسبه کرد. دقت این روش تا حد زیادی به نوفه‌های گرمایی و ناهمگنی تصاویر به علت جدایی خط مبنا بستگی دارد. افزایش طول خط مبنا باعث افزایش دقت تغییرات ارتفاعی به دست آمده با این روش می‌شود.

توجه کنند که هر تصویر دارای مجموعه‌ای از اطلاعات فاز و دامنه است. برای کسب تصویر تداخل‌سنجی راداری باید این اطلاعات را در هم ضرب مزدوج مختلط کرد.

زمین و در نتیجه پردازش‌های تداخل‌سنجی راداری دیفرانسیلی مورد استفاده قرار گرفت. پس از این مقدمه در بخش دوم اصول تداخل‌سنجی راداری دیفرانسیلی بررسی می‌شود. در بخش سوم مطالعه موردی زلزله بم و تعیین بزرگی آن با این روش مطرح می‌شود و سرانجام در بخش چهارم نتایج پردازش‌های تداخل‌سنجی راداری روی تصاویر بم بررسی می‌شود.

۲ تداخل‌سنجی راداری دیفرانسیلی

تغییرات سطح زمین با استفاده از تداخل‌سنجی راداری دیفرانسیلی با دقت نسبی چند سانتی‌متر یا کمتر قابل اندازه‌گیری است. این فن بر اساس چند مشاهده تداخل‌سنجی استوار است. هندسه سه مشاهده یک صحنه در شکل (۱) نشان داده شده است (میرباقری، ۲۰۰۱).



شکل ۱. تداخل‌سنجی راداری دیفرانسیلی. موقعیت سه دریابه که از یک منطقه تصویربرداری می‌کنند.

اختلاف فاز بین دو مشاهده اول برابر است با:

$$\Delta\phi_{12} = \frac{4\pi}{\lambda} a \cos(\theta) \quad (1)$$

این مقدار بین مشاهده اول و سوم برابر است با:

$$\Delta\phi_{13} = \frac{4\pi}{\lambda} b \cos(\theta + \alpha) \quad (2)$$

با موازی فرض کردن دو پرتو نور، نسبت بین دو اختلاف فاز برابر نسبت بین مؤلفه‌های موازی خط مبنا با

۳ مطالعه موردی

در تاریخ ۸۲/۱۰/۵ زلزله مهیبی به بزرگی $M_w = 6.3$ و ممان لرزه‌ای $3-8 \times 10^{18} \text{ Nm}$ شهر بم در ایران را لرزاند (شکل ۲).

طبق آمار رسمی این رویداد، نزدیک به ۴۰/۰۰۰ کشته، ۱۵/۰۰۰ مجروح و ۱۰۰/۰۰۰ نفر بی‌خانمان برجای گذارد. گسل قدیمی بم به طول تقریبی ۱۰۰ کیلومتر، در ارتباط با سامانه‌های گسلی (fault system) اندوهجرد، گوک (گلباف) و ناینند، با طول تقریبی ۴۰۰ کیلومتر است. همان‌طور که در شکل (۲) مشاهده می‌شود در شمال گسل بم، گسل اندوهجرد و گوک به طول ۲۵۰ کیلومتر تا ناینند ادامه دارد. (بربریان و همکاران، ۱۹۸۴ و بربریان و همکاران، ۲۰۰۱).

هدف از این تحقیق، به‌دست آوردن پارامترهای این زلزله بود که با استفاده از روش تداخل‌سنجی دیفرانسیلی راداری عملی شد. اطلاعات مربوط به تصاویر مورد استفاده در جدول (۱) آورده شده است.

