

استخراج میدان جابجایی سه بعدی و یافتن توزیع لغزش زلزله ۲۰۰۳ بم، ایران با تلفیق دیتای تداخل سنجی معمولی و چندروزنه‌ای

آنا حبیبی^{۱*}، مهدی معتق^۲، محمدعلی شریفی^۳

^۱ کارشناس ارشد ژئودزی - دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی - پردیس دانشکده‌های فنی - دانشگاه تهران
a_habibi.su90@ut.ac.ir

^۲ استادیار دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی - پردیس دانشکده‌های فنی - دانشگاه تهران
motagh@ut.ac.ir

^۳ دانشیار دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی - پردیس دانشکده‌های فنی - دانشگاه تهران
sharifi@ut.ac.ir

(تاریخ دریافت مرداد ۱۳۹۳، تاریخ تصویب تیر ۱۳۹۴)

چکیده

ما با استفاده از تصاویر بالارو^۱ و پایین‌رو^۲ ماهواره Envisat و بکارگیری فن‌های تداخل سنجی راداری چنددیفراگمی^۳ و تداخل سنجی راداری معمولی^۴ برای زلزله ۲۰۰۳ بم تغییرشکل هم لرزه‌ای^۵ را در دو راستای خط دید ماهواره^۶ و مسیر آزیموتی^۷ بدست آوردیم و سه مولفه متعامد میدان جابجایی را از این اندازه‌گیری‌های ژئودتیک استخراج کردیم. سپس برای بدست آوردن هندسه گسل و توزیع لغزش^۸ روی صفحه گسل، این مولفه‌ها را، با استفاده از روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک و مدل تحلیلی نیم-فضای الاستیک اکادا معکوس کردیم. ما فهمیدیم که بیشترین لغزش در حدود ۲/۵ متر در امتداد ۳۰ کیلومتری گسیختگی بم، تقریباً در عمق ۵ ~ ۴ کیلومتری سطح زمین رخ داده است و گشتاور لرزه‌ای M0 با معکوس سازی 1.01×10^{18} N.m بدست آمده است که یک حادثه با دامنه ۶/۵ ریشتر را ارزیابی میکند، همچنین ما ۶۸٪ سطح اطمینان $(\mu \pm \sigma)$ را برای پارامترهای مدل از طریق معکوس سازی و بکار بردن روش آماری bootstrap تخمین زدیم.

واژگان کلیدی: زلزله بم، تلفیق معکوس‌سازی، توزیع لغزش، تداخل سنجی راداری معمولی، تداخل سنجی راداری چنددیفراگمی

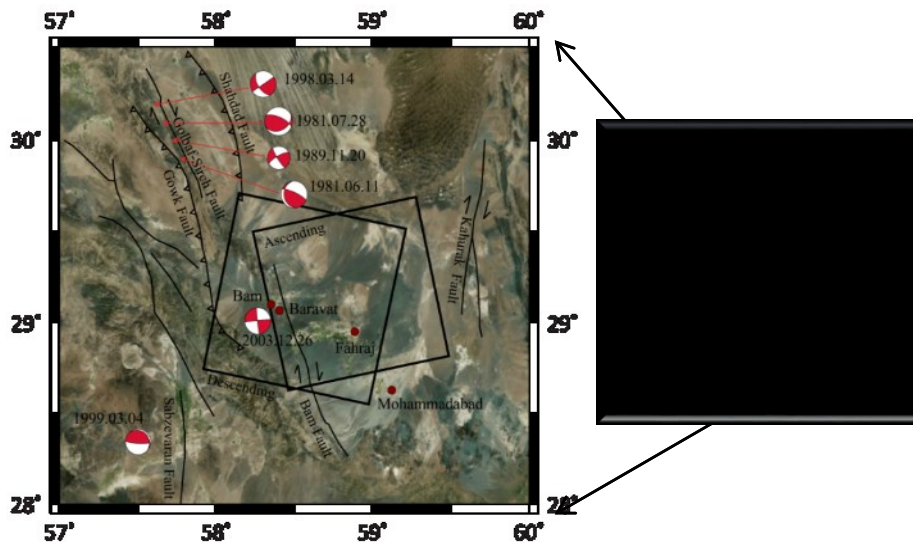
* نویسنده رابط

۱ Ascending
۲ Descending
۳ Multiple-Aperture Interferometry
۴ Conventional Interferometry
۵ Co-seismic
۶ Line Of Sight
۷ Azimuth offset
۸ Slip distribution

۱- مقدمه

شرقی توسط USGS تخمین زده شده است (شکل ۱). که بر اثر این زلزله ۵۰٪ ساختمان‌ها تخریب شدند و بیش از هزاران نفر جان خود را از دست دادند.

