



ارزیابی ارتباط ساختار گسلش مناطق لرزه خیز با توپوگرافی

چیستا پناهی و قار^{۱*}، بهزاد وثوقی^۲، سعید حاجی آقاجانی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد ژئودزی- دانشکده مهندسی نقشه برداری- دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

۲- دانشیار دانشکده مهندسی نقشه برداری- دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

۳- کارشناس ارشد ژئودزی- دانشکده مهندسی نقشه برداری- دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

چکیده:

توپوگرافی، غالباً حاصل چگونگی حرکت صفحه‌های تکتونیکی و گسل‌ها نسبت به هم است و اگر بتوانیم پس از شناسایی کامل ویژگی‌های تکتونیکی و براساس نرخ حرکت گسل‌های منطقه، این کنش و واکنش‌ها را مدل‌سازی کنیم، به مدلی کاربردی خواهیم رسید که توپوگرافی منطقه را بازسازی می‌کند. در این مقاله جهت نشان دادن ارتباط بین تکتونیک و توپوگرافی، بر روی سه گسل مشخص در منطقه تمرکز نموده و با استفاده از مدل المان مرزی و مدل آکادا، سعی بر شبیه‌سازی توپوگرافی ایجاد شده از فعل و انفعالات این سه گسل شده است. با توجه به لرزه‌خیزی بالای کشور ایران و ضرورت تحقیق این موضوع، با تعمیم این ایده، می‌توان در ابعاد وسیع‌تری، توپوگرافی منطقه‌ای را بازسازی نمود؛ و سپس از مجموعه تغییرات مشاهده شده در نمای زمین و مقایسه با توپوگرافی حاصل از مطالعات ماهواره‌ای، به کنترل ساختاری بر گسل‌های منطقه دست یافت. با انجام این تحقیق، بر اساس مدل‌سازی رابطه بین تکتونیک و توپوگرافی، به معیاری جهت شناخت و پیش‌بینی تغییرات مشخصات گسل‌ها، خواهیم رسید. بدین منظور با تغییر شاخص‌های تکتونیکی مربوط به گسل‌ها، به تخمین ارتفاعات حاصل پرداختیم و با در نظر گرفتن مقادیر مختلف برای سه شاخص متغیر، دست به ایجاد توپوگرافی‌های متناظر با هر یک زده‌ایم و نهایتاً با مدل ارتفاعی رقومی و مختصات توپوگرافیک این سه گسل مقایسه نموده‌ایم. مطالعات حاصل از مدل‌سازی نشان داد این سه گسل از شروع دوره کوتاه‌تری فعالیت داشته؛ همچنین با نرخ لغزش قائم ۲ میلی‌متر در سال در حال حرکت بوده‌اند؛ همچنین با استفاده از مقایسه کمی توپوگرافی زمین با مدل‌های ایجاد شده، وجود لغزش افقی در راستای شیب گسل با نرخ لغزش ۲/۵ میلی‌متر در سال، تأیید شد. مقداری که تا پیش از این توسط مطالعات زمین‌شناسی یا ماهواره‌ای، تعیین شده بود.

واژه‌های کلیدی: تکتونیک صفحه‌ای، توپوگرافی، تغییر شکل

نویسنده مکاتبه کننده: چیستا پناهی و قار

آدرس پستی: تهران، خیابان ولیعصر، تقاطع میرداماد، روبروی ساختمان اسکان، دانشکده عمران و نقشه برداری دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی. کد پستی: ۱۵۴۳۳-۱۹۹۶۷

تلفن: ۸۸۷۷۹۴۷۳-۴

آدرس پست الکترونیک: Tchistapanahi@gmail.com



۱- مقدمه

در دهه‌های گذشته، تحقیقاتی از این دست که ارتباط بین فرآیندهای تکتونیکی^۱ بزرگ‌مقیاس و روند تکاملی طولانی-مدت نمای زمین را نشان دهد؛ نتایج قابل توجهی داشته؛ به‌طوریکه موضوعات جدیدی در مورد رابطه بین فرآیندهای تکتونیکی و روند تکامل توپوگرافی^۲ سطح زمین، مطرح شده است.

موریساوا و هک^۳ (۱۹۸۵)، از مورفوتکتونیک^۴ به عنوان مشخص‌کننده رابطه بین تکتونیک و عوارض سطحی یاد کرده-اند و معتقدند که با داشتن این ارتباط، می‌توان فعل و انفعالات تکتونیکی را، از طریق مطالعه اشکال و ناهمواری‌های سطح زمین استنتاج کرد^۱. گمبرگ و الیس^۵ (۱۹۹۴)، وابستگی توپوگرافی و تکتونیک صفحه‌ای را مدلسازی کرده و نتایج مطالعات و پژوهش‌های خود را تحت مقاله‌ای منتشر نمودند^۲. این برنامه با استفاده از الگوریتم المان مرزی، محاسبات میدان جابجایی قائم را در مورد زلزله مربوط به منطقه نیومادرید ممکن ساخته و همچنین برای محاسبه جابجایی ناشی از حرکت گسل‌ها، از مدل اکادا^۶ استفاده می‌کند. در مورد طیف وسیعی از مدل‌های مستدل، میدان جابجایی سطحی سه‌بعدی بررسی شده، و از برنامه المان مرزی سه‌بعدی جدیدی برای محاسبه میدان جابجایی سطحی، استفاده شده است^۳.

پیشرفت در مباحث مدلسازی حرکت تکتونیک‌های بزرگ‌مقیاس، همراه با رشد سریع تکنولوژی امور محاسباتی، متخصصین ژئودزی را به استفاده از چنین مدلسازی‌هایی سوق داده است؛ به‌خصوص در ارتباط با وابستگی بین تکتونیک و توپوگرافی.

الکساندر ویت‌تیکر^۷ (۲۰۱۲)، مطرح نمود که برای حل این موضوع معکوس و رمزگشایی و تبدیل ریخت‌شناسانه آن به-طور مؤثر، بهتر است درک صحیحی از چگونگی واکنش نمای متناظر زمین و فرسایش ناشی از تغییرات عامل تکتونیکی و یا شرایط اقلیمی پیرامون داشته باشیم.

در این مقاله، ابتدا بر اساس مدلسازی حرکت، لغزش نسبی سه گسل البرز شمالی، خزر و کندوان نسبت به هم و کنش و واکنش صفحات تکتونیکی‌شان، مدل توپوگرافی منطقه، تولید و پس از تأیید این مدلسازی و مقایسه آن با مدل دیجیتال ارتفاعی، بررسی می‌شود که آیا می‌توان با تغییر دادن و تدقیق آن دسته از پارامترهای موجود برای گسل‌ها، که دقت کمتری دارند مانند: نرخ حرکت گسل و آغاز فعالیت گسل، به نتیجه مقبول‌تری در مورد توپوگرافی رسید و نتایج را بهبود بخشید؟

به منظور مدلسازی، از نرم‌افزار 3D-def، که در قالب کد فرترن توسط گمبرگ و الیس طراحی شده، کمک خواهیم گرفت. به این ترتیب، به مشخصات گسل‌های منطقه، از قبیل طول و عرض جغرافیایی، زاویه شیب، زاویه آزمون، مدت‌زمان فعالیت، و طول و عرض صفحه گسل و نوع گسل از منظر نحوه حرکت بلوک‌ها و اطلاعاتی ازین دست، به عنوان ورودی نرم‌افزار، نیازمندیم. در این مدلسازی، با توجه به شیب‌لغز بودن گسل‌ها و در نتیجه عدم وجود لغزش در امتداد راستای صفحه گسل، سه پارامتر از مشخصات گسل‌ها، به عنوان مجهول در نظر گرفته خواهد شد؛ نرخ لغزش افقی در راستای شیب و نرخ لغزش قائم بر صفحه گسل، و مدت زمان فعالیت گسل. شیب صفحه گسل، در این

^۱ Tectonics processes

^۲ Topography

^۳ Morisawa, M. and Hack, J. T.

