

اثرات زیست محیطی فعالیت گسل میناب و چالش های زمین ساختی

مهرداد سرهنگی^۱، علی سلگی^{۱*}، مرتضی طالبیان^۲، زهرا ملکی^۱

^۱دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، دانشکده علوم پایه و فناوریهای همگرا

^۲پژوهشکده علوم زمین، سازمان زمینشناسی و اکتشافات معدنی کشور

چکیده:

بر اساس نتایج تحقیقات و شاخص های زمین ساختی، منطقه در وضعیت زمین ساختی متوسط قرار دارد. از عوامل تهدید کننده در منطقه می توان به تاثیر گسل میناب بر بالا آمدگی منطقه اشاره کرد که باعث افزایش شیب منطقه در قسمت های شمالی می شود. این امر به نوبه خود باعث افزایش دبی آب و طغیان رودخانه ها در نواحی پایین دست شده و باعث ناپایداری شیب و رانش زمین در منطقه می شود. هدف از این پژوهش ارائه بینش های ارزشمندی در مورد تأثیر ساختارهای زمین شناسی منطقه بر روی چالش های زمین ساختی و زیست محیطی آینده می باشد. با محاسبه پارامترهای مورفوتکتونیک و شاخص های مورفومتری به منظور برآورد مخاطرات زمین ساختی گسل میناب به نقش آن بر روی مخاطرات زمین ساختی-زیست محیطی پرداخته شده است. بر این اساس تاثیر گسل میناب بر بالا آمدن منطقه می تواند شیب منطقه را در قسمت های شمالی افزایش داده و منجر به افزایش جریان آب و طغیان رودخانه ها در نواحی پایین دست شود. این امر می تواند باعث ناپایداری شیب و رانش زمین در منطقه شود. از نظر خطرات تکتونیک، وجود گسل میناب و فعالیت تکتونیک مرتبط با آن می تواند منجر به خطرات زمین ساختی مختلف از جمله زمین لرزه شود. در نتیجه، در حالی که گسل میناب و فعالیت های زمین ساختی مرتبط با آن می تواند چالش های زیست محیطی قابل توجهی را ایجاد کند، با برنامه ریزی صحیح و درک شرایط زمین ساختی، می توان این چالش ها را کاهش داد و به توسعه پایدار منطقه کمک کرد.

واژه های کلیدی: اثرات زیست محیطی، گسل میناب، چالش های زمین ساختی، مورفومتری.

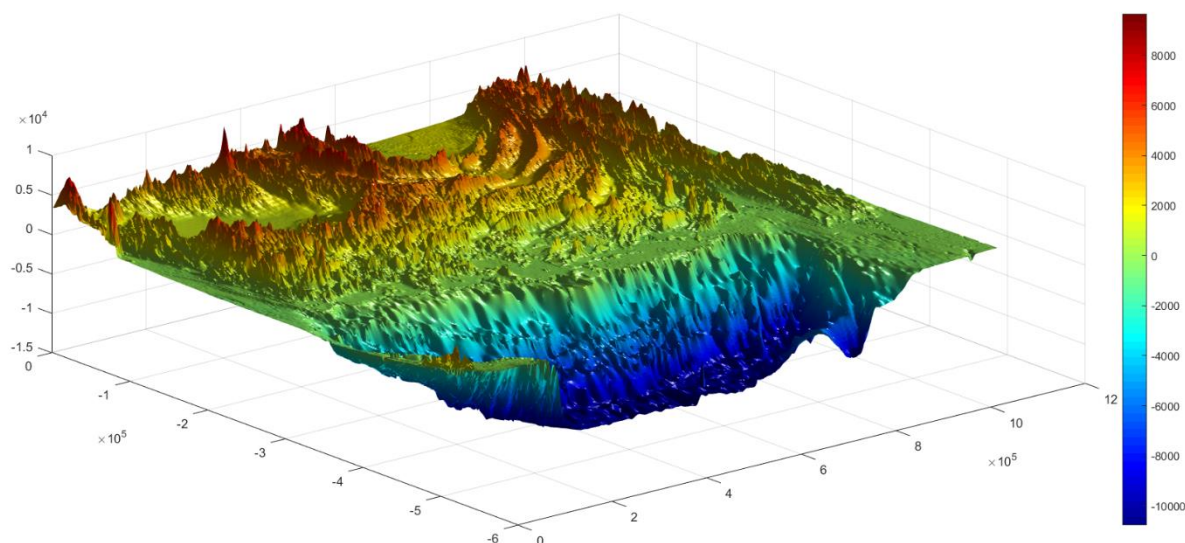
مقدمه:

مکران طول ۱۰۰۰ کیلومتر و عرض ۴۰۰ کیلومتر دارد که دو سوم آن آشکار شده است. این خشکی، بزرگترین منشور برافزایشی در جهان می باشد و از فرورانش مداوم صفحه عربستان به زیر صفحه اوراسیا حاصل می شود که در کرتاسه اولیه با همگرایی واقعی آغاز شد. نرخ های متغیری از ۳۵/۵ تا ۳۶/۵ میلی متر در سال در باختر مکران تا ۳۹ میلی متر در خاور دارد. صفحه فرورانش ۲ درجه تا ۲۷ درجه شمالی به سمت شمال شیب دارد؛ سپس با زاویه شیب ۳۰ درجه به سمت پایین خم می شود. سامانه گسل امتدادلغز میناب- میناب نمایانگر مرز خاوری صفحه عربستان است. در واقع،

مورفوتکتونیک یا ژئومورفولوژی تکتونیک، شاخه ای از ژئومورفولوژی است که چگونگی شکل گیری شکل های زمین یا تحت تاثیر فعالیت های زمین ساختی را مطالعه می کند و به دنبال درک مکانیسم های عمیق زمین در پشت ایجاد فرم های زمین ساختی توسط فرآیندهایی مانند بالا آمدن پوسته، فرونشست، گسلش، یا چین خوردگی است. مورفوتکتونیک بر تحقیقات بین رشته ای متکی است که از زمینه هایی مانند زمین شناسی، لرزه شناسی، جغرافیای فیزیکی، اقلیم شناسی، ژئوکرونولوژی و ژئودزی استخراج میشود. منشور برافزایشی

توسط سامانه گسل امتدادلغز میناب- میناب محدود می‌شود. این گذار را می‌توان به عنوان یک خط خطی ساختاری در نظر گرفت که به «خط عمان» نیز معروف است. گسل میناب- میناب با تکتونیک فشاری راست‌گرد، متشکل از چندین گسل با روند شمالی- جنوبی است و به نظر می‌رسد ادامه گسل راندگی اصلی زاگرس باشد که شامل دنباله‌هایی از فلیش و افیولیت و ملائزهای رنگی است (شکل ۱).

