نشریه علمی پژوهشی مهندسی فناوری اطلاعات مکانی

سال پنجم، شماره سوم، پاییز ۱۳۹۶

Vol.5, No.3, Autumn 2017

۱۳-۲۹

این مقاله در اولین کنفرانس ملی مهندسی فناوری اطلاعات مکانی به‌عنوان مقاله برگزیده انتخاب شده است که پس از تکمیل، داوری مجدد و اخذ پذیرش در این شماره از نشریه به چاپ می‌رسد.

شناخت ساختار گسلش بر مبنای توپوگرافی در مناطق لرزه‌خیز

چیستا پناهی وقار*[۱]، بهزاد وثوقی[۲] ، سعید حاجی آقاجانی[۳]

۱- کارشناس‌ارشد ژئودزی- دانشکده مهندسی ژئودزی و ژئوماتیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

۲- دانشیار دانشکده مهندسی ژئودزی و ژئوماتیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

۳- دانشجوی دکتری ژئودزی- دانشکده مهندسی ژئودزی و ژئوماتیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۰۱/۲۵ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۶/۳۱

چکیده

توپوگرافی، غالباً ماحصل چگونگی حرکت صفحه‌های تکتونیکی و گسل‌ها نسبت به هم است و اگر پس از شناسایی کامل ویژگی‌های تکتونیکی و بر اساس 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 الگوریتم المان مرزی و مدل اُکادا، سعی بر شبیه‌سازی توپوگرافی ایجاد شده از فعل و انفعالات این سه گسل داریم. با توجه به لرزه‌خیزی بالای کشور ایران و ضرورت تحقیق این موضوع، با تعمیم این ایده، می‌توان در ابعاد وسیع‌تری، توپوگرافی منطقه‌ای را بازسازی نموده؛ سپس از مجموعه تغییرات مشاهده شده در نمای زمین و مقایسه با مدل ارتفاعی واقعی 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 مشخصات گسل‌ها، خواهیم رسید. بدین منظور با تغییر شاخص‌های تکتونیکی مربوط به گسل‌ها، به تخمین ارتفاعات حاصل پرداخته و با در نظرگرفتن مقادیر مختلف برای سه شاخص متغیر، دست به ایجاد توپوگرافی‌های متناظر با هر یک زده‌ایم و نهایتاً با مدل ارتفاعی واقعی و مختصات توپوگرافیک این سه گسل مقایسه نموده‌ایم. مطالعات حاصل از مدل‌سازی نشان داد این سه گسل از شروع دوره کواترنری فعالیت داشته؛ همچنین با نرخ لغزش قائم ۲ میلی‌متر در سال در حال حرکت بوده‌اند. با استفاده از مقایسه کمّی 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.

کلید واژه‌ها: تکتونیک صفحه‌ای، توپوگرافی، تغییرشکل.

* نویسنده مکاتبه کننده: چیستا پناهی¬وقار، تهران، خیابان ولیعصر، بالاتر از میدان ونک، تقاطع میرداماد، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، کدپستی: ۱۹۹۶۷-۱۵۴۳۳

تلفن: ۸۸۸۷۷۰۷۱-۰۲۱

Email : Tchistapanahi@gmail.com

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-07]

[DOI: 10.29252/jgit.5.3.13]

۱- مقدمه

در دهه‌های گذشته، تحقیقاتی از این دست که ارتباط بین فرآیندهای تکتونیکی[1] بزرگ‌مقیاس و روند تکاملی طولانی‌مدت نمای زمین را نشان دهد؛ نتایج قابل‌توجهی داشته؛ به طوری‌که موضوعات جدیدی در مورد رابطه بین فرآیندهای تکتونیکی و روند تکامل توپوگرافی[2] سطح زمین، مطرح شده است.

موریساوا و هک[3] (۱۹۸۵)، از مورفوتکتونیک[4] به‌عنوان مشخص‌کننده رابطه بین تکتونیک و عوارض سطحی یاد کرده‌اند و معتقدند که با داشتن این ارتباط، می‌توان فعل و انفعالات تکتونیکی را، از طریق مطالعه اشکال و ناهمواری‌های سطح زمین استنتاج نمود [۱]. گمبرگ و الیس[5] (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[6]، محاسبات میدان جابه‌جایی قائم را در مورد زلزله مربوط به منطقه نیومادرید ممکن ساخته؛ همچنین برای محاسبه جابه‌جایی ناشی از حرکت گسل‌ها، از مدل اُکادا[7] استفاده می‌کند. در مورد طیف وسیعی از مدل‌های مستدل، میدان جابه‌جایی سطحی سه‌بعدی بررسی شده، و از برنامه المان مرزی سه‌بعدی جدیدی برای محاسبه میدان جابه‌جایی سطحی، استفاده شده‌است [۳].

پیشرفت در مباحث مدل‌سازی حرکت تکتونیک‌های بزرگ مقیاس، 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[8] (۲۰۱۲)، مطرح نمود که برای حل این موضوع معکوس و رمزگشایی و تبدیل ریخت شناسانه آن به‌طور مؤثر، بهتر است درک صحیحی از چگونگی واکنشِ نمای متناظر زمین و فرسایشِ 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 ارتفاعی واقعی، بررسی می‌شود که آیا می‌توان با تغییردادن 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؟

به‌منظور مدل‌سازی، از نرم‌افزار 3D-def، که در قالب کد فرترن[9] 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 آزیموت، مدت‌زمان فعالیت، و طول و عرض صفحه گسل و نوع گسل از منظر نحوه حرکت بلوک‌ها و اطلاعاتی ازین دست، به‌عنوان 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، به‌عنوان 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 مقاله ثابت فرض شده و مقدار آن بر طبق مطالعات زمین‌شناسی تعیین گردیده است.

[1] Tectonics processes
[2] Topography
[3] Morisawa, M. and Hack, J. T.
[4] Morphotectonics
[5] Joan Gomberg, Michael Ellis
[6] Boundary-element program
[7] Okada model
[8] Withtaker, A.
[9] Fortran code

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-07]
[DOI: 10.29252/jgit.5.3.13]

لازم به ذکر است که از مدل رقومی ارتفاعی ASTER[1] (آستِر) با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر به‌عنوان داده‌های واقعی از توپوگرافی منطقه استفاده خواهد شد. دقت ارتفاعی این مدل، ۴ تا ۶ متر و دقت مسطحاتی آن، ۰٫۰۰۰۲ درجه است.

۲- معرفی منطقه مطالعاتی

فلات ایران، محدوده اصلی کشور ایران در ادوار مختلف تاریخی بوده است؛ و بر پایه وجوه تاریخی، می‌توان 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 جنوب‌غربی 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 رشته کوه‌هایی 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 منطقه البرز شمالی، در محدوده جغرافیایی مشخص‌شده، که از نقشه گسل‌های فعال ایران در مقیاس ۱:۲,۵۰۰,۰۰۰ برداشته شده‌اند، مشاهده می‌شود؛ از این بین، سه گسل البرز شمالی، خزر و کندوان را جهت بررسی و مدل‌سازی توپوگرافی برگزیده‌ایم.

به معرفی ویژگی‌های سه گسل انتخابی می‌پردازیم:

گسل خزر

این گسل با طول ۶۰۰ کیلومتر [۵] و در برخی منابع ۴۴۰ کیلومتر، بین چالوس در غرب و گنبدکاووس در شرق واقع شده است. دارای راستای خم‌دار شرقی-غربی و شیب به سمت جنوب و ساز و کار گسل، شیب‌لغز معکوس است [۶]. همچنین در مورد این گسل، بیشینه جابه‌جایی قائم نسبی ۳۰۰۰ متری، برای دو میلیون سال اخیر برآورد شده است [۵]. در راستای این گسل، زمین‌لغزش‌های متعددی مشاهده شده که به گمان، مربوط به آغاز دوران کواترنری[2] و فعالیت‌های زمین‌ساختی است. سرعت‌های GPS[3] (سامانه موقعیت‌یاب جهانی یا جی‌پی‌اِس)، 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 شمال‌غربی- جنوب‌شرقی و با شیب به سمت جنوب‌غربی است؛ که البته ادامه شمال غربی این گسل، به طول حدود ۹۳ کیلومتر، به‌عنوان یک گسل احتمالی به نام گسل ساوه شناخته می‌شود؛ که روشن است با پذیرش پیوستگی آن‌ها، طول گسل بیشتر خواهد بود. ساز و کار گسل، شیب‌لغز معکوس است. از نظر موقعیت جغرافیایی، در شمال‌شرق شهر قم واقع شده است. این گسل، نهشته‌ای الیگومیوسن[4] را از سوی جنوب شرقی بر روی نهشته‌های کواترنری رانده است. همچنین می‌توان جنبش گسل را در نهشته‌های کواترنری مشاهده نمود.

