

بررسی ویژگی‌های زمین‌ساخت زمین‌لرزه ششم آذرماه ۱۳۸۴ جزیره قشم به روش حل معکوس با استفاده از مشاهدات تداخل‌سنجی راداری و الگوریتم ژنتیک

معصومه آمیغ‌پی^۱، بهزاد وثوقی^۲ و مهدی معنی^۳

^۱دکتر، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

^۲دانشیار، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

^۳استادیار، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه تهران، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۰۳/۰۷ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۰۵/۳۰

چکیده

زمین‌لرزه‌ای با بزرگای گشتاوری ۵/۹ در مقیاس امواج محلی در ساعت ۱۳:۵۳:۲۲ به وقت محلی روز ششم آذرماه ۱۳۸۴ جزیره قشم و بخش‌های وسیعی از استان ساحلی هرمزگان را به لرزه درآورد. این زمین‌لرزه در اثر گسلی معکوس با مؤلفه ناچیز راست‌الغز بوده است. زمین‌لرزه دیگری با بزرگای گشتاوری ۵/۵ در ساعت ۲۰ به وقت محلی همان روز روی داد. نکته جالب این زمین‌لرزه این است که سازوکار محاسبه شده برای قوی‌ترین پس‌لرزه آن، که ۶ ساعت پس از شوک اصلی اتفاق افتاده است، یک سازوکار راست‌الغز است که کاملاً با ساختار معکوس شوک اصلی فرق می‌کند. در این نوشتار، با استفاده از حل مسئله معکوس با مقادیر مرزی میدان جابه‌جایی سطحی زمین به دست آمده از مشاهدات تداخل‌سنجی راداری، پارامترهای گسلی این دو زمین‌لرزه برآورد شد. حل مسئله معکوس فوق با به کارگیری الگوریتم ژنتیک انجام شد و نتایج نشان‌دهنده آن بود که زمین‌لرزه اول در اثر فعالیت بخش جنوبی گسل معکوس قشم به طول ۷ کیلومتر بوده است که موجب فعال شدن گسلی راست‌الغز به موازات تاقدیس گورزین شده و زمین‌لرزه دوم را ایجاد کرده است. لغزش گسلی اول، ۹۶ سانتی‌متر و لغزش گسلی دوم ۹ سانتی‌متر برآورد می‌شود. همچنین بر اساس نتایج مدل‌سازی این نوشتار، بیشینه مقدار جابه‌جایی سطحی زمین ناشی از زمین‌لرزه اصلی، ۶/۷ سانتی‌متر در راستای باختر، ۴/۶ سانتی‌متر در راستای جنوب و ۱۶/۴ سانتی‌متر در راستای بالا بود و بیشینه مقدار جابه‌جایی سطحی زمین ناشی از بزرگ‌ترین پس‌لرزه این رویداد، ۱/۳ سانتی‌متر در راستای باختر، ۱/۶ سانتی‌متر در راستای جنوب و ۱/۴ سانتی‌متر در راستای پایین بود.

کلیدواژه‌ها: تداخل‌سنجی راداری، الگوریتم ژنتیک، مسئله معکوس، سازوکار زمین‌لرزه، پارامترهای گسل.

***نویسنده مسئول:** معصومه آمیغ‌پی

E-mail: amighpey@yahoo.com

۱- پیش‌نوشتار

شناسایی گسل مسبب زمین‌لرزه و بررسی ویژگی‌های آن از دیر باز مورد توجه پژوهشگران علوم زمین بوده است. از آنجایی که یک سری از مشاهدات قابل دسترسی به منظور برآورد آنچه در ژرفای زمین اتفاق می‌افتد، مشاهدات میدان جابه‌جایی سطح زمین است، مدل‌های متفاوتی به منظور برآورد تغییر شکل سطح زمین با معلوم بودن ویژگی‌های هندسی گسل مسبب زمین‌لرزه و چگونگی و میزان نابرجایی اتفاق افتاده بر سطح گسل ارائه شده است (Wang et al., 2006; Okada, 1985). از طرف دیگر از آنجایی که در عمل ویژگی‌های هندسی گسل مسبب زمین‌لرزه، مجهول مطالعات لرزه‌زمین‌ساخت بوده و مشاهدات میدان جابه‌جایی سطح زمین است که از طریق منابع مختلف ژئودیتیک همچون تداخل‌سنجی راداری و ترازیابی دقیق در دسترس ماست، استفاده از این مدل‌ها، بررسی‌ها را به سمت حل مسئله‌ای معکوس با ماهیتی غیر خطی سوق می‌دهد که معمولاً دارای چندین کمینه محلی و یک کمینه کلی است. در این موارد، روش‌هایی چون حل معکوس کمترین مربعات به مقادیر اولیه وابسته بوده، نزدیک‌ترین کمینه به مقادیر اولیه و نه کمینه سراسری را برآورد می‌کند که می‌تواند سبب برآورد نادرستی از مجهولات شود. مشکل دیگری که حل اینگونه مسائل معکوس با آن روبه‌روست، عدم یکتایی جواب است، به عبارتی ممکن است به ازای توزیع‌های متفاوتی از مجهولات، به میدان جابه‌جایی ثابتی در سطح زمین رسید (Misra, 2008). به منظور حل اینگونه مسائل، استفاده از روش‌های بهینه‌سازی سراسری گسترش داده شده است که از طریق نمونه‌برداری تصادفی فضای مجهولات از همگرایی جواب مسئله به کمینه محلی جلوگیری می‌کند. مسئله بهینه‌سازی، شامل جستجوی مدلی که بهترین برازش به مشاهدات را داشته باشد، است. از متداول‌ترین روش‌های بهینه‌سازی سراسری، الگوریتم ژنتیک است که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفت. در این نوشتار پس از مروری بر زمین‌شناسی قشم و معرفی الگوریتم ژنتیک، حل مسئله معکوس به منظور برآورد ویژگی‌های زمین‌ساخت زمین‌لرزه ششم

آذرماه ۱۳۸۴ بر مبنای مشاهدات تداخل‌سنجی راداری انجام می‌شود و با استفاده از الگوریتم ژنتیک که الگوریتمی هوشمند در حل مسائل بهینه‌سازی است، برآوردی از پارامترهای گسل محاسبه می‌شود که میدان جابه‌جایی سطحی ناشی از آن بیشترین شباهت به میدان جابه‌جایی به دست آمده از مشاهدات تداخل‌سنجی راداری را داشته باشد و به منظور برآوردی یکتا از پارامترهای گسل، از قیود زمین‌ساخت‌شناسی موجود در منطقه استفاده می‌شود.

