

آنالیز تغییر شکل سطحی زمین در اثر زلزله ۶ آذر ۱۳۸۴ جزیره قشم با استفاده از تصاویر راداری

معصومه آمیغ پی^۱، بهزاد وثوقی^{۲*} و مریم دهقانی^۳

^۱دانش آموخته کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی نقشه برداری - دانشگاه خواجه نصیر

^۲استادیار دانشکده مهندسی نقشه برداری - دانشگاه صنعتی خواجه نصیر

^۳دانشجوی دکتری دانشکده مهندسی نقشه برداری - دانشگاه صنعتی خواجه نصیر

(تاریخ دریافت، ۸۶/۹/۲۰ تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۷/۹/۱۹، تاریخ تصویب ۸۸/۴/۲۸)

چکیده

زمین لرزه ای با بزرگای ۵/۹ در مقیاس امواج محلی در ششم آذر ۱۳۸۴ جزیره قشم و بخش‌های وسیعی از استان ساحلی هرمزگان را به لرزه درآورد. در این تحقیق، میدان جا به جایی سه بعدی ناشی از زلزله ۶ آذر ماه ۱۳۸۴ قشم با استفاده از اینترفراگرام‌ها و آزیموت آفست‌های مسیره‌های بالا گذر و پایین گذر، به دست آمد. ماکزیمم مقدار جا به جایی به دست آمده، ۱۰ سانتی متر در راستای غرب، ۶۹ سانتی متر در راستای جنوب، ۲۲ سانتی متر در راستای بالا بود. دقت برآورد شده این مؤلفه‌ها، به ترتیب ۰/۹، ۱۲/۱، ۱/۳ سانتی متر به دست آمد. سپس آنالیز استرین سه بعدی به روش حل عددی اجزا محدود، به منظور بررسی تغییر شکل های ناشی از حرکت هم لرزه ای انجام شد و کمیت های ناوردای اتساع و برش این میدان جا به جایی استخراج شد. نتایج به دست آمده، بیانگر ماکزیمم کشیدگی ۰/۰۰۶ و ماکزیمم فشردگی ۰/۰۰۵ و ماکزیمم مقدار برش ۰/۲ در صفحه XY، ۰/۴ در صفحه XZ و ۰/۱۹ در صفحه YZ، می باشد. نتایج به دست آمده، بیانگر تغییر جهت و کشیدگی و فشردگی بیشینه در راستای گسل های پیشنهادی از مطالعات لرزه نگاری پس لرزه های جزیره می باشد و تجمع بیشترین برش و اتساع را در قسمت مرکزی جزیره در راستای گسل معکوس شمال غربی - جنوب شرقی گذرنده از قسمت میانی جزیره نشان می دهد و در حوالی گسل قشم نیز برش و اتساعی وجود داشته است.

واژه های کلیدی: تداخل سنجی راداری، آزیموت آفست، استرین، آنالیز تغییر شکل، اینترفراگرام

مقدمه

اندازه گیری جا به جایی های زمین یک هدف کلیدی در مطالعات زلزله شناسی می باشد. تکنیک های ژئودتیکی به مشاهدات قبل زلزله نیاز دارد و اندازه گیری های دقیقی در نقاط محدود فراهم می کند، اما تصویربرداری ماهواره ای، تصاویری با اطلاعات جامع مکانی در اختیار ما قرار می دهد. با پرتاب ماهواره های راداری، امکان بررسی تغییر شکل پوسته زمین با دقت مناسب فراهم شده است. تکنیک تداخل سنجی راداری، در دهه اخیر تکنیک متداولی برای اندازه گیری تغییرات سطح زمین گردیده است. پوشش سراسری و قدرت تفکیک مکانی بالای تصاویر راداری و دقت قابل قبول این روش، این تکنیک را به عنوان ابزار نیرومندی برای مطالعه پدیده های مختلف زمین شناسی همچون زلزله، نشست، زمین لغزش و ... مطرح کرده است [۱].

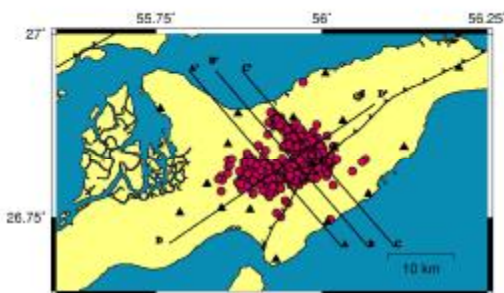
استخراج میدان جا به جایی سه بعدی از تصاویر راداری صورت پذیرفت. فیالکو و دیگران در ۲۰۰۱ با تلفیق آزیموت آفست‌ها و اینترفراگرام های با دو هندسه تصویر برداری متفاوت، به میدان جا به جایی سه بعدی پیوسته در راستای شمال، شرق، قائم ناشی از زلزله هکتور ماین دست یافتند [۲].

زمین لرزه ای با بزرگای ۵/۹ در مقیاس امواج محلی در تاریخ ۶ آذر ماه ۱۳۸۴ ساعت ۱۳ و ۵۳ دقیقه و ۳۱ ثانیه به وقت محلی جزیره قشم و بخش های وسیعی از استان ساحلی هرمزگان را به لرزه درآورد. این زمین لرزه ۱۰ کشته و ۱۰۰ مجروح به جای گذاشت.