گسل کندوان

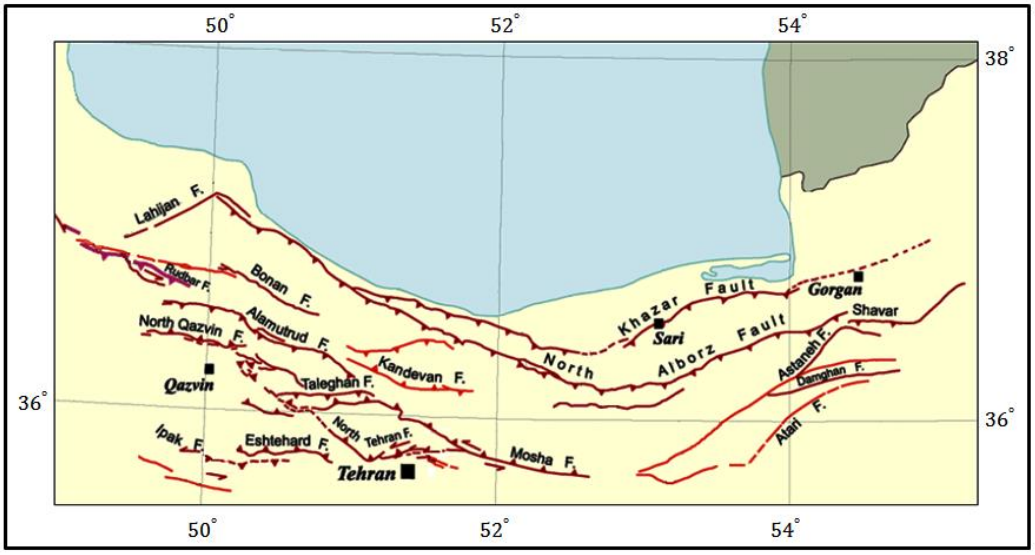
اگرچه طول این گسل در نقشه‌های زمین‌شناسی، در حدود ۵۰ کیلومتر است؛ اما در منابع دیگر طول آن را بسیار بیشتر در نظر گرفته‌اند. که البته این فرض با در نظر گرفتن گسل‌های اطراف بوده است. به گمان زانچی[5] و همکاران، طول گسل کندوان به ۲۰۰

[1] Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer

[2] Quaternary
[3] Global Positioning System
[4] Oligo-Miocene
[5] Zanchi

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-07]
[DOI: 10.29252/jgit.5.3.13]

کیلومتر هم می‌رسد [۸]. راستای کلی گسل، شمال‌غربی-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. ساز و کار گسل، راندگی است و چندین کیلومتر جابه‌جایی راست‌بر در طول گسل دیده می‌شود. همچنین در غرب انگوران، حدود هزار متر جابه‌جایی عمودی ناشی از لغزش شیب‌لغز گسل دیده می‌شود [۱۰]. جابه‌جایی قائم در ناحیه حدود ۲۵ کیلومتری غرب تا شمال‌غرب، به ۵ کیلومتر یا بیشتر می‌رسد [۱۱]. این گسل در البرز مرکزی و در شمال گچسرو دیزین واقع شده‌است. مشخصات تکتونیکی گسل‌ها که به‌عنوان داده ورودی مدل‌سازی مورداستفاده قرار خواهند گرفت در جدول (۱) آمده است.



شکل ۱: گسل‌های فعال منطقه البرز شمالی [۴]

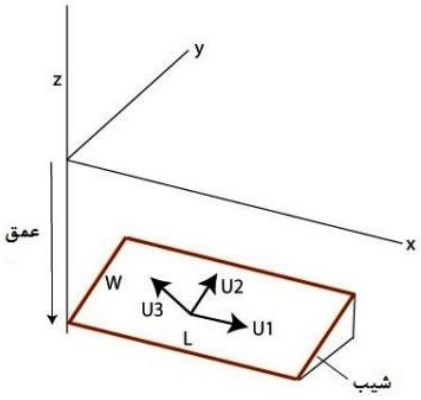
جدول ۱: ویژگی‌های تکتونیکی گسل‌های منطقه [۱۲]

نام گسل	طول جغرافیایی نقطه شروع گسل (کیلومتر)	عرض جغرافیایی نقطه شروع گسل (کیلومتر)	طول صفحه گسل (کیلومتر)	زاویه آزیموت گسل (درجه)	زاویه شیب گسل (درجه)
خزر	-۴۴۸٫۶۶۲	۴۴۱۲٫۳۲۵	۱۴۸٫۹۸۵	۱۱۰	۳۴
خزر	-۲۷۴٫۶	۴۳۶۵٫۰۲۳	۳۳٫۴۶۲۶۵	۷۶	۳۴
خزر	-۱۵۹٫۹۳۷	۴۴۱۰٫۰۷۹	۱۱۷٫۴۱۰۱	۷۶	۳۴
البرز شمالی	-۵۵۶٫۵۶۴	۴۴۸۱٫۴۶۱	۲۵۳٫۸۴۴۲	۱۱۲	۸۰
البرز شمالی	-۲۸۰٫۸۱۹	۴۳۴۱٫۱۱۳	۱۸۴٫۶۲۴۹	۷۸	۸۰
البرز شمالی	-۳۲۱٫۵۰۸	۴۳۶۰٫۸۰۳	۳۱٫۱۴۱۵۳	۱۱۰	۸۰
کندوان	-۴۰۵٫۳۰۶	۴۳۳۶٫۳۴۸	۳۹٫۸۴۱۳	۲۹۰	۶۰
کندوان	-۳۶۳٫۳۷۹	۴۳۳۴٫۹	۳۳٫۹۴۳۴	۲۷۱	۶۰

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-07]
[DOI: 10.29252/jgit.5.3.13]

۳- مدل‌سازی

گمبرگ والیس (۱۹۹۴)، با طراحی برنامه «المان مرزی سه‌بعدی»، توپوگرافی منطقه لرزه‌خیز نیومادرید مرکزی را بر پایه داده‌های تکتونیکی، مدل‌سازی نمودند [۲]. این برنامه، مقادیر مربوط به ویژگی گسل‌های منطقه نیومادرید را به‌عنوان ورودی گرفته و میدان جابه‌جایی سه‌بعدی، تنش و کرنش را در داخل و روی سطح نیم‌فضای الاستیک[1]، به‌عنوان خروجی تحویل می‌دهد. این برنامه با استفاده از الگوریتم المان مرزی، محاسبات میدان جابه‌جایی قائم را در مورد زلزله مربوط به منطقه نیومادرید ممکن ساخته و همچنین برای محاسبه جابه‌جایی ناشی از حرکت گسل‌ها، از مدل اُکادا استفاده می‌کند. مدل غیرخطی اُکادا، رابطه بین پارامترهای هندسی و فیزیکی گسل با مشاهدات جابه‌جایی ارتوگونال را بیان می‌کند. با استفاده از مدل اُکادا می‌توان جابه‌جایی‌های ناشی از یک منبع نقطه‌ای و مستطیل‌شکل محدود را که در شکل (۲) نشان داده شده است، در فضای نیمه‌محدود همگن و ایزوتروپیک[2] با استفاده از قانون‌های الاستیسیته خطی کلاسیک در سه امتداد x، y، و z به‌دست آورد.



شکل ۲: منبع نیروی مستطیلی‌شکل در مدل اُکادا [۱۳]

پارامترهای ورودی مدل به دو دسته پارامترهای هندسی و فیزیکی تقسیم می‌شود. پارامترهای هندسی، می‌توان به طول، عرض، شیب، عمق و بردارهای لغزش گسل اشاره کرد و در مورد پارامترهای فیزیکی نیز، ضرایب لامه[3] برای ماده الاستیک ایزوتروپیک را برشمرد. در واقع، مدل اُکادا جهت مدل‌کردن تغییرشکل‌های ناشی از حرکت گسل‌ها نسبت به هم، استفاده می‌شود. این مدل شامل روابط تحلیلی برای محاسبه میدان تغییرشکل ناشی از یک منبع نیروی نقطه‌ای و سپس انتگرال‌گیری از این روابط روی صفحه گسل (منبع نیروی مستطیلی‌شکل محدود) در داخل نیم‌فضای الاستیک است.

بردارهای جابه‌جایی برای نقاط مشاهدات، خروجی مدل گمبرگ هستند. گمبرگ و الیس (۱۹۹۴) بیان کردند اهمّ تغییرشکل پوسته‌ای، معمولاً به مرزهای صفحات لیتوسفر[4]ی محدود می‌شود، در محلی که تکتونیک صفحه‌ای، طبیعت و منشأ تغییرشکل در توپوگرافی را به‌وضوح نشان می‌دهد. تغییرشکل تولیدشده ازحرکت تکتونیک‌ها، دور از مرزهای صفحات تکتونیکی، 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، اهمّ 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. تغییر شکل در هر نقطه مشاهداتی (x, y, z)، در واقع موقعیت ثانی آن است. میدان جابه‌جایی با بردار جابه‌جایی که در رابطه (۱) نشان داده شده است، تعریف می‌شود:

$$U = u_x\hat{x} + u_y\hat{y} + u_z\hat{z} \qquad \text{رابطه (۱)}$$

[1] Elastic
[2] Homogeneous and isotropic
[3] Lamé coefficients
[4] Lithosphere

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-07]
[DOI: 10.29252/jgit.5.3.13]

تنسور گرادیان جابه‌جایی[1]: $[\frac{\partial u_k}{\partial \xi}]$ استرس[2]، استرین[3] و تنسور دوران جسم صلب همه از $[\frac{\partial u_k}{\partial \xi}]$ 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 جابه‌جایی‌ها و یا شرایط مرزی تنش در آنجا مشخص شده‌است.