^۴ Morphotectonics

^۵ Joan Gomberg, Michael Ellis

^۶ Okada model

^۷ Withtaker, A.



مقاله ثابت فرض شده و مقدار آن بر طبق مطالعات زمین‌شناسی تعیین گردیده‌است. لازم به ذکر است که از مدل رقومی ارتفاعی ASTER با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر به عنوان داده‌های واقعی از توپوگرافی منطقه استفاده خواهد شد.

۲- معرفی منطقه مورد بحث و خواص ژئودینامیکی آن

فلات ایران، محدوده اصلی کشور ایران در ادوار مختلف تاریخی بوده است؛ و بر پایه وجوه تاریخی، می‌توان این چنین تقسیم‌بندی‌ای داشت: سرزمین نسبتاً مرتفعی که از نظر موقعیت جغرافیایی و زمین‌شناختی، در نیم‌کره شمالی، در قاره آسیا (اورآسیای مرکزی) واقع شده و گسترش این فلات در آسیای جنوبی، آسیای جنوب غربی و قفقاز مشاهده می‌شود. در چارچوب جهانی، فلات ایران در محل تلاقی صفحه‌های تکتونیکی عربستان (عربستان-آفریقا)، هند(هند-استرالیا) و اوراسیا (اروپا-آسیا) واقع شده است. در روند حرکت این صفحات نسبت به هم و برخوردشان در طول زمان، پوسته فلات ایران، دچار تغییرشکل شده و چین‌خوردگی‌ها و رشته‌کوه‌هایی چون زاگرس در غرب، البرز و کپه‌داغ در شمال و شمال‌شرق و رشته‌کوه‌های مرکزی و کوه‌های خاوری (شرقی) تشکیل شده‌اند.

در شکل (۱)، گسل‌های اصلی در منطقه البرز شمالی نشان داده شده که از این بین، سه گسل البرز شمالی، خزر و کندوان را جهت بررسی و مدل‌سازی توپوگرافی برگزیده‌ایم.



شکل شماره ۱: گسل‌های فعال منطقه البرز شمالی [۴]

به معرفی ویژگی‌های سه گسل انتخابی می‌پردازیم:

گسل خزر: [۵]

این گسل با طول ۶۰۰ کیلومتر [۶] و در برخی منابع ۴۴۰ کیلومتر، بین چالوس در غرب و گنبدکاووس در شرق واقع شده‌است. دارای راستای خم‌دار شرقی-غربی و شیب به سمت جنوب است. ساز و کار گسل، شیب‌لغز معکوس می‌باشد. همچنین در مورد این گسل، بیشینه جابجایی قائم نسبی ۳۰۰۰ متری، برای دو میلیون سال اخیر برآورد شده است [۶]. در راستای این گسل، زمین‌لغزش‌های متعددی مشاهده شده که به گمان، مربوط به آغاز دوران کواترنری^۸ می‌باشد و به فعالیت‌های زمین‌ساختی مربوط است. سرعت‌های GPS، نرخ لغزش را بین بلوک‌های گسل خزر، ۰/۸ میلی‌متر در سال نشان می‌دهد [۷].

گسل البرز شمالی:

این گسل با طول ۴۵ کیلومتر، دارای راستای شمال غربی-جنوب شرقی و با شیب به سمت جنوب غربی است؛ که البته ادامه شمال غربی این گسل، به طول حدود ۹۳ کیلومتر، به عنوان یک گسل احتمالی به نام گسل ساوه شناخته می-

^۸ Quaternary



شود؛ که روشن است با پذیرش پیوستگی آن‌ها، طول گسل بیشتر خواهد بود. ساز و کار گسل، شیب لغز معکوس است. از نظر موقعیت جغرافیایی، در شمال شرق شهر قم واقع شده است. این گسل، نهشته‌های الیگومیوسن^۹ را از سوی جنوب شرقی بر روی نهشته‌های کواترنری رانده است. همچنین می‌توان جنبش گسل را در نهشته‌های کواترنری مشاهده نمود.

گسل کندوان:

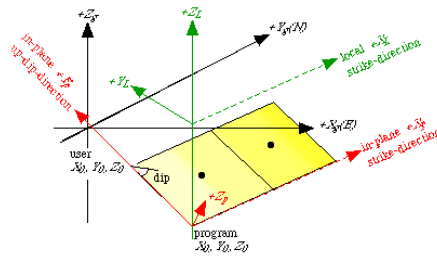
اگرچه طول این گسل در نقشه‌های زمین‌شناسی، در حدود ۵۰ کیلومتر است؛ اما در منابع دیگر طول آن را بسیار بیشتر در نظر گرفته‌اند. که البته این فرض با در نظر گرفتن گسل‌های اطراف بوده است. به گمان زانچی و همکاران، طول گسل کندوان به ۲۰۰ کیلومتر هم می‌رسد [۸]. راستای کلی گسل، شمال غربی-جنوب شرقی است با شیب عمومی به سوی شمال و شمال شرق. در ناحیه کندوان، شیب گسل ۳۰ تا ۶۰ درجه به سوی شمال است، اما به سمت غرب و در ناحیه علم‌کوه، شیب آن به ۷۰ تا ۹۰ درجه می‌رسد [۹]. داده‌های ساختاری و کینماتیکی در شرق علم‌کوه، شیب و امتداد ۳۵ و ۲۹ درجه به سوی شمال شرق را برای این گسل نشان می‌دهد [۱۰]. ساز و کار گسل، رانندگی است و چندین کیلومتر جابجایی راست‌بر در طول گسل دیده می‌شود. همچنین در غرب انگوران، حدود هزار متر جابجایی عمودی ناشی از لغزش شیب‌لغز گسل دیده می‌شود [۱۱]. جابجایی قائم در ناحیه حدود ۲۵ کیلومتری غرب تا شمال غرب، به ۵ کیلومتر یا بیشتر می‌رسد [۱۲]. این گسل در البرز مرکزی و در شمال گچسرو دیزین واقع شده است.

جدول شماره ۱: ویژگی‌های تکتونیکی گسل‌های منطقه

نام گسل	طول جغرافیایی نقطه شروع گسل (کیلومتر)	طول جغرافیایی نقطه پایان گسل (کیلومتر)	طول صفحه- گسل (کیلومتر)	زاویه آزیموت گسل (درجه)	زاویه شیب گسل (درجه)
خزر	-۵۰۲/۴۰۷	۴۳۲۶/۶۳۱	۱۵/۶۱۷۲۸	۸۳	۶۰
خزر	-۴۸۳/۳۲۱	۴۳۲۹/۴۶۶	۱۲/۱۴۰۵۶	۹۳	۶۰
خزر	-۴۶۸/۴۲۵	۴۳۲۸/۳۰۸	۶/۴۴۰۵۱	۷۷	۶۰
البرز شمالی	-۴۶۰/۸۰۹	۴۳۳۰/۴۳۸	۲۱/۳۴۹۶	۸۸	۶۰
البرز شمالی	-۴۳۴/۳۹۳	۴۳۳۱/۲۳۸	۵/۲۱۳۱۱۵	۱۰۶	۶۰
البرز شمالی	-۴۰۵/۳۰۶	۴۳۳۶/۳۴۸	۳۹/۸۴۱۳	۲۹۰	۶۰
کندوان	-۳۶۳/۳۷۹	۴۳۳۴/۹	۳۳/۹۴۳۴	۲۷۱	۶۰
کندوان	-۵۹۹/۶۵۳	۴۳۶۸/۸۳۱	۶/۶۵۶۲۹	۲۷۶	۴۱/۵

جهت روشن شدن تعریف دقیق نقطه شروع گسل (نقطه مرجع) که در جدول (۱) آورده شده، لازم است چگونگی تعریف گسل در نرم‌افزار 3D-def را بدانیم. در واقع هر صفحه گسل، با یک "المان" مشخص شده و شیب و امتداد ثابت خود را دارد. نقطه مرجع، برای هر المان، موقعیت صفحه گسل‌ها را نسبت به هم در سیستم مختصات جهانی تعیین می‌کند؛ که در شکل (۲)، نقطه مرجع نشان داده شده است [۱۳].