۲- مروری بر زمین‌شناسی قشم و رویداد زمین‌لرزه ۶ آذرماه ۱۳۸۴

بر اساس شواهد زمین‌ساختی و رسوب‌شناسی، می‌توان قشم را بخشی از جنوب خاوری ایالت زمین‌ساختی و نسبتاً فعال زمین‌ساختی - نوزمین‌ساختی زاگرس در نظر گرفت. شباهت ظاهری و همچنین هماهنگی در امتداد تاقدیس‌های بزرگ جزیره قشم با تاقدیس‌های زاگرس، شاهدی بر این موضوع است. تشکیل جزیره و یا بروز آن از دریا بیشتر نتیجه نیروهای فشاری در تداوم فاز زمین‌ساخت نهایی کوهزایی آلپ در اواخر تشریری بوده است. با توجه به قرارگیری جزیره قشم در پهنه لرزه‌زمین‌ساختی زاگرس، ویژگی‌های لرزه‌زمین‌ساختی این ناحیه مشابه مناطق مجاور آن در ایالت لرزه‌زمین‌ساختی زاگرس است. این ناحیه با رویداد زمین‌لرزه‌های با ژرفای کم و بزرگی متوسط بر اثر فعالیت گسل‌های معکوس یا رانده با شیب زیاد مشخص می‌شود. این منطقه، به دلیل مجاورت در مرز صفحات ایران و صفحه عربی، همواره یک منطقه لرزه‌خیز بوده است (فرزانگان و همکاران، ۱۳۸۵).

رسوبات سنگ بستر رخنمون‌یافته در جزیره، شش تاقدیس و یک ناودیس را تشکیل داده است. به استثنای تاقدیس کوردین با جهت شمال باختری - جنوب خاوری، همه ساختارهای یادشده، دارای راستای تقریبی خاور شمال خاوری - باختر جنوب باختری هستند (شکل ۱).

کرده است. اما به هر صورت این روش محدودیت‌هایی مانند حساسیت بالا به عدم همبستگی فاز تصاویر، مسئله بازیابی فاز که غالباً مشکل است، اندازه‌گیری جابه‌جایی تنها در جهت خط دید ماهواره و از آنجا که این روش قادر به اندازه‌گیری حداکثر جابه‌جایی نسبی بین دو پیکسل به اندازه نصف یک فرینج است، از دست دادن فرینج‌ها در مکانی که گرادیان جابه‌جایی بیش از نصف یک فرینج در هر پیکسل باشد (مانند مناطق نزدیک گسل)، را دارد (Massonnet & Feigl, 1998).

در این نوشتار، از میدان جابه‌جایی به دست آمده از مشاهدات تداخل‌سنجی راداری در راستای خط دید ماهواره استفاده می‌شود. ۲ تصویر بالاگذر و ۲ تصویر پایین‌گذر ماهواره ENVISAT که توسط آژانس فضایی اروپا فراهم شده (جدول ۱)، با نرم‌افزار گاما و پارامترهای مداری آژانس فضایی اروپا، پردازش شدند. برای حذف اثر توپوگرافی از اینترفراگرام‌ها از SRTM DEM استفاده شد و اینترفراگرام‌ها به روش خطوط برش بازیابی شدند. در شکل ۴، اینترفراگرام‌های حاصل از پردازش تصاویر برای مسیرهای بالاگذر و پایین‌گذر با قدرت تفکیک مکانی ۹۰ متر نمایش داده شده است.

با داشتن این دو اینترفراگرام در حقیقت میدان جابه‌جایی در دو راستای خط دید ماهواره در حالت بالاگذر و خط دید ماهواره در حالت پایین‌گذر برای ما مشخص است. در بخش بعد با استفاده از این مشاهدات و به کارگیری الگوریتم ژنتیک، مسئله معکوس برای دستیابی به ویژگی‌های گسل مسبب زمین‌لرزه حل خواهد شد.

۴- حل مسئله معکوس با به‌کارگیری مشاهدات تداخل‌سنجی راداری به منظور مدل‌سازی گسل مسبب زمین‌لرزه

مدل‌های تحلیلی موجود رفتار گسل‌ها، از طریق معلوم فرض کردن ویژگی‌های گسل، میدان جابه‌جایی ناشی از فعالیت گسل مزبور بر سطح زمین را محاسبه می‌کنند (Wang et al., 2006; Okada, 1985). از طرفی، در بررسی‌های زمین‌ساخت لرزه‌ای، این ویژگی‌های گسل است که مجهول حساب شده و برآورد این ویژگی‌ها به وسیله مشاهدات میدان جابه‌جایی سطحی زمین مدنظر می‌باشد. بنابراین در اینگونه مسائل هدف برآورد پارامترهایی از گسل است که اختلاف میدان جابه‌جایی محاسبه شده آنها توسط روابط تحلیلی با میدان جابه‌جایی مشاهداتی سطح زمین حداقل شود.

ساده‌ترین روش حل معکوس کمترین مربعات است که مدل حول نقطه اولیه جواب خطی شده و سپس در تکرارهای متوالی به کمینه همگرا می‌شود. اما این روش وابسته به مقدار اولیه است و نزدیک‌ترین کمینه به جواب اولیه را به عنوان کمینه کلی معرفی می‌کند و حال آنکه توابعی که در ژئوفیزیک استفاده می‌شود، معمولاً دارای چند کمینه محلی و یک کمینه کلی است. بنابراین برای حل چنین مسائل معکوسی از الگوریتم‌های بهینه‌سازی سراسری همچون الگوریتم ژنتیک استفاده می‌شود که فضای مجهولات را بدون وابستگی به مقدار اولیه جستجو کرده، مدل بهینه از پارامترهای مجهول را ارائه می‌کند (Misra, 2008).

۴-۱- مروری بر الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک که به عنوان یکی از روش‌های تصادفی بهینه‌یابی شناخته شده، توسط Holland (1967) ابداع شده است. بعدها این روش با تلاش‌های Goldberg (1989) توسعه یافته و امروزه نیز به واسطه توانایی‌های روش، جایگاه مناسبی در میان دیگر روش‌ها دارد (Goldberg, 1989). روال بهینه‌یابی در الگوریتم ژنتیک براساس یک روند تصادفی هدایت شده استوار است. این روش بر مبنای نظریه تکامل تدریجی و ایده‌های بنیادین داروین پایه‌گذاری شده است.

