

## تعیین فعالیت گسل پیرانشهر به عنوان شمال غربی ترین قطعه راندگی جوان زاگرس با کاربرد مدل DTM و نرم افزار GIS

### چکیده

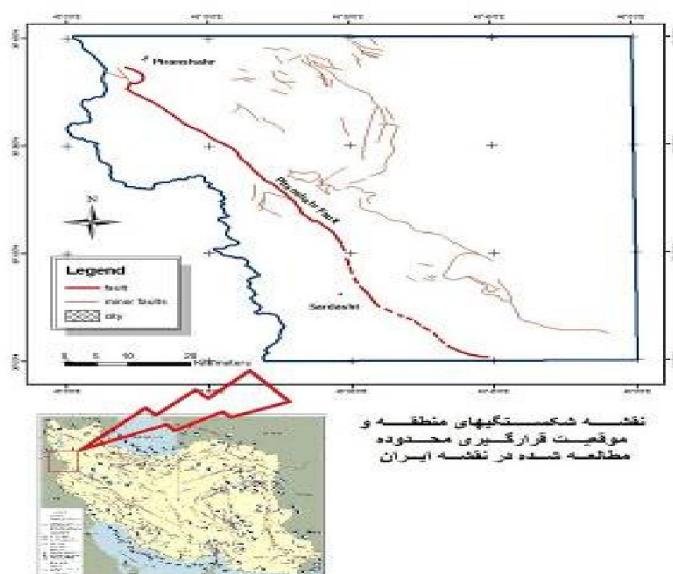
تکتونیک، نقش بسیار مهمی در تکامل مورفولوژیک هر منطقه ایفا می‌کند و به خوبی، به وسیله شاخص‌های مورفومتری، رودخانه‌ای و ساختمانی منعکس می‌شود. تحلیل تکتونیک فعال با استفاده از شاخص‌های مورفومتری، به مقاومت سنگ‌ها و گسل‌های موجود در منطقه بستگی دارد. از طرفی، نتایج حاصل از بررسی‌های مورفو-تکتونیکی برای ارزیابی و پیش‌بینی خطر زمین‌لرزه در یک منطقه، روشنی کارآمد است. به منظور تعیین میزان فعالیت گسل پیرانشهر به عنوان شمال‌غربی‌ترین قطعه راندگی جوان زاگرس، واقع در جنوب غربی استان آذربایجان‌غربی، شاخص‌های مورفو-تکتونیکی، شامل: نسبت عرض دره به ارتفاع دره ( $V_e$ )، نسبت پهنه‌ای کف دره به عمق دره ( $V_f$ ) و کاهش سینوسیتی پیشانی کوهستان ( $S_{mf}$ ) به کار گرفته شده‌اند. نتیجه اندازه‌گیری‌ها نشان دهنده نرخ سریع بالاً‌مدگی دره‌ها و مسطح‌شده‌گی فعال در پیشانی کوهستان است. همچنین، ارقام حاصل از به کار گیری شاخص‌های مختلف نیز نشان‌دهنده فعال بودن تکتونیک در محدوده گسل پیرانشهر است. نتایج بررسی‌های لرزه زمین‌ساختی نیز نشان می‌دهند گسل پیرانشهر با طول تقریبی ۹۵ کیلومتر، توان ایجاد زلزله‌ای با حداقل بزرگی ۶/۹ درجه در مقیاس ریشتر را دارد.

**واژه‌های کلیدی:** مورفو-تکتونیک، نوزمین‌ساخت، تکتونیک فعال، شاخص‌های مورفومتری.

### مقدمه

زلزله به جوامع انسانی؛ به ویژه از لحاظ اقتصادی، صدمه فراوانی می‌زند. بلایای طبیعی و مقابله با آن، به شناخت تکتونیک فعال، شامل: مطالعه الگوی دگر‌شکلی‌ها، تکامل چشم اندازها و تعیین نرخ فرایندهای تکتونیکی در طول میلیونها سال بستگی دارد. تکتونیک ژئومورفولوژی در کمریندهای کوهزایی، یکی از ایزارهای اصلی در معرفی گسل‌های فعال، شناخت مراحل تکامل ساختارهای زمین‌شناصی، برآورد خطر زلزله و مطالعه تکامل چشم‌اندازهای است (Keller & Pinter, 2002). در واقع، تکتونیک ژئومورفولوژی (مورفو-تکتونیک) به مطالعه لندهای ایجاد شده توسط فرایندهای تکتونیکی یا کاربرد اصول ژئومورفیکی در حل مسائل تکتونیکی می‌پردازد.

مطالعه تکتونیک فعال و نیز حرکات و تغییر‌شکل‌های نوزمین‌ساختی با استفاده از شاخص‌ها و علایم و شواهد مختلفی؛ از جمله: علایم و شواهد زمین‌شناصی، ژئومورفولوژی، زلزله‌شناسی، ژئودزی و ... تشخیص داده می‌شوند.



شکل ۱) محدوده مورد مطالعه در نقشه ایران

### علاجم و شواهد زمین‌شناسی

علاجم و شواهد زمین‌شناسی نشان‌دهنده فعالیت‌های نوزمین‌ساختی، شامل کوتاه شدگی و طویل شدگی، ضخیم شدگی و نازک شدگی، کمانش یا قوس برداشتن پوسته، چین خوردگی‌ها، گسل خوردگی‌ها، فعالیت‌های گندی‌شدن و آتش‌شسان می‌شود که در طول دوران چهارم صورت گرفته‌اند. علاجم و شواهد زمین‌شناسی حرکات جوان نسبت به علاجم و شواهد دیگر، دوره‌های زمانی به نسبت طولانی‌تری را نشان می‌دهند؛ لیکن به استثنای گسل خوردگی جوان گسل‌های عال، سایر علاجم و شواهد زمین‌شناسی اغلب، صدرصد قاطع و مورد اطمینان نیستند. به همین علت، در اغلب مطالعات نوزمین‌ساختی، گسل‌های فعال و گسل خوردگی جوان بیشتر از سایر علاجم و شواهد زمین‌شناسی مورد توجه قرار می‌گیرند؛ ضمن اینکه گسل‌های فعال جوان، معمولاً از نظر نرخ لغزش، میزان فعالیت و زلزله‌زاویی، به گسل‌های با فعالیت کم، متوسط و زیاد و بر اساس چگونگی تظاهر در روی زمین نیز به انواع گسل‌های کور، پنهان و دارای رخمنون تقسیم می‌شوند.