برای نمونه، در شرایط مرزی تنش می‌توانیم مجموعه معادلات خطی نشان داده شده در رابطه‌های (۲، ۳ و۴) را بنویسیم:

رابطه (۲)

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

رابطه (۳)

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

رابطه (۴)

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

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

σ_n: تنش کششی (نرمال)

متغیرهای τ_s^b، τ_d^b و σ_n^b: اجزا کشش و تنش نرمال در جزء مرتبط با میدان جابه‌جایی است.

D_j^d، D_j^s و D_j^n: مولفه جابه‌جایی نسبی به‌ترتیب در امتداد، شیب و راستای نرمال معادلات گرین[4]، A_{ij}^{ss}، ...، A_{ij}^{nn} توسط مدل اُکادا (۱۹۹۲) محاسبه می‌شوند [۱۴].

در شکل (۳)، چگونگی تعامل یک المان با دیگر المان‌ها در الگوریتم المان مرزی سه‌بعدی نمایش داده شده است.

معادلات شرایط مرزی مشابهی در مورد همه زها استفاده می‌شود. شرایط مرزی جابه‌جایی، بنا بر معادلات گرین مناسب تغییر می‌کند. مجموعه‌ای از معادلات مرتبط با شرایط مرزی بر هر المان و جزءهای مجهول جابه‌جایی نسبی، D_j^d، D_j^s و D_j^n به‌آسانی با تشکیل یک ماتریس‌معکوس ساده قابل حل است. با در نظر گرفتن شرایط مرزی در کل سطح المان، به‌جای این‌که فقط در مرکز المان در نظر گرفته شود؛ در حل مسئله تقریب ایجاد خواهد شد.

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 نشان داده شده در رابطه (۵) و استفاده از ماتریس معکوس، می‌توان مقادیر مربوط به جابه‌جایی‌های نسبی را برای دو گسل تعیین نمود.

رابطه (۵)

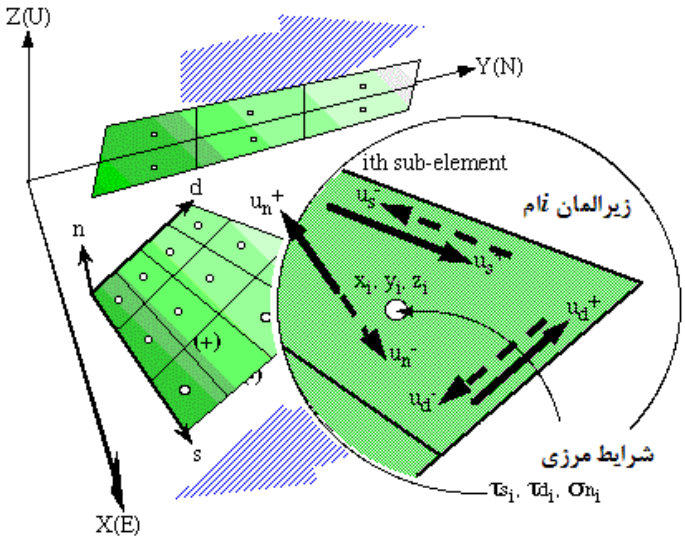
$$\begin{vmatrix}\boldsymbol{\tau_1^s}\\ \boldsymbol{\tau_1^d}\\ \boldsymbol{\sigma_1^n}\\ \boldsymbol{\tau_2^s}\\ \boldsymbol{\tau_2^d}\\ \boldsymbol{\sigma_2^n}\end{vmatrix} = \begin{vmatrix}\mathbf{A_{11}^{ss}} & \mathbf{A_{11}^{sd}} & \mathbf{A_{11}^{sn}} & \mathbf{A_{12}^{ss}} & \mathbf{A_{12}^{sd}}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

همان‌طور که گفته شد در روابط بالا، اندیس s مربوط به امتداد، d مربوط به شیب، و n مربوط به مولفه نرمال است. ضرایب A توابع گرین برای نیم‌فضای الاستیک است که در مدل اُکادا معرفی شده‌اند. اصطلاح المان که در این برنامه تعریف شده نشانگر یک صفحه جداشدگی است؛ هر المان به قسمت‌های کوچک‌تری تقسیم می‌شود که زیرالمان نام دارند [۱۶].

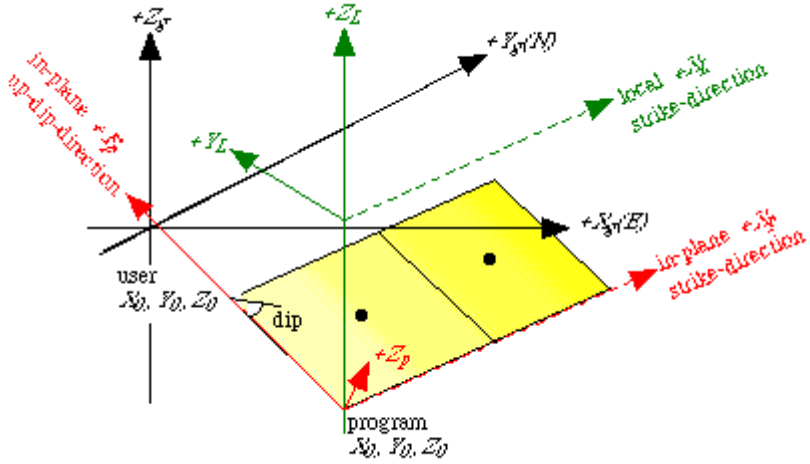
جهت روشن‌شدن تعریف دقیق نقطه شروع گسل (نقطه مرجع) که در جدول (۱) آورده شده، لازم است چگونگی تعریف گسل در نرم‌افزار 3D-def را بدانیم. همان‌طور که گفته شد، هر صفحه گسل، با یک المان مشخص شده و شیب و امتداد ثابت خود را دارد. نقطه مرجع، برای هر المان، موقعیت صفحه گسل‌ها را نسبت به هم در سیستم مختصات جهانی تعیین می‌کند [۱۷]. در شکل (۴)، نقطه مرجع نشان داده شده است.

[1] The Displacement Gradient Tensor
[2] Stress
[3] Strain
[4] Green's functions

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-07]
[DOI: 10.29252/jgit.5.3.13]



شکل ۳: الگوریتم المان مرزی سه‌بعدی [۱۵]



شکل ۴: نقطه مرجع برنامه و نقطه مرجع از دید ناظر [۱۸]

جهت مدل‌سازی توپوگرافی و متعاقب آن، مقایسه‌اش با مدلی ارتفاعی واقعی منطقه، از مشخصات گسل‌های مورد بحث، سه پارامتر را مجهول در نظر گرفته‌ایم، که بنا بر محدوده‌ی تغییرات این مشخصه‌ها در طول زمان و یا مطالعات پیشین انجام‌گرفته بر روی این گسل‌ها، دست به ایجاد حالت‌های ممکنه و چینش‌های احتمالی این مشخصه‌ها زده‌ایم.

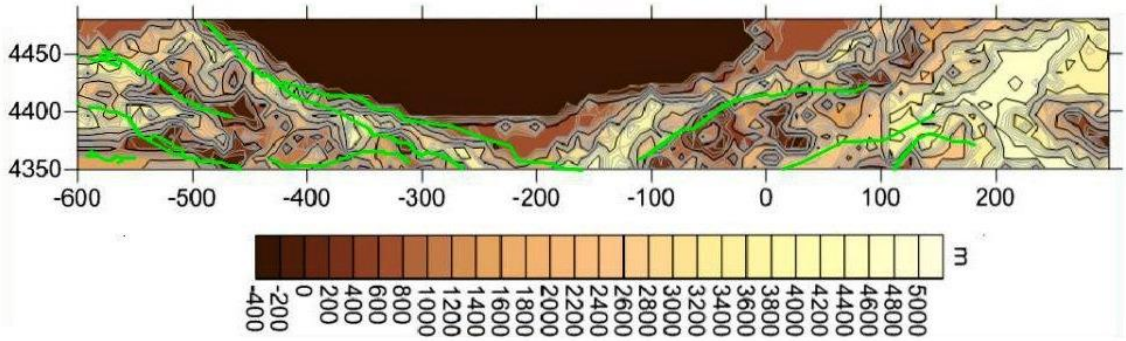
۴- نتایج عددی

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

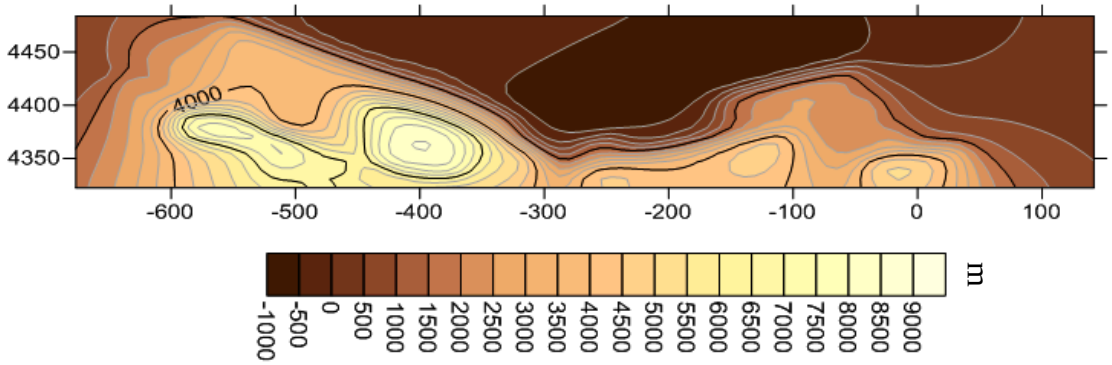
[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-07]
[DOI: 10.29252/jgit.5.3.13]

متفاوت وجود دارد. از آنجا که نوع لغزش سه گسل البرز شمالی، خزر و کندوان، شیب‌لغز است؛ 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+ میلی‌متر در سال در نظر گرفت.