به طور خلاصه حل مسئله با در نظر گرفتن جمعیتی از پاسخ‌های تصادفی شروع می‌شود و تابع ارزیابی جمعیت برآورد شده، سپس با ارتقای جمعیت مورد نظر از طریق تقاطع و جهش، نسل‌های بعدی تولید می‌شوند تا هر بار پاسخ‌های به دست آمده دارای تابع ارزیابی مناسب‌تری شود. مشاهده می‌شود که با گذشت از میان

در ساعت ۱۳:۵۳:۲۲ به وقت محلی روز ششم آذر ماه ۱۳۸۴ هجری خورشیدی زمین‌لرزه‌ای با بزرگای ۵/۹ جزیره قشم و مناطق اطراف را لرزاند. این زمین‌لرزه با کشته شدن ۱۰ نفر و تخریب حدود ۲۰۰ خانه همراه بود. ۲۴ روستا در شمال و نوار جنوبی جزیره تخریب شد و حدود ۲۲ هزار نفر آسیب دیدند. در این زمین‌لرزه ۳ روستای گورزین، زیرانگ و تنبان ۱۰۰ درصد تخریب شدند (Pouladi, 2005).

زمین‌لرزه دیگری با بزرگای گشتاوری ۵/۵ در ساعت ۲۰ به وقت محلی همان روز روی داد. نکته جالب این زمین‌لرزه این است که سازوکار محاسبه شده توسط گروه لرزه‌نگاری دانشگاه هاروارد، برای قوی‌ترین پس‌لرزه آن، که ۶ ساعت پس از شوک اصلی اتفاق افتاده است، یک سازوکار راستالغز است که کاملاً با ساختار معکوس شوک اصلی فرق می‌کند (<http://www.seismology.harvard.edu/projects/CMT>).

بر اساس مطالعاتی که بر مبنای مشاهدات گسیختگی سطحی به بررسی گسل مسبب زمین‌لرزه پرداخته بود، نزدیک‌ترین گسل رانده‌گی به رومرکز زمین‌لرزه اول، یعنی گسل قشم با طولی حدود ۶۰ کیلومتر به عنوان گسل مسبب زمین‌لرزه اصلی، پیشنهاد شد که از حوالی شهر قشم تا جزیره هنگام با تحدیبی به سمت شمال باختر امتداد دارد. همچنین، برای زمین‌لرزه دوم فعالیت صفحه با راستای شمال باختری گسل گورزین، مسبب این زمین‌لرزه معرفی شد (شاه‌پسندزاده و حسامی، ۱۳۸۵).

پس از زمین‌لرزه ۶ آذر ۱۳۸۴، ۱۷ ایستگاه لرزه‌نگاری در منطقه مرکزی زمین‌لرزه نصب شد. توزیع رومرکز پس‌لرزه‌ها و همچنین توزیع ژرفای آنها در بازه زمانی ۱۱ آذر ۱۳۸۴ تا ۱۷ اسفند ۱۳۸۴، پراکنده بود و تعیین راستاهای ساده مرتبط با گسل‌ها کار دشواری بود. بر اساس این مطالعات، راستای مقاطع 'BB' و 'CC' در شکل ۲ برای سازوکار فشاری و راستای 'DD' در نزدیکی گسل قشم برای سازوکار راستالغز پیشنهاد شد (Gholamzadeh et al., 2007).

مطالعه دیگری که در این زمینه انجام شد، مدل‌سازی گسل مسبب زمین‌لرزه با استفاده از داده‌های تداخل‌سنجی راداری، بر اساس مدل جابه‌جایی کشسان و به روش بهینه‌سازی محلی غیر مرکب بود (Nissen et al., 2007). در این مطالعه، یک گسل خاوری - باختری معکوس، گسل مسبب زمین‌لرزه معرفی شد. شکل ۳ بالاآمدگی محاسبه شده از این مدل‌سازی و صفحه گسل را نمایش می‌دهد.

رویکرد دیگر، استفاده از آنالیز استرین میدان جابه‌جایی به دست آمده از مشاهدات تداخل‌سنجی راداری، به منظور بررسی سازوکار این زمین‌لرزه بود (Amighpey et al., 2009). این نتایج، تجمع بیشترین برش و اتساع را در راستای گسل‌های مطالعه پراکنده‌گی پس‌لرزه‌های منطقه و ژرفای آنها نشان می‌داد (Gholamzadeh et al., 2007). در این نوشتار، مدل‌سازی این زمین‌لرزه و بزرگ‌ترین پس‌لرزه آن، به روش حل معکوس با استفاده از مشاهدات تداخل‌سنجی راداری و الگوریتم ژنتیک، انجام می‌شود.

۳- مشاهدات تداخل‌سنجی راداری ناشی از رویداد زمین‌لرزه ششم آذرماه ۱۳۸۴ جزیره قشم

اندازه‌گیری جابه‌جایی‌های سطحی زمین یک ابزار کلیدی در مطالعات زمین‌لرزه‌شناسی است. روش‌های ژئودتیکی به مشاهدات پیش زمین‌لرزه نیاز دارد و اندازه‌گیری‌های دقیقی در نقاط محدود فراهم می‌کند، اما تصویربرداری ماهواره‌ای، تصاویری با اطلاعات جامع مکانی در اختیار ما قرار می‌دهد. با پرتاب ماهواره‌های راداری، امکان بررسی تغییر شکل پوسته زمین با دقت مناسب فراهم شده است. روش تداخل‌سنجی راداری، در دهه‌های اخیر روش متداولی برای اندازه‌گیری تغییرات سطح زمین شده است. پوشش سراسری و قدرت تفکیک مکانی بالای تصاویر راداری و دقت قابل قبول این روش، این روش را به عنوان ابزار نیرومندی برای مطالعه پدیده‌های مختلف زمین‌شناسی همچون زمین‌لرزه، نشست، زمین‌لغزش و ... مطرح

۵- تفسیر و بررسی نتایج

نتایج به دست آمده از مدل سازی معکوس زمین لرزه قشم، حاکی از جنبش گسلی معکوس با راستای شمال خاوری- جنوب باختری بود که موجب فعال شدن گسل راستالغز دیگری با راستای شمال باختری- جنوب خاوری شده بود. مقایسه نتایج مدل سازی زمین لرزه اصلی و نقشه گسل های منطقه، بیانگر انطباق این گسل با بخش جنوبی گسل معکوس قشم داشت. همچنین بر اساس این نتایج، فعالیت گسلی به موازات تاقدیس گورزین مسبب بزرگترین پس لرزه این منطقه بود.