### علاجم و شواهد مورفو-تکتونیکی

این علاجم و شواهد، شامل: تغییرات غیرعادی در شکل سطحی کانال رودخانه‌ها، نیمرخ بستر کانال رودها و مقطع عرضی آنها، مخروط افکنه‌ها، تراس‌های رودخانه‌ای، شیب‌ها و تشکیل پرتگاه‌های گسلی، رانش زمین، جبهه‌های کوهستان گسلی و همچنین، تغییرات غیرعادی در خطوط ساحلی و تراس‌های دریایی است. این نوع علاجم و شواهد نیز دوره زمانی کم و بیش طولانی را نشان می‌دهند؛ ولی نسبت به علاجم و شواهد زمین‌شناسی، دارای قاطعیت و اطمینان بیشتری هستند.

رودخانه ها اولین اشکال محیطی هستند که نسبت به وقوع تغییرات در بستر جریان و یا بروز تغییرات در حواشی بستر جریان، عکس العمل نسبتاً سریعی نشان می‌دهند. با توجه به عکس العمل های ثابت شده رودخانه ها نسبت به وقوع تغییرات غیرعادی ناشی از تکتونیک، می‌توان با تحلیل آنها با استفاده از شاخص های مورفومتری، در رابطه با وقوع تغییرات مذکور اظهار نظر نمود. به عبارت دیگر، شاخص های مورفومتری از ابزار مناسب برای بررسی تأثیر تکتونیک بر رودخانه ها محسوب می‌شوند که می‌توان در بررسی اثرهای تکتونیک بر مسیر رودخانه ها، به نتایج حاصل از آنها استناد نمود.

### علایم و شواهد ژئودزی

این نوع علایم و شواهد نشان‌دهنده حرکات و تغییر شکل های جوان، بسیار دقیق بوده، اغلب بدون ابهام هستند. علایم و شواهد ژئودزی، در واقع نتایج اندازه گیری های بسیار دقیق توسط دستگاه های اندازه گیری ژئودزی هستند. وجود حرکات و تغییر شکل های جوان در هر منطقه و جزئیات و مشخصات آنها را می‌توان به راحتی از مقایسه نتایج اندازه گیری های انجام شده در مورد فاصله بین دو نقطه مشخص و یا اختلاف ارتفاع دو نقطه مشخص تشخیص داد.

### علایم و شواهد زلزله شناسی

علایم و شواهد زلزله شناسی، پس از شواهد ژئودزی، از جمله علایم دقیق بیانگر وجود فعالیت های نوزمین ساختی است. این علایم شامل داده های دستگاهی زلزله ها می‌شوند.

### روش پژوهش

به علت فراوانی سازه های مسکونی، نظامی و مرزی در منطقه پیرانشهر و با توجه به حضور برخی از علایم و شواهد نوزمین ساختی در منطقه جنوب آذربایجان غربی نیاز به بررسی جامعی از فعالیت های تکتونیکی و تعیین میزان فعالیت گسل اصلی موجود در این منطقه (گسل پیرانشهر) به عنوان بخشی از گسل فعال زاگرس احساس شد. نظر به اینکه این محدوده مرزی و دورافتاده قبل از این دقت و به صورت جزئی مطالعه نشده و فاقد بیشینه تحقیق است، نگارنده بر آن شد تا با استفاده از علایم و شواهد زمین شناسی، ژئومورفولوژی و زلزله شناسی میزان فعالیت تکتونیکی و در نتیجه لرزه خیزی منطقه را بررسی و تعیین کند. در این راستا، پس از انجام مطالعات کتابخانه ای، زمین شناسی و صحرایی و با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی (Dem) در محیط GIS، نقشه رقومی ارتفاعی منطقه تهیه شده است. سپس بر اساس این نقشه اندیس های مورفو تکتونیکی، شامل: شاخص نسبت پهنه ای عرض دره به ارتفاع دره ( $V_h$ )، شاخص نسبت ( $V_v$ )، شاخص به کمک ابزار Analyst 3D در محیط Arcmap استخراج و اندازه گیری شده اند. نتایج حاصل از اندازه گیری اندیس های مورفو تکتونیکی میزان فعالیت گسل اصلی منطقه و طول مؤثر گسل (نصف طول اندازه گیری شده گسل) بزرگی زلزله حاصل از فعالیت این گسل را نشان می دهد. شایان ذکر است کلیه کارهای پژوهشی در مورد لرزه خیزی این منطقه به صورت کلی و با عنوان بخشی از گسل اصلی جوان زاگرس انجام گرفته است.

### زمین شناسی منطقه

گسل پیرانشهر و محدوده مورد مطالعه که اندیس‌های مورفومتری در آن اندازه‌گیری شده‌اند، در تقسیم‌بندی‌های ساختمانی ایران، بخشی از زون زاگرس و زیر پهنه راندگی‌ها محسوب می‌شود (آقاباتی، ۱۳۸۳). گسل پیرانشهر در جنوب غربی استان آذربایجان غربی واقع شده است که نخستین بار توسط افتخارنژاد (۱۹۷۵) نامگذاری شد. این گسل دارای روند شمال‌غربی-جنوب‌شرقی است که مرمرهای ژوراسیک - کرتاسه را در جنوب باختری از آبرفت‌های کواترنر در شمال خاوری جدا می‌کند. چالنکو و براد (۱۹۷۴) این گسل را قطعه شمال‌غربی گسل اصلی جوان زاگرس دانسته‌اند. گسل اصلی و جوان زاگرس، یک گسل فعال و لرزه‌زا در ادامه شمال باختری گسل اصلی زاگرس است که توسط چالنکو و براد (۱۹۷۴) به این نام<sup>۱</sup> خوانده شده است. گسل اصلی جوان زاگرس مورد اختلاف نظر بین زمین شناسان است؛ ولی به نظر می‌رسد پیدایش آن مربوط به ۵ تا ۷ میلیون سال گذشته بوده و همراه با گسل آناتولی در ترکیه بخشی از حرکت راستگرد بین پلیت اوراسیا و عربستان را تأمین می‌کند (طلالیان و جکسون ۲۰۰۲). این گسل در غرب کشور، مرز بخش جنوب غربی ایران مرکزی و بخش شمال شرقی کمربند چین خورده زاگرس را تشکیل می‌دهد. گسل اصلی جوان زاگرس یک ساختار منفرد نیست؛ بلکه زون باریکی است که از ردیف قطعات گسلی منفرد و مجزا و به طور عمومی راستگرد تشکیل شده که طرح همپوشان<sup>۲</sup> دارند. قطعات گسلی تشکیل‌دهنده این گسل از جنوب شرقی به شمال غربی عبارتند از: گسل درود، نهادن، گارون، صحنه، مروارید و پیرانشهر.