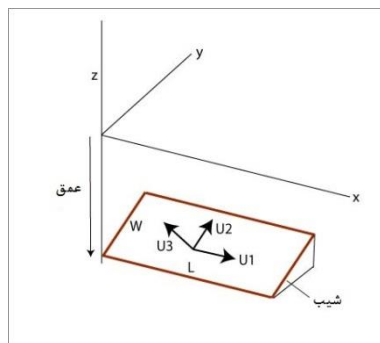
^۹ Oligo-Miocene



شکل شماره ۲: نقطه مرجع برنامه و نقطه مرجع از دید ناظر [۱۴]

۳- مدل سازی

گمبرگ والیس (۱۹۹۴)، با طراحی برنامه "المان مرزی سه بعدی"، توپوگرافی منطقه لرزه خیز نیومادرید مرکزی را بر پایه داده های تکتونیکی، مدلسازی نمودند [۲]. این برنامه، مقادیر مربوط به ویژگی گسل های منطقه نیومادرید را به عنوان ورودی گرفته و میدان جابجایی سه بعدی، تنش و کرنش در داخل و روی سطح نیم فضای الاستیک را، به عنوان خروجی تحویل می دهد. این برنامه با استفاده از الگوریتم المان مرزی، محاسبات میدان جابجایی قائم را در مورد زلزله مربوط به منطقه نیومادرید ممکن ساخته و همچنین برای محاسبه جابجایی ناشی از حرکت گسل ها، از مدل آکادا استفاده می کند. مدل غیرخطی آکادا، رابطه بین پارامترهای هندسی و فیزیکی گسل با مشاهدات جابجایی ارتوگونال را بیان می کند. با استفاده از مدل آکادا می توان جابجایی های ناشی از یک منبع نقطه ای و مستطیل شکل محدود را در فضای نیمه محدود هموزن و ایزوتروپیک^{۱۰} با استفاده از قانون های الاستیسیته خطی کلاسیک در سه امتداد x ، y ، و z به دست آورد.



شکل شماره ۳: هندسه مدل منبع [۱۵]

پارامترهای ورودی مدل به دو دسته پارامترهای هندسی و فیزیکی تقسیم می شود. پارامترهای هندسی، می توان به طول، عرض، شیب، عمق و بردارهای لغزش گسل اشاره کرد و در مورد پارامترهای فیزیکی نیز، ضرایب لامه^{۱۱} برای ماده الاستیک ایزوتروپیک را برشمرد. در واقع، مدل آکادا جهت مدل کردن تغییر شکل های ناشی از حرکت گسل ها نسبت به هم، استفاده می شود. این مدل شامل روابط تحلیلی برای محاسبه میدان تغییر شکل ناشی از یک منبع نیروی نقطه ای و سپس انتگرال گیری از این روابط روی صفحه گسل (منبع نیروی مستطیلی شکل محدود) در داخل نیم فضای الاستیک می باشد.

^{۱۰} homogeneous and isotropic

^{۱۱} Lamé coefficients



بردارهای جابجایی برای نقاط مشاهدات، خروجی مدل گمبرگ هستند. گمبرگ و الیس (۱۹۹۴) بیان کردند اهمیت تغییرشکل پوسته‌ای، معمولاً به مرزهای صفحات لیتوسفری محدود می‌شود، در محلی که تکتونیک صفحه‌ای، طبیعت و منشأ تغییرشکل در توپوگرافی را به‌وضوح نشان می‌دهد. تغییرشکل تولیدشده از حرکت تکتونیک‌ها، دور از مرزهای صفحات تکتونیک، تعریف نمی‌شود زیرا تنها در مرزهای موثر است که تأثیر فعل و انفعالات بین صفحات، ملموس‌تر است. در واقع عمدتاً به این دلیل که سطح لرزه‌خیزی و تغییرشکل در مناطق درون‌صفحه‌ای، نسبت به مرز صفحات، کمتر است، اهمیت کنترل تغییرشکل‌ها و ثبت آن‌ها مربوط به مرز صفحات است [۲]. این الگوریتم را با توجه به مدلسازی گسل‌ها و تغییرشکل الاستیک ناشی از آن‌ها، بررسی می‌کنیم. گسل‌ها، توسط المان‌های مسطح مستطیلی در نیم‌فضای همگن نشان داده شده‌اند. تغییرشکل در هر نقطه مشاهداتی (x, y, z) ، در واقع موقعیت ثانی آن است. میدان جابجایی با بردار جابجایی تعریف می‌شود:

$$U = u_x \hat{x} + u_y \hat{y} + u_z \hat{z} \quad (1)$$

تنسور گرادیان جابجایی: $\left[\frac{\partial u_k}{\partial \xi} \right]$

استرس، استرین و تنسور دوران جسم صلب همه از $\left[\frac{\partial u_k}{\partial \xi} \right]$ قابل محاسبه‌اند. در الگوریتم المان مرزی، تعامل یک المان با دیگر المان‌ها، با حل مجموعه‌ای از معادلات خطی فرمول‌بندی می‌شود. برای هر المان، نقطه مشاهداتی (x_i, y_i, z_i) یا در مرکز المان واقع شده و یا مجموعه‌ای از جابجایی‌ها و یا شرایط مرزی تنش در آنجا مشخص شده‌است.

برای نمونه، در شرایط مرزی تنش می‌توانیم مجموعه‌ای از معادلات خطی زیر را بنویسیم:

$$\tau_s(x_i, y_i, z_i) = \sum_{j=1}^J (A_{ij}^{ss} D_j^s + A_{ij}^{sd} D_j^d + A_{ij}^{sn} D_j^n) + \tau_s^b \quad (2)$$

$$\tau_d(x_i, y_i, z_i) = \sum_{j=1}^J (A_{ij}^{ds} D_j^s + A_{ij}^{dd} D_j^d + A_{ij}^{dn} D_j^n) + \tau_d^b \quad (3)$$

$$\sigma_n(x_i, y_i, z_i) = \sum_{j=1}^J (A_{ij}^{ns} D_j^s + A_{ij}^{nd} D_j^d + A_{ij}^{nn} D_j^n) + \sigma_n^b \quad (4)$$

که در آن:

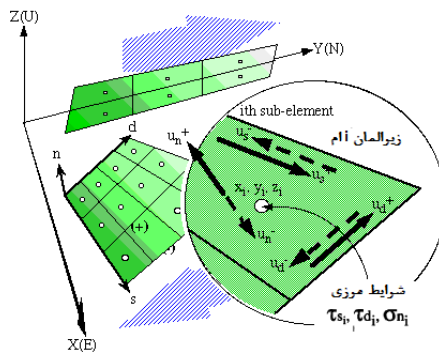
τ_d, τ_s : کشش روی المان در راستای امتداد و شیب

σ_n : تنش کششی (نرمال)

متغیرهای $\tau_s^b, \tau_d^b, \sigma_n^b$: اجزا کشش و تنش نرمال در جزء مرتبط با میان جابجایی است.

D_j^s و D_j^d : مولفه جابجایی نسبی به ترتیب در امتداد، شیب و راستای نرمال

معادلات گرین $A_{ij}^{ss}, \dots, A_{ij}^{nn}$ توسط مدل آکادا (۱۹۹۲) محاسبه می‌شوند [۱۶].



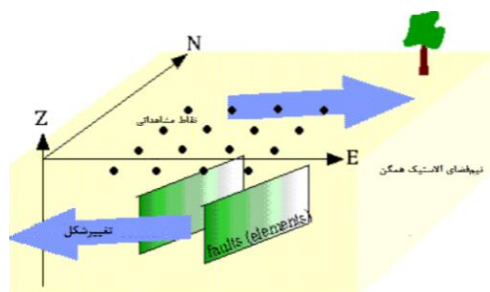
شکل شماره ۴: الگوریتم المان مرزی سه بعدی [۱۷]

معادلات شرایط مرزی مشابهی در مورد همه زها استفاده می شود. شرایط مرزی جابجایی، بنا بر معادلات گرین مناسب تغییر می کند. مجموعه ای از معادلات مرتبط با شرایط مرزی بر هر المان و جزءهای مجهول جابجایی نسبی، D_j^d ، D_j^s و D_j^n به آسانی با تشکیل یک ماتریس معکوس ساده قابل حل می باشد. با در نظر گرفتن شرایط مرزی در کل سطح المان، به جای اینکه فقط در مرکز المان در نظر گرفته شود؛ در حل مسئله تقریب خواهیم داشت.