زلزله بم ۶/۵ ریشتری در ۲۶ دسامبر ۲۰۰۳ در بخش جنوب شرقی ایران واقع در استان کرمان بوقوع پیوست. موقعیت اولیه این زلزله $29^{\circ}04'$ شمالی و $58^{\circ}37'$



شکل ۱- تصویر رنگی منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد که از سایت <http://www.flashearth.com> تهیه شده است. ساز و کار کانونی (Beach Balls) نمایش دهنده مکانیزم مرکزی زلزله‌هایی است که توسط پردازش‌های USGS (<http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>) به دست آمده است. تعدادی از گسل‌های فعال جنوب شرقی ایران که توسط IIEES تهیه شده است با خطوط سیاه نمایش داده شده‌اند. مستطیل‌های سیاه چارچوب تصویربرداری رادار در مدارهای بالارو و پایین‌رو را که در این مقاله از آن استفاده شده است، نشان می‌دهد.

اینترفرومتری راداری و چند دیافراگمی میدان جابجایی سه بعدی را بازسازی کردند [۴].

در این تحقیق ما از دیتای Envisat استفاده کردیم و آنها را با استفاده از تکنیک‌های تداخل سنجی راداری معمولی و تداخل سنجی راداری چنددیافراگمی پردازش کردیم و با تلفیق این دو دسته مشاهده میدان جابجایی سه بعدی روی سطح زمین را به دست آوردیم. علاوه بر این پارامترهای منبع این زلزله را آنالیز کردیم تا بر اساس این پارامترها میزان لغزش بر روی صفحه گسل را تعیین کنیم. همچنین با تلفیق تکنیک Bootstrap و الگوریتم Genetic عدم قطعیت پارامترهای به دست آمده را بررسی کردیم.

۲- دیتا و روش شناسی

۱-۲- دیتای SAR

ماهواره Envisat در مدار بالارو با زاویه آزیموتی ۳ درجه و در مدار پایین‌رو با زاویه آزیموتی ۱۹۵ درجه از منطقه

مطالعات زیادی در زمینه بررسی پارامترهای منبع زلزله و بررسی لغزش صفحه گسل زلزله بم انجام پذیرفته است. Funning و همکاران (۲۰۰۵)، از مشاهدات ماهواره Envisat برای ساختن میدان جابجایی سه بعدی زلزله استفاده کردند. آنها موقعیت و توجیه صفحه گسل و همچنین توزیع لغزش را از طریق اینترفرومتری راداری^۱ و شیفت پیکسلی^۲ بدست آوردند و برای تخمین عدم قطعیت از تکنیک Monte Carlo استفاده کردند [۱]. Peyret و همکاران (۲۰۰۷)، توسط مشاهدات اینترفرومتری راداری، شیفت پیکسلی و مشاهده ترازبایی به صورت جداگانه و ترکیبی پارامترهای منبع را در دو مرحله بدست آوردند و از روش نزدیکترین همسایگی^۳ (NA) برای یافتن پارامترهای منبع زلزله استفاده کردند [۲]. Motagh و همکاران (۲۰۰۶)، با تلفیق دیتای رادار ماهواره Envisat و دیتای ترازبایی توزیع لغزش روی صفحه گسل را بدست آوردند [۳]. Bo Hu و همکاران (۲۰۱۲)، توسط تلفیق دیتای

^۱ InSAR Interferometry

^۲ Pixel Offset

^۳ Neighbourhood Algorithm

$$\phi_{forward} = -\frac{4\pi x}{\lambda} \sin(\theta_{sq} + \frac{\alpha}{4}) \quad (1)$$

$$\phi_{back} = -\frac{4\pi x}{\lambda} \sin(\theta_{sq} - \frac{\alpha}{4})$$

در این روابط x میزان جابه جایی در راستای ماهواره، λ طول موج، θ زاویه کج‌بینی رادار و α پهنای زاویه‌ای آنتن است.

با محاسبه اختلاف فاز بین دو اینترفروگرام تولید شده، جابجایی در راستای امتداد-مسیر را بدست آوردیم [۶، ۷] همچنین برای کاهش نویز از فیلتر گذرپایین مربعی 11×11 استفاده کردیم. رابطه (۲) جابه‌جایی در راستای حرکت ماهواره را نشان می‌دهد:

$$\phi_{MAI} = \frac{2\pi}{l} x \quad (2)$$

۳- مدلسازی

حجم بالای دیتای اینترفروگرام معمولی و چند دیافراگمی باعث بیشتر شدن زمان محاسبات شده به این دلیل برای مدلسازی محدوده را کوچکتر در نظر گرفتیم، دیتاها دارای همبستگی^۵ پایین را حذف کردیم و دیتاها را به صورت دوبعدی 21×21 نمونه‌برداری کردیم، همچنین بر اساس همدوسی هر دیتا، به آن وزنی اعمال کردیم و میدان جابه‌جایی سه بعدی را به همراه ماتریس وریانس بدست آوردیم.

۳-۱- مدلسازی جابجایی الاستیک^۶

در مسئله معکوس سازی به یافتن پارامترهای جابجایی در عمق توسط دیتای ژئودتیک می‌پردازیم. معمولاً از یک صفحه مستطیلی با اندازه محدود که میتواند در جهات امتداد-لغز^۷ و شیب-لغز^۸ بلغزد، برای مدلسازی جابجایی ناشی از زلزله استفاده میشود (مدل تحلیلی اکادا) [۸]. ما از روش بهینه سازی الگوریتم ژنتیک و مینیمم کردن $V^T V$ برای یافتن محتمل‌ترین جواب اولیه برای پارامترهای مدل استفاده کردیم [۹].