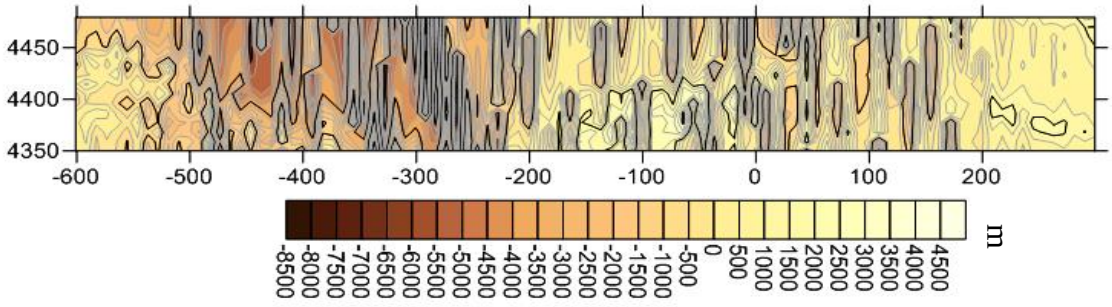
ابتدا با تغییر پارامترهای زمان و نرخ لغزش قائم در مورد هر سه گسل، دست به ایجاد مدل‌های توپوگرافی احتمالی زدیم و با مقایسه هریک با مدل ارتفاعی واقعی منطقه، همانطور که در شکل‌های (۶، ۷، ۸، ۹، ۱۰، ۱۱، ۱۲، ۱۳، ۱۴، ۱۵، ۱۶، ۱۷، ۱۸، ۱۹، ۲۰، ۲۱، ۲۲ و ۲۳) مشهود است، این نتیجه حاصل شد که انتخاب چه مقادیری برای مشخصات تکتونیکی گسل‌ها مناسب‌تر است. شکل (۵)، مدل ارتفاعی واقعی منطقه است؛ که اختلاف هریک از مدل‌ها با این مدل ارتفاعی، محاسبه شده و نمودار آن در زیر هر یک از مدل‌های توپوگرافی حاصل از نمونه مشخصات تکتونیکی متفاوت آمده است.



شکل ۵: مدل واقعی ارتفاعی منطقه مورد مطالعه



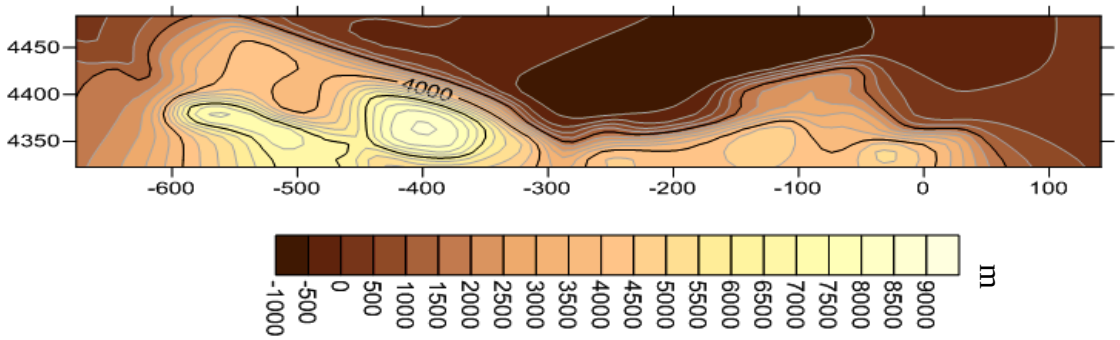
شکل ۶: مدل توپوگرافی حاصل از نمونه مشخصات تکتونیکی (۱)



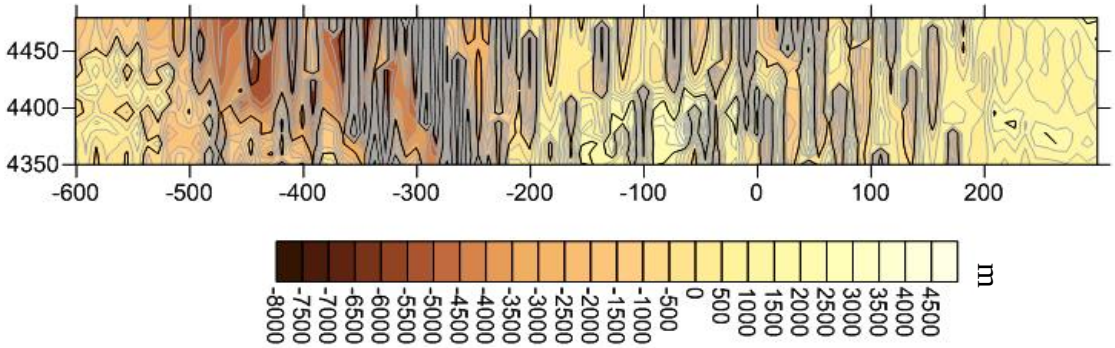
شکل ۷: اختلاف ارتفاعی بین مدل توپوگرافی (۱) و مدل ارتفاعی واقعی

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-07]

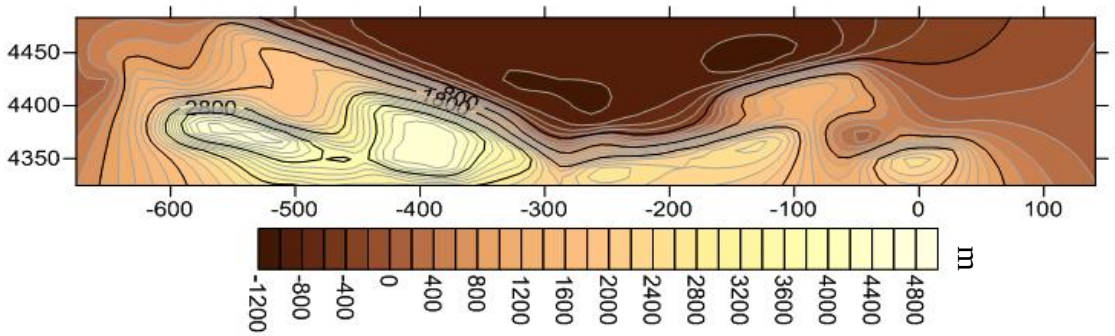
[DOI: 10.29252/jgit.5.3.13]



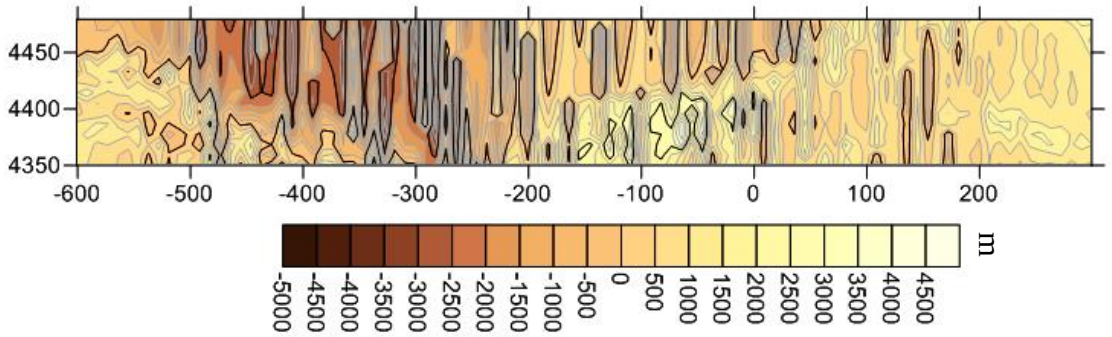
شکل ۸: مدل توپوگرافی حاصل از نمونه مشخصات تکتونیکی (۲)



شکل ۹: اختلاف ارتفاعی بین مدل توپوگرافی (۲) و مدل ارتفاعی واقعی



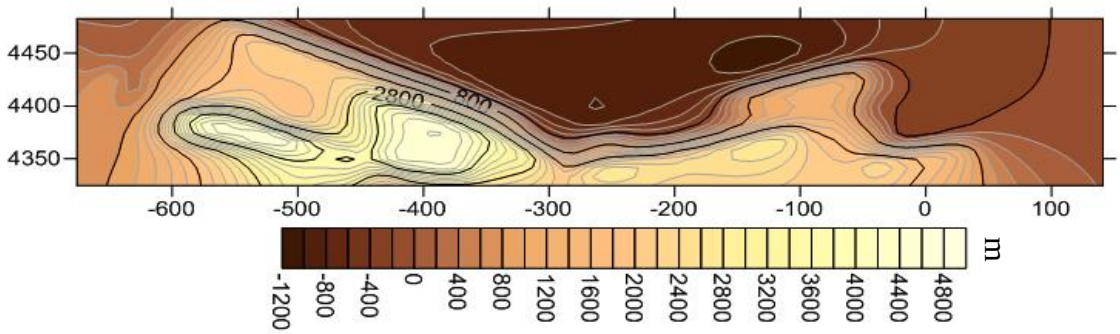
شکل ۱۰: مدل توپوگرافی حاصل از نمونه مشخصات تکتونیکی (۳)