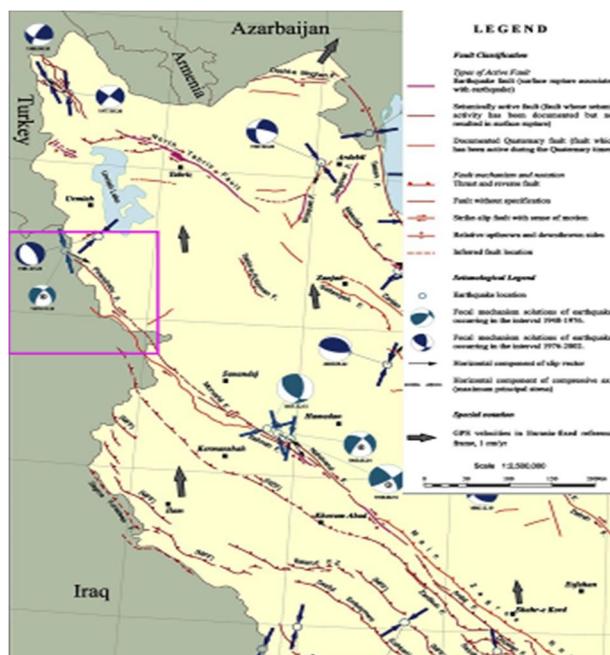
گسل جوان زاگرس دارای سه قطعه با روندهای قرارگیری متفاوت است: قطعات شمال غربی، میانی و جنوبی. با توجه به نحوه قرارگیری این قطعات نسبت به هم، انتظار داریم که در بخش‌های پایانی آن شاهد وجود مؤلفه نرمال باشیم. لذا با توجه به شواهد ژئومورفیکی و صحرایی می‌توان وجود مؤلفه نرمال را در گسل پیرانشهر که قطعه پایانی گسل جوان زاگرس است، تأیید کرد. طول گسل پیرانشهر حدود ۹۵ کیلومتر در نظر گرفته شده است. این گسل در امتداد دامنه غربی دره رودخانه زاب کوچک، یک مرز ساختاری ایجاد کرده است. رشته کوهی که یک قطعه مورفولوژیکی برخاسته است و بیش از ۲۵۰۰ متر ارتفاع دارد، بر اثر عملکرد این گسل شکل گرفته است. جابه‌جایی قائم در امتداد این گسل بیش از ۱۰۰۰ متر است. بر اساس بازدیدهای صحرایی، کارکرد گسل پیرانشهر کششی است و جابه‌جایی شواهد مورفولوژیکی، نظر آبراهه‌ها و عوارض توپوگرافی، نشان‌دهنده مؤلفه امتداد لغز راستگرد این گسل است. یک حوضه جدایش و کشش<sup>۳</sup> توسط علپور و همکاران (۲۰۱۲) در امتداد گسل پیرانشهر شناسایی شده (شکل ۳) که به واسطه تغییر جهت گیری تنش‌ها در امتداد این گسل کششی ایجاد شده است. طول این حوضه حدود ۱۵ کیلومتر از روی عکس ماهواره‌ای تخمین زده شده که با توجه به زمان تشکیل گسل اصلی جوان زاگرس (۵ تا ۱۰ میلیون سال قبل) نرخ جابه‌جایی حدود ۱/۵ تا ۳ میلی‌متر در سال را برای این گسل تخمین می‌زند. در همین تحقیق، تعدادی اشکال حاصل از زمین‌لغزش هم به فعالیت نرمال گسل پیرانشهر نسبت داده شده است. بررسی سازوکار کانونی برخی زلزله‌ها (سیلانخور، ۲۳ ژانویه ۱۹۰۹) در

1- Main recent fault

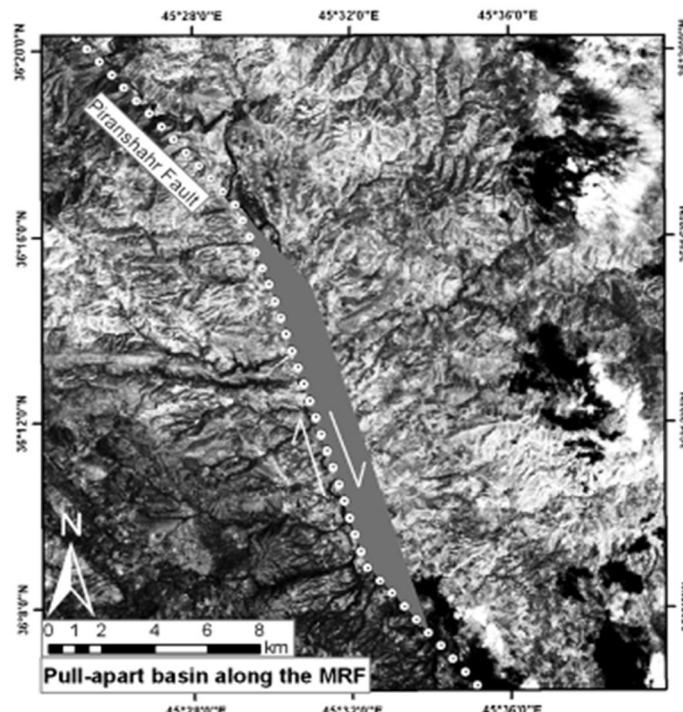
2- en echelon

3- pull apart

حوالی شمال غرب گسل اصلی جوان زاگرس حرکت امتداد لغز قطعات این بخش را همراه با مؤلفه نرمال نشان می‌دهد و همچنین، وجود بخش‌های تحت کشش در فاصله بین گسل‌های این قسمت را اثبات می‌کند.