با توجه به روابط بالا، با فرض در اختیار داشتن مقادیر مربوط به کشش در راستای امتداد و شیب دو گسل، و همچنین مقادیر استرس نرمال دو گسل، با حل دستگاه معادلات زیر (ماتریس معکوس)، می توان مقادیر مربوط به جابجایی های نسبی برای دو گسل را تعیین نمود.

$$\begin{bmatrix} \tau_1^s \\ \tau_1^d \\ \sigma_1^n \\ \tau_2^s \\ \tau_2^d \\ \sigma_2^n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11}^{ss} & A_{11}^{sd} & A_{11}^{sn} & A_{12}^{ss} & A_{12}^{sd} & A_{12}^{sn} \\ A_{11}^{ds} & A_{11}^{dd} & A_{11}^{dn} & A_{12}^{ds} & A_{12}^{dd} & A_{12}^{dn} \\ A_{11}^{ns} & A_{11}^{nd} & A_{11}^{nn} & A_{12}^{ns} & A_{12}^{nd} & A_{12}^{nn} \\ A_{21}^{ss} & A_{21}^{sd} & A_{21}^{sn} & A_{22}^{ss} & A_{22}^{sd} & A_{22}^{sn} \\ A_{21}^{ds} & A_{21}^{dd} & A_{21}^{dn} & A_{22}^{ds} & A_{22}^{dd} & A_{22}^{dn} \\ A_{21}^{ns} & A_{21}^{nd} & A_{21}^{nn} & A_{22}^{ns} & A_{22}^{nd} & A_{22}^{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D_1^s \\ D_1^d \\ D_1^n \\ D_2^s \\ D_2^d \\ D_2^n \end{bmatrix} \quad (5)$$

همانطور که گفته شد در روابط بالا، اندیس s مربوط به امتداد، d مربوط به شیب، و n مربوط به مولفه نرمال می باشد. ضرایب A توابع گرین برای نیم فضای الاستیک می باشند که در مدل آکادا معرفی شده اند. اصطلاح المان که در این برنامه تعریف شده است، نشانگر یک صفحه جداشدگی می باشد؛ هر المان به قسمت های کوچکتری تقسیم می شود که زیر المان نام دارد [۱۸].



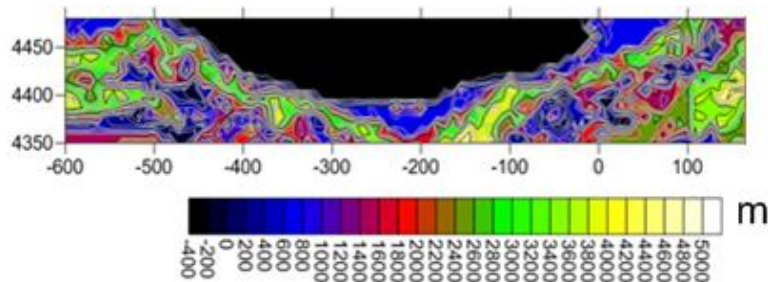
شکل شماره ۵: مدل سه بعدی گسل در نیم فضای الاستیک [۱۹]

جهت مدلسازی توپوگرافی و متعاقب آن، مقایسه اش با مدلی رقومی ارتفاعی منطقه، از مشخصات گسل های مورد بحث، سه پارامتر را مجهول در نظر گرفته ایم، که بنا بر محدوده تغییرات این مشخصه ها در طول زمان و یا مطالعات پیشین انجام گرفته بر روی این گسل ها، دست به ایجاد حالت های ممکنه و چینش های احتمالی این مشخصه ها زده ایم.

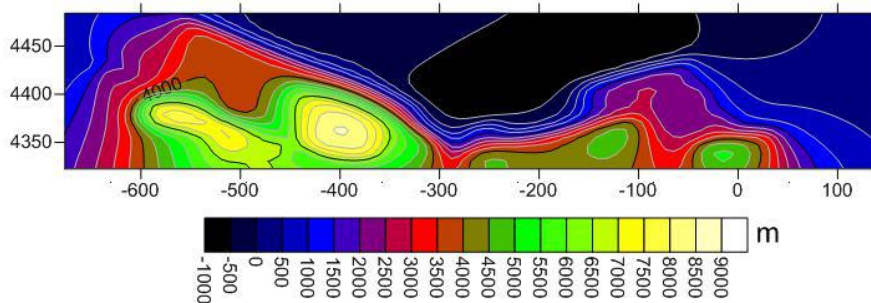
۴- نتایج عددی

می‌خواهیم گسل‌ها و تغییرات آن‌ها را از شروع دوران کواترنری تاکنون، مورد بررسی قرار دهیم. در این دوران، بنا به اینکه گسل از شروع کدام عصر، فعالیتش محسوس‌تر بوده است، بازه‌ای تعریف می‌کنیم که از حدود ۲/۵ میلیون سال پیش آغاز شده و تاکنون ادامه دارد. بسته به تحقیقات صورت‌گرفته پیرامون شیب گسل‌های منطقه، و به خصوص در مورد سه گسل مورد بحث، مقدار ثابت ۶۰ درجه، انتخاب شد. لغزش نسبی که با واحد میلی‌متر در سال سنجیده می‌شود حرکت نسبی بلوکهای گسل نسبت به یکدیگر است؛ که بنا بر نوع حرکت، سه حالت متفاوت وجود دارد. از آنجا که نوع لغزش سه گسل البرز شمالی، خزر و کندوان، شیب‌لغز می‌باشد؛ لذا لغزشی در راستای امتداد نداشته و تنها لغزش در امتداد شیب و لغزش قائم بر صفحه گسل، در مورد آن‌ها تعریف می‌شود. بنا بر مطالعات صورت گرفته بر روی لغزش عمودی، و نرخ لغزش‌های برآورد شده در گسل‌های منطقه، بازه‌ی تغییرات آن‌ها را می‌توان از ۰/۵- تا ۲+ میلی-متر در سال در نظر گرفت.

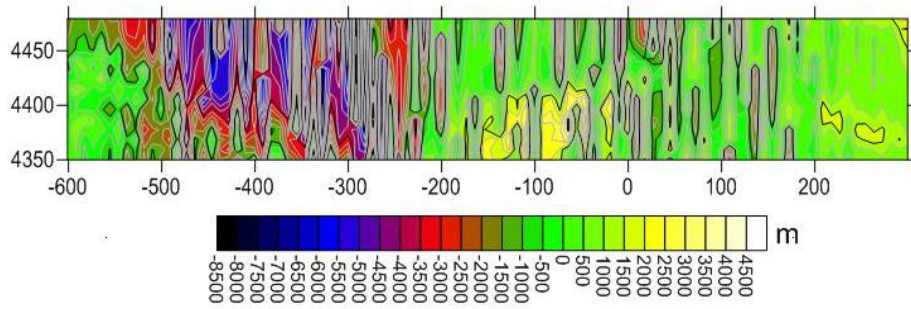
ابتدا با تغییر پارامترهای زمان و نرخ لغزش قائم در مورد هر سه گسل، دست به ایجاد مدل‌های توپوگرافی احتمالی زدیم و با مقایسه هریک با مدل رقومی ارتفاعی منطقه، همانطور که در شکل‌های (۷) تا (۲۴) مشهود است، این نتیجه حاصل شد که اختیار چه مقادیری برای مشخصات تکتونیکی گسل‌ها مناسب‌تر است. شکل (۶)، مدل رقومی ارتفاعی منطقه است؛ که اختلاف هریک از مدل‌ها با این مدل رقومی ارتفاعی، محاسبه شده و نمودار آن در زیر هر یک از مدل‌های توپوگرافی حاصل از نمونه مشخصات تکتونیکی متفاوت آمده است.