در این تحقیق، میدان جا به جایی سه بعدی ناشی از زلزله ۶ آذر ماه ۱۳۸۴ جزیره قشم، با استفاده از تصاویر راداری ASAR از ماهواره ENVISAT و با تلفیق تکنیک های تداخل سنجی راداری و آزیموت آفست محاسبه و بررسی شد و سپس تانسور استرین سه بعدی ناشی از زلزله به روش عددی اجزا محدود محاسبه شد. پس از

یکی از محدودیت های تکنیک تداخل سنجی راداری، امکان اندازه گیری جا به جایی تنها در راستای خط دید ماهواره، می باشد. بدین منظور، تلاش هایی در جهت

زمین لرزه دیگری با بزرگای گشتاوری ۵/۵ در ساعت ۲۰ به وقت محلی همان روز روی داد. نکته جالب این زلزله این است که ساز و کار محاسبه شده برای قوی ترین پس لرزه آن، که ۶ ساعت بعد از شوک اصلی اتفاق افتاده است، یک ساز و کار راستا لغز است که کاملاً با ساختار معکوس شوک اصلی فرق می کند [۳]. طبق نظر شاه پسند زاده و حسامی که بر اساس مشاهدات گسیختگی سطحی به تفسیر گسل مسبب زلزله پرداخته بودند، نزدیکترین گسل راندگی به رومرکز زمین لرزه اول، گسل قشم با طولی حدود ۶۰ کیلومتر است که از حوالی شهر قشم تا جزیره هنگام با تحدبی به سمت شمال باختر امتداد دارد. طبق نظر شاه پسند زاده و حسامی، برای زلزله دوم با ساز و کار کانونی دو صفحه تقریباً قائم که امتداد یکی از آنها شمال خاوری و دیگری شمال باختری است، شاید بتوان صفحه کمکی با راستای شمال باختری گسل گورزین، را گسل مسبب این زمین لرزه دانست [۴]. پس از زلزله ۶ آذر ۱۳۸۴، ۱۷ ایستگاه لرزه نگاری در منطقه مرکزی زلزله نصب شد. توزیع رو مرکز پس لرزه ها و همچنین توزیع عمق آنها در بازه زمانی ۱۱ آذر ۱۳۸۴ تا ۷ اسفند ۱۳۸۴، پراکنده است و تعیین راستاهای ساده مرتبط با گسل ها کار دشواری است. غلامزاده و دیگران راستای مقاطع BB' و CC' در شکل (۱) را برای مکانیسم فشاری و راستای DD' در نزدیکی گسل قشم را برای مکانیسم راستالغز پیشنهاد می کنند [۵]. نیسن و دیگران به مدلسازی گسل مسبب زلزله بر مبنای داده های تداخل سنجی راداری، بر اساس مدل جابجایی الایسته پرداختند [۶]. آنها گسل شرقی - غربی معکوس را گسل مسبب زلزله معرفی نمودند. شکل (۲) بالا آمدگی محاسبه شده از مدل سازی و صفحه گسل را نمایش می دهد.



شکل ۱: توزیع پس لرزه های ثبت شده توسط شبکه لرزه نگاری [۵].

محاسبه تنسور استرین با استفاده از مکانیک محیط های پیوسته، کمیت های عددی برش و اتساع نیز برای تفسیر این تنسورها محاسبه شد و نتایج این تفسیرها با نتایج حاصل از دیگر مطالعات انجام شده بر این زلزله مقایسه شد. این تحقیق توانست با ارائه میدان جا به جایی سطحی سه بعدی با قدرت تفکیک مکانی بالا، منبع اساسی برای مدل سازی تحلیلی گسل های مسبب زلزله و بررسی رفتار آنها باشد و مشکلات بررسی زلزله بر اساس اینترفروگرام های زلزله قشم را که جا به جایی را در راستای خط دید ماهواره می دادند و بنابراین تفسیر هندسی آنها به راحتی میدان جابجایی سه بعدی امکان پذیر نبود، رفع نماید.

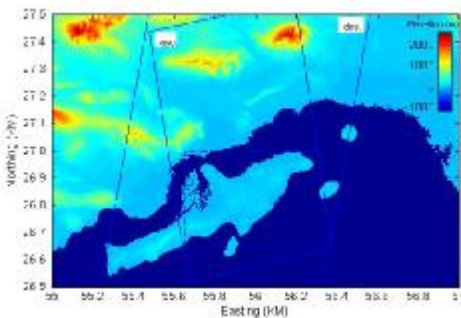
مروری بر زمین شناسی قشم و رویداد زلزله ۶ آذر ماه ۱۳۸۴

بر اساس شواهد تکتونیکی و رسوب شناسی، می توان قشم را بخشی از جنوب شرقی ایالت زمین شناختی و نسبتاً فعال تکتونیکی - نئوتکتونیکی زاگرس در نظر گرفت. شباهت ظاهری و همچنین هماهنگی در امتداد تاقدیس های بزرگ جزیره قشم با تاقدیس های زاگرس، شهادی بر این موضوع است. تشکیل جزیره و یا برون زد آن از دریا عمدتاً نتیجه نیروهای فشاری در تداوم فاز تکتونیک نهایی کوهزایی آلپ در اواخر ترشیاری بوده است. با توجه به قرارگیری جزیره قشم در پهنه لرزه زمین ساختی زاگرس، ویژگی های لرزه زمین ساختی این ناحیه مشابه مناطق مجاور آن در ایالت لرزه زمین ساختی زاگرس است. این ناحیه با رویداد زمین لرزه های با عمق کم و بزرگی متوسط بر اثر فعالیت گسل های معکوس یا رانده با شیب زیاد مشخص می شود. این منطقه، بدلیل مجاورت در مرز صفحات ایران و صفحه عربی، همواره یک منطقه لرزه خیز بوده است.