شکل ۸ میدان جابه جایی مدل سازی سطح زمین ناشی از گسلش اصلی و شکل ۹ میدان جابه جایی مدل سازی سطح زمین ناشی از گسلش بزرگترین پس لرزه را نشان می دهد. در این شکل ها، تصویر صفحه این گسل بر سطح زمین با مستطیل خط چین و محل تقاطع صفحه گسل با سطح زمین با خط ممتد نشان داده شده است. همچنین مرکز گسل با ستاره صورتی نشان داده شده است. همانطور که از شکل ۸ مشخص است، از آنجا که گسل مسبب زمین لرزه اول گسلی معکوس برآورد شده است، بزرگترین مؤلفه جابه جایی در سطح زمین مؤلفه ارتفاعی است که مقدار آن $16/4$ سانتی متر بالاتر است. همچنین، بیشینه مقدار جابه جایی سطحی زمین ناشی از این گسلش در راستای باختر، $6/7$ سانتی متر و در راستای جنوب $4/6$ سانتی متر به دست آمده است. مطابق شکل ۹، بیشینه مقدار جابه جایی سطحی زمین ناشی از بزرگترین پس لرزه این رویداد، $1/3$ سانتی متر در راستای باختر، $1/6$ سانتی متر در راستای جنوب و $1/4$ سانتی متر در راستای پایین بود.

بی شک استفاده از مدل تحلیلی اکادا و در نظر گرفتن پوسته زمین به عنوان نیم فضای همگون الاستیک از یک سو، و محدودیت دقت مشاهدات تداخل سنجی راداری از سوی دیگر، نتایج مدل سازی را تحت تأثیر قرار می دهند. اما با این وجود بررسی بردار باقیمانده مدل سازی، نشان دهنده توافق کلی مناسب مشاهدات با میدان جابه جایی مدل سازی است.

۶- نتیجه گیری

در این نوشتار، با استفاده از میدان جابه جایی حاصل از تداخل سنجی راداری، حل مسئله معکوس به منظور برآورد پارامترهای گسل های مسبب زمین لرزه ششم آذر ماه ۱۳۸۴ و بزرگترین پس لرزه آن انجام شد. حل مسئله معکوس با استفاده از الگوریتم ژنتیک انجام شد. نتایج بیانگر آن است که مشاهدات تداخل سنجی راداری با یک گسل معکوس با ژرفای ۶ کیلومتر و طول ۷ کیلومتر و عرض ۵ کیلومتر، با شیب ۴۲ و آزیموت ۲۴۸ منطبق است. این گسل دارای لغزش ۹۶ سانتی متر بوده است. همچنین این پژوهش توانست با مدل سازی بزرگترین پس لرزه این رویداد برازش بهتری به مشاهدات داشته و پارامترهای گسل مسبب پس لرزه را نیز برآورد کند. این گسل، گسلی راستالغز با ژرفای ۶ کیلومتر و طول ۱۱/۷ کیلومتر و عرض ۹/۵ کیلومتر، با شیب ۸۳ و آزیموت ۲۹۳ منطبق است. این گسل دارای لغزش ۹۶ سانتی متر بوده است.

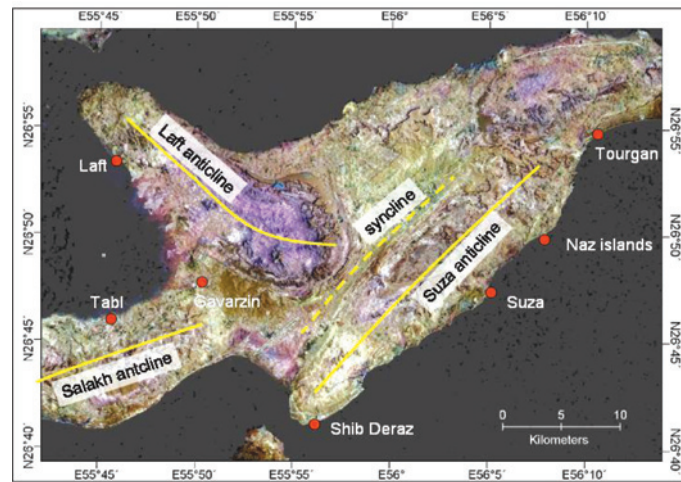
از آنجایی که مشاهدات تداخل سنجی راداری جابه جایی سطحی زمین را تنها در راستای خط دید ماهواره اندازه گیری می کند، استفاده از تصاویر از ماهواره های متفاوت با زاویه دیدهای مختلف به منظور استخراج میدان جابه جایی سه بعدی سطح زمین و استفاده از آن در حل مسئله معکوس برای برآورد پارامترهای گسلش منطقه پیشنهاد می شود.

تعداد زیادی از نسل ها، الگوریتم ژنتیک به سمت ایجاد جواب با تابع ارزیابی بهینه میل می کند.

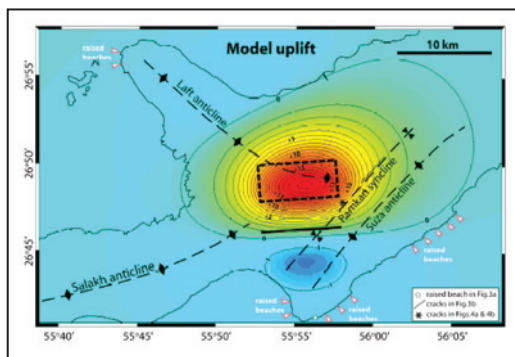
الگوریتم ژنتیک، با انتخاب و باز تولید از نسلی به نسل بعد منتقل می شود تا به شرط اتمام الگوریتم برسد. معیار توقف الگوریتم می تواند ایجاد محدودیت در زمان اجرای الگوریتم و یا تعداد نسل هایی که ایجاد می شوند، باشد. از طرف دیگر از آنجایی که این الگوریتم تلاش می کند تمام افراد یک جمعیت به یک راه حل منتهی شود، بنابراین اگر مجموع اختلافات افراد یک جمعیت از حدی کوچک تر بود، می توان الگوریتم را خاتمه داد. همچنین اگر در طول تعداد مشخصی از نسل ها ارتقا به حد کافی دیده نشد و یا هرگاه میزان تابع ارزیابی به مقدار مناسبی رسید، می توان به الگوریتم خاتمه داد.

