مجله ژئوفیزیک ایران، جلد ۱۸، شماره ۵، ۱۴۰۳، صفحه ۱ –۲۵ (مقاله پژوهشی) DOI: 10.30499/ijg.2024.444475.1576

جایگاه زمین‌ساختی زمین‌لرزهٔ ۲۱ اردیبهشت ۱۳۹۲ گوهران (بزرگای گشتاوری ۶/۱) در مکران غربی

میرعلی حسن‌زاده [۱] و اسماعیل شبانیان بروجنی [۲*]

[۱] دانشجوی دکتری، دانشکده علوم زمین، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان، زنجان، ایران
[۲] دانشیار، دانشکده علوم زمین، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان، زنجان، ایران

(دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۲۹، پذیرش: ۱۴۰۳/۰۱/۱۱)

چکیده

زمین‌لرزهٔ ۲۱ اردیبهشت ۱۳۹۲ گوهران با بزرگای گشتاوری ۶/۱ بخش غربی گوهٔ برافزایشی فرورانش فعال مکران را متاثر کرد و با گسیختگی سطحی راستالغز چپ‌بر در راستای شرقی–غربی همراه بود. ماهیت قاره‌ای این رخداد در ظاهر با جایگاه زمین‌ساختی آن در بخش غربی گوهٔ فرورانشی مکران هم‌خوانی ندارد. این پژوهش با ارائه اطلاعات زمین‌شناسی ساختاری و نوزمین‌ساختی از منطقهٔ تاثیر زمین‌لرزهٔ گوهران و تلفیق آن با اطلاعات موجود تلاش دارد با توضیح لرزه‌زمین‌ساختی مناسب این رویداد لرزه‌ای، زایش آن را در میان دو جایگاه زمین‌ساختی برخوردی و فرورانشی بررسی کند. بررسی‌های دورسنجی زمین‌شناسی و زمین‌ساخت فعال بر روی تصاویر ماهواره‌ای با قدرت تفکیک بالا نشان می‌دهد دگرشکلی فعال در منطقه به طور اصلی با دسته‌ای از گسله‌های چپ‌بر کواترنری با راستای نزدیک به شرقی – غربی کنترل می‌شود که چین‌ها و راندگی‌های اصلی مکران شمالی و داخلی را بریده و جابه‌جا کرده‌اند. همراهی این گسله‌های چپ‌بر با پله‌های ساختاری در نوار مکران شمالی، و تغییر در پهنای نوار مکران داخلی تا حذف کامل آن در غرب، نشان می‌دهد (۱) این گسله‌ها ساختارهای مهم پوسته‌ای هستند که از نخستین مراحل شکل‌گیری گوهٔ برافزایشی مکران فعالیت داشته‌اند، (۲) این ساختارها در اندرکنش با گسله‌های راست‌بر نزدیک به شمالی – جنوبی، در قالب جفت گسله‌های هم‌یوغ کواترنری این امکان را فراهم می‌کنند تا بخشی از کوتاه‌شدگی شمال، شمال‌شرقی میان ورقهٔ عربی و بلوک لوت را بدون چین‌خوردگی وگسله‌های راندگی اصلی جای‌داده، باقی‌ماندهٔ آن را به شمال منتقل کنند، و (۳) آنها به عنوان پهنه‌های لرزه‌زمین‌ساختی ویژه برای میزبانی زمین‌لرزه‌های راستالغز قاره‌ای متوسط تا بزرگ باید در مطالعات تحلیل خطر زمین‌لرزه در نظر گرفته شوند. این بررسی نشان می‌دهد اندرکنش‌های ساختاری در نواحی پیچیدهٔ زمین‌ساختی می‌تواند الگوهای به ظاهر متناقضی در دگریختی فعال ایجاد کند که توضیح آن با مدل‌های زمین‌ساختی مبتنی بر پیش‌فرض‌های ساده دشوار است.

کلمه‌های کلیدی: پهنه گذار زاگرس به مکران، دگریختی قاره‌ای، زمین‌لرزهٔ میناب، گسله‌های هم‌یوغ، گوهٔ فرورانشی