همگرایی طولانی‌مدت و همچنان ادامه‌دار به سمت شمال صفحه عربستان در زیر صفحه اوراسیا قاره‌ای منجر به منطقه برخورد زاگرس در باختر و منطقه فرورائش مکران در خاور می‌شود. همگرایی از قاره- قاره در سمت خلیج فارس به اقیانوسی- اقیانوسی در دریای عمان که توسط تنگه هرمز به هم متصل می‌شوند تغییر می‌کند. از شمال با گسل رانده اصلی زاگرس- ناحیه برخوردی اقیانوس نئوتیس- و از خاور



شکل ۱- نقشه توپوگرافی سه بعدی مکران استخراج شده از GeoMapApp

سنگ‌شناسی و جابه‌جایی متغیر در امتداد گسل‌ها به طور کلی برای شناسایی گسل‌های امتدادلغز در مقاطع استفاده می‌شود (Ramadan et al., 2014). با این وجود، استفاده از داده‌های لرزه‌ای برای تعیین گسترش آن‌ها با قطعیت بر روی ویژگی لرزه‌ای دوبعدی معمولی بسیار چالش‌برانگیز است.

سامانه گسل امتدادلغز میناب- میناب (ZMFS) نمایانگر مرز خاوری صفحه عربستان است. در واقع، همگرایی طولانی‌مدت و همچنان ادامه‌دار به سمت شمال صفحه عربستان در زیر صفحه اوراسیا قاره‌ای منجر به منطقه برخورد

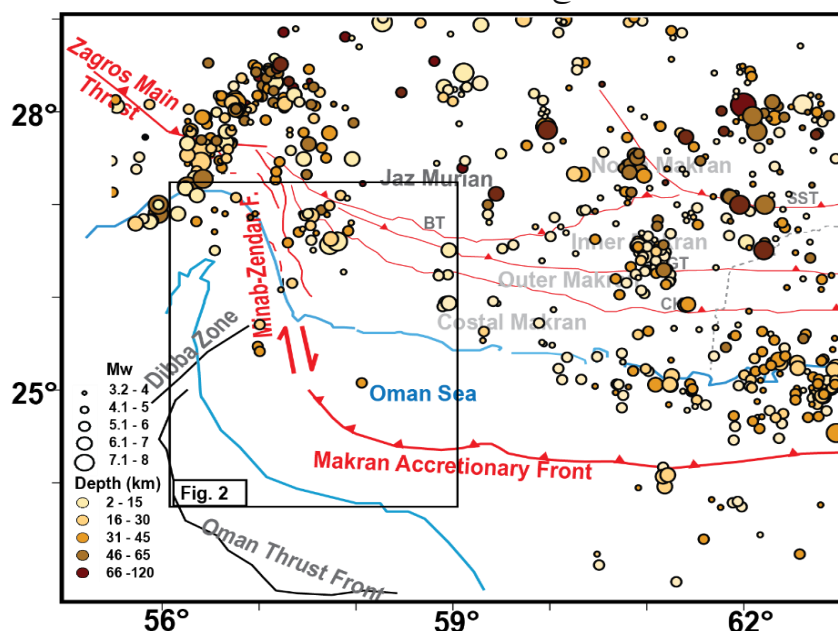
زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه:

تکتونیک امتدادلغز عمدتاً در مقاطع افقی (نمای نقشه) مورد مطالعه قرار گرفته است (Zalan, 1987) و مقاطع عمودی (خطوط لرزه‌ای) هندسه خطی، گسل‌های سطحی، ساختار کششی و لغزش‌های دماسبی، کمتر شاخص‌های سیستم گسل امتدادلغز در نقشه هستند (Moody and Hill, 1956; Harding, 1985; McClay and Bonora, 2001). در حالی که گسل‌های قائم، ساختارهای گل، تغییرات ناگهانی رخساره‌های رسوبی و ضخامت همان واحد چینه‌شناسی،

زاگرس در باختر و منطقه فرورانش مکران در خاور می‌شود (شکل ۲). همگرایی از قاره-قاره در سمت خلیج فارس به اقیانوسی-اقیانوسی در دریای عمان-که توسط تنگه هرمز به هم متصل می‌شوند- تغییر می‌کند. از شمال با گسل رانده اصلی زاگرس-ناحیه برخوردی اقیانوس نئوتیس (Ricou, 1977)- و از خاور توسط ZMFS محدود می‌شود (شکل ۲). این گذار را می‌توان به عنوان یک خط خطی ساختاری در نظر گرفت که به «خط عمان» نیز معروف است (Kadinsky- Cade and Barazangi, 1982). گسل میناب- میناب با تکتونیک فشاری راست‌گرد، متشکل از چندین گسل با روند شمالی- جنوبی است (Regard et al., 2010) و به نظر می‌رسد ادامه گسل راندگی اصلی زاگرس باشد (Walker and Jackson, 2002) که شامل دنباله‌هایی از فلیش و افیولیت و ملائزهای رنگی است (McCall et al., 1994).

مطالعات GPS نشان داده است که ZMF در حال حاضر یک گسل فعال است و مقداری کرنش الاستیک را جمع می‌کند

(Penney et al., 2017). اما به دلیل کمبود ایستگاه‌ها و پیچیدگی‌های ساختاری در منطقه، لرزه‌خیزی آن به طور دقیق مشخص نشده است. امتداد جنوبی ZMFS روی نیمرخ‌های لرزه‌ای دوبعدی دریای عمان دیده شده است (Ravaut et al., 1998). اگرچه، انتقال از منطقه برخورد به منطقه فرورانش، ساختارهای مرتبط و گسترش آن در دریا ناشناخته باقی مانده است. از این رو، پیشنهاد می‌شود که تفسیر پروفایل‌های لرزه‌ای دوبعدی منتشر شده توسط شرکت ملی نفت ایران (NIOC) و نقشه‌های زمان و عمق مهاجرت در امتداد باختر دریای عمان، برای درک بهتر گسترش فراساحل ZMFS و نقش آن در خطر لرزه‌ای منطقه یکپارچه گردد. ابتدا شرح مختصری از زمین‌ساخت مناطق مکران و زاگرس ارائه می‌شود. سپس داده‌ها و روش‌شناسی موجود به دنبال تفسیر و تحلیل توصیف می‌گردد. در بخش آخر نیز ماهیت ZMFS و تکامل آن مورد بحث قرار می‌گیرد.