سپس با استفاده از آنالیز آماری residual bootstrap و با محاسبه گشتاورهای اول و دوم هر پارامتر به منظور افزایش یکتایی جواب پارامترهای مدل را به همراه فواصل اطمینان‌شان

تصویربرداری کرده است. در جدول ۱ دیتاهای رادار استفاده شده در این تحقیق نشان داده شده است.

جدول ۱- دیتای ماهواره Envisat مورد استفاده در این مقاله

مسیر	تصویر قبل زلزله	تصویر بعد زلزله	فاصله زمانی	زاویه تابش
بالارو	۲۰۰۳-۱۱-۱۶	۲۰۰۴-۰۲-۲۹	۱۰۵ روز	۲۳/۰۹ درجه
پایین‌رو	۲۰۰۳-۱۲-۰۳	۲۰۰۴-۰۲-۱۱	۷۰ روز	۲۲/۷۰ درجه

۲-۲- روش

ما تصاویر SAR بدست آمده را توسط نرم افزار Envi SARscape پردازش کردیم و جابجایی را از یک بعد به دو بعد در دو راستای خط دید ماهواره و مسیر آزیموتی گسترش دادیم.

۲-۲-۱- تداخل‌سنجی راداری معمولی

ابتدا روی دیتای خام Envisat عمل فوکوسینگ انجام پذیرفته و دیتای SLC بدست می‌آید. پس از آن بین دو تصویر تناظریابی انجام شده و تصویر اینترفروگرام با همدوسی^۱ بالایی تولید میشود، اثر توپوگرافی از تصویر فاز اینترفرومتری توسط مدل ارتفاعی رقومی^۲ SRTM، ۹۰ متری حذف میگردد. سپس برای کاهش نویزهای فاز، اینترفروگرام تفاضلی توسط روش Goldstein فیلتر شده [۵] و اینترفروگرام تخت شده را با استفاده از روش Minimum Cost Flow (MCF) آنرپ^۳ کردیم و سپس آن را توسط مدل ارتفاعی رقومی زمین مرجع می‌کنیم و درنهایت جابجایی در راستای خط دید ماهواره را در دو راستای بالارو و پایین‌رو بدست می‌آوریم.

۲-۲-۲- تداخل‌سنجی راداری چند دیافراگمی

در بخش بعدی پردازش اینترفرومتری چند دیافراگمی نیز بر روی تصاویر بالارو و پایین‌رو دوبه‌دو اعمال میشود و تغییرشکل در راستای امتداد مسیر بر اساس پروسه زیر-دیافراگمی^۴ بدست می‌آید. بر اساس تکنیک پردازش تقسیم-پرتو دو تصویر، اینترفروگرام روبه جلو و رو به عقب، ایجاد میشود. فاز محاسبه شده برای دو اینترفروگرام را به صورت رابطه (۱) می‌توان نشان داد [۶]:

^۵ correlation

^۶ Elastic dislocation modeling

^۷ Strike-slip

^۸ Dip-slip

^۱ coherence

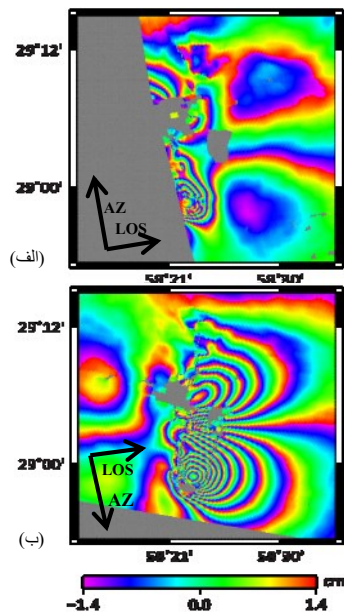
^۲ Digital Elevation Model (DEM)

^۳ Unwrap

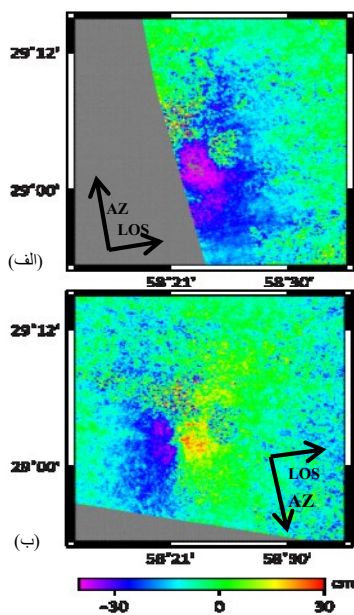
^۴ Sub-aperture

جابه‌جایی را نشان می‌دهد. در اینترفروگرام بالارو بخش غربی گسل دیده نمی‌شود ولی در بخش شرقی همان سیگنال‌های متقارن دیده می‌شود.

در شکل ۳ تغییر شکل در راستای حرکت ماهواره برای دو مدار بالارو و پایین‌رو به دست آمده که ۳۰ سانتی‌متر جابه‌جایی را به در دو طرف گسل نشان می‌دهد. بخش بالایی و گوشه راست گسل به دلیل وجود شهر بم و براوات دارای ناهمبستگی است.