* نگارنده رابط: shabanian@iasbs.ac.ir

۱ مقدمه

لرزه‌خیزی قاره‌ها یا به صورت میان ورقه‌ای در مرز آنها، یا با ماهیت درون ورقه‌ای بر روی ساختارهای زمین‌شناختی فعال موجود در بلوک‌های قاره‌ای ایجاد می‌شود. از این میان، لرزه‌خیزی میان‌ورقه‌ای ممکن است در ارتباط با پهنه‌های فرورانش اقیانوس – قاره باشد، یا در مرزهای قاره-قاره راستالغز یا برخوردی رخ دهد که زمین‌لرزه‌های مرتبط با هر یک از این جایگاه‌های زمین‌ساختی، ویژگی‌های لرزه‌زمین‌ساختی خود (الگوی گسلش، سازوکار کانونی، عمق، بیشینه بزرگا و ...) را داراست. گاهی، اندرکنش مرزهای ورقه‌ای متفاوت شرایط لرزه‌زمین‌ساختی پیچیده‌ای ایجاد می‌کند که در آن، شناخت و تفکیک الگوی ساختاری، شرایط جنبشی و دینامیکی مسبب زمین‌لرزه‌ها، و به طور کل، توضیح چرایی رویداد برخی از آنها دشوار به نظر می‌رسد. زمین‌لرزهٔ بیست و یکم اردیبهشت ۱۳۹۲ گوهران با بزرگای گشتاوری ۶/۱ را شاید بتوان در این دسته قرارداد. این رویداد زمین‌لرزه‌ای غربی‌ترین بخش پهنهٔ مکران (مکوران) در میان طول‌های ۵۷/۵ تا ۵۸ شرقی را متاثر کرد (شکل‌های ۱ و ۲). این بخش از پهنهٔ مکران محل تلاقی سه جایگاه زمین‌ساختی بسیار متفاوت از یکدیگر است (شکل ۳). ناحیهٔ زمین‌لرزه‌ای گوهران، که به طور مستقیم با رویداد اصلی و خردلرزه‌های مرتبط با آن متاثر شده است، در شمالی‌ترین بخش منشور برافزایشی میوسن - پلیوسن (نوار بیرونی مکران؛ بورگ و همکاران، ۲۰۱۳) قرار گرفته است (شکل‌های ۳ و ۴). این ناحیهٔ زمین‌لرزه‌ای از شمال به مجموعه راندگی‌های با روند شمال‌غرب-جنوب‌شرقی محدود می‌شود که مکران شمالی را به عنوان بخش‌های قدیمی، از باریکهٔ مکران داخلی (در شرق) و مکران بیرونی (در غرب) جدا می‌کند (مک‌کال و همکاران، ۲۰۰۲؛ بورگ و همکاران، ۲۰۱۳؛ منصف و همکاران، ۲۰۱۸). در بلافصل غرب این ناحیه، گسترهٔ تاثیر سامانهٔ گسلی میناب – زندان – پالامی قرار دارد که با راستای نزدیک به شمالی- جنوبی (۱۰ درجهٔ شمال‌غربی) به عنوان مرز میان پهنهٔ برخوردی قاره – قاره زاگرس و فرورانش فعال مکران شناخته می‌شود (برای نمونه، روگر و همکاران، ۲۰۰۵). این پیچیدگی در جایگاه زمین‌ساختی زمین‌لرزهٔ گوهران نه تنها توضیح و چرایی رویداد آن را دشوار می‌کند بلکه با وجود بزرگای نه چندان زیاد آن، آن را به رویدادی مهم تبدیل کرده‌است که با بررسی ویژگی‌های لرزه‌زمین‌ساختی آن می‌توان برای برخی از پرسش‌های مهم دربارهٔ الگوی ساختاری، ویژگی‌های جنبشی و دینامیک دگرریختی فعال در این بخش از پهنهٔ همگرایی عربی – اوراسیا پاسخی یافت. یکی از مهمترین این پرسش‌ها این است که این زمین‌لرزه در ارتباط با کدام فرآیند زمین‌ساختی فعال در منطقه رخ داده است؟ آیا یک زمین‌لرزه مرتبط با فرورانش اقیانوسی- قاره‌ای است، یا ناشی از فعالیت انتقال دگرریختی در پهنهٔ گذار زاگرس – مکران رخ داده است؟ یا اینکه اندرکنش مجموعهٔ زمین‌ساختی یادشده در بالا برای جای‌دهی دگرریختی فعال مسبب آن بوده است؟ پاسخ به این پرسش مهم نتایجی به همراه خواهد داشت که با استناد به آنها می‌توان گسترهٔ تاثیر هر یک از قلمروهای زمین‌ساختی یادشده را مشخص‌تر کرد و توضیح نزدیک به واقع‌تری از لرزه‌زمین‌ساخت این بخش از منطقهٔ مکران غربی ارائه داد.