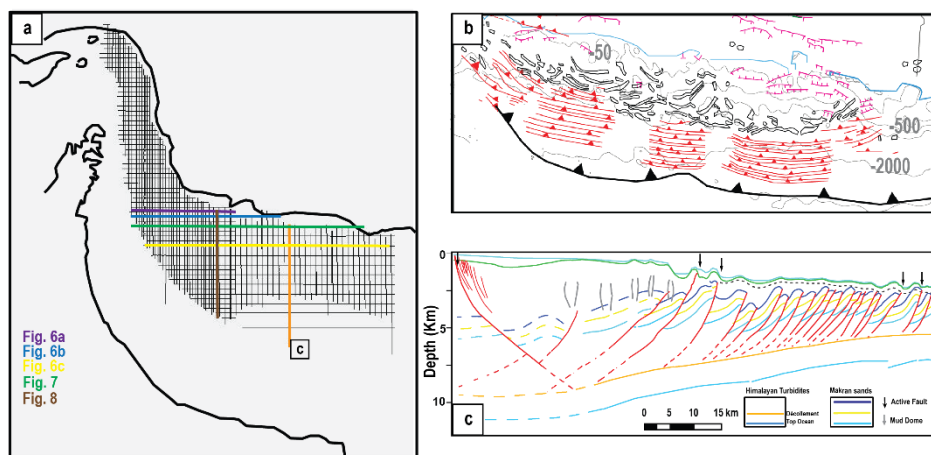


شکل ۲ - تنظیم ژئودینامیک انتقال زاگرس - مکران. لرزه‌خیزی، با زمین‌لرزه‌هایی با بزرگی بیشتر بیش از ۳/۵ از سال ۱۹۴۵ به صورت دایره‌های رنگی نشان داده شده است. CKT: رانش چاه خان، BT: رانش بشاگرد، GGT: قصره رانش قند. De. Mets et al., 2010

تکتونیک منطقه مورد مطالعه

منشور مکران به طور کلاسیک به دو حوزه ساحلی و فراساحلی تقسیم می‌شود که توسط یک کمربند ساحلی باریک (عرض چند کیلومتر) از هم جدا می‌شوند و در امتداد آن گسل‌های معمولی و گلفشانها قرار دارند (Pajang et al., 2021, 2022). نرخ رسوب بالا و شادابی کوهزایی هیمالیا (Rando and McClay, 2007) یکی از ویژگی‌های این منطقه است. گوه هنوز کاملاً زیردریایی می‌باشد و قدمت حدود ۹ تا ۱۲ میلیون سال دارد، که توسط یک اولیستوستروم زیردریایی بزرگ با قدمت تورتونین نشان داده شد که در امتداد بخش خشکی ایران مکران می‌روید (Ruh et al., 2018).

مشخصات لرزه‌ای فراساحلی باختری (Pajang et al., 2021). (شکل ۳- c) خط نزدیک‌تر به منطقه مورد مطالعه است که سه بخش ساختاری مختلف را تعریف می‌کند: (۱) یک منطقه رانش آغشته به شمال در جلو، (۲) یک منطقه دیاپیر با منشأ کم عمق، و (۳) گسل‌های نرمال لیستریک فعال واقع در امتداد خطوط ساحلی (شکل ۳- b). که به نظر می‌رسد ریشه در ساختاری جدایش دارند. نمایه ۳ مدل‌های اخیر توموگرافی (Haberland et al. 2020) نزدیک به منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. این نشان‌دهنده یک توده ضخیم (بیش از ۱۰ کیلومتر) با سرعت کم موج لرزه‌ای P (VP) در منطقه ساحلی بوده که با پوشش حوضه‌های رسوبی همزمان است.



شکل ۳- a. شبکه لرزه نگاری ۴×۴ کیلومتر در غرب دریای عمان. b. نقشه ساختاری فراساحلی Pajang et al (۲۰۲۱). c. مقطع غربی مهاجرت شده در عمق Pajang et al (۲۰۲۱). خط نارنجی محل آن را در قسمت a، نشان می‌دهد.

مکران در یک الگوی دم اسبی متصل می‌شود (Regard et al., 2005, 2004).

بخشی از ZMFS در خشکی قرار دارد که در آن ساختارهای گسلی سطحی توسط یک سری از گسل‌های فشاری راست‌گرد با روند تقریباً موازی شمالی-جنوبی تشکیل شده است (Mokhtari et al., 2008). چین‌خوردگی در امتداد ساختارهای اصلی در تصویر ماهواره‌ای ماهیت راست‌گرد آن را نشان می‌دهد (Mokhtari et al., 2008). در خاور گسل اصلی، خطواره‌ها نمایانگر پوشش‌های جانبی جوان‌تر در امتداد خط ساحلی جنوبی هستند که نشان‌دهنده مهاجرت به سمت خاور مجموعه گسلی در طول زمان است. چند مطالعه (Burberry and Jackson, 2013; Ravaut et al., 1998) به طور مختصر طولانی شدن ZMFS در فراساحل را نشان داده‌اند. باربری و جکسون (۲۰۱۳) پهنه ۴۰ کیلومتری از چندین گسل مایل‌لغز با اجزای رانشی و لغزش را نشان دادند که ماهیت رانش بیشتری به جبهه برافزایشی دارند و روند شمالی-جنوبی ساختارهای شیب‌لغز تأثیر بیشتری بر الگوی تغییر شکل دارد. اما گسترش این گسل و نقش آن در ساختار کلی منطقه نامشخص است.

رابطه مورفوتکتونیک و زمین‌شناسی محیطی

رابطه بین مورفوتکتونیک و زمین‌شناسی محیطی را می‌توان در چگونگی تأثیر فعالیت‌های تکتونیک بر عوامل محیطی مشاهده کرد. به عنوان مثال، مطالعه ای در استان کانال سوئز جنوبی (SSCP) در مصر نشان داد که حرکات تکتونیک مربوط به ریفتینگ خلیج سوئز تأثیر قابل توجهی بر منطقه داشته و منجر به مخاطرات آبی زیست محیطی مانند قطع آب و شور شدن خاک می‌شود. این مطالعه نشان داد که توزیع این خطرات بین سال‌های ۱۹۸۴ تا ۲۰۱۵ به‌طور چشمگیری تغییر کرد و این تغییرات به شدت با گسترش پوشش گیاهی

کوهزایی زاگرس با ۱۵۰۰ کیلومتر طول و ۳۰۰ کیلومتر عرض، بخشی از کمربند کوهزایی آلپ-همالیای بوده که ناشی از بسته شدن اقیانوس نئوتتیس جنوبی در طول مزوزویک و اوایل سنوزویک است (Chiu et al., 2013). برخورد بین صفحات ایران مرکزی و عربستان از اواخر ائوسن (Hessami et al., 2001; Allen and Armstrong, 2008) تا اواسط-اواخر میوسن (McQuarrie et al., 2003) ادامه داشته است. اندازه‌گیری GPS نرخ کوتاه‌شدگی شمالی-جنوبی، نشان‌دهنده افزایش از ۴ تا ۹ میلی‌متر در سال در شمال باختر (Walpersdorf et al., 2006) به حدود ۲۰ میلی‌متر در سال در فرورانش مکران است؛ بنابراین انتظار می‌رود که روند زاگرس-مکران حداقل ۱۰ میلی‌متر در سال حرکت انتقالی داشته باشد و باید حدود ۱۰ تا ۱۳ میلی‌متر در سال حرکت به سمت راست نیز در نظر گرفت (Peyret et al., 2009).