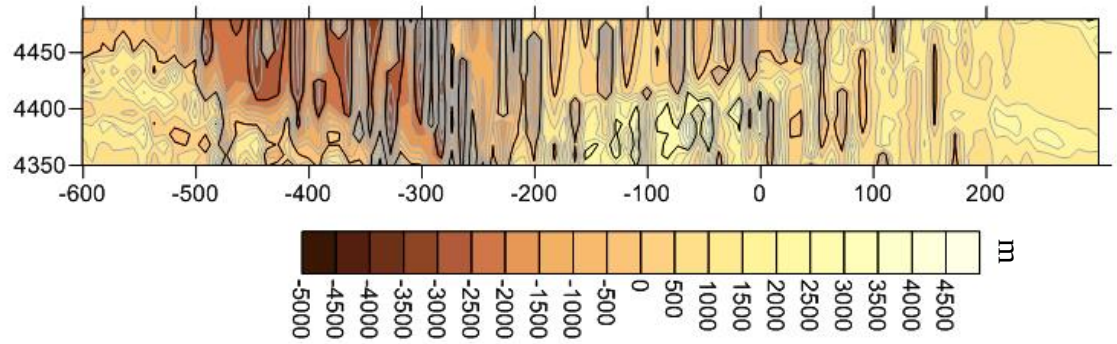
شکل ۱۱: اختلاف ارتفاعی بین مدل توپوگرافی (۳) و مدل ارتفاعی واقعی

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-07]

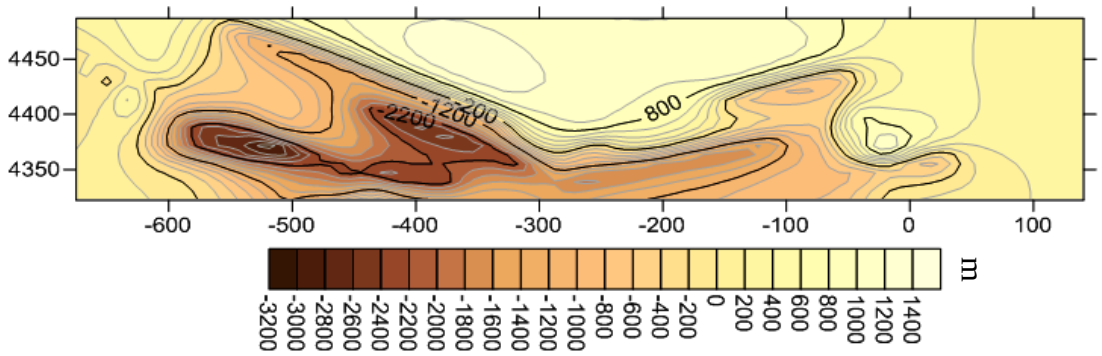
[DOI: 10.29252/jgit.5.3.13]



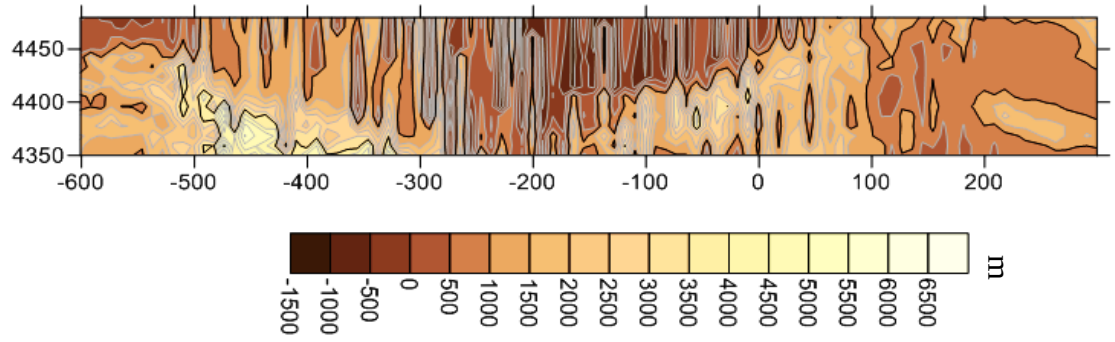
شکل ۱۲: مدل توپوگرافی حاصل از نمونه مشخصات تکتونیکی (۴)



شکل ۱۳: اختلاف ارتفاعی بین مدل توپوگرافی (۴) و مدل ارتفاعی واقعی



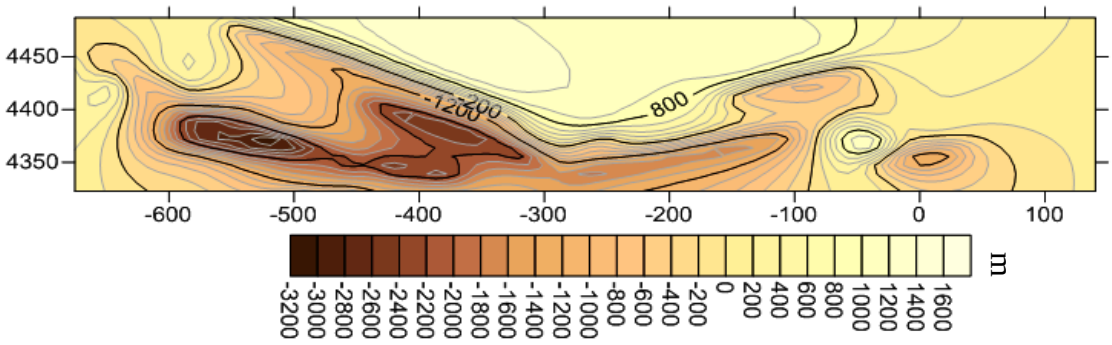
شکل ۱۴: مدل توپوگرافی حاصل از نمونه مشخصات تکتونیکی (۵)



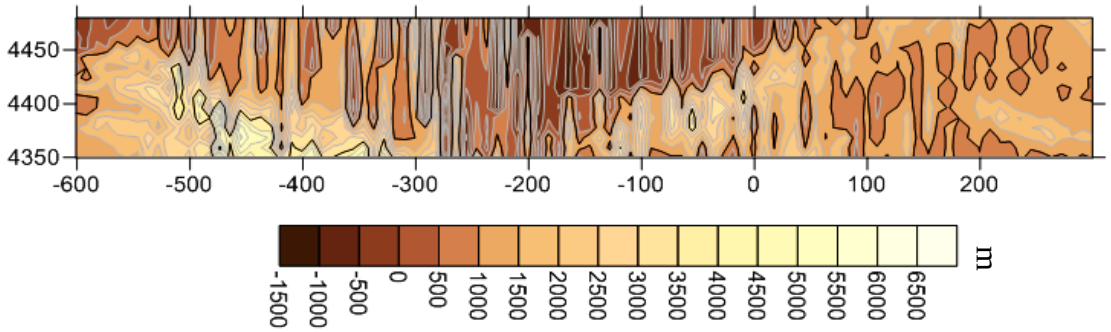
شکل ۱۵: اختلاف ارتفاعی بین مدل توپوگرافی (۵) و مدل ارتفاعی واقعی

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-07]

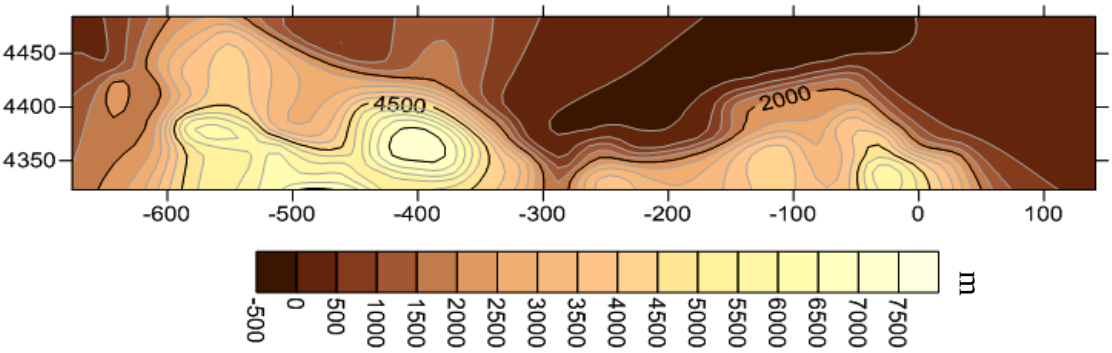
[DOI: 10.29252/jgit.5.3.13]



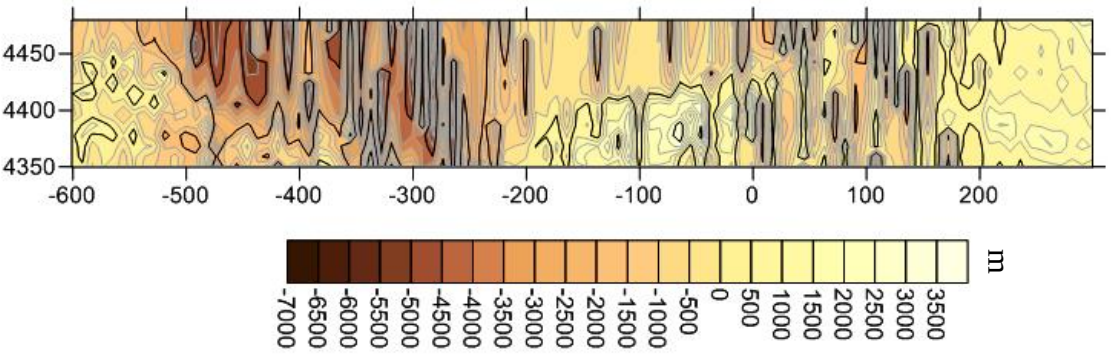
شکل ۱۶: مدل توپوگرافی حاصل از نمونه مشخصات تکتونیکی (۶)