شکل ۲- اینترفروگرام‌های جفت تصویر مدار بالارو (الف) و جفت تصویر مدار پایین‌رو (ب)



شکل ۳- جابه‌جایی‌ها در مسیر آزیموت جفت تصویر مدار بالارو (الف) و جفت تصویر مدار پایین‌رو (ب)

در سطح اطمینان $(\mu \pm \sigma)$ بدست آوردیم [۱۰]. بدین منظور ما برای ساختن ماتریس وریانس-کوریانس دیتاها از تجزیه چولسکی^۱ $(\Sigma = LL^T)$ و ماتریس هم‌دوسی استفاده کردیم، و بردار باقیمانده‌های وزندار را برای بهترین مدل فیت شده توسط $\epsilon = L^{-1}(d^{obs} - d^{cal})$ بدست آوردیم. سپس به صورت تصادفی از بردار ϵ نمونه‌برداری با جایگزینی انجام دادیم و به دیتای محاسبه شده به صورت $d^* = d^{cal} + L\epsilon^*$ اضافه کردیم و روند معکوس‌سازی را برای یافتن بهترین پارامترهای مدل و چگالی احتمال این پارامترها، ۵۰۰ بار تکرار کردیم [۱۱].

۳-۲- مدل لغزش هم‌لرزه‌ای

در این بخش ما توسط گسسته‌سازی صفحه گسل به ریز-گسل و حل لغزش برای هر قطعه مدل واقعی تری از لغزش را بدست می‌آوریم. توزیع لغزش روی صفحه گسل با هندسه ثابت در یک مسئله خطی تخمین زده می‌شود. تقریب گسسته به شکل ماتریسی رابطه (۳) می‌تواند نوشته شود [۱۲، ۱۳]:

$$U = G \times S \quad (3)$$

که U بردار جابجایی $n \times 1$ است، G ماتریس $n \times m$ توابع گسسته‌گرین است و S بردار لغزش‌های ناشناخته $m \times 1$ است، که می‌تواند شیب لغز، امتداد لغز، یا جابجایی بازشدگی^۲ باشد. معکوس‌سازی با اضافه کردن یک اپراتور هموارسازی به سیستمی که در بالا تشریح شد انجام می‌پذیرد تا مانع تشکیل مدل‌های لغزش نوسانی، که دارای معنای فیزیکی نیستند، بشود. روند هموارسازی با بکار بردن اپراتور لاپلاسین^۳ انجام می‌شود. در نهایت معادلات لغزش به صورت معادله (۴) می‌شود [۱۳].

$$\begin{bmatrix} U \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G \\ k \nabla^2 \end{bmatrix} [S] \quad \text{subject to } (S_i > 0) \quad (4)$$

۴- نتایج

اینترفروگرام رپ شده در شکل ۲ برای دو مدار بالارو و پایین‌رو نشان داده شده است. در اینترفروگرام پایین‌رو تغییرشکل‌های متقارن در هر دو سمت گسل به صورت چهار حلقه دیده می‌شود و جنوب شرقی گسل بیشترین بخش