شکل ۲) حل مکانیسم کانونی زلزله‌های رخداده در شمال غرب ایران؛ برگرفته از نقشه گسل‌های فعال ایران، مؤسسه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله



شکل ۳) حوضه جداش و کشش در امتداد گسل پیرانشهر (علیپور و همکاران، ۲۰۱۲)

- به باور بربریان (۱۹۷۶) زمین‌لرزه‌های زیر به نظر می‌رسد که در ارتباط با فعالیت مجدد گسل پیرانشهر باشند:
- زمین‌لرزه‌های ۲۲ جولای و ۱۷ آگوست ۱۹۶۴ میلادی با بزرگای حدود ۵,۵ که باعث تخریب بخش‌هایی از شهر پنجوین (شمال غربی مریوان، در عراق) و کشته شدن ۶ نفر گردید.
  - زمین‌لرزه ۲۵ اکتبر ۱۹۷۰ با بزرگای ۵ در نزدیکی پیرانشهر که به خسارت دیدن ۱۵۰ خانه و مجروح شدن ۲۰ نفر منجر گردید.
  - زمین‌لرزه ۲۸ نوامبر ۱۹۶۹ با بزرگای بین ۴ تا ۵ در جنوب پیرانشهر

### ژئو مورفولوژی

همان‌گونه که در مقدمه نیز عنوان شد، بررسی عوارض و شواهد مورفولوژیکی و شاخص‌های مورفو‌تکتونیکی رودخانه‌ها و پیشانی کوهستان‌ها از بهترین روش‌های ارزیابی زمین‌ساخت فعال هستند. از این‌رو، مهمترین هدف به کار گیری این روش در مورفو‌تکتونیک، بیرون آوردن اشکال ناهمواری‌های پوسته از حالت کیفی و توصیفی و عددی نمودن آنهاست (Zuchiewicz, 1998).

شبکه‌های زهکشی و چشم‌اندازهای رودخانه‌ای به صور گوناگون نسبت به وقوع تغییرات در بستر جریان عکس‌العمل نشان می‌دهند. تشکیل تراس‌های رودخانه‌ای، تغییر نیمرخ طولی و مقطع عرضی و همچنین، جابه‌جایی‌های جانبی در مسیر جریان رودخانه‌ها، از جمله این عکس‌العمل‌ها محسوب می‌شوند که با تشدید فرسایش نیز همراه می‌گردد. اطلاعاتی که از شاخص‌های مورفو‌تکتونیکی و نوزمین‌ساختی حاصل می‌شوند، بیانگر فعالیت‌های تکتونیکی جوان یا قدیم یک منطقه هستند. از این نظر، بررسی و مطالعه این شاخص‌ها در بررسی تکتونیک منطقه حائز اهمیت است. شاخص‌های مورفو‌تکتونیکی از فاکتورهای مهم برای ارزیابی فعالیت تکتونیکی منطقه هستند که تحت تأثیر ویژگی‌های فیزیکی و مکانیک سنگ نیز قرار دارند. در کل، در مناطق فعال از نظر تکتونیکی سیستم‌های زهکشی، اغلب توسط نوع، هندسه و فعالیت اخیر گسل‌های ناحیه‌ای و محلی تحت تأثیر قرار می‌گیرند.

### یافته‌های پژوهش

#### برآورد بیشینه بزرگی زلزله محتمل

فعالیت‌های لرزه زمین‌ساختی، خود یکی از بارزترین و پر اطلاعات‌ترین علایم و شواهد فعالیت‌های نوزمین‌ساختی در هر منطقه هستند. داده‌های زلزله، شامل داده‌های تاریخی و دستگاهی می‌شوند. شواهد تاریخی در رابطه با زلزله‌های رخداده، اغلب دارای ابهام بوده، دقت کمتری دارند. شکل (۴) نقشه لرزه‌خیزی شمال غربی ایران را نشان می‌دهد.

با توجه به نقشه سایزمو‌تکتونیکی شمال غرب ایران، کانون زلزله‌های رخداده در حوالی گسل پیرانشهر سطحی بوده (حدود ۰ تا ۳۳ کیلومتر)، با استفاده از فرمول محاسبه بزرگی زلزله ایجاد شده توسط گسل با توجه به طول آن که توسط مهاجر اشجعی و نوروزی (۱۹۷۸) معرفی شده (پور کرمانی و آرین، ۱۳۷۶)، بزرگی زلزله ایجاد شده توسط این گسل ۶/۹۷ در مقیاس ریشر است.

$$Ms=\log_{10} \frac{I}{I_0} + 5.4 = 6.97$$

در این فرمول، نصف طول گسل بر حسب متر نوشته می شود:

$$Ms=1.259+1.244\log L$$

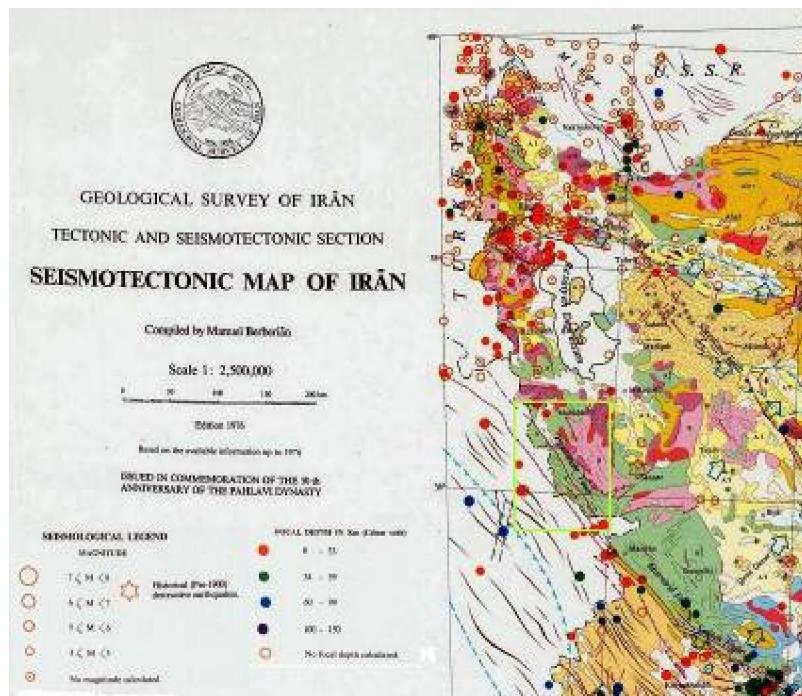
$$Ms=1.259+1.244\log 37500=\underline{6.94}$$

برای همین گسل، اگر بزرگای موج سطحی (Ms) ایجاد شده با فرمول امبرسیز و جکسون (۱۹۹۸) محاسبه شود، که برای زلزله های ایران و شرق مدیترانه (ترکیه) پیشنهاد شده (صفری و خدری ۱۳۹۰) عددی معادل  $6/9$  ریشتر به دست می آید، که در این فرمول نصف طول گسل بر حسب کیلومتر منظور می شود :

$$Ms=5.27+1.04\log L$$

$$Ms=5.27+1.04\log 37.5=\underline{6.90}$$

همان طور که ملاحظه می شود، در تمام روابط بالا بزرگی زلزله ایجاد شده توسط گسل پیرانشهر حداقل  $6/9$  محاسبه شده که به نظر می رسد باید نسبت به مقاوم سازی سازه های مسکونی، مرزی و نظامی فراوان در این منطقه اقدام شود. طبق نظر طالیان و جکسون (۲۰۰۲) گسل اصلی جوان زاگرس دارای قدرت لرزه زایی با بزرگی  $6$  تا  $7$  ریشتر است که با توجه به سرعت همگرایی  $17$  میلی متر در سال بین ایران و عربستان ممکن به نظر می رسد. بنابراین، گسل پیرانشهر هم به عنوان بخش انتهایی و شمالی گسل جوان زاگرس می تواند دارای چنین قدرت لرزه زایی باشد.