شکل ۱۷: اختلاف ارتفاعی بین مدل توپوگرافی (۶) و مدل ارتفاعی واقعی



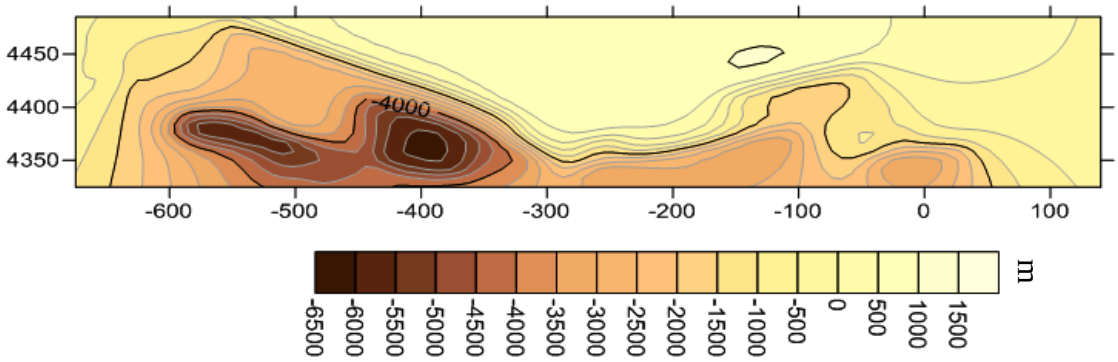
شکل ۱۸: مدل توپوگرافی حاصل از نمونه مشخصات تکتونیکی (۷)



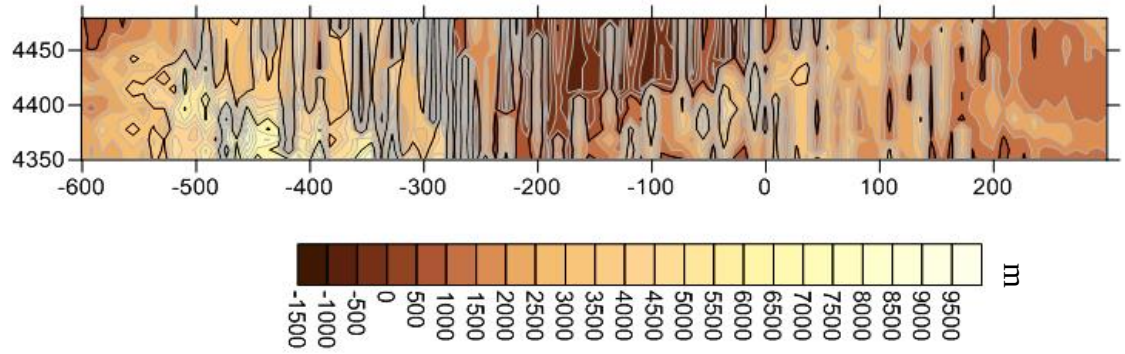
شکل ۱۹: اختلاف ارتفاعی بین مدل توپوگرافی (۷) و مدل ارتفاعی واقعی

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-07]

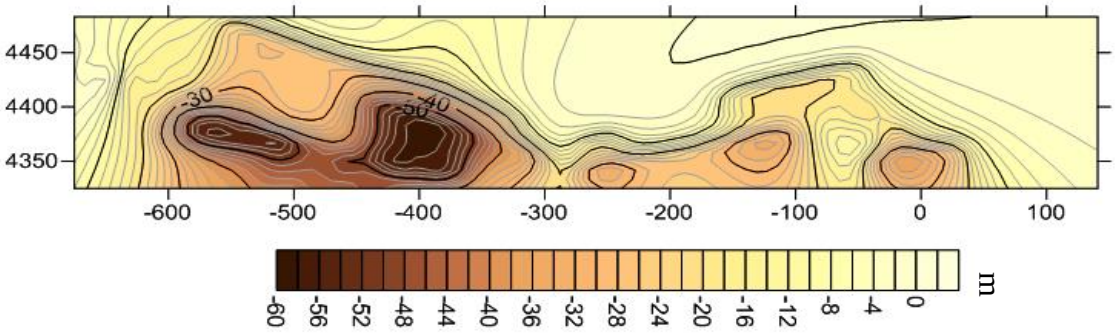
[DOI: 10.29252/jgit.5.3.13]



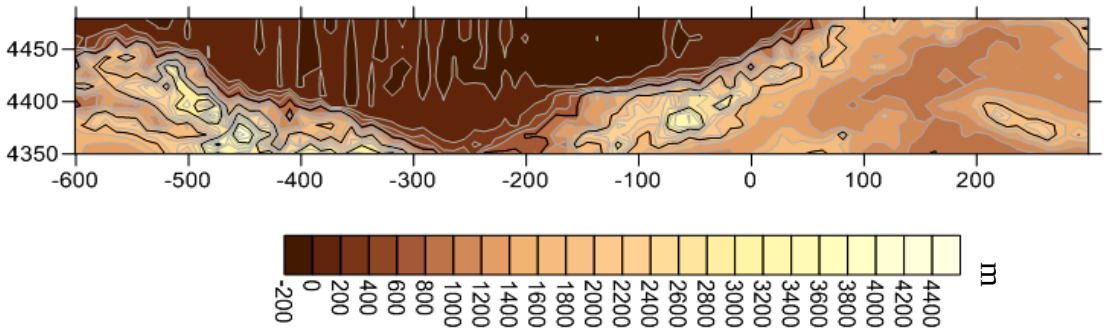
شکل ۲۰: مدل توپوگرافی حاصل از نمونه مشخصات تکتونیکی (۸)



شکل ۲۱: اختلاف ارتفاعی بین مدل توپوگرافی (۸) و مدل ارتفاعی واقعی



شکل ۲۲: مدل توپوگرافی حاصل از نمونه مشخصات تکتونیکی (۹)



شکل ۲۳: اختلاف ارتفاعی بین مدل توپوگرافی (۹) و مدل ارتفاعی واقعی

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-07]

[DOI: 10.29252/jgit.5.3.13]

جدول ۲: بررسی آماری مدل‌سازی‌ها

مدل‌سازی	انحراف جذر میانگین مربعات
شماره (۱)	۲۸/۱۹
شماره (۲)	۲۴/۱۲
شماره (۳)	۱۷/۹۲
شماره (۴)	۱۳/۴۸
شماره (۵)	۱۰/۸۱
شماره (۶)	۱۱/۵۹
شماره (۷)	۱۴/۱۸
شماره (۸)	۱۲/۱۸
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 میلی‌متر در سال، در نظر گرفته شد. در این نه مدل‌سازی همان‌طور که گفته شد، مشخصه نرخ لغزش افقی ثابت و برابر با ۲/۵ میلی‌متر در سال فرض شد؛ این عددهی بر طبق مطالعات زمین‌شناسی پیشین و جدول مشخصات تکتونیکی گسل‌های ایران، جمع‌آوری شده توسط دکتر حسامی آذر [۱۲]، صورت گرفته است. داده‌های تکتونیکی مربوط به مدل توپوگرافی (۹) در جدول (۳) آمده است.

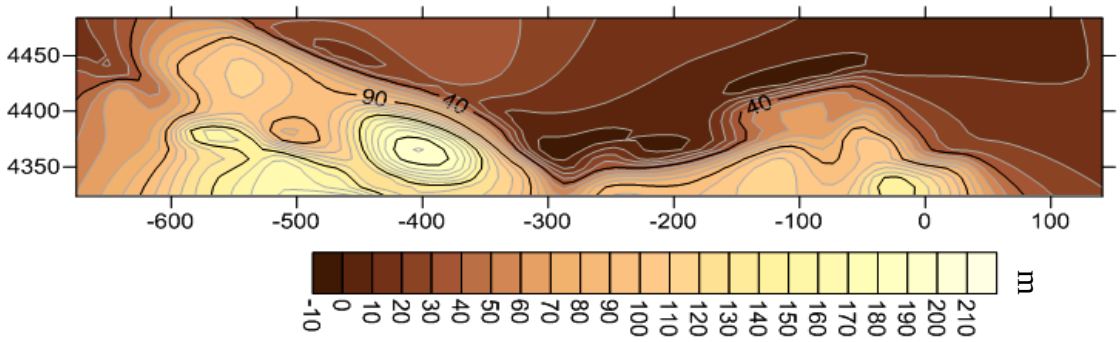
جدول ۳: ساختار گسلی فرض‌شده در مدل‌سازی (۹)