در ساعت ۱۳:۵۳:۲۲ به وقت محلی روز ششم آذر ماه ۱۳۸۴ هجری خورشیدی زمین لرزه ای با بزرگای ۵/۹ جزیره قشم و مناطق اطراف را لرزاند. این زمین لرزه 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 زمین لرزه ۳ روستای گورزین، زیرانگ و تنبان ۱۰۰ درصد تخریب شدند.

کار رود. بنابراین با استفاده از دامنه و فاز تصاویر راداری و تلفیق دو روش تداخل سنجی راداری و آزیموت آفست، به خوبی می توان به میدان جابجایی سه بعدی سطح زمین دست یافت.

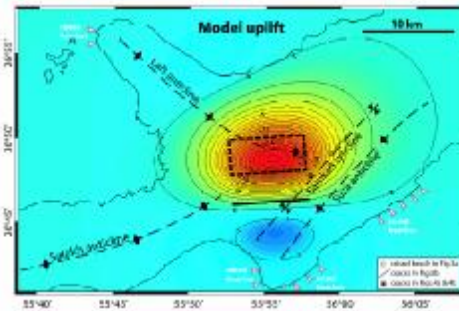
برای زلزله قشم چهار تصویر خام راداری ASAR از ماهواره ENVISAT از آژانس فضایی اروپا (ESA) در اختیار داشتیم و منطقه زلزله زده، توسط تصاویر بالا گذر و پایین گذر این ماهواره پوشش داده شده بود (شکل ۳). با استفاده از نرم افزار گاما و پارامترهای مداری آژانس فضایی اروپا، این تصاویر پردازش شدند و با تلفیق دو روش تداخل سنجی راداری و آزیموت آفست، میدان جا به جایی سه بعدی سطحی ناشی از زلزله قشم به دست آمد.



شکل ۳: مدل رقومی ارتفاعی SRTM منطقه قشم، محدوده تحت پوشش تصاویر بالا گذر و پایین گذر با خطوط پررنگ و منطقه مطالعاتی (منطقه اشتراک تصاویر) با خط چین نشان داده شده است.

داده تداخل سنجی راداری

تداخل سنجی رادار با درجه مصنوعی، یک تکنیک ژئودتیکی فضایی دقیق است که امکان تهیه نقشه از تغییر شکل را با قدرت تفکیک مکانی بالا و دقت مناسب فراهم می کند. اینترفراگرام ها تصاویر سه بعدی از اختلاف فاز تصاویر راداری هستند که بیانگر تغییر فاز در اثر جا به جایی سطح زمین در راستای خط دید ماهواره هستند. برای حذف اثر توپوگرافی از اینترفراگرام ها از SRTM DEM استفاده شد که با توجه به ارتفاع ابهام اینترفراگرام ها که از دقت ارتفاعی این مدل رقومی ارتفاعی بزرگتر بودند، اثر توپوگرافی به خوبی حذف شد و اینترفراگرام ها به روش خطوط برش بازبایی شدند [۸]. در شکل (۴) اینترفراگرام های حاصل از پردازش تصاویر برای مسیرهای بالا گذر و پایین گذر نمایش داده شده است.



شکل ۲: آپلیفت هم لرزه ای محاسبه شده از مدل زلزله استخراج شده از تداخل سنجی راداری، مستطیل خط چین نشان دهنده صفحه گسل مدفون مدل سازی شده با شیب شمالی است و خط ضخیم تصویر آن روی سطح است. خطوط خط چین بیانگر تاق دیس ها و ناودیس های جزیره است [۶].

در این تحقیق ما بر اساس نتایج سه بعدی دست آمده از آنالیز تغییر شکل سطحی زلزله بر مبنای تصاویر راداری، به مقایسه نتایج سه بعدی دست آمده از این تحقیق، با گسل های پیشنهادی بر اساس دیگر منابع اطلاعاتی می پردازیم.

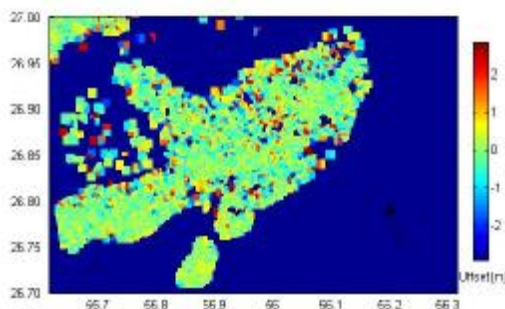
استخراج میدان جابجایی سه بعدی از تصاویر راداری Envisat

امروزه تکنیک تداخل سنجی راداری به عنوان یک تکنیک متداول برای مطالعات زلزله شده است. اما به هر صورت این تکنیک محدودیت هایی مانند حساسیت بالا به عدم همبستگی فاز تصاویر، مساله بازبایی فاز که غالباً مشکل است، و اندازه گیری جا به جایی تنها در جهت خط دید ماهواره، و از دست دادن فرینج ها در مکانی که گرادیان جا به جایی بیش از نصف یک فرینج در هر پیکسل باشد (مانند مناطق نزدیک گسل)، دارد [۷].