^۱ Cholesky decomposition
^۲ opening
^۳ Laplacian operator

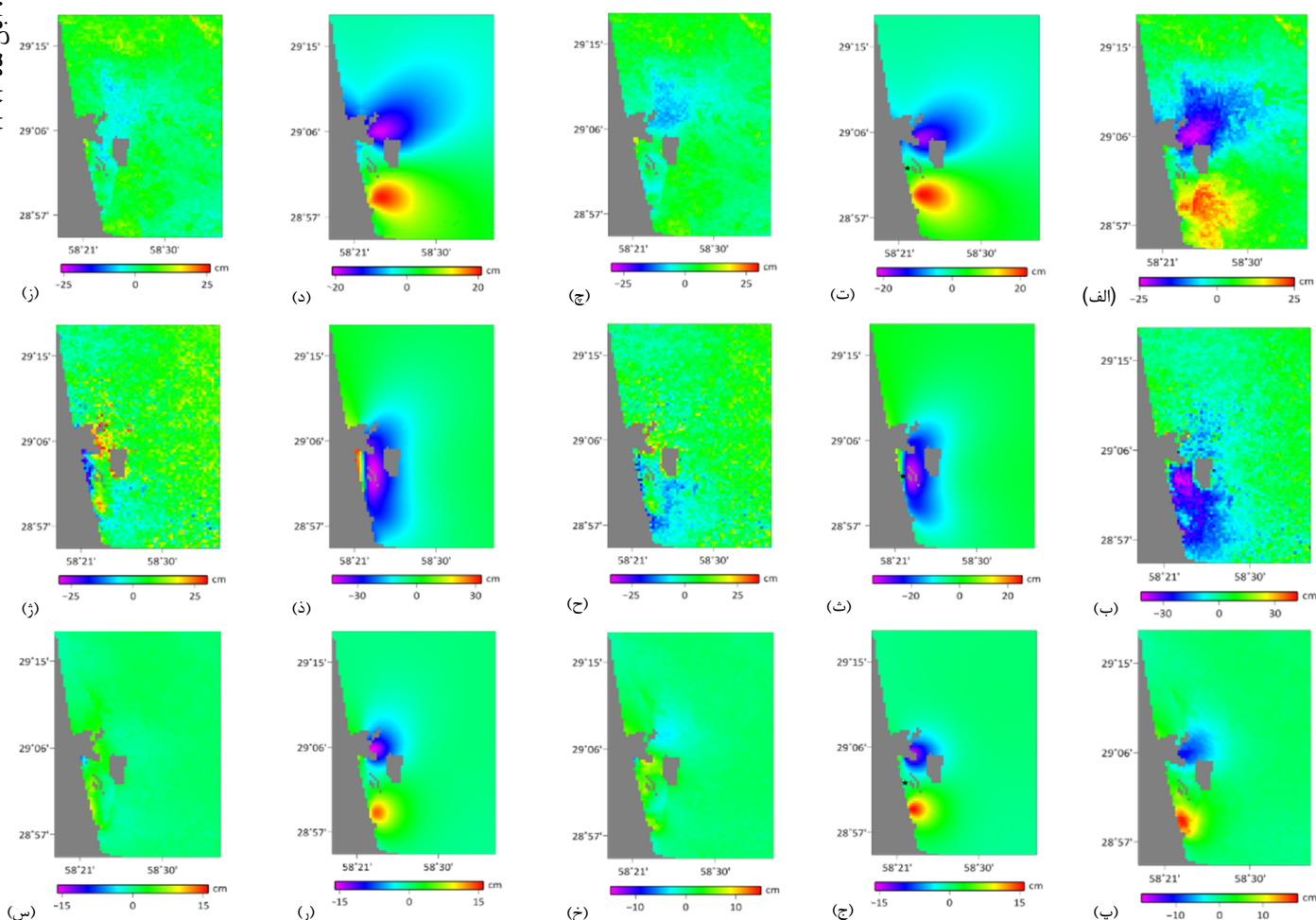
است که بیشترین بخش جابه‌جایی در راستای شمالی-جنوبی به دست آمده است.

جدول ۲ لیست پارامترهای مدل و فواصل اطمینان این پارامترها که با استفاده از روش معکوس سازی ما بدست آمده است را برای مشاهدات سه بعدی نشان میدهد. تغییرشکل پیش‌بینی شده میدان جابه‌جایی سه بعدی در شکل ۴(ت-ج) نشان داده شده است و نیز باقیمانده‌های متناظر بین مدل و دیتا در شکل ۴(چ-ح) به دست آمده است.

به دلیل نزدیک قطبی بودن مدار ماهواره، مشاهده LOS به جابه‌جایی در جهت شرقی-غربی و عمودی حساس است حال آنکه مشاهده MAI حساس به تغییرشکل در راستای شمالی-جنوبی است [۱۴، ۱۵]؛ بنابراین با تلفیق این مشاهدات و در دسترس بودن سمت راستای حرکت ماهواره و زاویه میل رادار در نقطه بازتابش، برای هر پیکسل میدان جابه‌جایی سه بعدی را میتوان بازسازی کرد. در شکل ۴(الف-پ) جابه‌جایی در راستای شمالی-جنوبی، شرقی-غربی و عمودی نشان داده شده

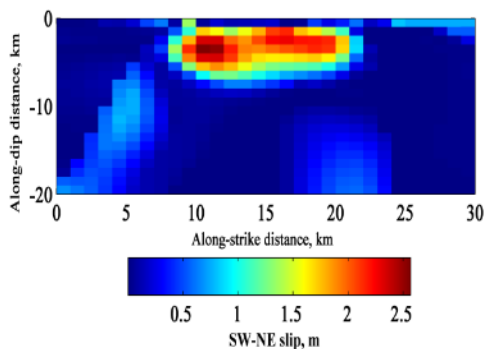
جدول ۲- پارامترهای گسل بم که از مدل‌سازی جابه‌جایی الاستیک مشاهدات سه‌بعدی به دست آمده‌اند. سطح اطمینان این پارامترها از آنالیز bootstrap به دست آمده است.

گشتاور لرزه‌ای (N.m)	لغزش (متر)	زاویه Rake (درجه)	زاویه Dip (درجه)	زاویه Strike (درجه)	عمق گسل (کیلومتر)	عرض گسل (کیلومتر)	طول گسل (کیلومتر)	مختصات Y مرکز گسل (درجه)	مختصات X مرکز گسل (درجه)
$6.755849e+018$	2.04 ± 0.64	-179.8 ± 0.07	82.9 ± 3.9	356.8 ± 0.9	4 ± 1.01	5.5 ± 2.7	10.5 ± 0.3	29.037 ± 0.002	58.365 ± 0.004