شکل ۴) نقشه سایزمو تکتونیکی شمال غرب ایران؛ محدوده گسل پیرانشهر داخل مستطیل مشخص شده، برگرفته از تارنمای سازمان زمین شناسی ایران

## تحلیل مورفولوژی و شاخص‌های مورفو-تکتونیکی فعال

معمولأً، چندین شاخص مورفو-تکتونیکی در تحلیل توپوگرافی و همچنین، نسبت فعالیت تکتونیکی یک منطقه استفاده می‌شوند. شاخص‌های منفرد بر اساس تحلیل شبکه آبراهه‌ای یا پیشانی کوهستان هستند. شاخص‌ها، یک روش کمی را برای تحلیل مورفولوژی وابسته به فرسایش و فرایندهای رسوب‌گذاری که کانال رودخانه‌ها، مقاطع طولی و ریخت‌شناسی دره‌ها و همچنین، فرم‌های مشتق شده تکتونیکی، مانند پرتگاه‌های گسلی را دربرمی‌گیرد، نشان می‌دهند. شاخص‌های تکتونیک فعال، ناهنجاری‌های سیستم آبرفتی یا طول پیشانی کوهستان را نمایان می‌سازد. این ناهنجاری‌ها ممکن است به وسیله تغییرات محلی فعالیت تکتونیکی در نتیجه بالآمدگی یا فرونشست ایجاد شده باشند. در اینجا شاخص‌های مختلف در منطقه مورد مطالعه اندازه‌گیری شده و سپس براساس میزان هر شاخص به رده‌های تکتونیکی غیرفعال، با فعالیت متوسط و فعال نسبت داده شده‌اند (Bull & Mc Fadden, 1977).

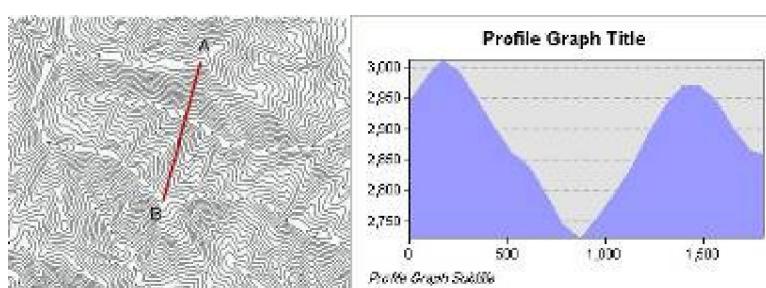
### شاخص نسبت عرض دره به ارتفاع دره (V)

این شاخص که به وسیله بول (2007) پیشنهاد شده است، در شناسایی وضعیت تکتونیکی منطقه؛ بویژه مناطقی که اخیراً بالآمده‌اند، کمک فراوانی می‌کند. این نسبت به صورت زیر محاسبه می‌شود:

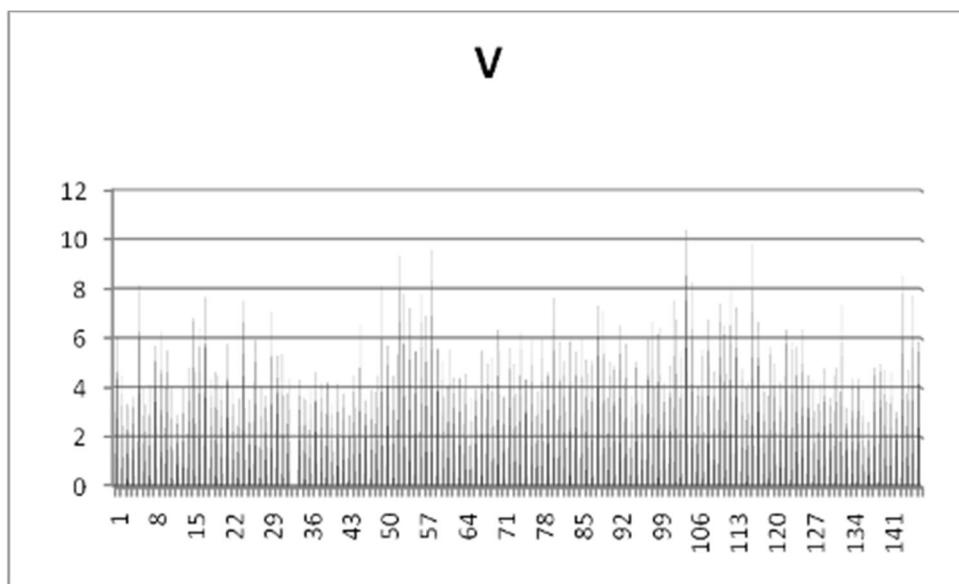
$$V = 2V_w / (E_{rd} - E_{sc}) + (E_{ld} - E_{sc})$$

در این فرمول  $V$ ، نسبت پهنه‌ای عرض دره به ارتفاع دره،  $V_w$  پهنه‌ای عرض دره،  $E_{ld}$  و  $E_{rd}$  به ترتیب ارتفاعات دیواره سمت راست و چپ دره و  $E_{sc}$  ارتفاع دره است. در شکل (۵) نمونه‌ای از دره‌های موجود در محدوده گسل پیرانشهر و نحوه رسم مقطع از آن نشان داده شده است.

در شکل (۶) مقادیر اندازه‌گیری شده شاخص نسبت عرض دره به ارتفاع دره برای ۱۴۵ دره موجود در محدوده مورد مطالعه نشان داده شده است. با مطالعه نمودار، مشخص می‌گردد که نرخ این شاخص از ۳ تا ۱۰ متغیر بوده و به طور میانگین حدود ۵/۵ در نظر گرفته شده است که نشان‌دهنده مناطق در حال بالا آمدن است. در مناطق غیرفعال از نظر بالآمدگی مقدار متوسط این شاخص معمولاً بالاتر از ۷ است (Bull, 2007).