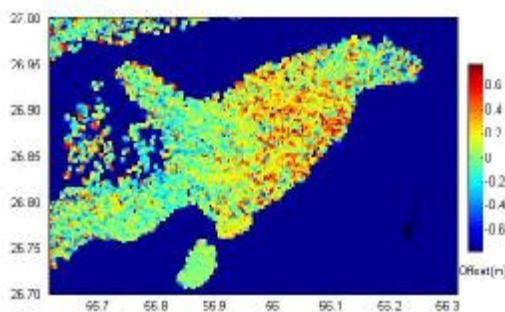
جستجوی شیفت لازم برای انطباق پیکسل های متناظر دامنه دو تصویر (آفستها) با دقت زیر پیکسل یک تکنیک اساسی برای به دست آوردن جا به جایی های افقی منطقه مورد نظر می باشد. گرچه این تکنیک صحت کمتری از تکنیک تداخل سنجی دارد و جا به جایی را با صحت چند ده سانتی متر اندازه گیری می کند، اما مستحکم تر بوده و از آنجا که دو مؤلفه جا به جایی را در راستای برد و آزیموت (مؤلفه عمود بر برد) اندازه گیری می کند، و همچنین نسبت به تکنیک تداخل سنجی، به عدم همبستگی تصاویر حساسیت کمتری دارد و بنابراین در نزدیکی گسل نیز می تواند جابجایی را اندازه گیری کند، می تواند به عنوان مکمل تکنیک تداخل سنجی به

بعد آزمون آفست های بزرگ دور از حد واقع فیلتر شد. آزمون آفست تصویرهای بالا گذر به شدت نویزی بود، طوری که پس از حذف رویه همچنان طبیعت تصادفی و نویزی را در مکانهای دور از جزیره نشان می داد. بنابراین از اطلاعات آفست آن برای استخراج میدان جابجایی استفاده نشد (شکل ۵ - الف).

آفست های باقی مانده مدار پایین گذر را می توان در اثر جا به جایی زمین در اثر زلزله مذکور در راستای حرکت ماهواره در نظر گرفت (شکل ۵ - ب). فیلتر میانه برای نرم کردن مشاهدات استفاده شد.



الف

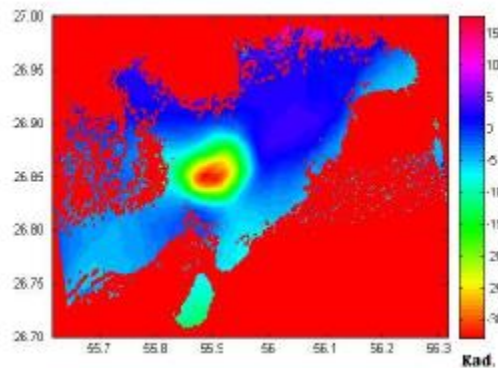


ب

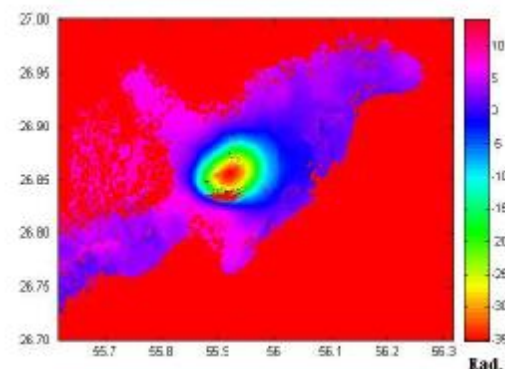
شکل ۵: داده آزمون آفست پس از حذف ترند، (الف) برای مسیر بالا گذر، (ب) برای مسیر پایین گذر، فلش نمایانگر جهت حرکت ماهواره است.

استخراج میدان جا به جایی سه بعدی

با داشتن حداقل سه مشاهده مستقل جابجایی زمین در هندسه های تصویر برداری مختلف، می توان مدل سه بعدی تغییر شکل زمین را به دست آورد. بردارهای جا به جایی مشاهداتی به دست آمده از فازهای تداخل سنجی مسیرهای بالا گذر و پایین گذر به مؤلفه های شرقی - غربی و قائم جا به جایی و بردارهای جا به جایی حاصل از آزمون آفست های این تصاویر به مؤلفه شمالی - جنوبی و شرقی - غربی جا به جایی حساسند.



الف



ب

شکل ۴: الف: اینترفراگرام بازیابی شده ژئوکد بالا گذر در بازه زمانی ۱۳۸۳ دی ۱-۱۳۸۴ دی ۱۶، ب: اینترفراگرام بازیابی شده ژئوکد پایین گذر در بازه زمانی ۴ آذر ۱۳۸۴-۹ دی ۱۳۸۴.

با داشتن این دو اینترفراگرام در حقیقت مؤلفه های بردار جا به جایی در دو راستای خط دید ماهواره در حالت بالا گذر و خط دید ماهواره در حالت پایین گذر برای ما مشخص است. برای به دست آوردن مؤلفه سوم از داده های آزمون آفست استفاده می کنیم.