شکل ۴- میدان جابه‌جایی سه‌بعدی محاسبه شده برای زلزله بم در راستای شرقی، شمالی و رو به بالا (الف-پ). میدان جابه‌جایی کامل سه‌بعدی مدل‌سازی شده توسط الگوریتم ژنتیک و آنالیز bootstrap در راستای شرقی، شمالی و رو به بالا (ت-ج). باقیمانده‌ها بین جابه‌جایی‌های سه‌بعدی محاسبه شده از مشاهدات اینترفرومتری معمولی و چند دیافراگمی و جابه‌جایی‌های سه‌بعدی مدل‌سازی شده مدل لغزش ثابت در راستای شرقی، شمالی و رو به بالا (چ-خ). میدان جابه‌جایی کامل سه‌بعدی مدل‌سازی شده توسط گسسته‌سازی گسل در راستای شرقی، شمالی و رو به بالا (د-ر). باقیمانده‌ها بین جابه‌جایی‌های سه‌بعدی محاسبه شده از مشاهدات اینترفرومتری معمولی و چند دیافراگمی و جابه‌جایی‌های سه‌بعدی مدل‌سازی شده مدل لغزش متغیر در راستای شرقی، شمالی و رو به بالا (ز-س).

احتمال را برای هر یک از این پارامترها بدست آوردیم. نتایج معکوس سازی در تلفیق مشاهدات به یک گسل امتدادلغز به طول ۱۰ کیلومتر و عمق ۴ کیلومتر اشاره میکند.

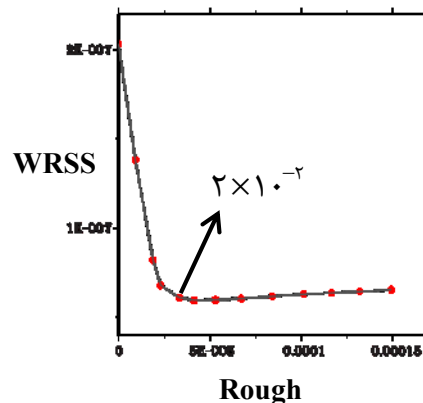


شکل ۶- توزیع لغزش متغیر برای بهترین مدل فیت شده زلزله بم توسط گسسته سازی گسل به زیرگسل های ۱ در ۱ کیلومتر. بیشترین لغزش در حدود ۲/۵ متر در عمق ۴-۵ کیلومتری به دست آمده است.

بر اساس نمودارهای بدست آمده در آنالیز bootstrap در شکل ۷ ما ۶۸٪ سطح اطمینان را برای پارامترهای مدل به دست آوردیم. ما مشاهده می کنیم که پارامتر شیب^۱ گسل دارای دو قله است که حالتی غیرمستقر را برای آن ایجاد کرده است ولی کمترین قله خارج از سطح اطمینان قرار می گیرد. همچنین پارامتر لغزش^۲ دارای پهنه گسترده تری نسبت به مابقی پارامترها است.

ما همچنین پارامترهای بدست آمده مدل را در مقابل یکدیگر پلات کردیم (شکل ۷) و برای ارزیابی های کمی و دیدن ارتباط بین پارامترها از آنها استفاده کردیم. اکثر پارامترهایی که در پلات پراکندگی به صورت خوشه های بسته بدست آمده اند همانهایی هستند که در نمودار هیستوگرام به صورت قله های نسبتاً باریک ظاهر شده اند بعنوان مثال عرض جغرافیایی^۳ مرکز گسل با انحراف معیاری در حدود ۰/۰۰۲ درجه برآورد شده است.

برای اینکه پارامتر هموارسازی (k) را برای مدل لغزش انتخاب کنیم، ارتباط بین جمع مربعات باقیمانده وزن دار^۱ (WRSS) و ناهمواری را در شکل ۵ پلات گرفتیم [۳، ۱۶]. هر دیتای نقطه ای روی منحنی یک اجرای مدل معکوس لغزش متغیر با استفاده از پارامتر هموارسازی مختلف را نشان میدهد. این منحنی ارتباط، مقدار 2×10^{-2} را بعنوان مقدار بهینه پیشنهاد میکند که ما برای بدست آوردن نتایج از آن استفاده کردیم.



شکل ۵- انتخاب پارامتر هموارسازی برای مدل لغزش متغیر با در نظر گرفتن جمع مربعات باقیمانده وزندار بعنوان تابعی از ناهمواری