۴-۲. مدل سازی ویژگی های زمین ساخت زمین لرزه قشم بر مبنای مشاهدات راداری و به کار گیری الگوریتم ژنتیک

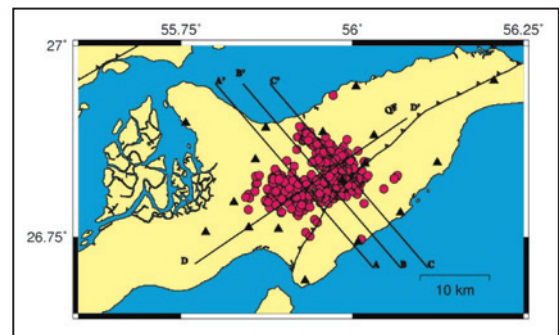
از آنجا که تغییر شکل هم لرز زمین لرزه، تغییر شکلی الاستیک به شمار می آید، در این مدل سازی از مدل تحلیلی اکادا استفاده شد. در مدل استاندارد اکادا فرض می شود سطح زمین مسطح و متناظر با صفحه محدود شده نیم فضای الاستیک است. این مدل، جابه جایی سطحی ناشی از یک نابرجایی که توسط بردار لغزش روی سطح گسلی مستطیلی، مشخص می شود را محاسبه می کند. این گسل مستطیلی نیز توسط پارامترهای طول و عرض و ژرفای گسل، شیب و آزیموت آن، و مختصات مرکز گسل مشخص می شود. شکل ۵ نمایشی از این پارامترهاست. الگوریتم ژنتیک به منظور حل معکوس مدل تحلیلی اکادا، یعنی یافتن پارامترهای یاد شده در بالا با اعمال این شرط که گشتاور زمین لرزه اصلی بین $5/8$ تا $6/1$ و در زمین لرزه دوم بین $5/4$ تا $5/6$ به دست آید، پیاده سازی شد. مجهولات مسئله پارامترهای گسل مسبب زمین لرزه اصلی و بزرگترین پس لرزه آن معرفی شد و جمعیت الگوریتم ژنتیک به صورت تجربی ۲۰۰۰ کروموزوم در نظر گرفته شد. تابع ارزیابی، نرم تفاضل میدان جابه جایی مدل سازی شده در جهت خط دید ماهواره، از میدان جابه جایی مشاهداتی تداخل سنجی راداری (شکل ۴) در نظر گرفته شد. از آنجا که بعد از چندین بار اجرای الگوریتم، مشخص شد حل این مسئله معکوس با مقادیر مرزی دارای جواب یکتا نیست، و از طرفی ممکن است برخی جواب ها فاقد تفسیر ژئوفیزیکی باشد، با استفاده از قیود زمین شناسی، فضای مجهولات به محدوده معنی دار ژئوفیزیکی محدود شد (جدول ۲) و الگوریتم ژنتیک پیاده سازی شد. به منظور کاهش حجم محاسبات، قدرت تفکیک مکانی اینترفروگرامها به ۹۰۰ متر تقلیل یافت. جدول ۳ پارامترهای برآورد شده برای این دو زمین لرزه توسط الگوریتم ژنتیک را نمایش می دهد. با استفاده از این پارامترهای برآورد شده، بزرگی گشتاوری زمین لرزه اصلی، و بزرگی بزرگترین پس لرزه آن $5/6$ برآورد شد که در تطابق با بزرگی گشتاوری محاسبه شده به وسیله اطلاعات لرزه نگاری توسط دانشگاه هاروارد بود (<http://www.seismology.harvard.edu/projects/CMT>). شکل ۶ اینترفروگرامهای بالاگذر و پایین گذر و اینترفروگرامهای حاصل از مدل سازی و بردار باقیمانده آنها را نشان می دهد که بیانگر برازش مناسب میدان جابه جایی به دست آمده از الگوریتم ژنتیک با مشاهدات تداخل سنجی راداری است. همچنین به منظور ارزیابی بهتر بردار باقیمانده، نقشه خطای نسبی مدل سازی، با تقسیم مقدار بردار باقیمانده بر مقدار جابه جایی تولید شد (شکل ۷). همین طور که در این نقشه دیده می شود، مقدار خطای نسبی در بیشتر نقاط ناچیز است.



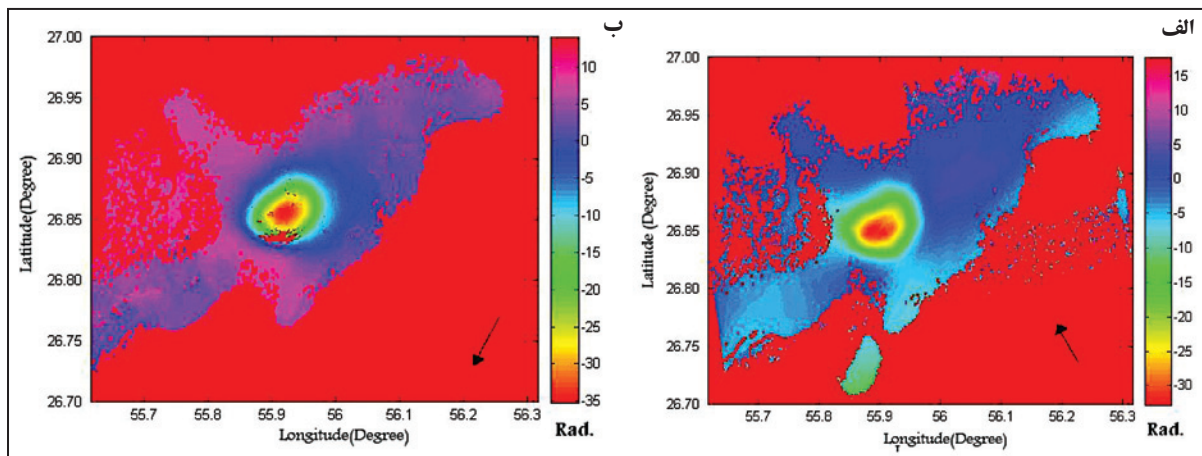
شکل ۱- ساختار تاق‌دیس‌ها (خطوط زرد) و ناودیس‌های (خط‌چین زرد) مهم جزیره قشم.



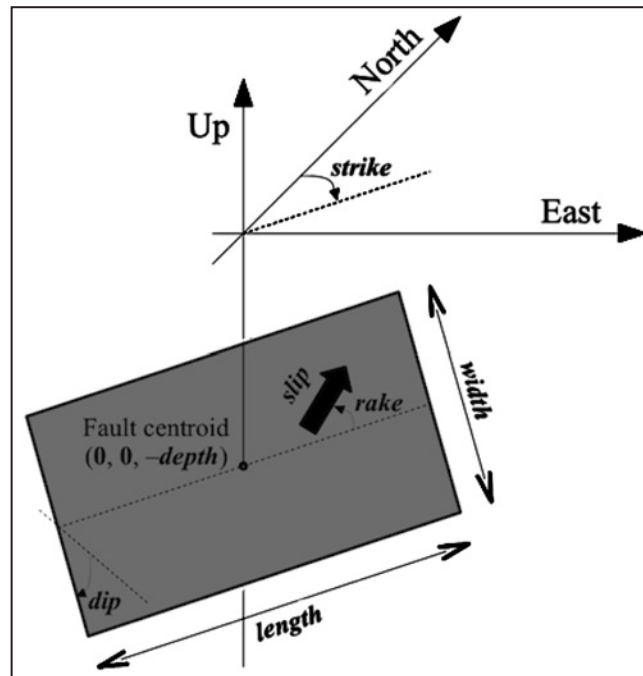
شکل ۳- بالاآمدگی هم‌لرزه‌ای محاسبه شده توسط مدل‌سازی جابه‌جایی سطحی زمین به روش غیر مرکب، مستطیل خط‌چین نشان‌دهنده صفحه گسل مدفون مدل‌سازی شده با شیب شمالی است و خط سبتر زیر مستطیل خط‌چین، تصویر آن روی سطح است (Nissen et al., 2007).