توپوگرافی، ژئومورفولوژی و چینه‌شناسی نشان می‌دهد که لرزه‌خیزی کوهستان زاگرس به دو حوزه زاگرس مرتفع و کمربند چین‌خورده ساده تقسیم می‌شود. زاگرس مرتفع حاوی برش‌های درهم تنیده از رسوبات مزوزویک و پالئوزویک و همچنین افیولیت‌هایی است که در کرتاسه پسین در حاشیه منفعل عربی قرار گرفته‌اند (Stoneley, 1990). کمربند چین‌خورده ساده تحت سلطه چین‌های بزرگ، باز و خطی است (Ramsey, 2008). ساختار زمین‌شناسی بین پی‌سنگ عربی و ایران مرکزی با گسل رانده اصلی زاگرس با روند شمال باختری-جنوب خاوری مشخص شده است (Talebian and Jackson, 2004; Alavi, 2007). به نظر می‌رسد انتهای جنوب خاوری رانش اصلی زاگرس با ZMFS، تغییرشکل را از زاگرس به فرورانش مکران منتقل می‌کند یا بیشتر در جنوب، به رانش‌های داخلی

آن‌ها از ناهنجاری‌های گرانشی ماهواره‌ای استفاده کردند که تغییرات میدان گرانشی زمین ناشی از تفاوت در چگالی و ضخامت پوسته زمین است تا فرآیندهای تکتونیکی را استنتاج کنند. این رویکرد به دانشمندان اجازه می‌دهد تا فعالیت‌های تکتونیکی مانند گسل‌شدن و چین‌خوردگی را که مشاهده مستقیم آن‌ها دشوار است، شناسایی و تجزیه و تحلیل کنند. تحلیل مورفوتکتونیکی المهدی و محمد (۲۰۱۴) از بخش مرکزی صحرای شرقی مصر نمونه دیگری از کاربرد مورفوتکتونیکی در درک محیط ما است. آنها شکل‌های زمین و ساختارهای زمین‌شناسی این منطقه را برای درک فرآیندهای تکتونیکی که آن را شکل داده‌اند مورد مطالعه قرار دادند. کار آنها بینش‌های ارزشمندی را در مورد تاریخ زمین‌ساختی منطقه و پیامدهای آن برای زمین‌شناسی محیطی ارائه می‌دهد.

به طور مشابه، مطالعه Kaplay et al., 2017 در مورد تکامل مورفوتکتونیکی دشت ساحلی کنکان جنوبی در غرب هند، کاربردهای متنوع مورفوتکتونیکی را نشان می‌دهد. آنها از ژئومورفولوژی رودخانه‌ای، که مطالعه نقش رودخانه‌ها در شکل‌دادن به چشم‌انداز است، برای استنتاج تاریخ زمین‌ساختی منطقه استفاده کردند. کار آنها به ما کمک می‌کند تا بفهمیم که چگونه فرآیندهای تکتونیکی چشم‌انداز این منطقه ساحلی را شکل داده‌اند و چگونه این فرآیندها ممکن است بر محیط زیست در آینده تأثیر بگذارند. در نتیجه، مطالعه مورفوتکتونیکی نقش مهمی در زمین‌شناسی محیطی ایفا می‌کند. این به ما کمک می‌کند درک کنیم که چگونه فرآیندهای تکتونیکی مناظر ما را شکل می‌دهند و بر محیط ما تأثیر می‌گذارند. آثار ذکر شده نمای کلی گسترده‌ای از این زمینه ارائه می‌دهند و کاربردهای آن را در زمینه‌های مختلف جغرافیایی و ارتباط آن با محیط‌های زمینی و فرازمینی را نشان می‌دهند. این مطالعات اهمیت تحقیقات بین‌رشته‌ای را در پیشبرد

و مناطق شهری مرتبط بود. توزیع ویژگی‌های ثابت آب‌شناسایی شده در نقشه پوشش زمین، دقیقاً با یک ساختار هورست مدفون که بر بخش میانی منطقه بررسی شده مسلط است، مطابقت دارد.

مورفوتکتونیک، همانطور که توسط Fairbridge توصیف شده است، رشته‌ای است که مطالعه زمین‌شناسی و ژئومورفولوژی را برای درک چگونگی شکل‌دهی نیروهای زمین‌ساختی به سطح زمین ترکیب می‌کند. این شامل مطالعه شکل‌های زمین مختلف مانند کوه‌ها، دره‌ها و دشت‌ها و درک چگونگی شکل‌گیری و تغییر آن‌ها در اثر فعالیت‌های زمین‌ساختی مانند زمین‌لرزه، فوران‌های آتشفشانی و حرکت صفحات است. مطالعه El-Rayes et al., 2018 یک مثال کامل از این است که چگونه مورفوتکتونیکی می‌تواند پیامدهای دنیای واقعی داشته باشد. آنها در مطالعه خود دریافتند که حرکات زمین‌ساختی مربوط به خلیج سوئز ریفتینگ منجر به خطرات زیست محیطی قابل توجهی در استان کانال سوئز جنوبی در مصر شده است. این خطرات شامل قطع شدن آب و شور شدن خاک است که می‌تواند اثرات مخربی بر کشاورزی و سایر فعالیت‌های انسانی داشته باشد. با درک فرآیندهای تکتونیکی که منجر به این خطرات شده است، می‌توانیم چنین خطراتی را در آینده بهتر پیش‌بینی و کاهش دهیم.

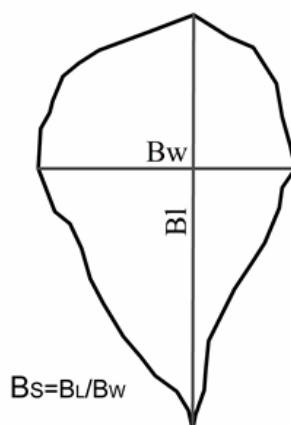
تحقیقات تیلور و هاوارد (۲۰۰۰) روی Elysium Mons، طور خلاصه، مورفوتکتونیک یک زمینه حیاتی در زمین‌شناسی محیطی است که به ما کمک می‌کند بفهمیم چگونه فرآیندهای تکتونیکی مناظر ما را شکل می‌دهند و بر محیط ما تأثیر می‌گذارند. کاربردهایی از کاهش خطرات زیست محیطی روی زمین .

مطالعه ایازی و همکاران. (۲۰۱۰) در رشته کوه‌های زاگرس در ایران نمونه بارز این است که چگونه می‌توان از فناوری مدرن برای ارتقاء درک ما از مورفوتکتونیکی استفاده کرد.

می باشد. بر این اساس شاخص شکل حوضه زهکشی به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$Bs = BI/Bw$$

در این رابطه، Bs شاخص شکل حوضه زهکشی، BI طول حوضه زهکشی و Bw عرض حوضه زهکشی می‌باشد (شکل ۴).



شکل ۴: شکل حوضه‌های زهکشی

کوهستانی با فراگیری سریع، حوضه‌های طویل پرشیب دارند و هنگامی که فعالیت تکتونیکی کاهش یابد و یا متوقف شود عریض شدن حوضه‌ها از سمت بالای جبهه کوهستان آغاز می‌شود (Ramirez & Herrera).