$$y_1 = |y_1| \exp(i\phi_1) \quad (9)$$

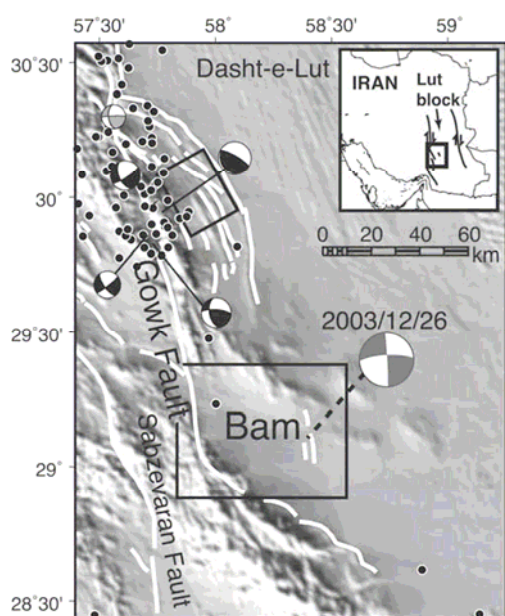
$$y_2 = |y_2| \exp(i\phi_2)$$

$$v = y_1 y_2^* = |y_1| |y_2| \exp(i(\phi_1 - \phi_2)) \quad (10)$$

می‌توان مشاهده کرد که در تداخل‌نگاشت دامنه‌ها تقویت می‌شوند ولی تفاضل فازها به‌دست می‌آید که این تفاضل در فاصله $-\pi$ تا π قرار گرفته‌اند و پس از بازیابی فاز به‌دست آمده می‌توان به تصویر مدل ارتفاعی رقومی منطقه دست یافت (شکل ۳). سپس با تفاضل دو تداخل‌نگاشت که یکی قبل از زلزله و دیگری پس از زلزله است اثر توپوگرافی و کرویت زمین حذف می‌شود و اگر اثرات نوفه و جوی را نادیده بگیریم آنچه باقی می‌ماند اثر تغییرات سطح زمین در اثر زلزله در راستای دید ماهواره است (شکل ۴). معادلات مربوطه در زیر آورده شده است:

$$\partial\phi = \partial\phi_{\text{Topo}} + \partial\phi_{\text{Def}} + \partial\phi_{\text{Atm}} + \partial\phi_{\text{Noise}} \quad (11)$$

$$\partial\phi_{\text{Def}} = -\frac{4\pi}{\lambda} D_{\text{Def}} \quad (12)$$



شکل ۲. تصویر ماهواره‌ای گسل بم و ارتباط آن با گسل‌های موجود در منطقه (فیلدینگ و همکاران، ۲۰۰۴).

جدول ۱. مشخصات تصاویر انتخاب شده در مطالعه زلزله بم.

name Data	Orbit	Frame	Direction	Track	Platform	Date(dd/mm/yyyy)
Master	9192	22	Descending	120	Envisat	2003/11/06
Slave1	6687	17	Descending	120	Envisat	2003/03/12
Slave2	9693	23	Descending	120	Envisat	2004/07/01

زمین‌لرزه است. تداخل‌نگاشت به‌دست آمده پس از حذف اثرات توپوگرافی در شکل (۴) نشان داده شده است.

همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود مختصات جغرافیایی منطقه مورد مطالعه آورده شده است.

از روی اشکال به‌دست آمده به وضوح می‌توان رومرکز و بزرگی زلزله را به‌دست آورد. از آنجایی که ماهواره مورد استفاده (Envisat) در باند C کار می‌کند و هر فرینج به‌دست آمده $\lambda/2$ است، معادل $5.6/2 = 2.8\text{cm}$ می‌شود، مقدار جابه‌جایی در جهت دید ماهواره با شمردن تعداد فرینج‌ها و از مقدار زیر به دست می‌آید:

$$11 \times 2.8 = 30.8\text{cm}$$

جابه‌جایی به‌دست آمده در جهت دید ماهواره است و این جابه‌جایی را باید به جابه‌جایی قائم و افقی تبدیل کرد. توجه کنید که زاویه دید ماهواره نسبت به قائم ۲۳ درجه است و این زاویه از روی هدر تصاویر به‌دست آمده است. همچنین سیکل رنگی زرد-آبی-قرمز جابه‌جایی دور از رادار و سیکل رنگی زرد-قرمز-آبی جابه‌جایی به سمت رادار را نشان می‌دهد.

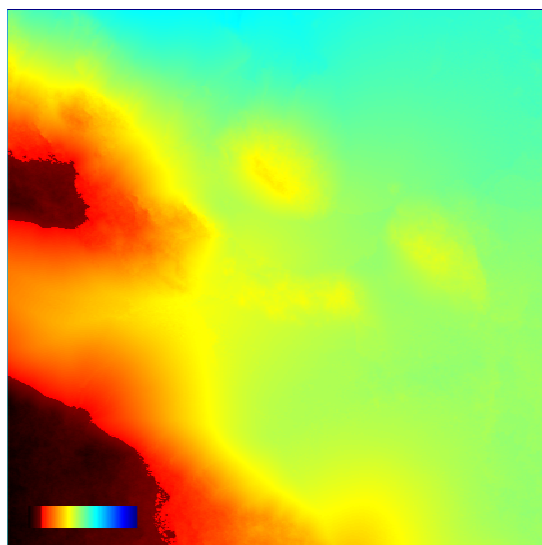
$$u_h = \frac{u}{\text{Sini}} = \frac{30.8}{\text{Sin}23^\circ} = 78.82\text{cm}$$

$$u_v = \frac{u}{\text{Cos}i} = \frac{30.8}{\text{Cos}23^\circ} = 33.46\text{cm}$$