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

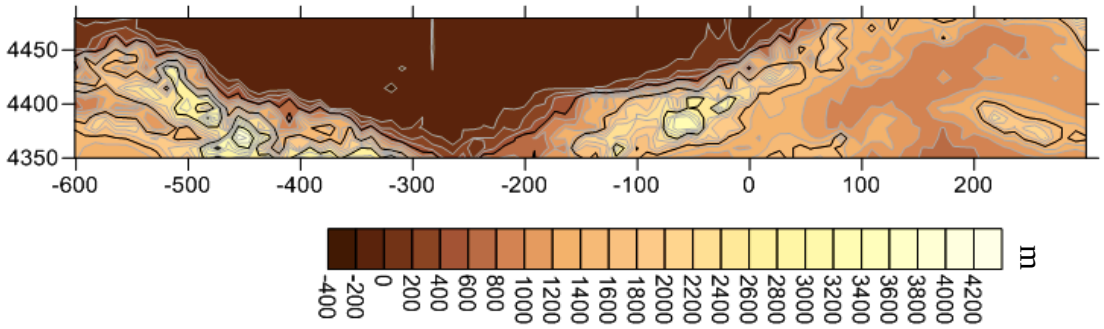
سپس با ثابت فرض نمودن مقادیر به‌دست آمده مذکور، سعی بر آن شد که با تغییر مشخصه نرخ لغزش افقی، دو مدل توپوگرافی دیگر ایجاد؛ و با محاسبه اختلاف بین مدل توپوگرافی حاصل، با مدل ارتفاعی واقعی، بررسی کنیم که آیا مدل‌سازی گمبرگ، مطالعات زمین‌شناسی مرتبط را تأیید می‌نماید یا خیر. تا از این طریق به چگونگی کنترل ساختاری چنین مدل‌سازی‌هایی پی برده و ضرورت بررسی ارتباط بین تکتونیک و توپوگرافی را خاطرنشان سازیم. نتایج این بررسی در شکل‌های (۲۴، ۲۵، ۲۶ و ۲۷) آورده شده است. 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 ۲/۵+ 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 ارتفاعی واقعی منطقه دارد، و مدل‌سازی بر اساس رابطه بین تکتونیک و توپوگرافی، تأییدی بر این ادعا را نشان می‌دهد.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-07]

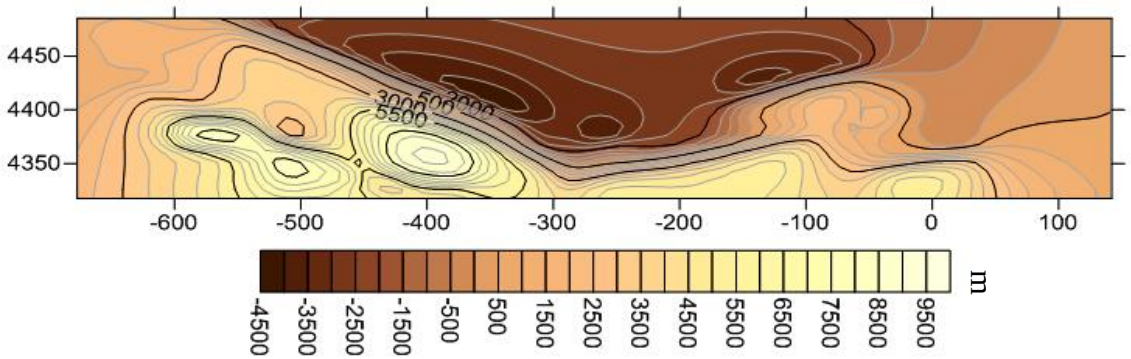
[DOI: 10.29252/jgit.5.3.13]



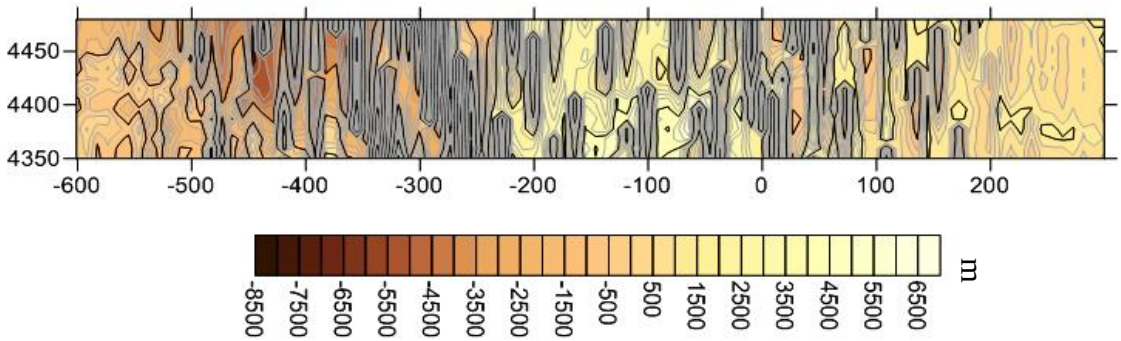
شکل ۲۴: مدل توپوگرافی حاصل از نمونه مشخصات تکتونیکی (۱۰)



شکل ۲۵: اختلاف ارتفاعی بین مدل توپوگرافی (۱۰) و مدل ارتفاعی واقعی



شکل ۲۶: مدل توپوگرافی حاصل از نمونه مشخصات تکتونیکی (۱۱)



شکل ۲۷: اختلاف ارتفاعی بین مدل توپوگرافی (۱۱) و مدل ارتفاعی واقعی

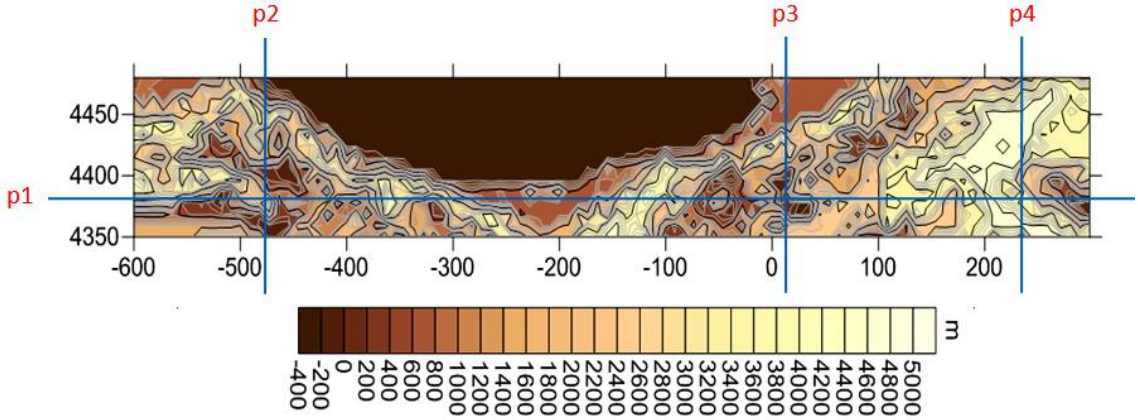
[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-07]

[DOI: 10.29252/jgit.5.3.13]

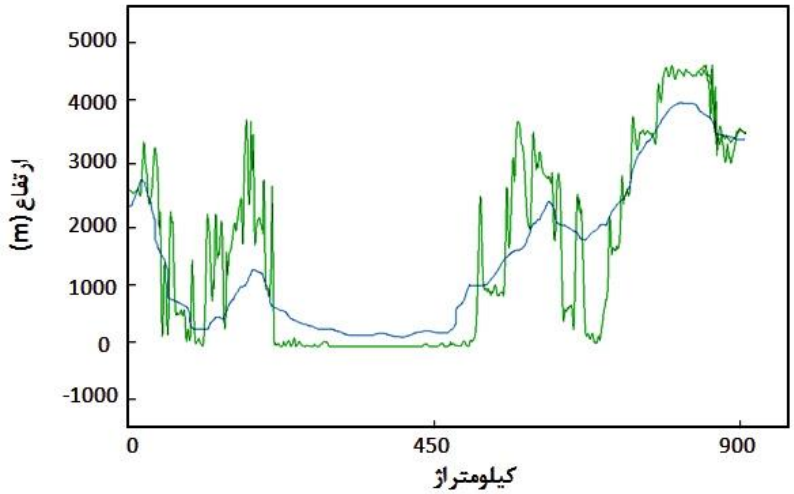
جدول ۴: بررسی آماری و تأیید مدل‌سازی

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

در شکل‌های (۲۹، ۳۰ و ۳۱)، به‌ترتیب پروفیل طولی در موقعیت p1 و پروفیل‌های عرضی در دو موقعیت p2 وp3، بر روی مدل ارتفاعی واقعی و مدل ارتفاعی محاسبه‌شده از نمونه مشخصات تکتونیکی (۹) رسم شده است. این موقعیت‌ها جهت ترسیم پروفیل‌های طولی و عرضی،در شکل (۲۸) در مدل ارتفاعی واقعی مشخص شده‌اند.