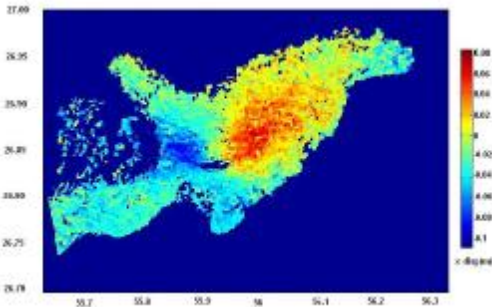
داده آزمون آفست

برای استخراج بردارهای جا به جایی با استفاده از آزمون آفست، آزمون آفست های با نسبت سیگنال به نویز بالاتر از ۶/۵ انتخاب شدند که این نسبت سیگنال به نویز ۶/۵ به صورت تجربی به عنوان نسبت سیگنال به نویز مناسب انتخاب شد. سپس یک رویه بر مقادیر آزمون آفست محاسبه شده در مکان هایی که دور از گسل زلزله بوده و در آنها به علت حوزه میدان نزدیک زلزله، انتظار جا به جایی سطح زمین وجود ندارد، برازش داده شد. سپس این رویه از مشاهدات آزمون آفست کم شد و در مرحله

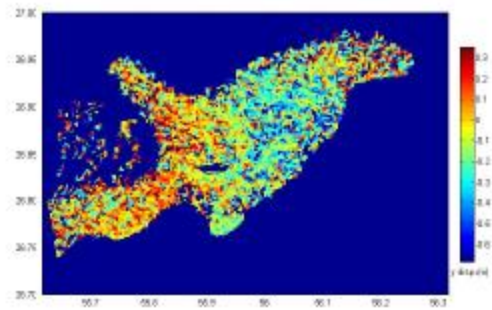
$$\sum_u = [P^T \sum_D^{-1} P]^{-1} \quad (۳)$$

خطای مؤلفه های بردار جا به جایی سه بعدی $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ ، که تحت تاثیر سطح نویز داده ها و جهت خط دید ماهواره است، با رابطه زیر به دست می آید:

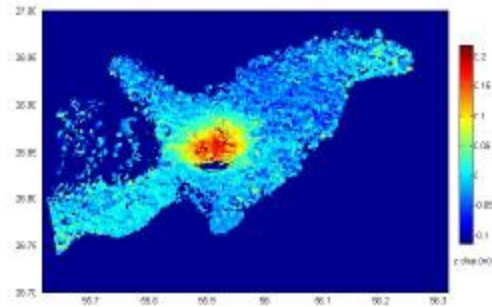
$$(\sigma_x^2, \sigma_y^2, \sigma_z^2) = \text{diag}[P^T \sum_D^{-1} P]^{-1} \quad (۴)$$



الف



ب



ج

شکل ۶: میدان جا به جایی سه بعدی برای زلزله قشم، الف- مؤلفه x، ب- مؤلفه y، ج- مؤلفه z.

با استفاده از اینترفراگرام های مسیر های بالا گذر و پایین گذر و آزمون آفست مسیر پایین گذر، میدان جا به جایی سه بعدی سطح زمین در اثر زلزله قشم و دقت مؤلفه های این میدان به دست آمد (شکل ۶). ماکزیمم

عدم تطابق^۱ این اندازه گیریها با محاسبه عدم تطابق^۲ بین داده و بهترین صفحه برازش شده در منطقه دور از زلزله، با در نظر گرفتن حوزه میدان نزدیک زلزله و انتظار نداشتن جا به جایی در مناطق دور، برآورد می شود و جذر میانگین مربعی^۳ این عدم تطابق داده و صفحه مذکور به عنوان تخمینی برای عدم تطابق داده به کار می رود (جدول ۱).

جدول ۱: عدم اطمینانی اینترفراگرامها و آزمون آفست ها.

RMS(m)	Data
0.0045	Ascending interferogram
0.0036	Descending interferogram
0.656	Ascending azimuth offset
0.116	Descending azimuth offset

در حالتی که ۲ تصویر مربوط به مسیر بالاگذر و ۲ تصویر مربوط به مسیر پایین گذر در اختیار داریم، هر پیکسل روی زمین ۴ مشاهده جا به جایی وجود دارد، دو بردار جا به جایی در راستای خط دید ماهواره مربوط به اینترفراگرامهای بالاگذر و پایین گذر، و دو مشاهده بردار جا به جایی به دست آمده از آزمون آفست در راستای حرکت ماهواره. این مشاهدات را با ماتریس D نشان می دهیم که $D = (d_1, d_2, d_3, d_4)$ است. اگر P بردار سطری واحد (p_x, p_y, p_z) باشد که مؤلفه های بردار مشاهده از زمین به ماهواره را در یک سیستم مرجع محلی شرقی، شمالی، قائم نشان می دهد، خواهیم داشت:

$$D = Pu \quad (۱)$$

که در این معادله u بردار ستونی $(u_x, u_y, u_z)^T$ است که شامل مؤلفه های جا به جایی در همان سیستم مختصات مرجع محلی است. اگر ماتریس کوواریانس خطای مشاهدات باشد، داریم:

$$\hat{u} = -[P^T \sum_D^{-1} P]^{-1} P^T \sum_D^{-1} D \quad (۲)$$

و ماتریس کوواریانس مؤلفه های بردار جا به جایی از رابطه زیر به دست می آید:

این نقاط برای محاسبه استرین حذف شد و مقدار استرین محاسباتی در فاصله حداکثر ۴۵۰ متری آنها، به این نقاط نسبت داده شد.