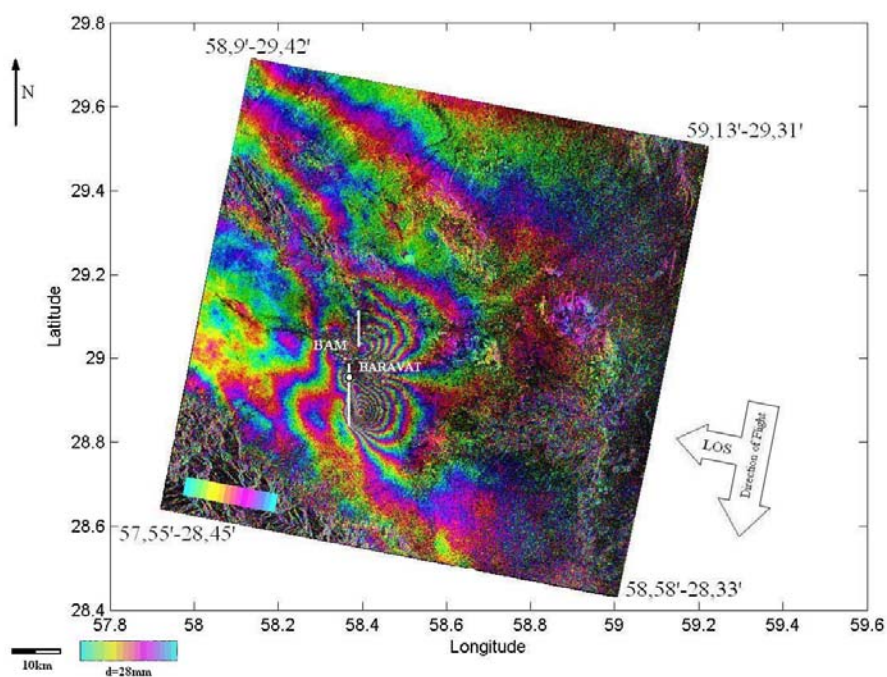
$$u_{\text{total}} = \sqrt{u_h^2 + u_v^2} = 85.63$$

برای به‌دست آوردن تغییرات زمین با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری دیفرانسیلی باید حداقل از سه تصویر و یا دو تصویر و یک مدل رقومی موجود استفاده شود. در این تحقیق از روش اول یعنی از سه تصویر استفاده شد بدین‌صورت که با استفاده از تصاویر ۱ و ۲ مدلی رقومی و با استفاده از تصاویر ۱ و ۳ یک تداخل‌نگاشت تولید شد. سپس فازهای مربوط به توپوگرافی که با استفاده از تصویر ۱ و ۲ به‌دست آمده بودند از تداخل‌نگاشت اول کسر شدند تا یک تداخل‌نگاشت دیفرانسیلی ساخته شود. در مورد زلزله بم، ابتدا با دو تصویر قبل از زلزله (Master و Slave1) با خط مبنای عمودی حدود ۵۰۰ متر مدل رقومی زمین تهیه شد. مدل رقومی تهیه شده در این مرحله در شکل (۳) دیده می‌شود. مدل رقومی نشان داده شده در این شکل در سامانه مختصات راداری است. پردازش‌های مربوطه با نرم‌افزار Doris و در محیط لینوکس صورت گرفته است (کامپس و یوسای، ۱۹۹۹).