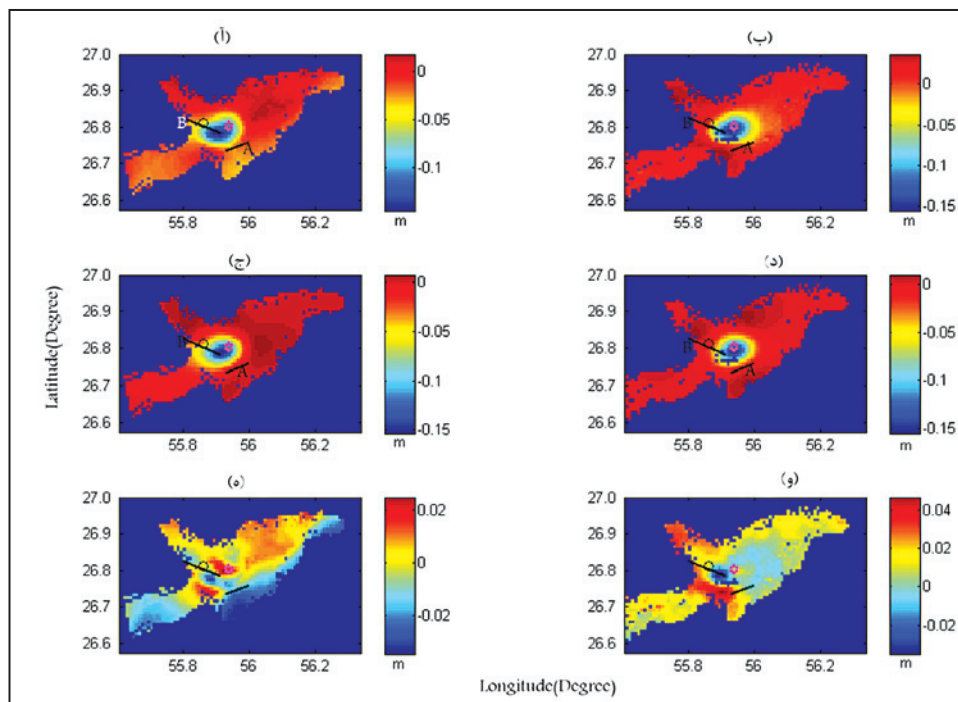
شکل ۲- توزیع پس‌لرزه‌های ثبت شده توسط شبکه لرزه‌نگاری (Gholamzadeh et al., 2007).



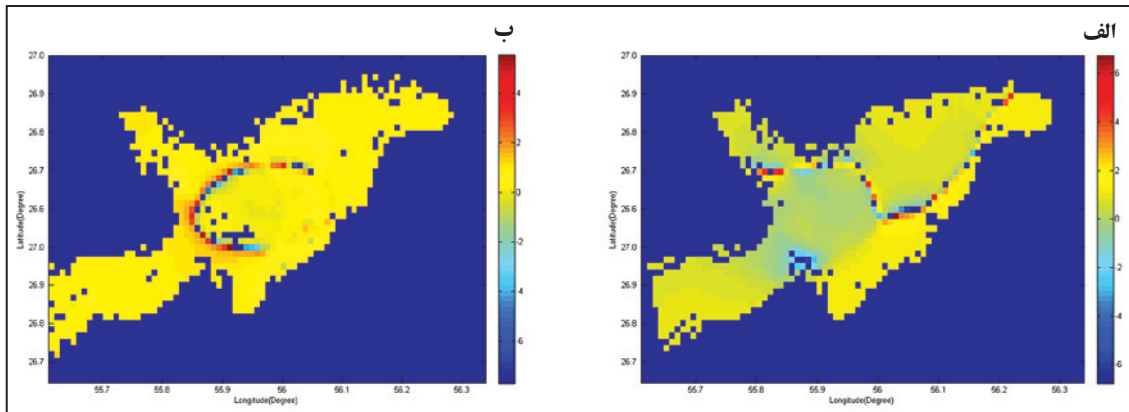
شکل ۴- اینترفروگرام‌های بازیابی شده حاصل از تصاویر الف) بالاگذر؛ ب) پایین‌گذر. بردار نشان‌داده شده جهت خط دید ماهواره است.



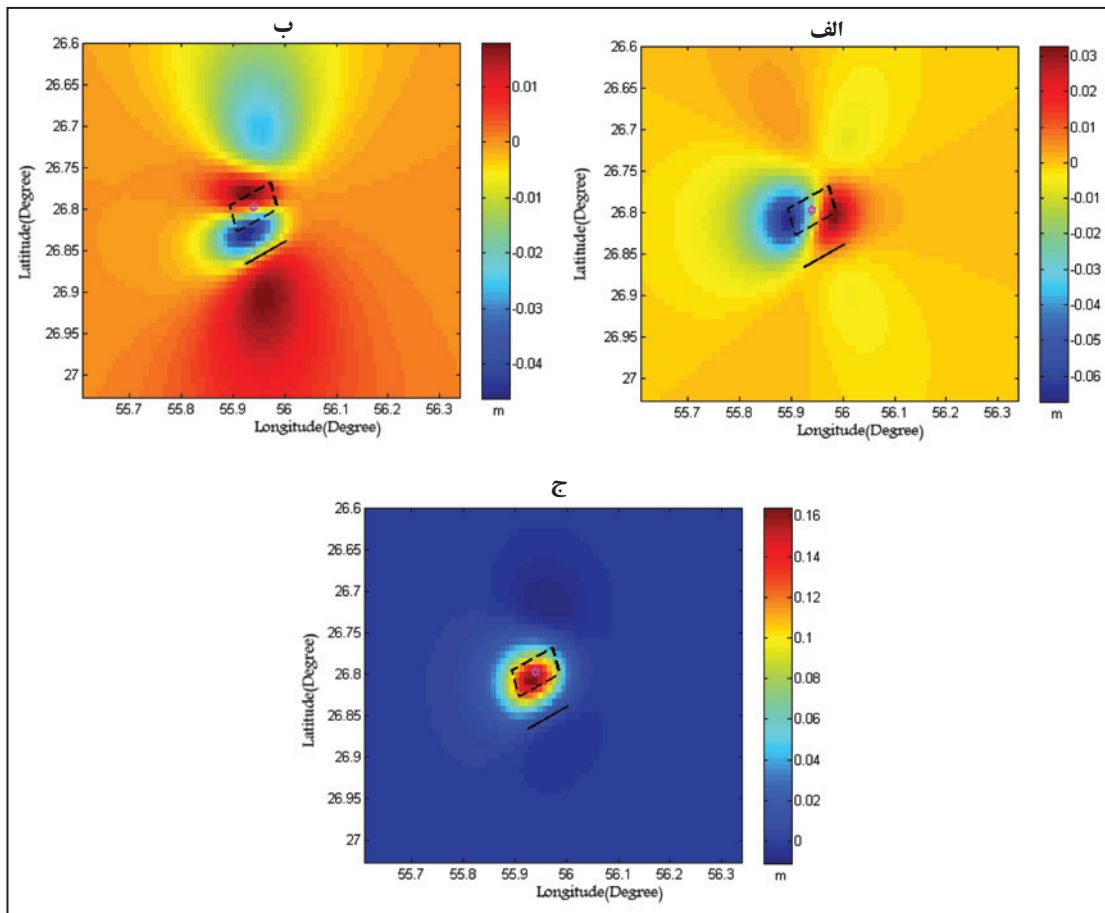
شکل ۵- پارامترهای تعریف شده گسل در مدل اکادا.