مقدار شاخص Bs برای ناحیه مورد مطالعه، بررسی شد و به ترتیب برای حوضه‌های ۱، ۲ و ۳ مقادیر ۷/۹، ۷/۶ و ۳/۷ به دست آمد که نشان از Bs بالا در حوضه ۱ و ۲ و Bs متوسط در حوضه ۳ دارد (شکل ۳ و جدول‌های ۱ و ۲).

درک ما از زمین و محیط زیست آن برجسته می‌کند. از میان شاخص‌های مورفوتکتونیکی محاسبه شده، شاخص Bs نقش مهمتری در تعیین چالش‌های زیست محیطی در اثر فعالیت گسل میناب دارا می‌باشد. بر این اساس بر اساس اصول تقسیم بندی تقسیم‌بندی فعالیت‌های تکتونیکی مناطق بر اساس میزان شاخص Bs (El Hamdouni et al., 2008) و تعیین محدوده با تأثیرات منفی یا مثبت زیست محیطی دارا

حوضه‌های زهکشی نسبتاً جوان در نواحی تکتونیکی فعال که تمایل به طویل شدن در جهت شیب توپوگرافی دارند. اما همسو با تکامل حوضه‌های زهکشی و یا کاهش فعالیت‌های تکتونیکی، حوضه‌ها از حالت طویل به حالت مدور تغییر شکل پیدا می‌نمایند (Bull & MacFadden, 1977).

این شاخص اختلاف بین حوضه‌های طویل با مقادیر بالا و حوضه‌های مدور با مقادیر پایین را منعکس می‌سازد. حوضه‌های طویل از ویژگی‌های مناطق تکتونیکی فعال است که رودخانه‌های با برش به سمت پایین دارند. جبهه‌های

جدول ۱- تقسیم‌بندی فعالیت‌های تکتونیکی مناطق بر اساس میزان شاخص Bs (El Hamdouni et al., 2008)

Low tectonic activity	Medium tectonic activity	High tectonic activity	Tectonic activity
-----------------------	--------------------------	------------------------	-------------------

Bs < 3	۴ - 3	Bs > 4	Bs
--------	-------	--------	----

جدول ۲- مقادیر شاخص Bs در حوضه‌ها

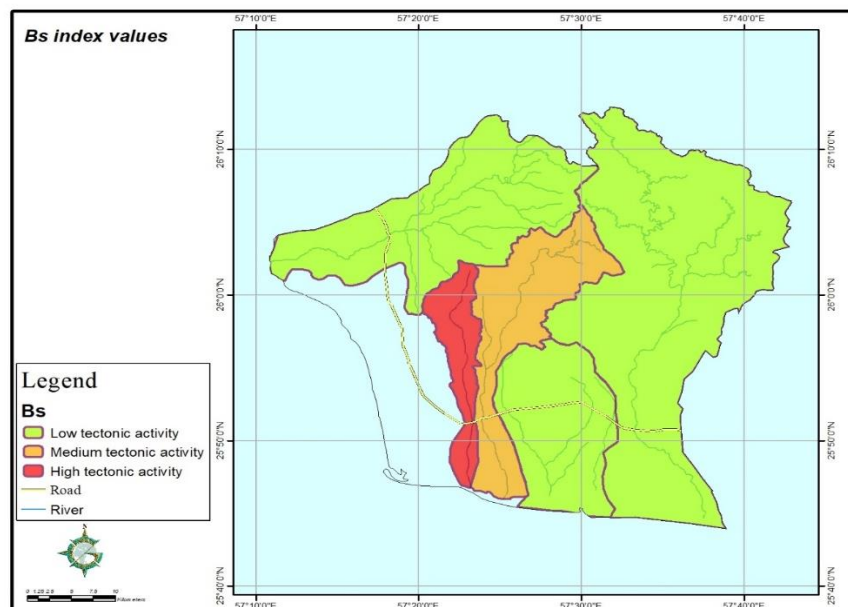
Basic	BL	Rw	Bs	Assessment
River1	38.0	11.3	3.4	Medium tectonic activity
River2	20.6	12.5	1.6	Low tectonic activity
River3	53.8	20.6	2.6	Low tectonic activity
River4	35.8	16.6	2.2	Low tectonic activity
River5	28.8	4.7	6.1	High tectonic activity

زمین‌ساخت پایین (S/n بیشتر از ۲/۵) است. با توجه به این رده‌بندی در منطقه مورد مطالعه نتایج زیر حاصل شد (جدول ۳). با توجه به رده‌بندی بالا، در حوضه‌های ۱، ۲، ۳ و ۵ زمین‌ساخت نسبی در کلاس فعالیت متوسط و در حوضه ۴ در کلاس فعالیت زیاد قرار می‌گیرد. در نهایت با تجمیع کلاس‌ها شاخص Iat مشخص گردید که منطقه مورد مطالعه تحت تأثیر فعالیت گسل‌های منطقه از جمله گسل میناب و رسوبات و نهشته‌های سست در مرحله زمین‌ساخت و فعالیت تکتونیکی متوسط قرار دارد (جدول‌های ۱، ۲ و ۳).

شاخص‌های مختلف زمین‌ریختی که به آن اشاره شد، در زمین‌ساخت نسبی (Iat) به چهار رده فعالیت خیلی بالا، فعالیت بالا، فعالیت متوسط و فعالیت پایین تقسیم و با محاسبه میانگین رده کلاس شاخص‌ها (S/n) در هر حوضه و ارزیابی آن با روش شاخص زمین‌ساختی نسبی (Iat) به چهار رده کلاس تقسیم گردید. در این کلاس‌بندی، رده یک فعالیت زمین‌ساخت خیلی بالا (S/n بین ۱/۵ تا ۱)، رده دو فعالیت زمین‌ساخت بالا (S/n بین ۲ تا ۱/۵)، رده سه فعالیت زمین‌ساخت متوسط (S/n بین ۲/۵ تا ۲) و رده چهار فعالیت

جدول ۳: مقدار شاخص فعالیت‌های تکتونیکی (Iat) در منطقه مورد مطالعه

موقعیت	Sl	Smf	Vf	Af	Bs	T	Iat	کلاس
حوضه ۱	۱.۴	۲	۱.۷	۳	۲	۳	۲.۱۸	متوسط
حوضه ۲	۳	۳	-	۱	۳	۲	۲.۴۰	متوسط
حوضه ۳	۱.۲	۳	۱.۹	۳	۳	۲	۲.۳۵	متوسط
حوضه ۴	۱.۵	۱	۲.۴	۲	۳	۲	۱.۹۸	زیاد
حوضه ۵	۲	۳	۱	۲	۱	۳	۲.۰۰	متوسط
کل حوضه							۲.۱۸	متوسط



شکل ۳- مقدار شاخص Bs در حوضه‌ها

(شکل ۵) و نیز وجود سنگ‌های رسوبی نرم فرسا (شکل ۲) قرار گرفته است؛ به طوری که مقدار شاخص I_{at} نشان‌دهنده فعالیت تکتونیکی متوسط در این منطقه می‌باشد.