شکل ۵) چگونگی برداشت یک دره به عنوان نمونه و تهیه مقطع توپوگرافی از آن برای اندازه‌گیری شاخص‌های مورفو-تکتونیکی

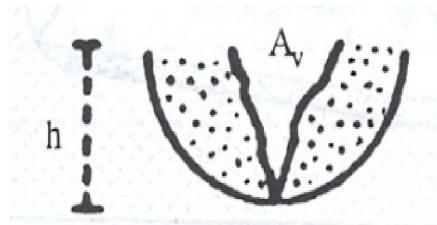


شکل ۶) شاخص  $V_c$  محاسبه شده برای ۱۴۵ دره در محدوده گسل پیرانشهر

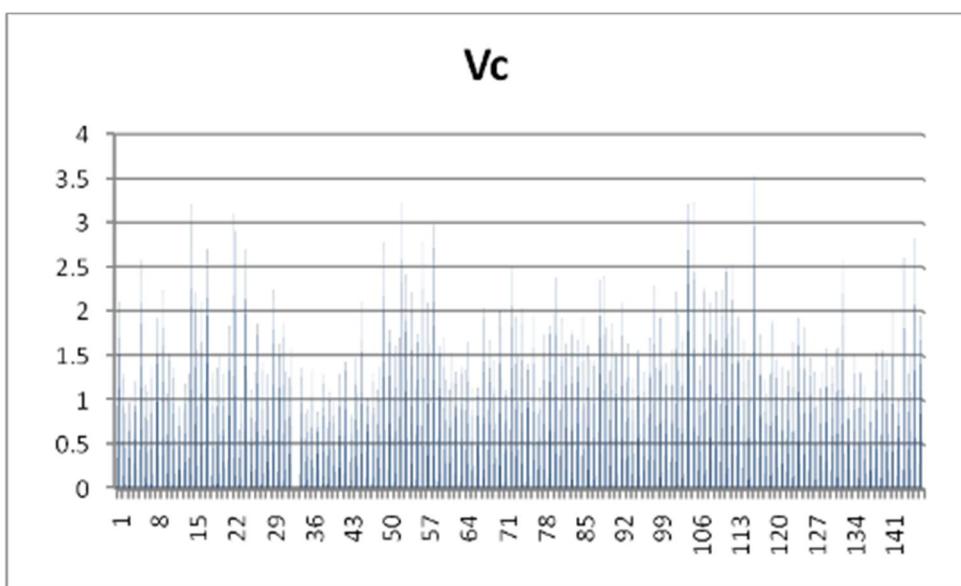
### شاخص نسبت $V_c$

از شاخصهای دیگر مربوط به شکل دره‌ها می‌توان به نسبت  $V_c$  اشاره نمود که دارای حساسیت متوسطی نسبت به بالا آمدگی تکتونیکی بوده (Mayer, 1986) و از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$V_c = A_v/A_c$$



در رابطه فوق،  $A_v$  مساحت دره در مقطع عرضی بر حسب متر مربع،  $A_c$  مساحت نیم دایره به شعاع  $h$  و کمیت  $h$  حداکثر ارتفاع دامنه کوتاه تر دره است. هرچه مقدار عددی  $V_c$  به عدد یک نزدیکتر باشد، شکل دره به صورت  $V$  ظاهر می‌گردد که بیانگر بالا آمدگی تکتونیکی در منطقه است. به طور کلی، دره عریض‌تر و با عمق کم، نشان‌دهنده غلبه فرسایش بر فرایندهای تکتونیکی یک منطقه است. البته، جنس مواد و سنگ‌ها نیز در این امر مؤثر است. هرچه دره عریض‌تر و عمق آن کمتر باشد، مقدار  $V_c$  بزرگ‌تر می‌شود و هرچه این شاخص به ۱ نزدیکتر باشد، شکل دره به  $V$  نزدیکتر و بالا آمدگی تکتونیکی بیشتر است. مقادیر عددی اندازه‌گیری شده برای این شاخص در منطقه مورد مطالعه به طور میانگین ۱/۵ است و فعالیت بالای تکتونیکی را نشان می‌دهد (شکل ۷).

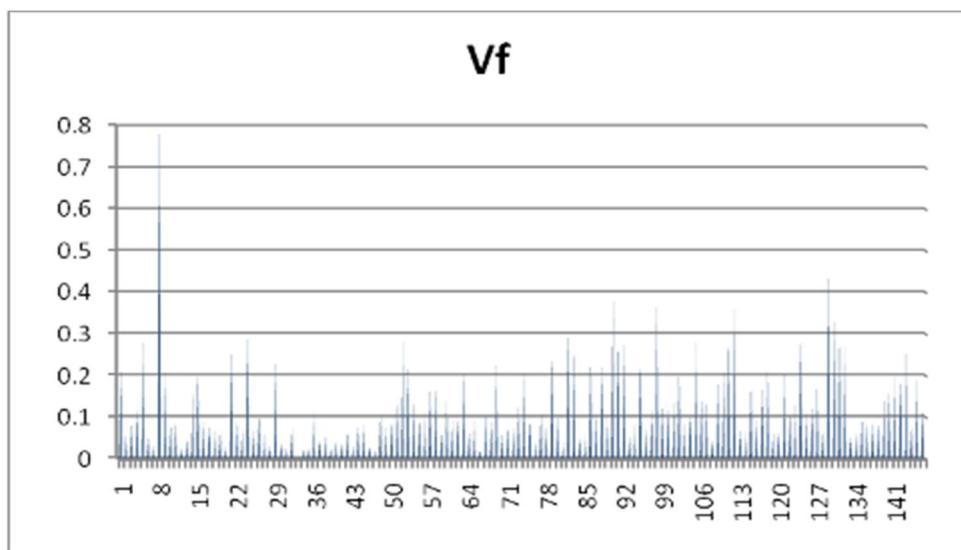
شکل ۷) شاخص  $V_c$  محاسبه شده برای ۱۴۵ دره در محدوده گسل پیرانشهر

### شاخص نسبت پهنه‌ای کف دره به عمق دره ( $V_f$ )

این شاخص که به وسیله Bull & Mc Fadden (1977) پیشنهاد شده است، در شناسایی سکون تکتونیکی منطقه و مناطقی که اخیراً بالا آمده اند، کمک می‌کند. این نسبت به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$V_f = 2V_{fw}/(Erd-Esc)+(Eld-Esc)$$