بزرگترین المان های تنسور استرین المانهایی E_{23} و E_{32} می باشند. در نقاطی که با تغییر شکل مواجه هستیم، به دلیل همگن و ایزوتروپ نبودن میدان جا به جایی با کاهش دقت مواجه هستیم. اثر کاهش دقت مؤلفه شمالی جا به جایی بر دقت مؤلفه های استرین نیز در دقت مؤلفه های E_{23} و E_{22} و E_{21} به خوبی مشهود است. دقت گرادیان جا به جایی نسبت به Z نیز نسبت به دو راستای دیگر X, Y بزرگتر است، که به علت تغییر کمتر توپوگرافی منطقه در برابر تغییرات مؤلفه های مسطحاتی منطقه می باشد.

به منظور تفسیر هندسی بهتر تنسور استرین کمیت های اتساع و برش محاسبه شد. برای تفسیر و نمایش بهتر این نتایج، فیلتر وینر روی این کمیت ها اعمال شد. شکل (۷) پارامترهای اتساع و برش در صفحات X و Y و Z محاسبه شده توسط روش اجزا محدود را نشان میدهد. همان طور که در شکل دیده می شود، در منطقه مرکزی جزیره شاهد انقباض و انبساط و تغییر امتداد هستیم.

بررسی راستا و موقعیت گسل های مسبب زلزله

در این قسمت، بر اساس مقادیر اتساع و برش محاسبه شده در قسمت قبل، به بررسی نواحی با بیشترین تغییر شکل در اثر زلزله می پردازیم.

شکل (۷) نمایش مقادیر اتساع و برش و راستای گسل های مطرح به عنوان گسل مسبب زلزله می باشد. در این اشکال A راستای گسل قشم، B راستای گسل پیشنهادی غلامزاده برای گسل معکوس مسبب زلزله و C راستای گسل پیشنهادی نیسن است.

همان طور که ملاحظه می شود، در راستای گسل های مطرح شده شاهد ماکزیمم برش و اتساع هستیم و در راستای این گسل ها شاهد تغییر جهت و انقباض و انبساط هستیم. البته تجمع ماکزیمم مقادیر برش و اتساع حول گسل های پیشنهادی غلامزاده و دیگران [۵]، بیشتر است.

مقدار جا به جایی به دست آمده، ۱۰ سانتی متر در راستای غرب (X)، ۶۹ سانتی متر در راستای جنوب (Y)، ۲۲ سانتی متر در راستای قائم (Z)، بود. جدول (۲) دقت (انحراف معیار) مؤلفه های شرق و شمال و قائم برای میدان جابجایی سه بعدی به دست آمده از تکنیک تلفیق تداخل سنجی و آزیموت آفست را نشان می دهد.

جدول ۲: دقت (انحراف معیار) برآورد شده مؤلفه های شرق و شمال و بالای جا به جایی.

σ_z (cm)	σ_y (cm)	σ_x (cm)
1.3	12.1	0.9

آنالیز استرین سه بعدی

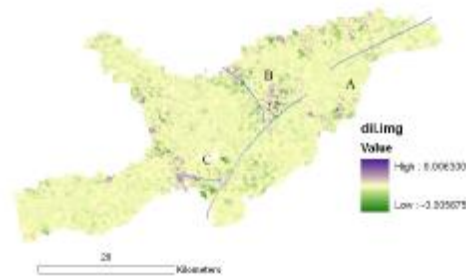
به منظور آنالیز تغییر شکل ناشی از زلزله بصورت مستقل از سیستم مختصات، به محاسبه تنسور استرین منطقه و دقت آن و پارامترهای اتساع و برش آن پرداختیم. از آنجا که با داده ناپیوسته مواجه بودیم، با استفاده از روش حل عددی اجزاء محدود (استفاده از المان های چهار وجهی) تنسور استرین محاسبه شد.

با استفاده از روش اجزا محدود تنسور استرین در نقاط جزیره محاسبه شد. در روش اجزا محدود، مؤلفه های تنسور استرین، با استفاده از اطلاعات هر گرید چهار تایی از پیکسل ها، برای مرکز ثقل هر گرید محاسبه شد. در این روش، از آنجا که به خاطر وضعیت توپوگرافی تقریباً هموار و کم تغییر منطقه، المانهایی حجمی (هرمی) ما، شکل مناسبی پیدا نمی کرد و برخی از المان ها نزدیک به مربع می شد و حدوداً در صفحه قرار می گرفت، (به دلیل تغییرات ارتفاعی ناچیز)، با مشکل سینگولاریتی ماتریس طراحی در برخی نقاط مواجه بودیم. علاوه بر آن در نیمی از نقاط شبکه به دلیل نزدیک بودن ماتریس طراحی به سینگولاریتی، با دقت های غیر قابل قبولی مواجه می شدیم (دقتی در محدوده 10^{13}).