پس از بررسی شاخص‌های زمین‌ریخت‌شناسی و محاسبه آنها، منطقه مورد مطالعه به لحاظ زمین‌ساخت فعال نسبی تحت تأثیر سه پدیده زمین‌ساختی بزرگ گسل میناب، بالآمدگی و ایجاد توپوگرافی خشن و فرورانش اقیانوسی



شکل ۴ - تراس های تکتونیکی ساحل جاسک و دریای عمان که بیانگر برخاستگی و فعال بودن تکتونیکی منطقه است.

(۵۰ متر) لغزیده است که باعث ایجاد یک سونامی ویرانگر شده است.

گسیختگی زمین: گسیختگی زمین به جابجایی فیزیکی سطح در امتداد یک گسل در هنگام زمین لرزه اشاره دارد. این می تواند منجر به تغییرات قابل توجهی در چشم انداز، آسیب رساندن به زیرساخت ها، تغییر آبراه ها و ایجاد خطرات بالقوه برای ساختمان ها و سایر سازه ها شود. زمین لرزه ۱۹۹۲ لندرز در شهرستان سن برناردینو، کالیفرنیا، نمونه ای از گسیختگی زمین قابل توجه ناشی از فعالیت گسل است. یک گسیختگی سطحی حدود ۵۰ مایل گسترش یافت و باعث آسیب قابل توجهی به سازه ها و همچنین به زمین شد.

سونامی: زمین لرزه های زیر آب که اغلب به دلیل حرکت گسل ها در زیر کف اقیانوس ایجاد می شوند، می توانند سونامی ایجاد کنند. این امواج دریا می توانند مسافت های

مخاطرات زمین شناسی زیست محیطی ناشی از فعالیت

گسل

فعالیت گسل‌ها، به ویژه در مناطقی با فرآیندهای تکتونیکی فعال، می تواند منجر به انواع مخاطرات زمین شناسی محیطی شود.

زمین لرزه: فوری ترین و آشکارترین خطر ناشی از فعالیت گسل، وقوع زمین لرزه است. این رویدادهای لرزه ای زمانی رخ می دهند که تنش در امتداد یک گسل بر نیروهایی که آن را در کنار هم نگه می دارند غلبه کرده و باعث آزاد شدن ناگهانی انرژی می شود. این انرژی به صورت امواج لرزه ای به بیرون تابش می کند و زمین را تکان می دهد و به طور بالقوه آسیب قابل توجهی به زیرساخت ها و محیط زیست وارد می کند. زمین لرزه سال ۲۰۱۱ در سواحل شرقی ژاپن نمونه ای از زمین لرزه های مهم ناشی از فعالیت گسل است. کارشناسان محاسبه می کنند که این گسل به اندازه ۱۶۴ فوت

تأثیرات قابل توجهی بر جوامع انسانی و اکوسیستم‌های طبیعی داشته باشند. بنابراین، درک و نظارت بر فعالیت خطا برای ارزیابی و کاهش خطر بسیار مهم است.

نتیجه‌گیری:

با محاسبه پارامترهای مورفوتکتونیک و شاخص‌های مورفومتری به منظور برآورد مخاطرات زمین‌ساختی گسل میناب به نقش آن بر روی مخاطرات زمین‌ساختی-زیست محیطی پرداخته شده است. بر این اساس تأثیر گسل میناب بر بالا آمدن منطقه می‌تواند شیب منطقه را در قسمت‌های شمالی افزایش داده و منجر به افزایش جریان آب و طغیان رودخانه‌ها در نواحی پایین دست شود. این امر می‌تواند باعث ناپایداری شیب و رانش زمین در منطقه شود. از نظر خطرات تکتونیک، وجود گسل میناب و فعالیت تکتونیک مرتبط با آن می‌تواند منجر به خطرات زمین‌ساختی مختلف از جمله زمین‌لرزه شود. در نتیجه، در حالی که گسل میناب و فعالیت‌های زمین‌ساختی مرتبط با آن می‌تواند چالش‌های زیست محیطی قابل توجهی را ایجاد کند، با برنامه‌ریزی صحیح و درک شرایط زمین‌ساختی، می‌توان این چالش‌ها را کاهش داد و به توسعه پایدار منطقه کمک کرد.

بر اساس نتایج تحقیقات و شاخص‌های زمین‌ساختی، منطقه در وضعیت زمین‌ساختی متوسط قرار دارد. از عوامل تهدید کننده در منطقه می‌توان به تأثیر گسل میناب بر بالا آمدگی منطقه اشاره کرد که باعث افزایش شیب منطقه در قسمت‌های شمالی می‌شود. این امر به نوبه خود باعث افزایش دبی آب و طغیان رودخانه‌ها در نواحی پایین دست شده و باعث ناپایداری شیب و رانش زمین در منطقه می‌شود. با مشخص شدن اثرات مثبت و منفی زیست محیطی فعالیت گسل میناب با محاسبه پارامترهای مورفوتکتونیک و شاخص‌های مورفومتری به منظور برآورد مخاطرات زمین‌ساختی گسل

زیادی را طی کنند و هنگامی که به مناطق ساحلی می‌رسند خسارات زیادی به بار آورند.

تغییرات در شکل زمین: زمین لرزه‌های مکرر زمین را در طول هزاره‌ها شکل می‌دهند و مناطق گسلی اغلب دارای شکل‌های لندفرم منحصر به فرد و تشخیصی ناشی از فرآیند گسلی هستند. این تغییرات می‌تواند بر اکوسیستم‌ها و سکونتگاه‌های انسانی تأثیر بگذارد.

رانش زمین (زمین لغزش): زمین‌لرزه‌های ناشی از فعالیت گسل‌ها نیز می‌توانند باعث رانش زمین، به‌ویژه در مناطق تپه‌ای یا کوهستانی شوند. این لغزش‌ها می‌توانند خانه‌ها، جاده‌ها و سایر زیرساخت‌ها را مدفون کنند و همچنین خطرات قابل توجهی برای زندگی انسان ایجاد کنند.

لرزه خیزی القایی: فعالیت‌های انسانی، مانند تزریق فاضلاب به اعماق زیرزمین، می‌تواند با تغییر شرایط تنش بر روی گسل‌های موجود، لرزه خیزی ایجاد کند. این لرزه خیزی ناشی از زمین‌لرزه می‌تواند منجر به زمین‌لرزه‌هایی شود که به طور طبیعی رخ نمی‌دادند. در نتیجه، فعالیت گسل‌ها می‌تواند منجر به انواع مخاطرات زمین‌شناسی زیست محیطی شود که بسیاری از آنها می‌توانند تأثیرات قابل توجهی بر جوامع انسانی و اکوسیستم‌های طبیعی داشته باشند. بنابراین، درک و نظارت بر فعالیت خطا برای ارزیابی و کاهش خطر بسیار مهم است.