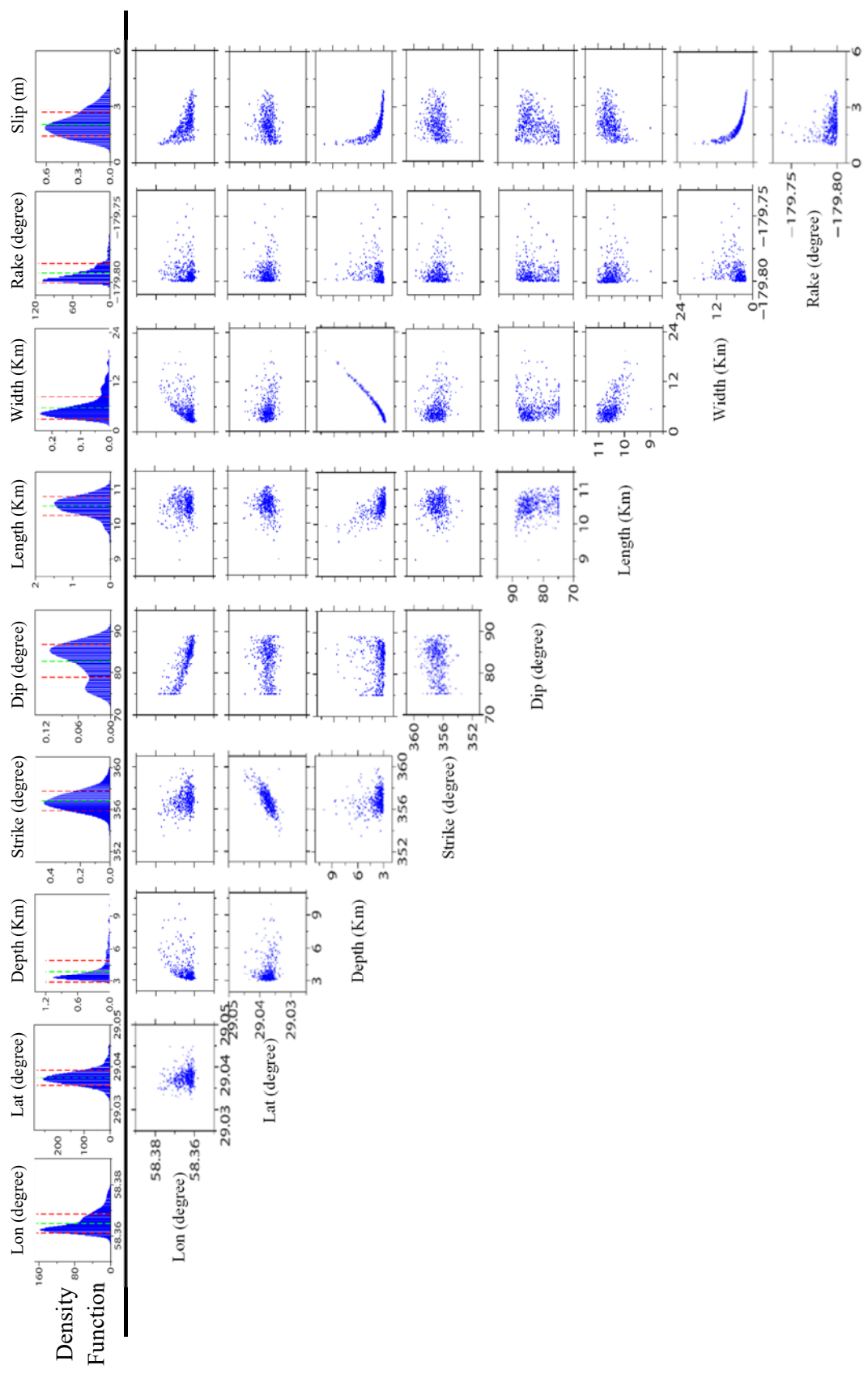
مدل توزیع لغزش روی صفحه گسل هم لرزه ای با معکوس مشاهدات بدست آمده از تلفیق دیتای MAI و LOS در شکل ۶ نشان داده شده است. مدل جابجایی سه بعدی بهترین فیت برای مدل لغزش در شکل ۴ (د-ر) نشان داده شده است، و نیز باقیمانده متناظر بین مدل و دیتا در شکل ۴ (ز-س) نشان داده شده است.

۵- بحث و نتیجه گیری

تکنیک تداخل سنجی راداری با درجه مصنوعی در مناطقی که دیتای ژئودتیکی زمینی کافی موجود نیست، روشی است که جابجایی در راستای یک بعد را فراهم میکند. در این مقاله برای زلزله ۲۰۰۳ بم این تکنیک را از یک بعد به دوبعد گسترش دادیم و میدان جابجایی سه بعدی را بر اساس آن بازسازی کردیم و پارامترهای گسل را بدست آوردیم. ما برای رویه معکوس سازی دیتاها از دو مرحله استفاده کردیم در گام اول با استفاده از الگوریتم ژنتیک پارامترهای منبع را برآورد کردیم و در گام دوم برای یکتاتر کردن جوابها از الگوریتم bootstrap استفاده کردیم و سطح اطمینان و تابع چگالی

^۱ Dip
^۲ Slip
^۳ Latitude

^۱ Weighted residual sum of squares



شکل ۷- فاصله اطمینان پارامترهای گسل زلزله ۲۰۰۳ بم و پلاتهای ارتباط بین این پارامترها که توسط ۵۰۰ بار روند معکوس- سازی توسط آنالیز bootstrap به دست آمده است. هیستوگرام‌ها تابع توزیع احتمال را نشان می‌دهند. خطوط قرمز ۶۸٪ سطح اطمینان و خط سبز میانگین پارامترها را نشان می‌دهند. ارتباط بین جفت پارامترها در پلات‌های برآکندگی نشان داده شده است.

مدل‌های نقص لغزش در عمق کم است که در آن لغزش هم- لرزه‌ای در لایه‌های فوقانی کمتر از لایه‌های لرزه‌خیزی (۴~۱۰ کیلومتر) دیده می‌شود.

سپاسگزاری

از آژانس فضایی اروپا (European Space Agency) به دلیل فراهم کردن تصاویر زلزله بهم نهایت تشکر و سپاسگزاری را داریم.