برای حل این مشکل برای محاسبه تنسور استرین در این نقاط، از جا به جایی پیکسل های دورتر (و نه پیکسل های مجاور) که در فواصل نهایتاً ۱۸۰۰ متری نقطه مورد نظر بودند، استفاده شد و المان های جدیدی در این نقاط تعریف شد، با این حال هنوز در ۱۶ درصد نقاط با مشکل مقیاس نامناسب ماتریس طراحی مواجه بودیم که نهایتاً

در مورد گسل های مسبب زلزله جزیره قشم ، اختلاف نظرهایی وجود داشت و سه نظریه مطرح بود ، نظریه شاه پسند زاده و حسامی که بر اساس مشاهدات گسیختگی های سطحی منطقه بود، گسل قشم را به عنوان گسل فشارشی (مربوط به شوک اصلی) و گسل گورزین را به عنوان گسل مسبب پس لرزه با مکانیسم راستا لغز پیشنهاد کرده بود[۴]. نتایج برش و اتساع به دست آمده ما، در قسمت هایی از گسل قشم که در تلاقی با گسل پیشنهادی با نظریه غلامزاده و دیگران بود ، تغییر جهت و اتساعی را نشان می داد ، اما در راستای گسل گورزین این برش در برابر برش دیگر نواحی قابل توجه نبود. نظریه دیگر، نظریه غلامزاده و دیگران بود که بر اساس بررسی پراکندگی پس لرزه های منطقه و عمق آنها، گسلی با راستای شمال غربی - جنوب شرقی را به عنوان گسل معکوس و راستایی نزدیک به گسل قشم را به عنوان راستای پیشنهادی برای گسل راستالغز پیشنهاد می کرد. از نقاط ضعف این کار، ایجاد شبکه لرزه نگاری در فاصله زمانی چند روز پس از زلزله اصلی بود که بنابر این امکان تعیین موقعیت شوک اصلی و پس لرزه اصلی نبود. نتایج ما تجمع بیشترین برش و اتساع را در راستای گسل معکوس فوق نشان می داد و در راستای گسل قشم نیز برش و اتساعی وجود داشت .

نظریه سوم، نظریه نیسن و دیگران [۶] بود که براساس مدل سازی زلزله فوق بر مبنای روش تداخل سنجی راداری، طبق تئوری جا به جایی الایسته و مشاهدات زمینی و مدل سازی موج لرزه نگاری انجام شده بود، وی نتوانسته بود بر اساس اینترفراگرام های ایجاد شده، راستا و محل گسل راستا لغز پس لرزه را به دست آورد، و یک گسل شرقی - غربی را به عنوان گسل معکوس مسبب زلزله پیشنهاد کرده بود. به نظر می رسد با توجه به هندسه تصویر برداری راداری و این که اینترفراگرام جابجایی را تنها در راستای خط دید ماهواره نشان می دهد، برای مدلسازی زلزله، بهترین روش استخراج مؤلفه های جا به جایی، و سپس مدلسازی زلزله بر مبنای این میدان باشد. کاری که هنوز برای زلزله قشم صورت نگرفته است. در هر صورت ما در راستای گسل پیشنهادی نیسن نیز شاهد برش و اتساعی بودیم، اما بیشترین برش و اتساع همان طور که شرح داده شد در راستای گسل پیشنهادی غلامزاده و دیگران بود.



الف



ب



ج



د

شکل ۷: پارامترهای هندسی به دست آمده از تنسور استرین ، و راستای گسل های مطرح به عنوان گسل مسبب زلزله. الف- اتساع ب- برش در صفحه XY ج- برش در صفحه XZ د- برش در صفحه YZ.

دورتر (و نه پیکسل های مجاور) استفاده شد.

دقت گرادیان های جا به جایی به دقت میدان های جا به جایی وابسته است. به طوری که دقت گرادیان های جا به جایی در راستای y که جا به جایی در این راستا دقت کمتری از سایر مؤلفه های ما داشت، کمتر از دقت سایر گرادیان ها بود. علاوه بر این، دقت گرادیان های جا به جایی به همگن و ایزوتروپ بودن میدان جا به جایی نیز وابسته است. بنابر این دقت گرادیان های جا به جایی در نواحی که دچار تغییر شکل شده اند، کمتر می باشد.

به منظور تفسیر هندسی بهتر تانسور استرین کمیت های اتساع و برش محاسبه شد. بر این اساس راستاهایی که در آنها با حرکت برشی و انقباض و انبساط روبرو بودیم، مشخص شد. نتایج حاصل، بیانگر انقباض و انبساط در محل گسل های منطقه و برش ماکزیمم در این مناطق می باشند.

نکته قابل توجه این است که ماکزیمم برش ایجاد

شده، برش در صفحه xz ، یعنی γ_{13} می باشد که حدودا دو برابر برش ایجاد شده در صفحات دیگر است، این خود موید رفتار گسل مسبب شوک اصلی است که مکانسیم فشاری داشته از نوع گسل های معکوس بوده است.

در مورد گسل های مسبب زلزله جزیره قشم، بر اساس مشاهدات گسیختگی های سطحی منطقه، بررسی پراکندگی پس لرزه های منطقه و عمق آنها و مدل سازی تحلیلی گسل ها سه نظریه موجود بود که نتایج این تحقیق، بیشترین توافق را با مطالعات بررسی پراکندگی پس لرزه های منطقه و عمق آنها نشان داد.