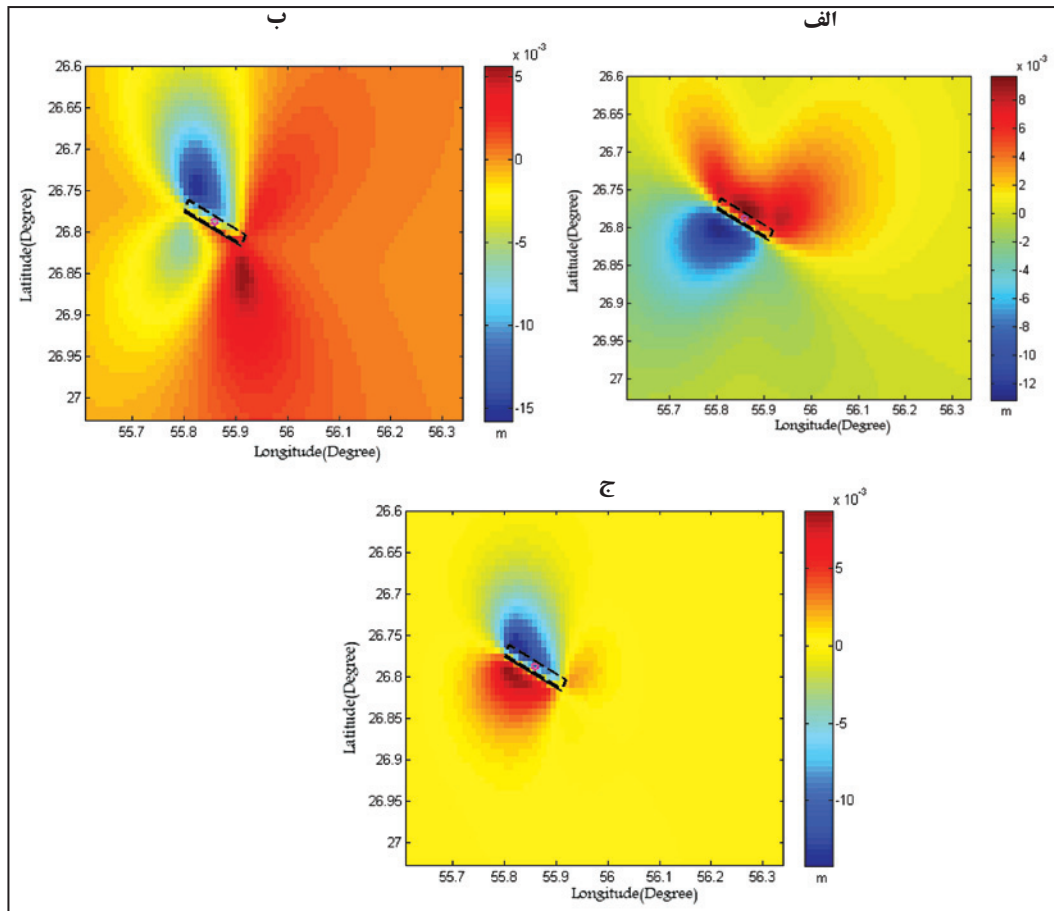
شکل ۶- الف) اینترفراگرام بالاگذر؛ ب) اینترفراگرام پایین گذر؛ ج) اینترفراگرام بالاگذر مدل سازی شده؛ د) اینترفراگرام پایین گذر مدل سازی شده؛ ه) بردار باقیمانده اینترفراگرام بالاگذر؛ و) بردار باقیمانده اینترفراگرام پایین گذر؛ جابه جایی های نمایش داده شده در راستای خط دید ماهواره است. مختصات مرکز گسل اصلی با ستاره صورتی و مختصات مرکز گسل فعال شده در پس لرزه با دایره نمایش داده شده است. گسل A مسبب زمین لرزه اصلی و گسل B گسل مسبب پس لرزه است.



شکل ۷- نقشه خطای نسبی. الف) اینتر فراگرام بالاگذر؛ ب) اینتر فراگرام پایین‌گذر.



شکل ۸- میدان جابه‌جایی مدل‌سازی شده زمین‌لرزه اصلی در راستای الف) خاوری- باختری؛ ب) شمالی- جنوبی؛ ج) ارتفاعی.



شکل ۹- میدان جابه‌جایی مدل‌سازی شده زمین‌لرزه دوم در راستای الف (خاوری-باختری؛ ب) شمالی-جنوبی؛ ج) ارتفاعی.

جدول ۱- ویژگی‌های تصاویر بالاگذر و پایین‌گذر مورد استفاده در این پژوهش.

تاریخ ۲	تاریخ ۱	آزیموت ماهواره (°)	زاویه برخورد (°)	
۲۰۰۵/۱۲/۲۱	۲۰۰۵/۰۱/۱۵	-۱۰	۴۱	اینترفراگرام بالاگذر
۲۰۰۵/۱۲/۲۹	۲۰۰۵/۱۱/۲۴	-۱۶۸	۲۳	اینترفراگرام پایین‌گذر

جدول ۲- بازه تغییرات تعریف شده پارامترهای گسل‌های منطقه برای الگوریتم ژنتیک.