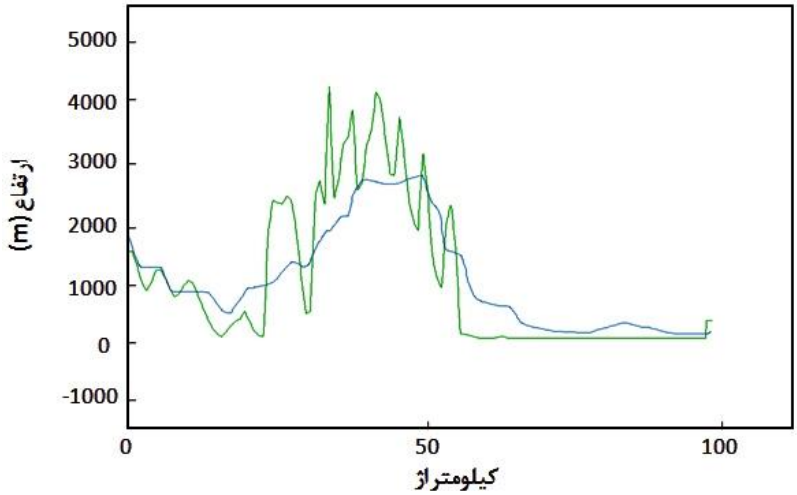
شکل ۲۸: موقعیت پروفیل طولی و پروفیل‌های عرضی در مدل ارتفاعی واقعی



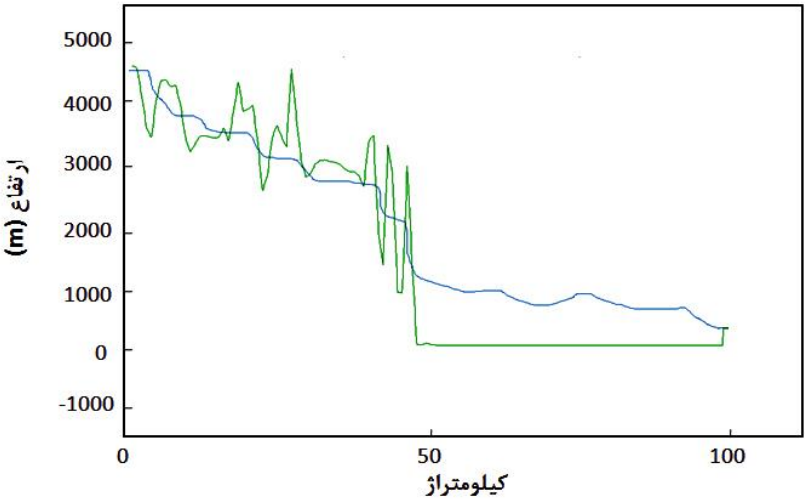
شکل ۲۹: پروفیل p1، مدل ارتفاعی واقعی (رنگ سبز)، مدل ارتفاعی محاسبه شده (رنگ آبی)

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-07]

[DOI: 10.29252/jgit.5.3.13]



شکل ۳۰: پروفیل p2: مدل ارتفاعی واقعی (رنگ سبز)، مدل ارتفاعی محاسبه شده شماره ۹ (رنگ آبی)



شکل ۳۱: پروفیل p3: مدل ارتفاعی واقعی (رنگ سبز)، مدل ارتفاعی محاسبه شده شماره ۹ (رنگ آبی)

لازم به ذکر است که با توجه به متغیر فرض نمودن 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 نمی‌وان داشت. زیرا با حذف گسل‌های اطراف، کنش و واکنش‌های ناشی از حرکت آن‌ها و تأثیری که در شکل نهایی توپوگرافی خواهند داشت، نادیده گرفته شده است.

۵- نتیجه‌گیری

مدل‌سازی توپوگرافی بر اساس داده‌های تکتونیکی، که در واقع ارتباط بین توپوگرافی (به مثابه روبنا) و حرکت گسل‌های منطقه (به مثابه زیربنا) را نشان می‌دهد، می‌تواند بالعکس، بنا بر مقایسه بین توپوگرافی مدل‌سازی‌شده بر اساس حرکت تکتونیک‌ها، و مدل ارتفاعی واقعی منطقه، و مطالعه و مقایسه کمّی نمای زمین از این طریق، معیاری جهت شناسایی مشخصات تکتونیکی گسل‌ها و تغییرات در آن‌ها باشد؛ به‌طوری که می‌توان از توپوگرافی پوسته زمین، به تغییرات نرخ حرکت گسل‌ها و دیگر ویژگی‌هایشان پی‌برد و ساختار تکتونیکی گسل‌ها را کنترل نمود.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-07]
[DOI: 10.29252/jgit.5.3.13]

مراجع

[1] M. Morisawa, and J. T. Hack, Tectonic geomorphology, The binghamton symposia in geomorphology, int. series 15, sept. 1984. allen & unwin, Boston, 1985.

[2] J.S. Gomberg, and M.A. Ellis, "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, 1994.

[3] J. S. Gomberg, "Tectonic deformation in the New Madrid seismic zone: inferences from map-view and cross-sectional boundary element models", J. Geophys. Res. 98, 6639-6664, 1993.

[4] http://s5.picofile.com/file/8119385368/iran_faults_map.jpg

[5] M. Berberian, "The southern Caspian: a coppressional depression floored by trapped Modified occanic crust", Canadian Journal of Earth Science 20. 163-183, 1983.

[6] V. V. Fedynsky, K. E. Fomenko, J. A. Garkalenkov, V. P. Goncharov, B. A. Khrychev, YA. P. Malovitsky, A. P. Milashin, Ju. P. Neprochnov, and S. A. Ushakov, "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, 1972.

[7] J. Hollingsworth, J. Jackson, R. Walker, and N. Nazari, "Extrusion tectonics and subduction in the eastern South Caspian region since 10 Ma", Geology, 36; no. 10; p. 763-766, 2008.

[8] A. Zanchi, F. Berra, M. Mattei, M.R. Ghassemi, and J. Sabouri, "Inversion tectonics in central Alborz, Iran. Journal of Structural Geology", 28, 2023-2037, 2006.

[9] M. Gluse, "Die geologie des gebietes nordlieh des Kandovan passes (zentral Elborz)", Mitt.Geol., Inst. E.T.H.V.48.165pp. Zurich, 1965.

[10] R. Asserto, "Geological map of upper Djajrud and Lar valleys (Central Alborz, Iran)", Milano, Inst. Geol. Univ. Milano: Publ. N.232, 86p, 1966.

[11] M. B. Allen, M. R. Ghassemi, M. Shahrabi, and M. Qorashi, "Acommodation of late Cenozoic oblique shortening in the Alborz range", northern Iran. Journal of Structural Geology 25: 659-679, 2003.

[12] K. Hessami Azar, P. Mobayen, and H. Tabasi, "Revised Version of Active Faults of Iran", International Institue of earthquake Engineering and Seismology, 2013 (Persian).

[13] https://ars.els-cdn.com/content/image/1-s2.0-S037702730000233X-gr3.gif

[14] Y. Okada, "Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space", Bull: Seismol. Soc. Am., p. 1018-1040, 1992.

[15] http://www.unavco.org/software/modeling/3d-def/images/introbig.gif

[16] A. Holmes, Principles of physical geology, (second edition), London: Nelson, 1965

[17] J.S. Gomberg, and M.A. Ellis, 3D-DEF: A user's manual, U.S. Geol. Surv. Open File Rep, p. 93-547, 1993.

[18] http://www.unavco.org/software/modeling/3d-def/images/manual1.gif

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-07]

[DOI: 10.29252/jgit.5.3.13]

K. N. TOOSI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
FACULTY OF GEODESY AND GEOMATICS ENGINEERING

Journal of Geospatial Information Technology
Vol.5, No.3, Autumn 2017

An investigation of the link between faulting and topography in seismic regions

Chista Panahi Vaghar *[1], Behzad Voosoghi [2], Saeid Haji Aghajany [3]

1- MSc of Geodesy, Faculty of Geodesy & Geomatics Engineering, K. N. Toosi University of Technology (KNTU)
2- Associate Professor, Faculty of Geodesy and Geomatics Engineering, K.N. Toosi University of Technology (KNTU)
3- PHD Student, Faculty of Geodesy & Geomatics Engineering, K. N. Toosi University of Technology (KNTU)

Abstract

Topography is usually resulted from the deformation patterns of the plate tectonics and faults. If we can create a model for these interactions of topography and tectonics, after the complete recognition of the properties of the tectonics based on the slip rates of the study area, the model will reconstruct the topography of the región as well. In this paper, in order to model these interactions, three faults on the study area are considered. Then, the method of Boundary Element based on the Okada Model is used to simulate the topography of the area from these three fault. Since Iran is subjected to the high possibility of the earthquake, it is important to investigate this matter and with the generalization of this idea, the topography of this region can be reconstructed in more dimensions, based on the set of the observed variations on the ground perspective and its comparison with the real height model from the satellite topographic models studies, a structural control on the faults of the region can be gained. In this investigation, the modeling of the relationship between tectonics and the topography, results a criteria for understanding and predicting some parameters of the faults that have created that topography. Therefore, by changing the faults parameters, the height estimations can be obtained and by considering the various values for the variable parameters, the identical topographies can be produced and they are finally compared with the real height model and the topographic coordination of these three faults. The studies of this modeling show that these faults have been active from the Quaternary era and were moving with the vertical slip rate of 2 mm per year. By comparing the earth topography quantities of these models, the presence of the horizontal slip in the slope directions of faults with the slip rate of 2.5 mm per year is confirmed. This value was already determined by the geology or satellite topographic models studies.

Key words: Plate tectonics, Topography, Deformation.

Correspondence Address Faculty of Geodesy & Geomatics Engineering, K. N. Toosi University of Technology (KNTU), Valiasr Street, Mirdamad Conjunction, Tehran, Iran.
Tel : +98 21 88877071
Email : tchistapanahi@gmail.com

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-07]

[DOI: 10.29252/jgit.5.3.13]