به هر حال بین برخی از این جفت پارامترها در پلات پراکندگی همبستگی قوی وجود دارد، مثلاً میتوان نوعی ارتباط خطی و نمایی را بین پارامترهای عمق و عرض، عمق و لغزش، عرض و لغزش دید.

ما همچنین مدل توزیع لغزش، بر اساس تلفیق دو دسته دیتا و یافتن میدان سه بعدی را برای زلزله بم بررسی کردیم. بر اساس شکل ۶ بیشترین لغزش در لایه‌ی میانی شکننده ۵~۴ کیلومتری سطح زمین رخ داده است و در لایه‌های کم عمق پوسته مقدار لغزش بسیار کاهش می‌یابد، که نمونه‌ای از

مراجع

- [1] G. J. Funning, B. Parsons, and T. J. Wright, "Surface displacements and source parameters of the 2003 Bam (Iran) earthquake from Envisat advanced synthetic aperture radar imagery," *Journal of Geophysical Research*, vol. 110, no. B9, 2005.
- [2] M. Peyret, J. Chéry, Y. Djamour, A. Avallone, F. Sarti, P. Briole, and M. Sarpoulaki, "The source motion of 2003 Bam (Iran) earthquake constrained by satellite and ground-based geodetic data," *Geophysical Journal International*, vol. 169, no. 3, pp. 849-865, 2007.
- [3] M. Motagh, J. Klotz, F. Tavakoli, Y. Djamour, S. Arabi, H.-U. Wetzel, and J. Zschau, "Combination of Precise Leveling and InSAR Data to Constrain Source Parameters of the Mw = 6.5, 26 December 2003 Bam Earthquake," *Pure and Applied Geophysics*, vol. 163, no. 1, pp. 1-18, 2006.
- [4] B. Hu, H. Wang, Q. Shen, and L. Jiang, "Coseismic Displacements Field of the BAM Earthquake Inferred from InSAR," *Journal of Information & Computational Science*, vol. 9, no. 9, pp. 2537-2544, 2012.
- [5] I. Baran, M. P. Stewart, B. M. Kampes, P. Zbigniew, and P. Lilly, "A Modification to the Goldstein Radar Interferogram Filter," *IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING*, vol. 41, no. 9, 2003.
- [6] N. B. D. Bechor, "EXTENDING INTERFEROMETRIC SYNTHETIC APERTURE RADAR MEASUREMENTS FROM ONE TO TWO DIMENSIONS," *THE DEPARTMENT OF GEOPHYSICS AND THE COMMITTEE ON GRADUATE STUDIES, STANFORD*, 2006.
- [7] N. B. D. Bechor, and H. A. Zebker, "Measuring two-dimensional movements using a single InSAR pair," *Geophysical Research Letters*, vol. 33, no. 16, 2006.
- [8] Y. Okada, "Surface Deformation Due To Shear And Tensile Faults In A Half-Space," *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 75, no. 4, pp. 1135-1154, 1985.
- [9] R. L. Haupt, and S. E. Haupt, *Practical Genetic Algorithms: A John Wiley & Sons, Inc*, 2004.
- [10] H. Sudhaus, and S. Jónsson, "Improved source modelling through combined use of InSAR and GPS under consideration of correlated data errors: application to the June 2000 Kleifarvatn earthquake, Iceland," *Geophysical Journal International*, vol. 176, no. 2, pp. 389-404, 2009.
- [11] M. Motagh, J. Hoffmann, B. Kampes, M. Baes, and J. Zschau, "Strain accumulation across the Gazikoy-Saros segment of the North Anatolian Fault inferred from Persistent Scatterer Interferometry and GPS measurements," *Earth and Planetary Science Letters*, vol. 255, no. 3-4, pp. 432-444, 2007.
- [12] M. Battaglia, P. F. Cervelli, and M.-M. J. R., "Modeling Crustal Deformation_A Catalog of Deformation Models and modeling approaches " *U.S. Geological Survey Techniques and Methods*, pp. 37-85, Tacoma Publishing Service Center, 2012.

- [13] Y. Du, A. AYDIN, and P. SEGALL, "Comparison of various inversion techniques as applied to the determination of a geophysical deformation model for the 1983 Borah Peak earthquake," *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 82, no. 4, pp. 1840-1866, 1992.
- [14] Y. Fialko, D. Sandwell, M. Simons, and P. Rosen, "Three-dimensional deformation caused by the Bam, Iran, earthquake and the origin of shallow slip deficit," *Nature*, vol. 435, no. 7040, pp. 295-9, May 19, 2005.
- [15] P. J. González, J. Fernández, and A. G. Camacho, "Coseismic Three-Dimensional Displacements Determined Using SAR Data: Theory and an Application Test," *Pure and Applied Geophysics*, vol. 166, no. 8-9, pp. 1403-1424, 2009.
- [16] R. Pedersen, S. Jónsson, T. Árnadóttir, F. Sigmundsson, and K. L. Feigl, "Fault slip distribution of two June 2000 MW6.5 earthquakes in South Iceland estimated from joint inversion of InSAR and GPS measurements," *Earth and Planetary Science Letters*, vol. 213, no. 3-4, pp. 487-502, 2003.