زمین‌لرزهٔ گوهران به دلیل دوری از تراکم جمعیتی و نبود زیرساخت‌های شهری – صنعتی مهم در آن منطقه چندان توجه پژوهشگران را به خود جلب نکرده است، طوری که تنها مطالعات چاپ شده در این باره را آزادفر و قیطانچی (۱۳۹۴) و پنی و همکاران (۲۰۱۵) انجام داده‌اند. آزادفر و قیطانچی (۱۳۹۴) در کنار مکان‌یابی دوبارهٔ پس‌لرزه‌های این زمین‌لرزه و حل سازوکارهای کانونی برای مهم‌ترین آنها، نشان دادند که زمین‌لرزهٔ اصلی بایست در عمق حدود ۱۱ کیلومتری رخ داده باشد. ابر

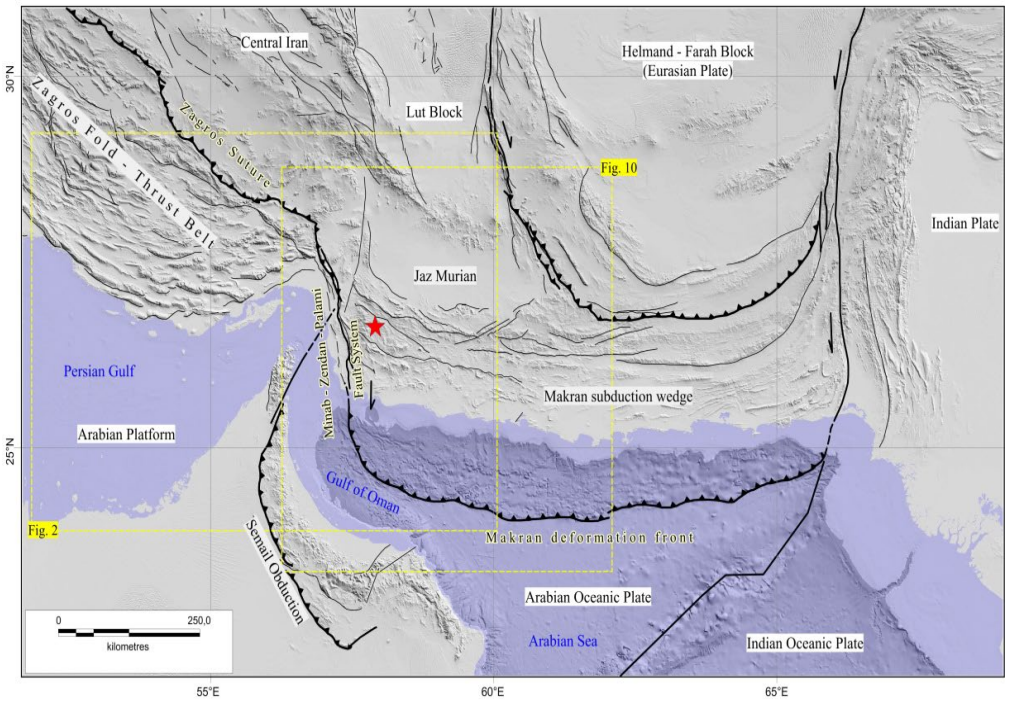
زمین‌لرزه‌ای مرتبط با این رویداد در بازهٔ عمقی ۵ تا ۴۰ کیلومتری گسترده شده است؛ هرچند این الگو از نگاه نویسندگان نامعقول گزارش شده و با اشاره به عمق بیشتر پس‌لرزه‌ها، بر بازهٔ عمقی ۵ تا ۱۵ کیلومتر تاکید شده است. آزادفر و قیطانچی (۱۳۹۴) به درستی دریافتند که این زمین‌لرزه در پی فعالیت یک گسلهٔ راستالغز چپ‌بر ناشناخته با راستای شمال‌شرق– جنوب‌غربی ایجاد شده است. پنی و همکاران (۲۰۱۵) با بهره‌گیری از اطلاعات زلزله‌شناسی مربوط به رویداد اصلی و دو پس‌لرزهٔ آن، وارون‌سازی الگوی لغزش همالرزه‌ای به دست آمده از اینسار (سامسونوف و چارنوگورسکا، ۲۰۱۳) و نیز همراهی پاره‌ای اطلاعات زمین‌شناسی میدانی، تلاش کردند رویداد این زمین‌لرزه را در ارتباط با پهنهٔ گذار میناب– زندان - پالامی توضیح دهند. این زمین‌لرزه در کار پنی و همکاران زمین‌لرزهٔ میناب نام‌گذاری شده است که با توجه به جغرافیای بسیار متفاوت آن از منطقهٔ میناب، در اینجا آن را به زمین‌لرزهٔ گوهران (شهر گوهران در شهرستان بشاگرد) تغییر نام داده‌ایم (شکل ۳). بنابر مشاهدات و تفسیر پنی و همکاران، زمین‌لرزهٔ گوهران ناشی از لغزش برروی دسته‌ای از گسله‌های راستالغز چپ‌بر شرقی – غربی بوده است. این گسله‌ها با چرخش ساعت‌گرد به دور محورهای شاقولی نقش جای‌دهی میدان سرعتی هم‌ارز با برش راست‌بر در راستای گسله‌های شمالی – جنوبی میناب – زندان را دارند. ایشان همچنین عنوان کرده‌اند که فعالیت این گسله‌ها می‌تواند اختلاف مشاهده شده میان آهنگ‌های لغزش به دست آمده از دو روش زمین‌شناسی و جی‌پی‌اس را در مکران غربی توضیح دهد. با وجود این مشاهدات و تفسیر ارائه شده، داده‌های زمین‌شناختی و زمین‌لرزه‌ای به کار رفته از تراکم و دقت مکانی سه بعدی کافی برخوردار نیست و هیچ اطلاعات ساختاری از الگوی گسلش سطحی ارائه نشده است تا بتوان با استناد به آنها رویداد زمین‌لرزهٔ گوهران را در این پهنهٔ ساختاری – لرزه‌زمین‌ساختی پیچیده توضیح داد. برای نمونه، طبق مدل ارائه شده (پنی و همکاران، ۲۰۱۵) چرخش ساعت‌گرد گسله‌های چپ‌بر (به عنوان سازوکار ایجاد برش چپ‌بر) نیازمند فعالیت یک پهنهٔ برش راست‌بر شمالی – جنوبی است. در صورتی که، زمین‌لرزهٔ گوهران بیرون از سامانهٔ شمالی–جنوبی گسلهٔ میناب- زندان - پالامی رخ داده است و مشخص نیست گسله‌های شمالی - جنوبی راستالغز راست‌بری که بر اساس مدل ارائه شده باید مرز چرخش ساختاری ساعت‌گرد را بسازند، در واقعیت کجایند؟ از سوی دیگر، یک گسلهٔ زمین‌لرزه‌ای که توان ایجاد رویدادی با بزرگای ۶/۱ را داشته باشد، نمی‌تواند یک ساختار فرعی در عرض گوهٔ برافزایشی مکران باشد. در این صورت، ارتباط ساختاری، جنبشی و دینامیکی این دسته از گسله‌های چپ‌بر با ساختارهای اصلی منطقه چیست؟ آیا شکل‌گیری و فعالیت این گسله‌ها وابستگی ویژه‌ای به جایگاه زمین‌ساختی آنها دارد یا آنها را در همه‌جای مکران غربی می‌توان دید؟ در این صورت، نقش آنها در ایجاد خطر زمین‌لرزه – گسلش منطقه چه خواهد بود؟ و بسیاری ابهام‌های دیگر!