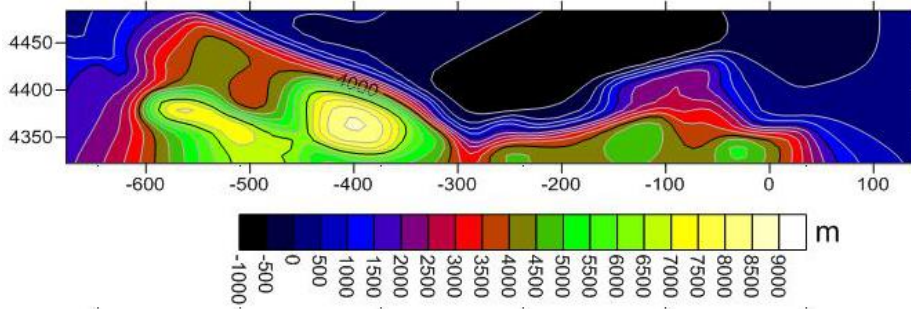
شکل شماره ۶: مدل رقومی ارتفاعی منطقه



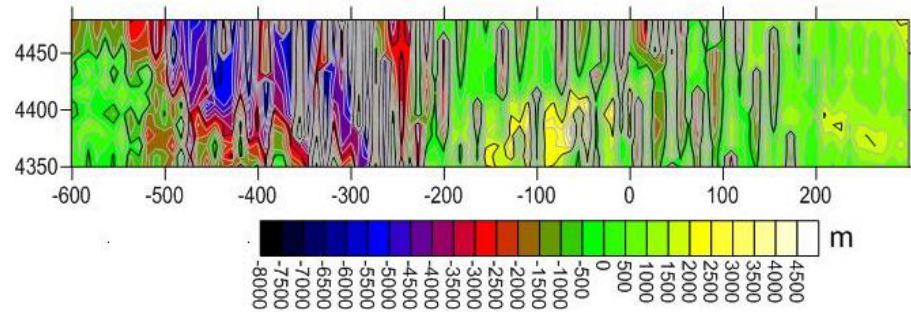
شکل شماره ۷: مدل توپوگرافی حاصل از نمونه مشخصات تکتونیکی (۱)



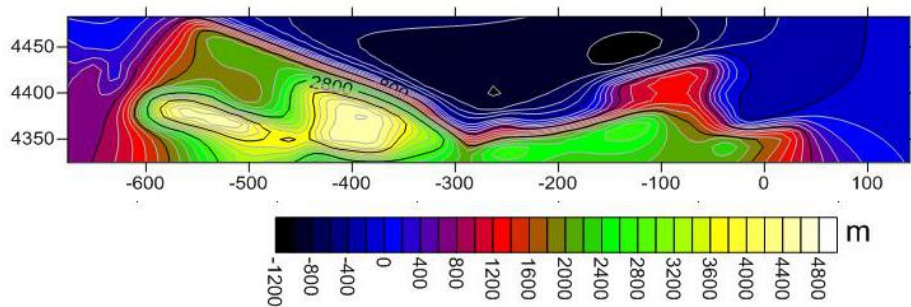
شکل شماره ۸: اختلاف ارتفاعی بین مدل توپوگرافی (۱) و مدل رقومی ارتفاعی



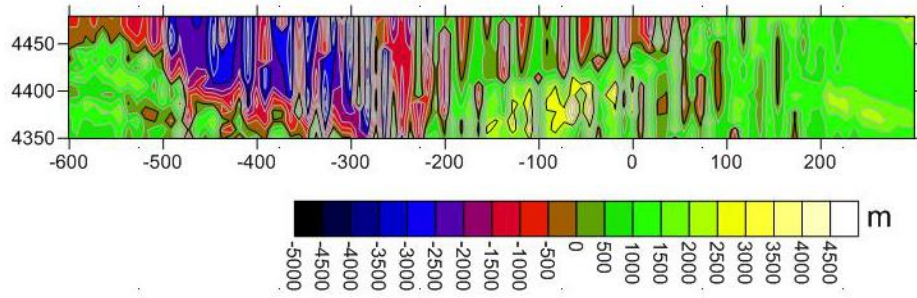
شکل شماره ۹: مدل توپوگرافی حاصل از نمونه مشخصات تکتونیکی (۲)



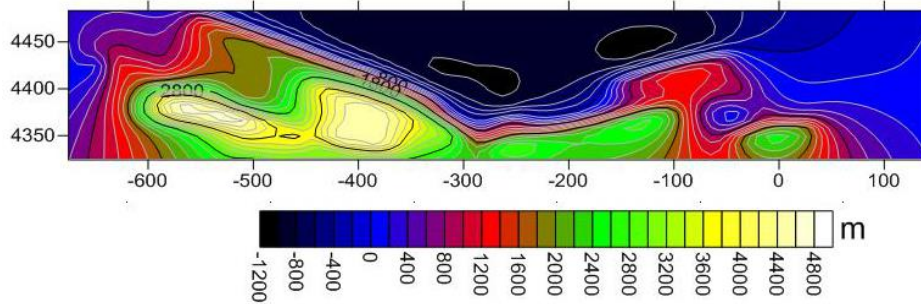
شکل شماره ۱۰: اختلاف ارتفاعی بین مدل توپوگرافی (۲) و مدل رقومی ارتفاعی



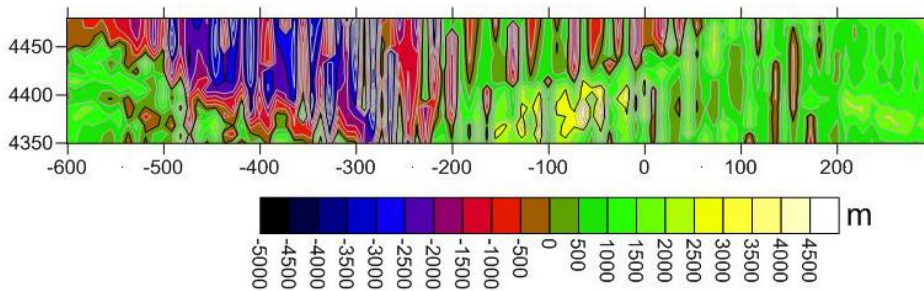
شکل شماره ۱۱: مدل توپوگرافی حاصل از نمونه مشخصات تکتونیکی (۳)



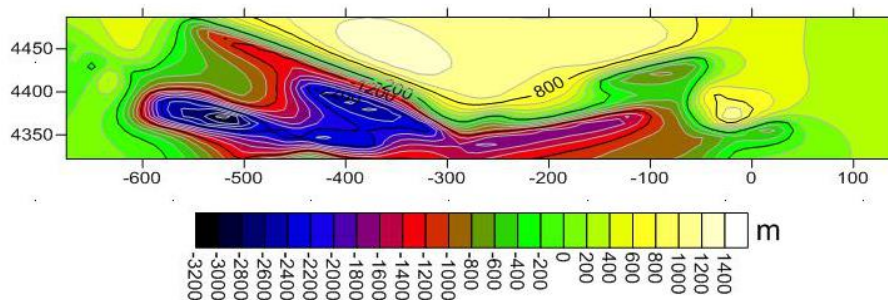
شکل شماره ۱۲: اختلاف ارتفاعی بین مدل توپوگرافی (۳) و مدل رقومی ارتفاعی