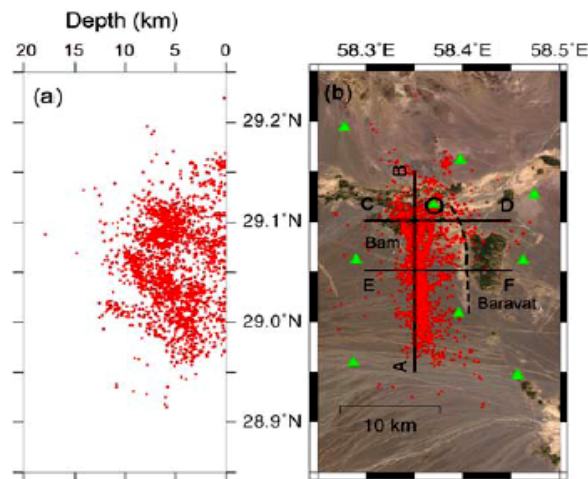
با داشتن مدل رقومی زمین می‌توان اثرات توپوگرافی را از تداخل‌نگاشت حذف کرد به‌طوری‌که تداخل‌نگاشت تولید شده فقط تغییرات زمین را نشان دهد. برای به‌دست آوردن تغییرات زمین به علت زلزله با استفاده از تصاویر بعد از زلزله (Master و Slave2) با خط مبنای (baseline) عمودی حدود ۵۷۰ متر تداخل‌نگاشت دیگری تهیه شد و با استفاده از مدل رقومی (DEM) تهیه شده در مرحله قبل، اثر توپوگرافی از روی آن برداشته شد. در نتیجه تداخل‌نگاشت به‌دست آمده در این مرحله فقط نشان دهنده تغییرات زمین در اثر



شکل ۳. مدل رقومی به دست آمده از دو تصویر قبل از زلزله (Slave1 و Master).



شکل ۴. تداخل نگاشت تفاضلی دامنه و فاز به دست آمده از سه تصویر (Slave2 و Slave1 و Master). همان طور که در شکل مشاهده می شود مختصات جغرافیایی منطقه مورد مطالعه آورده شده است.



شکل ۵. نمایش پس‌لرزه‌ها در عمق و روی سطح با استفاده از مدل‌سازی سه‌بعدی (Sadeghi et al., 2004).

(لی و والاس، ۱۹۹۵ و اکی و ریچارد، ۱۹۸۰).

$$M_w = \frac{\log M_0}{1.5} - 10.73 \quad (15)$$

و در نهایت خواهیم داشت:

$$M_w = 6.4$$

۴ نتیجه‌گیری

مقایسه نتایج روش‌های مختلف در جدول زیر آمده است:

جدول ۲. مقایسه نتایج روش‌های متفاوت در تعیین بزرگی زلزله بم.

Name	(Nm) M	DEP (km)	Mw
USGS	7.5×10 ¹⁸	14	6.5
HRVD	8.8×10 ¹⁸	34	6.6
Interferometry	4.3×10 ¹⁸	16	6.4

آنچه در رابطه با فازهای زلزله و تداخل‌سنجی راداری مطرح می‌شود، جمع شدن تنش در یک منطقه قبل از زلزله است که منجر به تغییرات قائم پوسته زمین می‌شود که با تصاویر پردازش شده این نشانگر قابل رؤیت است و زلزله بر اساس آن پیش‌بینی می‌شود. برای بررسی پارامترهای زلزله پس از وقوع آن از تنش رها گشته استفاده می‌بریم که همانند قبل از زلزله، تا چندین روز پس از آن با همین روش می‌توان بالا آمدگی پوسته زمین را در

برای به‌دست آوردن ممان زلزله از رابطه زیر کمک

می‌گیریم:

$$M_0 = \mu u A \quad (13)$$

که در آن μ ضریب ثابت برابر 10^{11} و u همان مجموع جابه‌جایی و A سطح شکستگی است که با رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$A = \text{Depth} \times \text{Length} \quad (14)$$

برای به‌دست آوردن عمق و درازای شکستگی باید از صفحه گسلی استفاده کرد که در این مورد می‌توان با استفاده از پس‌لرزه‌های زلزله و تصویر آنها روی صفحه به عمق و درازای شکستگی پی برد. شکل بالا، این پس‌لرزه‌ها را نمایش می‌دهد:

خواهیم داشت:

$$\text{Length} \cong 30\text{Km} \quad \text{و} \quad \text{Depth} \cong 16\text{Km}$$

بنابراین ممان لرزه‌ای به مقدار زیر به‌دست می‌آید:

$$\text{یا} \quad M_0 = 4.3 \times 10^{18} \text{ N.m}$$

$$M_0 = 4.3 \times 10^{25} \text{ dyn.cm}$$

حال برای به‌دست آوردن بزرگی زلزله از رابطه تجربی زیر که به ایران تعلق دارد استفاده شده است