در این فرمول  $V_f$ ، نسبت پهنه‌ای کف دره به ارتفاع دره،  $V_{fw}$  پهنه‌ای کف دره،  $E_{ld}$  و  $E_{rd}$  به ترتیب ارتفاعات دیواره سمت راست و چپ دره و  $E_{sc}$  ارتفاع دره از سطح دریاهای آزاد است. مقادیر نسبتاً بالای  $V_f$ ، دره‌هایی با کف پهن شده و U شکل را که بر اثر فرسایش جانبی به وجود آمده‌اند و از ثبات زمین ساختی<sup>۴</sup> منطقه حکایت می‌کنند، نشان می‌دهند. دره‌هایی به شکل V نیز با مقادیر نسبتاً پایینی از  $V_f$  مشخص می‌شوند که مربوط به زیاد بودن نرخ بالا آمدگی و وجود دره‌هایی عمیق است (Keller & Pinter, 1996). هرچه میزان این شاخص کوچکتر باشد، نشان دهنده مناطق تکتونیکی فعال و در حال بالا آمدن همراه با ایجاد دره‌های باریک و عمیق است. مقادیر این شاخص برای منطقه مورد مطالعه در شکل (۸) نشان داده شده است. مقدار عددی ۰/۹۹ را مرز میان جبهه‌های کوهستانی فعال و غیرفعال از نظر تکتونیکی عنوان نموده‌اند. در مناطق کوهستانی بسیار فعال مقدار  $V_f$  بین ۰/۰۵ تا ۰/۰۵ متغیر است (Bull, 2007). همان‌طور که از نمودار شکل (۸) پیداست، مقدار این شاخص در محدوده مورد مطالعه حدود ۰/۱۴ است که گویای فعالیت بالای تکتونیکی است.



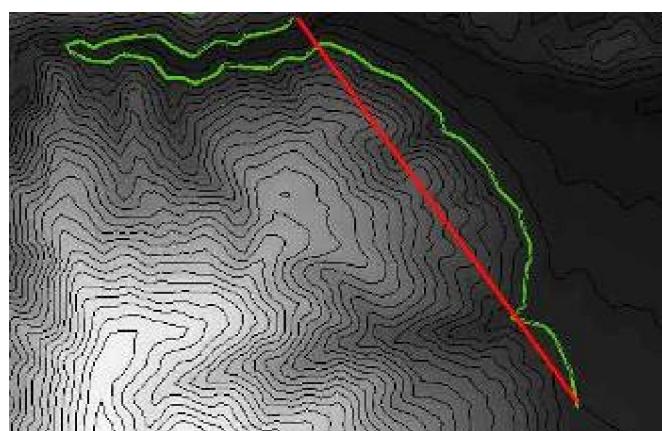
شکل ۸) شاخص  $V_f$  محاسبه شده برای ۱۴۵ دره در محدوده گسل پیرانشهر

#### شاخص پیچ و خم پیشانی کوهستان ( $S_{mf}$ )

این شاخص یک ابزار شناسایی در تشخیص نواحی فعال تکتونیکی است که توسط بول و مک فادن (۱۹۷۷) پیشنهاد شده است و میزان فعالیت تکتونیکی و تغییرات فرسایشی ساختمان‌های تکتونیکی را نشان می‌دهد. شاخص سینوستیه پیشانی کوهستان به شکل زیر تعریف شده است:

$$S_{mf} = L_{mf}/L_s$$

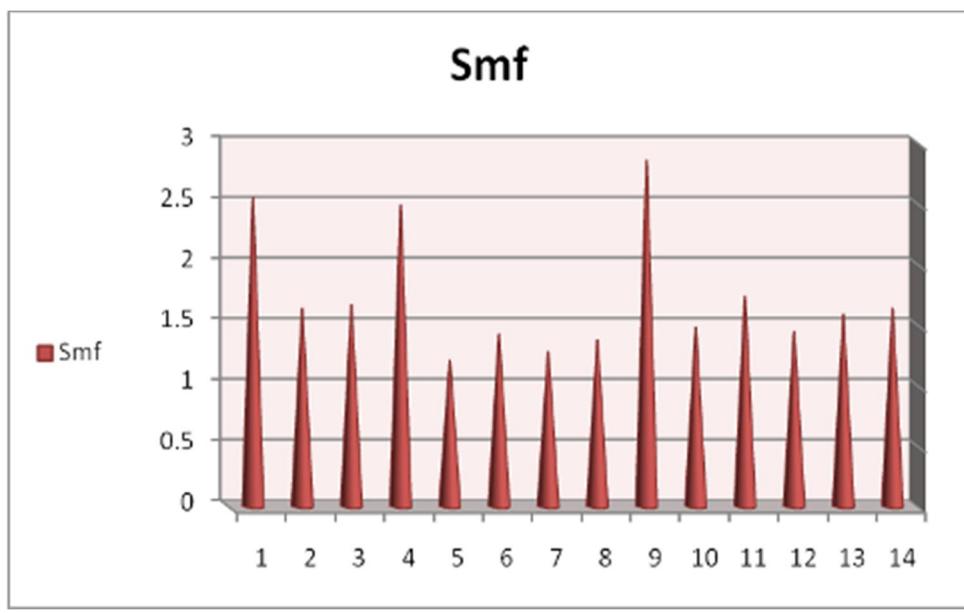
در این فرمول،  $L_{mf}$  معرف طول پیشانی کوهستان در امتداد کوهپایه در محل شکستگی واضح در شیب و  $L_s$  طول خط مستقیم ترسیم شده به موازات پیشانی مورد نظر است (شکل ۹). سینوستیه پیشانی کوه، تعادل بین نیروهای فرسایشی و نیروهای تکتونیکی را معکس می‌نماید. نیروهای فرسایشی روندی عمودی نسبت به برش دماغه‌ها در پیشانی کوه دارند، در صورتی که نیروهای تکتونیکی از روند ایجاد شده در پیشانی کوه که به صورت مستقیم و منطبق بر گسل فعال منطقه هستند، پیروی می‌کنند.



شکل ۹) نحوه اندازه‌گیری شاخص پیچ و خم پیشانی کوهستان در محل تغییر شیب در محدوده گسل پیرانشهر

پیشانی‌های فعال تکتونیکی مقدار  $S_{mf}$  کمتر از ۳ دارند؛ در حالی که مقادیر  $S_{mf}$  بیشتر از ۳ با پیشانی‌های غیرفعال در ارتباط است. هر چه قدر این شاخص کوچکتر و به عدد یک نزدیکتر باشد، نشان‌دهنده غلبه فعالیت تکتونیکی بر فرایش، در میزان برخاستگی منطقه دارد. بنابراین، در یک جبهه کوهستانی مستقیم و صاف با یک گسل مرزی فعال، پیچ و خم پیشانی کوهستان مقدار پایین ۱ تا ۳، جبهه‌های با فعالیت متوسط، مقدار این شاخص را ۳ تا ۵ و جبهه‌های با فعالیت کمتر، مقدار این شاخص را بیشتر از ۵ نشان می‌دهند (Bull & Mc Fadden, 1977; Keller & Pinter, 1996).