زمین‌لرزه	طول (km)	عرض (km)	ژرفا (km)	شیب (°)	آزیموت (°)	عرض مرکز زمین‌لرزه (°)	طول مرکز زمین‌لرزه (°)	لغزش (m)	زاویه لغزش (m)
زمین‌لرزه اصلی	۱_۵۰	۱_۵۰	۱_۱۵	۲۰_۶۰	۲۲۰_۳۰۰	۲۶/۶۰_۲۷/۰۲	۵۵/۶۱_۵۶/۳۳	-۶_۶	۲۰_۲۲۰
پس‌لرزه	۱_۵۰	۱_۵۰	۱_۱۵	۷۵_۹۰	۲۰۰_۳۳۰	۲۶/۶۰_۲۷/۰۲	۵۵/۷۱_۵۶/۳۳	-۱_۱	-۱۸۰_۱۰

جدول ۳- پارامترهای برآورد شده برای زمین‌لرزه ششم آذرماه ۱۳۸۴ جزیره قشم و بزرگ‌ترین پس‌لرزه آن.

زمین‌لرزه	طول (km)	عرض (km)	ژرفا (km)	شیب (°)	آزیموت (°)	عرض مرکز زمین‌لرزه (°)	طول مرکز زمین‌لرزه (°)	لغزش (m)	زاویه لغزش (m)
زمین‌لرزه اصلی	۷/۲	۵/۱	۶/۱	۴۲	۲۴۸	۲۶/۸۳	۵۵/۹۳	۰/۹۶	۶۴
پس‌لرزه	۱۱/۷	۹/۵	۶/۳	۸۳	۲۹۳	۲۶/۸۴	۵۵/۸۶	۰/۰۹	-۱۵۷

کتابنگاری

شاه‌پسندزاده، م. و حسامی، خ.، ۱۳۸۵- بررسی گسیختگی‌های سطحی ناشی از زمین‌لرزه ششم آذرماه ۱۳۸۴ جزیره قشم، پژوهشنامه زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، سال نهم، شماره دوم، تابستان ۸۵، ص ۳۴-۴۱.
 فرزادگان، ا.، میرزایی علویجه، ح. و سیناییان، ف.، ۱۳۸۵- گزارش زمین‌لرزه ششم آذر ۱۳۸۴ جزیره قشم (خلیج فارس)، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، ۱۳۸۵.

References

- Amighpey, M., Vosooghi, B. & Dehghani, M., 2009- Earth surface deformation analysis of 2005 Qeshm earthquake based on threedimensional displacement field derived from radar imagery measurements, *Int. J. Applied Earth Observation and Geoinformation* 11(2): 156-166.
- Gholamzadeh, A., Yamini-Fard, F. & Ghasemi, M., 2007- The 2005 November 27 Qeshm Island earthquake (Iran), Mw 6.0, aftershock seismicity, 5th international conference in seismology and earthquake engineering, Tehran, Iran.
- Goldberg, D. E., 1989- *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, Kluwer Academic Publishers, Boston, MA.
- Holland, J. H., 1967- *Nonlinear environments permitting efficient adaptation*, *Computer and Information Sciences II* (New York: Academic).
<http://www.seismology.harvard.edu/projects/CMT>.
- Massonnet, D. & Feigl, K., 1998- Radar Interferometry and its application to changes in the earth surface, *Reviews of Geophysics*, pages 441-500, 36.
- Misra, S., 2008- *Global optimization with application to Geophysics*, Thesis (Ph.D.), University of Alberta (Canada).
- Nissen, E., Ghorashi, M., Jackson, J., Parson, B. & Talebian, M., 2007- The 2005 Qeshm Island earthquake (Iran) – a link between buried reverse faulting and surface folding in the Zagros Simply Folded Belt, *Geophysical Journal International*, NO. 171, PP. 326–338.
- Okada, Y., 1985- Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 75 (4), 1,135–1, 154.
- Pouladi, F., 2005- Iran villagers shelter in tents after killer quake, *Agence France-Presse (AFP)*.
- Wang, R., Lorenzo, M. F. & Roth, F., 2006- PSGRN/PSCMP - a new code for calculating co- and post-seismic deformation, geoid and gravity changes based on the viscoelastic-gravitational dislocation theory, *Computers and Geosciences*, 32, 4, 527-541.

Assessment of Source Parameters of Qeshm 2005 Earthquake Based on InSAR Observation Inversion Using Genetic Algorithm

M. Amighpey^{1*}, B. Vosooghi² & M. Motagh³

¹ Ph.D., Faculty of Geodesy & Geomatics Engineering, K. N. Toosi University of Technology (KNTU), Tehran, Iran

² Associate Professor, Faculty of Geodesy & Geomatics Engineering, K. N. Toosi University of Technology (KNTU), Tehran, Iran

³ Assistant Professor, Faculty of Geodesy & Geomatics Engineering, Tehran University, Tehran, Iran

Received: 2012 May 27

Accepted: 2013 August 21

Abstract

An earthquake with the magnitude of 5.9 M_L shocked the Qeshm island located in the Persian Gulf on 27 November, 2005 at 13:53:22 local time. The earthquake occurred due to the reactivation of a NE-SW fault with a major reverse mechanism accompanied by a minor strike-slip component. Another earthquake of 5.5 M_W occurred on the same day at ca. 20:00 local time. The interesting feature of this earthquake is that the calculated mechanism for its strongest aftershock, which occurred ca. 6 hours after the main-shock, was a strike-slip mechanism that is completely different from the pure reverse mechanism for the main-shock. This study uses inversion of InSAR observation of earth surface displacement field boundary values to solve parameters of these 2 earthquakes. The results show activation of southern part of the Qeshm fault caused by the first earthquake along 7 km of its length. This event induced the second earthquake by activation of another strike-slip fault which is parallel to the Gavazin anticline. Estimated slip was 96 cm for the first earthquake and 9 cm for the second one. Based on the estimated parameters of the these 2 earthquakes, the maximum displacement induced by the first earthquake was 6.7 cm in west, 4.6 cm in south and 16.4 cm in vertical directions on the earth surface. The maximum displacement of the second earthquake in west, south and vertical directions were 1.3, 1.6 and 1.4 cm respectively.

Keywords: InSAR, Genetic Algorithm, Inverse Problem, Earthquake Mechanism, Fault Parameters.

For Persian Version see pages 343 to 350

*Corresponding author: M. Amighpey; E-mail: amighpey@yahoo.com