توالی لرزه خیزی سپتامبر تا اکتبر ۲۰۱۳ در ۲۱ کیلومتری ساحل خلیج والنسیا (اسپانیا) رخ داد، نمونه‌ای از لرزه خیزی ناشی از عملیات ذخیره سازی زیرزمینی گاز (پروژه کاستور) ۶ است. این مثال‌ها تأثیرات متنوع و قابل توجهی را که فعالیت گسل می‌تواند بر محیط ما داشته باشد را نشان می‌دهد. در نتیجه، فعالیت گسل‌ها می‌تواند منجر به انواع مخاطرات زمین‌شناسی زیست محیطی شود که بسیاری از آنها می‌توانند

بر منطقه می‌توان از توان خطرات و حوادث طبیعی قابل پیش‌بینی کاست.

References:

- Alavi, M., 2007. Structures of the Zagros fold-thrust belt in Iran. *Am. J. Sci.* 307, 1064–1095. <https://doi.org/10.2475/07.2007.02>
- Al-Mahdi, B., Mohammad, A.A., 2014. Morphotectonic analysis of Wadi Al-Na'aman, northern Iraq. *Arab. J. Geosci.* 7, 1041–1050. <https://doi.org/10.1007/s12517-012-0698-8>
- Ayazi, M.A., Ghassemi, M.R., Talebian, M., 2010. Satellite gravity anomalies and their implications for the morphotectonics of the Zagros Mountains, Iran. *J. Asian Earth Sci.* 39, 196–208. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2010.02.006>
- Burberry, C.M., Jackson, J.A., 2013. Offshore continuation of the Zagros Main Frontal Thrust in the western Gulf of Oman, from seismic reflection data. *Geol. Soc. Lond., Spec. Publ.* 372, 27–41. <https://doi.org/10.1144/SP372.10>
- Chiu, H.-Y., Chung, S.-L., Zarrinkoub, M.H., Willett, S.D., Yeh, M.-W., Lin, I.-J., Chen, Y.-G., Lee, T.-Y., He, L., 2013. Zircon U-Pb and Hf isotopic constraints from the Zagros orogen, Iran. *Gondwana Res.* 24, 1092–1106. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2013.02.005>
- El-Rayes, M.M., El-Shazly, A.K., El-Khashab, A.M., 2023. Morphotectonic analysis of the Southern Suez Canal Province, Egypt: A key to mitigate environmental hazards. *Environ. Earth Sci.* 82, 1–20. <https://doi.org/10.1007/s12665-022-10735-7>
- Haberland, C., Rumpker, G., Giese, P., Farahani, H.R., Hushmandi, A., 2020. Crustal structure of the Zagros orogeny from receiver function analysis and 3-D gravity modeling. *Geophys. J. Int.* 220, 1680–1698. <https://doi.org/10.1093/gji/ggz492>
- Harding, T. P. (1985). Seismic characteristics and identification of negative flower structures, positive flower structures, and positive structural inversion. *AAPG Bulletin*, 69(4), 582-600.
- Hessami, K., Koyi, H.A., Talbot, C.J., Tabasi, H., Shabani, E., 2001. Progressive unconformities within an evolving foreland fold-and-thrust belt, the Zagros Mountains of Iran. *J. Geol. Soc.* 158, 969–981. <https://doi.org/10.1144/0016-764901-008>
- Kadinsky-Cade, K., & Barazangi, M. (1982). Structural evolution of the Zagros fold-thrust belt, southwestern Iran. *Tectonophysics*, 85(3-4), 269-313.
- Kaplay, R.S., Sheth, H.C., Kumar, R., 2017. Morphotectonic evolution of the western continental margin of India inferred from SRTM data.

میناب به نقش آن بر روی مخاطرات زمین‌شناختی-زیست محیطی پرداخته شده است. بر این اساس:

اثرات مثبت محیطی: نتایج حاصل از پژوهش می‌تواند به درک بهبود یافته از ساختارهای زمین‌شناسی برای تعیین نقش مطالعات زمین‌شناسی و تأثیر آن بر مطالعات زیست محیطی آینده کمک کرده و مفید باشد. همچنین با برنامه ریزی صحیح و آگاهی کامل از شرایط زمین‌شناختی حاکم بر منطقه، می‌توان از قدرت مخاطرات طبیعی قابل پیش‌بینی کاست. این امر می‌تواند به توسعه پایدار منطقه کمک کند.

اثرات منفی محیطی: نتایج حاصل از پژوهش افزایش سیلاب و رانش زمین: تأثیر گسل میناب بر بالا آمدن منطقه می‌تواند شیب منطقه را در قسمت‌های شمالی افزایش داده و منجر به افزایش جریان آب و طغیان رودخانه‌ها در نواحی پایین دست شود. این امر می‌تواند باعث ناپایداری شیب و رانش زمین در منطقه شود.

خطرات تکتونیکی: وجود گسل میناب و فعالیت تکتونیکی مرتبط با آن می‌تواند منجر به خطرات زمین‌شناختی مختلف از جمله زمین‌لرزه شود. در نتیجه، در حالی که گسل میناب و فعالیت‌های زمین‌شناختی مرتبط با آن می‌تواند چالش‌های زیست محیطی قابل توجهی را ایجاد کند، با برنامه ریزی صحیح و درک شرایط زمین‌شناختی، می‌توان این چالش‌ها را کاهش داد و به توسعه پایدار منطقه کمک کرد. بر اساس نتایج حاصل از بررسی‌های شاخص‌های تکتونیکی و زمین‌ساخت نسبی و پدیده‌های سطحی می‌توان به نسبت فعالیت تکتونیکی منطقه پی برد؛ از جمله تأثیر گسل میناب بر بالا آمدگی منطقه که باعث افزایش شیب منطقه در قسمت‌های شمالی و در نتیجه افزایش سرعت جریان آب و طغیان رودخانه‌ها در مناطق پایین‌دست و ایجاد ناپایداری دامنه‌ای و رانش زمین در منطقه می‌شوند. بنابراین با برنامه‌ریزی درست و آگاهی کامل از شرایط تکتونیکی حاکم