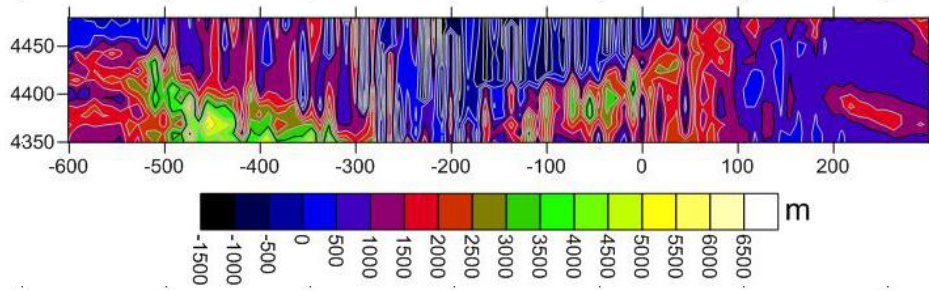
شکل شماره ۱۳: مدل توپوگرافی حاصل از نمونه مشخصات تکتونیکی (۴)



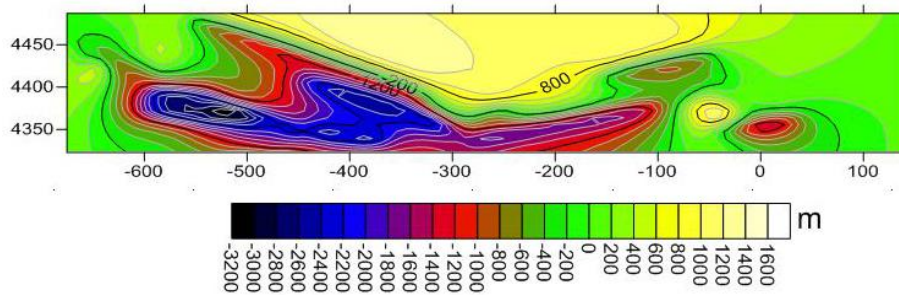
شکل شماره ۱۴: اختلاف ارتفاعی بین مدل توپوگرافی (۴) و مدل رقومی ارتفاعی



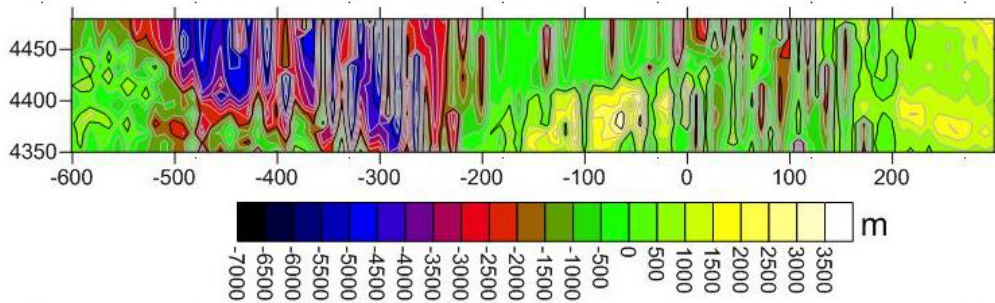
شکل شماره ۱۵: مدل توپوگرافی حاصل از نمونه مشخصات تکتونیکی (۵)



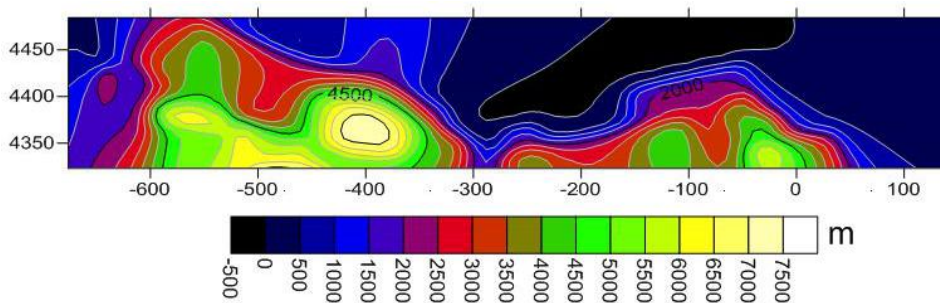
شکل شماره ۱۶: اختلاف ارتفاعی بین مدل توپوگرافی (۵) و مدل رقومی ارتفاعی



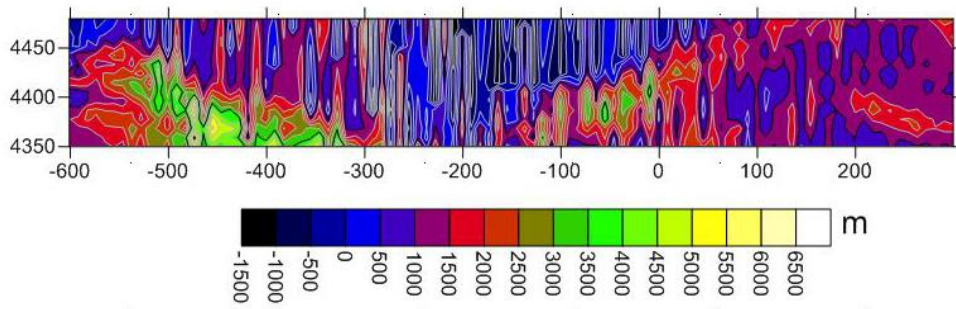
شکل شماره ۱۷: مدل توپوگرافی حاصل از نمونه مشخصات تکتونیکی (۶)



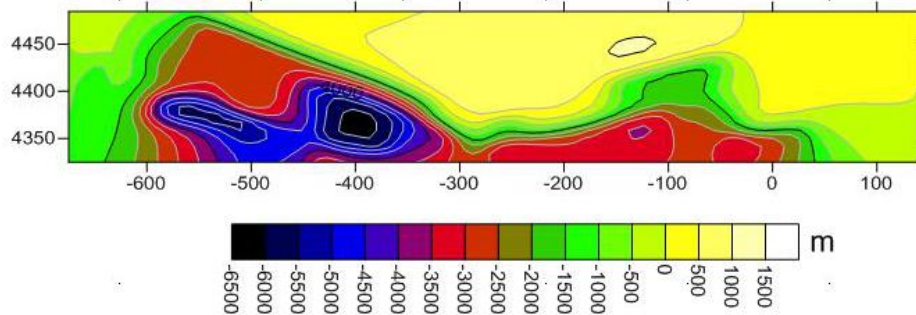
شکل شماره ۱۸: اختلاف ارتفاعی بین مدل توپوگرافی (۶) و مدل رقومی ارتفاعی



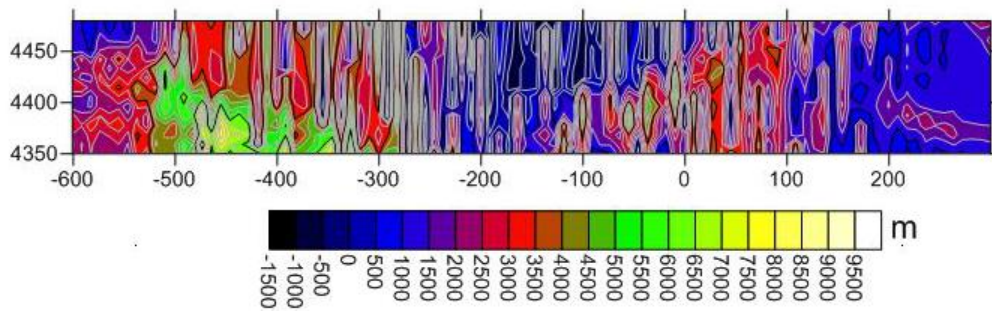
شکل شماره ۱۹: مدل توپوگرافی حاصل از نمونه مشخصات تکتونیکی (۷)



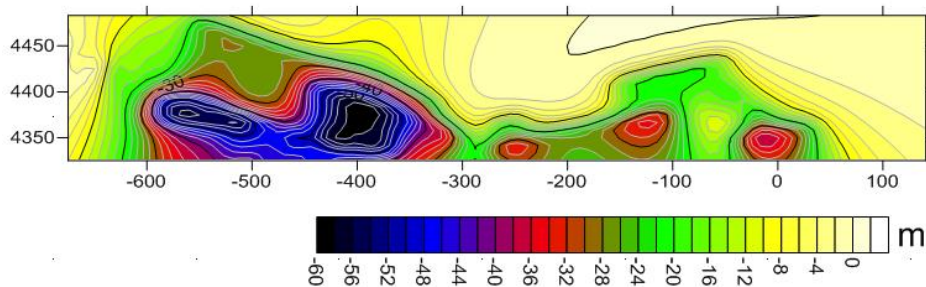
شکل شماره ۲۰: اختلاف ارتفاعی بین مدل توپوگرافی (۷) و مدل رقومی ارتفاعی