- Parsons and Waller, R., 2004, Aseismic deformation of a fold-and-thrust belt imaged by synthetic aperture radar interferometry near Shahdad, southeast Iran, *Geology*, 577-580.
- Gabriel, A. K., Goldstein, R. M., and Zebker, H. A., 1989, Mapping small elevation changes over large areas: Differential radar interferometry, *J. Geophys. Res.*, **94(B7)**, 9183-9191.
- Kampes, B., and Usai, S., 1999, Doris: The Delft Object-oriented Radar Interferometric software, proceedings ITC 2nd ORS symposium.
- Lay, T., and Wallace, T. C., 1995, *Modern global seismology*, Academic Press Inc., San Diego.
- Li, F. K., and Goldstein, R. M., 1990, Studies of multibaseline spaceborne interferometric synthetic aperture radars. *IEEE T. Geosci. Remote Sensing*, **28**, 88-96.
- Massonnet, D., 1995, Application of remote sensing data in earthquake monitoring, *Adv. Space Res. Vol. 15, No. 11*, 37-44.
- Massonnet, D., and Feigl, K., 1998, Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface: *Rev. Geophys.* **36(4)**, 441-500.
- Mirbagheri, M., 2001, Analysis of interferometric SAR for topographic mapping, PhD. Thesis, School of Surveying and Spatial Information Systems, University of New South Wales, Unsw Sydney, Australia.
- Sadeghi, H., Fatemi Aghdam, S. M., Suzuki, S., and Nakamura, T., 2004, 3D velocity structure of the 2003 Bam earthquake area (SE Iran): existence of a shallow brittle layer and its relation to the heavy damages. Earthquake Research Center, also at Department of Geology, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad 91775-1436, Iran.
- Talebian, M., Fielding, E. J., Funning, G. J., Ghorashi, M., Jackson, J. A., Nazari, H., Parsons, B., Priestley, K., Rosen, P. A., Walker, R., and Wright, T. J., 2004, The 2003 Bam (Iran) earthquake-rupture of a blind strike-slip fault: auxiliary material Geological Survey of Iran
- Wright, T. J., 2000, Crustal deformation in Turkey from synthetic aperture radar Interferometry, PhD. Thesis, Wolfson College, Oxford.
- Wyss, M., Wang, R., Zschau, J., and Xia, Y., 2004, Instability of Loss Estimates After Earthquakes: Bam, 26 December 2003, World Agency of Planetary Monitoring and Earthquake Risk Reduction, Switzerland.
- حد میلی متر مشاهده کرد و اندازه گرفت (رایت، ۲۰۰۰).
- استفاده از سنجش از دور ماهواره‌ای به دلیل پوشش وسیع و به‌هنگام بودن آن می‌تواند روش مناسبی برای پیش‌بینی زلزله و مدیریت بحران ناشی از آن باشد.
- با بررسی روش‌های متفاوت سنجش از دور ماهواره‌ای، می‌توان نتیجه گرفت که روش تداخل‌سنجی راداری که بر اساس جابه‌جایی قائم پوسته زمین صورت می‌گیرد، به دلیل پوشش وسیع و قابلیت کار در هر شرایط آب و هوایی و دقت زیاد آن بهترین روش است.
- با انتخاب تصاویر مناسب با فاصله زمانی کم و طول خط مبنای مناسب با توجه به منطقه مورد مطالعه می‌توان به نتایج بهتری دست یافت و در آینده با ترکیب این روش با روش‌های اندازه‌گیری مکرر زمینی همانند سامانه موقعیت‌سنجی جهانی می‌توان به نتایجی بسیار دقیق برای پیش‌بینی زلزله رسید.

منابع

- Aki, K., and Richards, P. G., 1980, *Quantitative seismology: Theory and methods*, W. H. Freeman, San Francisco.
- Berberian, M., Jackson, J. A., Qorashi, M., and Kadjar, M. H., 1984, Field and teleseismic observations of the 1981 Golbaf Sirch earthquakes in SE Iran: *Geophys. J. Roy. Astron. Soc.*, **77**, 809-838.
- Berberian, M., Jackson, J. A., Fielding, E., Parsons, B. E., Priestly, K., Qorashi, M., Talebian, M., Walker, R., Wright, T. J., Bacher, C., 2001, The 1998 March 14 Fandoqa earthquake (Mw = 6.6) in Kerman province, southeast Iran: re-rupture of the 1981 Sirch earthquake fault, triggering of slip on adjacent thrusts and the active tectonics of the Gowk fault zone, *Geophys. J. Int.*, **146**, 371-398.
- Fielding, E. J., Talebian, M., Rosen, P. A., Nazari, H., Jackson, J. A., Ghorashi, M., and Walker, R., 2005, Surface ruptures and building damage of the 2003 Bam, Iran, earthquake mapped by satellite synthetic aperture radar interferometric correlation, *J. Geophys. Res.*, **110**, B03302.
- Fielding, E. J., Wright, T. J., Muller, B. E.,