شاخص کاهش سینوسیتی پیشانی کوهستان برای ۱۴ پیشانی در محدوده گسل پیرانشهر اندازه‌گیری و نتایج آن در نمودار شکل (۱۰) نشان داده شده است. همان‌گونه که در نمودار شکل (۱۰) نیز مشاهده می‌شود، این شاخص در همه جبهه‌ها عدد کمتر از ۳ را نشان می‌دهد.



شکل (۱۰) نمودار شاخص  $Smf$  محاسبه شده برای ۱۴ پیشانی کوهستان در محدوده گسل پیرانشهر

### نتیجه‌گیری

گسل پیرانشهر در جنوب غربی استان آذربایجان غربی، دارای راستای تقریبی شمال غربی-جنوب شرقی است. این گسل با حرکت شب لغز نرمال با مؤلفه امتداد لغز راستگرد، موجب پایین‌افتادگی زمین‌های بخش شمال شرقی نسبت به بخش جنوب غربی شده است. از شواهد آن، وجود یک حوضه جدایش و کشش به طول تقریبی ۱۵ کیلومتر در شمال شرق گسل است. با توجه به حرکت پلیت عربستان به سمت اوراسیا در طول گسل جوان زاگرس و گسل آناتولی ترکیه با سرعت ۱۷ میلی متر در سال و فشار به وجود آمده از این همگرایی، گسل جوان زاگرس و در نتیجه گسل پیرانشهر به عنوان بخشی از آن فعال و لرزه‌زا هستند. همان‌طور که اندازه‌گیری شاخص‌های مورفو-تکتونیکی حوالی گسل پیرانشهر هم مؤید این مطلب است، نتیجه اندازه‌گیری چندین شاخص ریخت مورفو-تکتونیکی، میزان فعالیت تکتونیکی گسل

پیرانشهر را به عنوان شمالی ترین قطعه گسل جوان زاگرس نشان می دهد. اندازه گیری شاخص نسبت عرض دره به ارتفاع آن برای ۱۴۵ دره، به طور میانگین مقدار عددی ۵/۵ را نشان می دهنده که بیانگر تکتونیک فعال در منطقه است. با توجه به شکل دره های ایجاد شده در منطقه که به صورت دره های عمیق و باریک هستند، چنین نتیجه می شود که بالآمدگی در فاصله زمانی کم و با قدرت برش زیاد صورت گرفته است؛ به طوری که جریان، فرصت پهن نمودن دره را نداشته است. نتیجه اندازه گیری نسبت های  $V_c$  و (پهنهای کف دره به عمق دره)  $V_f$  نیز که در ارتباط مستقیم با شکل دره ها هستند، نشان دهنده تکتونیک فعال در محدوده گسل پیرانشهر هستند. همچنین، میانگین نسبت  $V_c$  در منطقه ۱/۵ بوده، بیانگر بالآمدگی سریع تکتونیکی است. همچنین، نسبت  $V_f$  به طور متوسط ۰/۱۴ را نشان می دهد که گواه فعالیت بالای تکتونیکی در منطقه است. شاخص پیچ و خم پیشانی کوهستان در ۱۴ جبهه اندازه گیری شده، که همه عدد پایین ۳ را نشان می دهد و گویای فعالیت بالای تکتونیکی در این منطقه است. بنابراین، با توجه به اندازه گیری های انجام شده و سایر شواهد زمین شناسی، می توان با اطمینان گسل پیرانشهر را یک گسل فعال و لرزهزا و در نتیجه منطقه را حائز فعالیت های نوزمین ساختی در نظر گرفت. با توجه به طول تقریبی ۹۵ کیلومتری گسل (طول مؤثر گسل نصف طول واقعی آن در نظر گرفته شده است)، توان ایجاد زلزله با بزرگی حداقل ۶/۹ درجه در مقیاس امواج درونی زمین (ریشت) نیز انتظار می رود که اثرهای نامطلوبی برای سازه های منطقه خواهد داشت؛ لذا با توجه به مطالعات و اندازه گیری های انجام شده و نتایج حاصله تأکید می شود هرچه زودتر نسبت به مقاوم سازی سازه های مسکونی، مرزی و بخصوص نظامی موجود در این منطقه اقدام شود.

## منابع

- آقاباتی، سید علی. (۱۳۸۳). زمین شناسی ایران، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی ایران.
- پور کرمانی، محسن و آرین، مهران. (۱۳۷۶). سایزمو تکتونیک (لرزه زمین ساخت)، شرکت مهندسی مشاور دز آب.
- صفری، حجت الله و خدیری، لادن. (۱۳۹۰). لرزه زمین ساخت، دانشگاه گلستان.
- Alipour, R. . Zare, M. & Gassemi, M.R. 2012, Inception of activity and slip rate on the Main Recent Fault of Zagros Mountains, Iran, Geomorphology 04047.
- Berberian, M., 1976, Contribution to the Scismotectonics of Iran. Geological Survey of Iran, Rep. No 39.
- Bull, W.B., 2007, Tectonic Geomorphology of Mountains A New Approach to paleoseismology, black well, 316pp.
- Bull, W.B. , Fadden , L.D. , 1997, Tectonic Geomorphology north and south of the Garlock Fault, California, Proceedingof 8th Annual Geomorphology Symposium, New York.
- Eftekharnezhad , J., 1975, Brief history and structural development of Azarbaijan. Geo. Surv. Iran. Internal report 8p.
- Keller, E.A., Pinter, N., 1996, Active Tectonics: Earthquakes, Uplift and Landforms Prentice Hall, New Jersey.
- Mayer, L., 1986, Tectonic geomorphology of escarpments and mountain fronts, In: Wallace Active Tectonics, National Academy Press, Washington, 125-135.
- Talebian M. and Jackson J., 2002 , Offset on the Main Recent Fault of NW Iran and implications for the late Cenozoic tectonics of the Arabia-Eurasia collision zone, Geophys. J. Int. (2002) 150, 422–439

- 12- Tchalenko,J.S., Braud,J., 1974, Seismicity and structure of Zagros (Iran) – the Main Recent Fault. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*277, 1-25.
- 13- Zuchiewicz,W., 1998, Quaternary tectonics of the outer west Carpathians, Poland, *Tectonophysics*, 297: 121-132.