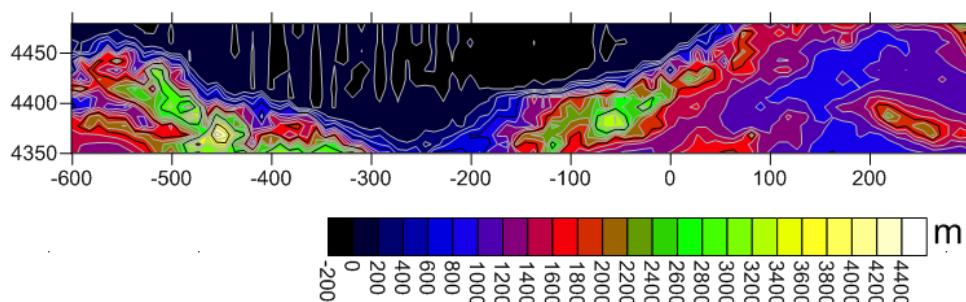
شکل شماره ۲۱: مدل توپوگرافی حاصل از نمونه مشخصات تکتونیکی (۸)



شکل شماره ۲۲: اختلاف ارتفاعی بین مدل توپوگرافی (۸) و مدل رقومی ارتفاعی



شکل شماره ۲۳: مدل توپوگرافی حاصل از نمونه مشخصات تکتونیکی (۹)



شکل شماره ۲۴: اختلاف ارتفاعی بین مدل توپوگرافی (۹) و مدل رقمی ارتفاعی

بر اساس جدول (۲) که انحراف جذر میانگین مربعات را برای هر (۹) مدل بالا نشان می دهد، مشهود است مدل شماره (۹)، کمترین انحراف جذر میانگین مربعات را داشته، لذا انتخاب مقادیر مشخصات گسلها استفاده شده در مدل شماره (۹)، یقیناً به مشخصات تکتونیکی واقعی گسلها، نزدیک تر خواهد بود.

جدول شماره (۲): بررسی آماری مدل سازیها

مدل سازی	انحراف جذر میانگین مربعات
مدل شماره (۱)	۲۸/۱۹
مدل شماره (۲)	۲۴/۱۲
مدل شماره (۳)	۱۷/۹۲
مدل شماره (۴)	۱۳/۴۸
مدل شماره (۵)	۱۰/۸۱
مدل شماره (۶)	۱۱/۵۹
مدل شماره (۷)	۱۴/۱۸
مدل شماره (۸)	۱۲/۱۸
مدل شماره (۹)	۸/۰۹

در مدل شماره ۹، زمان فعالیت گسل از ۲/۵۸۸ میلیون سال پیش، یعنی شروع دوره کواترنری فرض شد؛ همچنین نرخ لغزش قائم بر صفحه گسل برابر با ۲ میلی متر در سال، در نظر گرفته شد. در این ۹ مدل سازی همانطور که گفته شد، مشخصه نرخ لغزش افقی ثابت و برابر با ۲/۵ میلی متر در سال فرض شد؛ این عددی بر طبق مطالعات زمین شناسی پیشین و جدول مشخصات تکتونیکی گسل های ایران، جمع آوری شده توسط دکتر حسامی، صورت گرفته است.

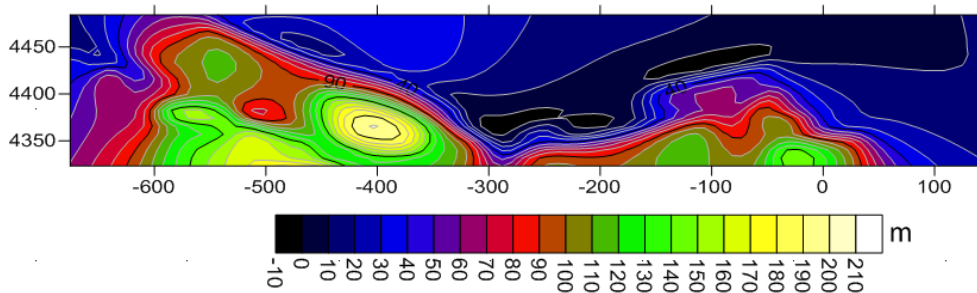
داده های تکتونیکی مربوط به مدل توپوگرافی (۹) در جدول (۳) آمده است.

جدول شماره ۳: بررسی آماری مدل سازیها

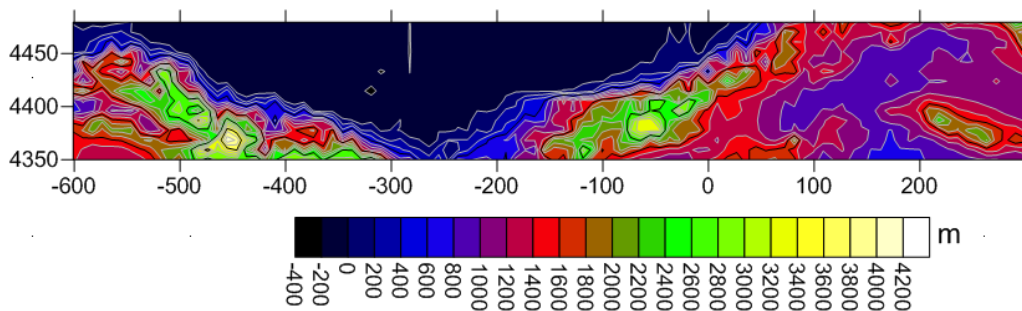
مدل شماره (۹)	زمان فعالیت گسل	لغزش افقی در راستای شیب	لغزش قائم بر صفحه گسل
گسل خزر	۲/۵۸۸ میلیون سال پیش	۲/۵ میلی متر در سال	۲ میلی متر در سال
گسل البرز شمالی	۲/۵۸۸ میلیون سال پیش	۲/۵ میلی متر در سال	۲ میلی متر در سال
گسل کندوان	۲/۵۸۸ میلیون سال پیش	۲/۵ میلی متر در سال	۲ میلی متر در سال



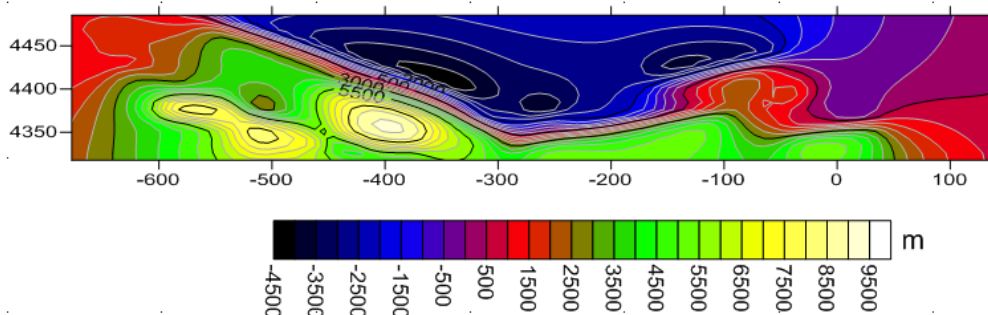
سپس با ثابت گرفتن مقادیر به دست آمده مذکور، سعی بر آن شد که با تغییر مشخصه نرخ لغزش افقی، دو مدل توپوگرافی دیگر ایجاد؛ و با محاسبه اختلاف بین مدل توپوگرافی حاصل، با مدل ارتفاعی واقعی، بررسی کنیم که آیا مدلسازی گمبرگ، مطالعات زمین‌شناسی مرتبط را تأیید می‌نماید یا خیر. تا از این طریق به چگونگی کنترل ساختاری چنین مدلسازی‌هایی پی برده و ضرورت بررسی ارتباط بین تکتونیک و توپوگرافی را خاطر نشان سازیم. بنا به مطالعات صورت گرفته بر روی لغزش افقی در راستای شیب گسل، و نرخ لغزش‌های برآورد شده در گسل‌های منطقه، بازه‌ی تغییرات آن‌ها را می‌توان از ۳- تا $2/5+$ میلی‌متر در سال در نظر گرفت. همانطور که از مقایسه انحراف جذر میانگین مربعات مدل‌ها در جدول (۴)، مشخص است، مدلی که بر اساس مطالعات زمین‌شناسی تولید شده یعنی همان مدل (۹)، اختلاف کمتری با مدل رقومی ارتفاعی منطقه دارد، و مدلسازی بر اساس رابطه بین تکتونیک و توپوگرافی، تأییدی بر این ادعا را نشان می‌دهد.