1390. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2009.04135.x>
- Ramadan, E. M., El-Sheikh, A. A., & Abdel-Rahman, M. A. (2014). Fault plane solutions of earthquakes in the Gulf of Suez, Egypt: Implications for regional tectonics and stress distribution. *Journal of African Earth Sciences*, 99, 864-875.
- Ramirez, J.M., Herrera, G., Morphotectonic evolution of the Altiplano and adjacent regions in the central Andes. *J. South Am. Earth Sci.* <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2022.103793>
- Ramsey, L.A., 2008. Structural evolution of the Zagros fold-thrust belt, Iran: New insights from seismic reflection data. *Geol. Soc. Lond., Spec. Publ.* 301, 1–41. <https://doi.org/10.1144/SP301.1>
- Rando, J. C., & McClay, K. R. (2007). The role of the Himalayan orogeny in the development of the Makran accretionary prism: New insights from the Makran 2005 cruise. *Geophysical Research Letters*, 34(18).
- Ravaut, C., Villemin, T., Cattin, R., Arpe, M., & Bourles, D. (1998). The Oman line: A late Cretaceous-Paleocene suture between the Arabian and Eurasian plates. *Geology*, 26(11), 1035-1038.
- Ravaut, M., Armijo, R., Tapponnier, P., Mercier, J.L., 1998. Quaternary kinematics of the Gobi Altay and Tien Shan in western China from GPS measurements. *Geophys. Res. Lett.* 25, 2179–2182. <https://doi.org/10.1029/98GL01396>
- Regard, V., Bellier, O., Thomas, J. C., & Bourlès, D. L. (2010). Kinematics of the Minab-Zendan fault (Iran) from GPS measurements: Implications for the present-day deformation of the Zagros fold-and-thrust belt. *Geophysical Journal International*, 180(1), 334-346.
- Regard, V., Bellier, O., Thomas, J.C., Bourlès, D.L., Bonnet, C., Mohazzabi, P., Mercier, J.L., Shabanian, E., Soleymani, S., 2005. Accommodation of Arabia-Eurasia convergence in the Zagros Mountains of Iran. *J. Geophys. Res. Solid Earth* 110. <https://doi.org/10.1029/2003JB002923>
- Regard, V., Bellier, O., Thomas, J.C., Bourlès, D.L., Bonnet, C., Mohazzabi, P., Mercier, J.L., Shabanian, E., Soleymani, S., 2004. Late Cenozoic evolution of the Zagros folded belt: Insights from a seismic reflection profile in the Dezful Embayment, Iran. *Geology* 32, 649–652. <https://doi.org/10.1130/G20566.1>
- Ricou, L. E. (1977). Origin of the Zagros mountains: active continental collision. *Tectonophysics*, 38(1-2), 1-29.
- Ruh, J., Regard, V., Bellier, O., & Bourlès, D. (2018). The Makran accretionary wedge (SE Iran): New Geomorphology 295, 170–185. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.06.012>
- McCall, G. J., Kidd, W. S., & Molnar, P. (1994). The geophysics of subduction zones: an update. *Reviews of Geophysics*, 32(3), 221-259.
- McClay, K. R., & Bonora, M. (2001). Analogue models of restraining stepovers in strike-slip fault systems. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 85(4), 601-616.
- McQuarrie, N., Stock, J.M., Verdel, C., Wernicke, B.P., 2003. Cenozoic evolution of Neotethys and implications for the causes of plate motions. *Geophys. Res. Lett.* 30, 1243. <https://doi.org/10.1029/2002GL016622>
- Mokhtari, M., Hessami, K., Koyi, H.A., 2008. Geometry and kinematics of the Zagros Main Frontal Thrust in the Lurestan Province, Iran. *J. Asian Earth Sci.* 32, 407–419. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2007.11.006>
- Moody, J. D., & Hill, M. J. (1956). Wrench fault tectonics. *Geological Society of America Bulletin*, 67(9), 1207-1246.
- Pajang, A., Mazzotti, S., Vannucchi, P., 2021. Seismic characteristics of the western offshore Oman Sea. *Mar. Geol.* 433, 106435. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2021.106435>
- Pajang, A., Zarei, M., & Dehghani, A. (2021). Distribution and characteristics of mud volcanoes in the Makran accretionary prism, southeastern Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*, 219, 104822.
- Pajang, A., Zarei, M., & Dehghani, A. (2022). Mud volcanoes in the Makran accretionary prism, southeastern Iran: A review of their distribution, characteristics, and implications for hydrocarbon exploration. *Earth-Science Reviews*, 225, 103949.
- Penney, C., Jackson, J. A., & McKenzie, D. (2017). The geometry of the Makran subduction zone: A new subduction interface model from seismic tomography. *Geophysical Research Letters*, 44(18), 9294-9302.
- Peyret, G., Walpersdorf, A., Hatzfeld, D., Tavakoli, F., Ghafory-Ashtiany, M., 2009. GPS velocity field of Iran and implications for the motion of the rigid blocks in the Middle East. *Geophys. J. Int.* 177, 1377–1390. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2009.04135.x>
- Peyret, G., Walpersdorf, A., Hatzfeld, D., Tavakoli, F., Ghafory-Ashtiany, M., 2009. GPS velocity field of Iran and implications for the motion of the rigid blocks in the Middle East. *Geophys. J. Int.* 177, 1377–

Res. Planets 105, 15047–15065. <https://doi.org/10.1029/1999JE001187>
-Walker, R., & Jackson, J. (2002). Offset and evolution of the Gowk fault, southern Iran: A major intra-continental strike-slip fault. *Journal of Structural Geology*, 24(11), 1677-1698.
-Walpersdorf, A., Hatzfeld, D., Nankali, H., Tavakoli, F., Ghafory-Ashtiany, M., 2006. GPS-derived crustal deformation in Iran. *Geophys. J. Int.* 167, 1128–1138. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2006.03116.x>
-Zalan, P. V. (1987). Geometry and kinematics of the Zagros fold-thrust belt, southwestern Iran. *Tectonics*, 6(3), 323-338.

insights into its structural evolution and kinematics from GPS measurements and seismic data. *Tectonics*, 37(12), 4419-4440.
-Stoneley, R., 1990. The geology of the Oman Mountains. Geol. Soc. Lond., Spec. Publ. 49, 1–30. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1990.049.01.01>
-Talebian, M., Jackson, J., 2004. A reappraisal of earthquake focal mechanisms and active shortening in the Zagros Mountains of Iran. *Geophys. J. Int.* 156, 506–526. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2004.02167.x>
-Taylor, G.J., Howard, K.A., 2000. Structural controls on the evolution of Elysium Mons, Mars. *J. Geophys.*

Environmental Effects of the Minab Fault Activity and Tectonic Challenges

Mehrdad Sarhangi , Ali Selgi , Morteza Talebian , Zahra Maleki

:Abstract

Based on the research results and tectonic indicators, the region is in an average tectonic state. One of the threatening factors in the region is the effect of the Minab fault on the rise of the region, which increases the slope of the region in the northern parts. This, in turn, causes an increase in water flow and flooding of rivers in the downstream areas and causes slope instability and landslides in the region. The purpose of this research is to provide valuable insights about the influence of the geological structures of the region on the future geological and environmental challenges. By calculating morphotectonic parameters and morphometric indices in order to estimate the tectonic risks of Minab fault, its role on geological-environmental risks has been discussed. Based on this, the effect of the Minab fault on the rise of the region can increase the slope of the region in the northern parts and lead to an increase in water flow and river flooding in the downstream areas. This can cause slope instability and landslides in the region. In terms of tectonic risks, the existence of the Minab fault and its related tectonic activity can lead to various tectonic risks, including earthquakes. As a result, while the Minab fault and related tectonic activities can create significant environmental challenges, with proper planning and understanding of tectonic conditions, these challenges can be reduced and lead to sustainable development. The area helped

.Keywords: Environmental effects, Minab fault, Tectonic challenges, Morphometry