در هر صورت کار بر روی گسل های مسبب این زلزله با توجه به پیچیدگی رفتاری زمین شناسی قشم، همچنان ادامه دارد. اما پیشنهاد می شود به منظور تکمیل این روند، مدل سازی تحلیلی زلزله فوق بر اساس میدانهای جا به جایی سه بعدی ناشی از زلزله به دست آمده در این تحقیق انجام شود. همچنین به منظور بررسی بهتر صحت میدان جا به جایی به دست آمده، مخصوصا اطمینان از قابل چشم پوشی بودن اثر اتمسفری، استفاده از دیگر منابع مشاهداتی همچون ترازیبایی دقیق و GPS در بررسی حرکات هم لرزه ای زلزله ها پیشنهاد می شود.

نکته قابل توجه دیگر این است که ماکزیمم برش ایجاد شده، برش در صفحه xz ، می باشد که حدودا دو برابر برش ایجاد شده در صفحات دیگر است، این خود موید رفتار گسل مسبب شوک اصلی است که مکانسیم فشاری داشته از نوع گسل های معکوس بوده است.

بحث و نتیجه گیری و پیشنهادات

با توجه به شباهت زمین شناسی و لرزه زمین ساختی جزیره قشم با زاگرس، این جزیره از پتانسیل لرزه خیزی بالایی برخوردار است. رویداد زمین لرزه های تاریخی در این جزیره موید همین مسئله است. در این میان مناطق میانی جزیره با توجه به روند لرزه خیزی مطالعه شده از پتانسیل بالاتری برخوردار بوده است. رویداد این قبیل زمین لرزه ها می توان خطری جدی برای ساخت و ساز روستایی و شهری جزیره رو به توسعه قشم داشته باشد که ضروری است مورد توجه قرار گیرد.

رویداد ششم آذر ماه سال ۱۳۸۴ قشم، نخستین زمین لرزه با بزرگای بیش از پنج در مقیاس ریشتر، در این پهنه، در سال ۱۳۸۴ است. این زمین لرزه منجر به خساراتی متوسط در پهنه رومرکز مه لرزه ای شد.

در این تحقیق، ۴ تصویر راداری با استفاده از نرم افزار گاما مورد پردازش قرار گرفت و میدان جا به جایی سه بعدی ناشی از زلزله آذر ماه ۱۳۸۴ قشم با استفاده از تلفیق دو تکنیک تداخل سنجی راداری و آزیموت آفت، به دست آمد. پس از آن، با استفاده از محاسبه گرادیان-های میدان جا به جایی و محاسبه کمیت هایی همچون اتساع و برش، میدان جا به جایی به دست آمده از تصاویر راداری ناشی از تغییر شکل سطحی ناشی از زلزله مورد بررسی قرار گرفت. این تحقیق، اولین تحقیقی بود که به محاسبه گرادیانهای جابجایی سه بعدی به دست آمده از تصاویر راداری با خصوصیت قدرت تفکیک مکانی بالا می پرداخت. خصوصیت توان تفکیک بالای میدان های جا به جایی تولید شده، امکان بررسی رفتار گسل های منطقه را برای ما فراهم می نمود، در کنار اینکه به علت توپوگرافی ملایم منطقه که از یک پیکسل به پیکسل مجاور تغییر ارتفاعی در برابر تغییر مسطحاتی ناچیز بود، مشکل سینگولاریتی برای محاسبه استرین به روش اجزا محدود ایجاد می شد. برای حل این مشکل برای محاسبه تانسور استرین در هر نقطه، از اطلاعات پیکسل های

تقدیر و تشکر

در خاتمه لازم است از همکاری بسیار خوب سازمان زمین شناسی کشور به جهت در اختیار قرار دادن نرم افزار گاما و تصاویر ENVISAT، کمال تشکر و قدردانی را داشته باشیم.

ضروری به نظر می رسد به لحاظ وضعیت تکنونیکایی فعال این جزیره، ایجاد ایستگاه دائم GPS و تکرار مشاهدات شبکه های GPS و ترازیبی منطقه به منظور بررسی و کنترل تغییرات سطحی زمین در جزیره قشم، مورد توجه قرار گیرد.

مراجع

- 1 - Massonnet, D. and Feigl, K. (1998). "Radar Interferometry and its application to changes in the earth surface." *Reviews of Geophysics*, PP. 441-500.
- 2 - Fialko, Y., Simons, M., 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 geodetic observations, *Geophysical Research Letters*. Vol. 28, No. 16, PP. 3063-3066.
- 3 - <http://www.seismology.harvard.edu/projects/CMT>
- 4 - Shahpasand-Zadeh, M. and Hesami, K. (2006). "Study of surface rupture due to November 27, 2005 Qeshm-Island earthquake." *Pajoheshnameh, IIEES, No 2*, Summer, PP. 34-41 (In Persian).
- 5 - Gholamzadeh, A., Yamini-Fard, F. and 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.
- 6 - Nissen, E., Ghorashi, M., Jackson, J., Parson, B. and 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.
- 7 - Wang, H., Linlin, G. and Caijun, X. (2007). "3-D coseismic displacement field of 8 October 2005 Kashmir earthquake inferred from satellite radar imagery." *Earth, Planets and Space*, Vol. 59, No. 5, PP. 343-349.
- 8 - Henderson, F. M. and Lewis, A. J. (1998). "Manual of Remote Sensing: Principles and Applications of Imaging Radar." *3th. Ed. Chapter 6, Publisher, John Wiley, U.S.A., New York*.

واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

- 1 - Uncertainty
- 2 - Misfit
- 3 - RMS