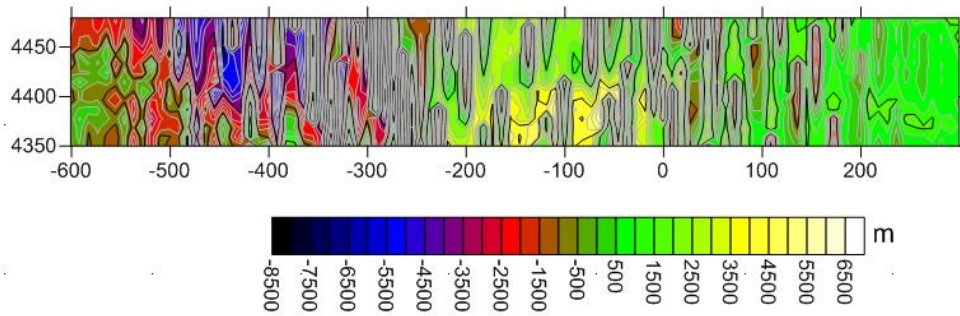
شکل شماره ۲۵: مدل توپوگرافی حاصل از نمونه مشخصات تکتونیکی (۱۰)



شکل شماره ۲۶: اختلاف ارتفاعی بین مدل توپوگرافی (۱۰) و مدل رقومی ارتفاعی



شکل شماره ۲۷: مدل توپوگرافی حاصل از نمونه مشخصات تکتونیکی (۱۱)



شکل شماره ۲۸: اختلاف ارتفاعی بین مدل توپوگرافی (۱۱) و مدل رقومی ارتفاعی

جدول شماره ۴: بررسی آماری و تأیید مدل سازی

مدل	انحراف جذر میانگین مربعات
مدل شماره (۹)	۸/۰۹
مدل شماره (۱۰)	۱۳/۴۷
مدل شماره (۱۱)	۱۵/۴۳

لازم به ذکر است که با توجه به متغیر فرض کردن سه شاخص و دخیل کردن تنها سه گسل در محاسبات، و در نظر نگرفتن عامل فرسایش در شکل نهایی توپوگرافی زمین، انتظار دقت بالایی را در مورد محاسبات نمی توان داشت. زیرا با حذف گسل های اطراف، کنش و واکنش های ناشی از حرکت آن ها و تأثیری که در شکل نهایی توپوگرافی خواهند داشت، نادیده گرفته شده است.

۵- نتیجه گیری

مدلسازی توپوگرافی بر اساس داده های تکتونیکی، که در واقع ارتباط بین توپوگرافی (به مثابه روبنا) و حرکت گسل های منطقه (به مثابه زیربنا) را نشان می دهد، می تواند بالعکس، بنا بر مقایسه بین توپوگرافی مدلسازی شده بر اساس حرکت تکتونیک ها، و مدل رقومی ارتفاعی منطقه، و مطالعه و مقایسه کمی نمای زمین از این طریق، معیاری جهت شناسایی مشخصات و تغییرات در مشخصات گسل ها باشد؛ به طوریکه می توان از توپوگرافی پوسته زمین، به تغییرات نرخ حرکت گسل ها و دیگر ویژگی هایشان، و نتیجتاً پیدایش گسل های جدید، پی برد و ساختار تکتونیکی گسل ها را کنترل نمود.

مراجع

- [1] Rockwell, T. K.; Keller, E. A.; and Johnson, D. L., 1985, Tectonic geomorphology of alluvial fans and mountain fronts near Ventura, California, in M. Morisawa and J. T. Hack (eds.), Tectonic Geomorphology. Boston: Allen & Unwin, pp. 183-208.
- [2] Gomberg, J.S., and Ellis, M.A., 1994, Topography and tectonics of the central New Madrid Seismic zone: results of numerical experiments using a three-dimensional boundary-element program: Journal of Geophysical Research, v. 99, p. 20299-20310.
- [3] Gomberg, J. S., 1993, Tectonic deformation in the New Madrid seismic zone: inferences from map-view and cross-sectional boundary element models: J. Geophys. Res. 98, 6639- 6664.
- [5] Fedynsky, V. V., Fomenko, K. E., Garkalenkov, J. A., Goncharov, V. P., Khrychev, B. A., Malovitsky, YA. P., Milashin, A. P., Neprochnov, Ju. P., and Ushakov, S. A. (1972): The Earth's crust of the island seas and continental depressions of the west Tethys region. 24th International Geological Congress, Montreal, P. Q., Section 3, pp. 51-57.



- [6] Berberian, M. (1983a): The southern Caspian: a compressional depression floored by trapped Modified oceanic crust. *Canadian Journal of Earth Science* 20. 163-183.
- [7] Hollingsworth, J., Jackson, J., Walker, R., Nazari, N. (2008): Extrusion tectonics and subduction in the eastern South Caspian region since 10 Ma, *Geology*, 36; no. 10; p. 763-766.
- [8] Zanchi, A., Berra, F., Mattei, M., Ghassemi, M.R., Sabouri, J. (2006): Inversion tectonics in central Alborz, Iran. *Journal of Structural Geology*, 28, 2023-2037.
- [9] Gluse, M. (1965): Die geologie des gebietes nordlich des Kandovan passes (zentral Elborz). *Mitt.Geol., Inst. E.T.H.V.* 48.165pp. Zurich.
- [۱۰] نیک‌نژاد، س. (۱۳۸۲): تحلیل هندسی و جنبشی گسله‌های راندگی منطقه کندوان (البرز مرکزی)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس تهران، ۹۶ص.
- [11] Asserto, R. (1966): Geological map of upper Djajrud and Lar valleys (Central Alborz, Iran). Milano, Inst. Geol. Univ. Milano: Publ. N.232, 86p.
- [12] Allen, M. B., Ghassemi, M. R., Shahrabi, M., Qorashi, M. (2003): Accommodation of late Cenozoic oblique shortening in the Alborz range, northern Iran. *Journal of Structural Geology* 25: 659-679.
- [13] Gomberg, J.S., and Ellis, M.A., 1993, 3D-DEF: A user's manual, U.S. Geol. Surv. Open File Rep, p. 93-547
- [۱۴] قاسمی، م. ر.، قرشی، م. (۱۳۸۳): بررسی ناحیه‌ای گسله‌های بنیادی و لرزه‌زا در کوه‌های البرز. پروژه تحقیقاتی شورای پژوهشی علمی ایران. ۵۸ص.
- [16] Okada, Y., 1992, Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space, *Bull: Seismol. Soc. Am.*, p. 1018-1040.
- [18] Holmes, A. 1965, *Principles of physical geology*, (second edition), London: Nelson.
- [4] http://s5.picofile.com/file/8119385368/iran_faults_map.jpg
- [14] <http://www.unavco.org/software/modeling/3d-def/images/manual1.gif>
- [15] http://www.web.pdx.edu/~mccaf/www/defnode/td_fig1a.jpg
- [17] <http://www.unavco.org/software/modeling/3d-def/images/introbig.gif>
- [19] <http://www.unavco.org/software/modeling/3d-def/images/basic.gif>