این پژوهش در قالب مطالعات زمین‌ساخت فعال و زمین‌شناسی ساختاری به روش دورسنجی انجام شده است. بررسی های دورسنجی ریخت‌زمین‌ساختی و زمین–شناسی ساختاری در شرق سامانهٔ گسلهٔ میناب– زندان – پالامی به تهیه یک نقشهٔ به روزشده از گسلش کواترنری منتج شده است. کار زمین‌شناسی بر روی بررسی سیماهای زمین‌ریختی مرتبط با گسلش فعال به روش دورسنجی تصویرهای ماهواره ای با قدرت تفکیک بالا و داده های توپوگرافی رقومی متمرکز شده است. مجموعهٔ این مشاهدات و داده‌ها به ما اجازه داده است تا افزون بر تعیین الگوی ساختاری ناحیهٔ گوهران و پیرامون، جایگاه لرزه‌زمین‌ساختی زمین‌لرزهٔ گوهران را در ارتباط با پهنه‌های سه گانه زمین‌ساختی منطقه توضیح دهیم.

افزون‌براین، تفسیری دربارهٔ چرایی فعالیت گسله‌های شرقی- غربی چپ‌بر و ارتباط آنها با ساختارهای اصلی و دگریختی منطقه‌ای در مکران غربی ارائه دهیم.

۲ جایگاه زمین‌ساختی و لرزه‌زمین‌ساخت منطقه

ایران بخشی از کمربند کوهزایی بزرگ آلپ- هیمالیا است که میان دو ورقهٔ عربی در جنوب‌غرب و اوراسیا در شمال‌شرق فشرده می‌شود. سرعت میانگین همگرایی ورقهٔ عربی – اوراسیا بر پایهٔ مطالعات جی‌پی‌اس ۲۷ میلی متر بر سال در مسقط عمان، در جهت نزدیک به شمالی – جنوبی به دست آمده است (ورنان و همکاران، ۲۰۰۴؛ خرمی و همکاران، ۲۰۱۹). نتیجهٔ این همگرایی در جنوب ایران و پاکستان باعث فعالیت امروزی پهنهٔ فرورانشی مکران است که در آنجا از زمان کرتاسه (حدود ۱۰۰ میلیون سال پیش) بخش اقیانوسی سنگ‌کرهٔ عربی به زیر خردقارهٔ ایران مرکزی (در ایران) و اوراسیا (در پاکستان) رانده می‌شود (شکل ۱).

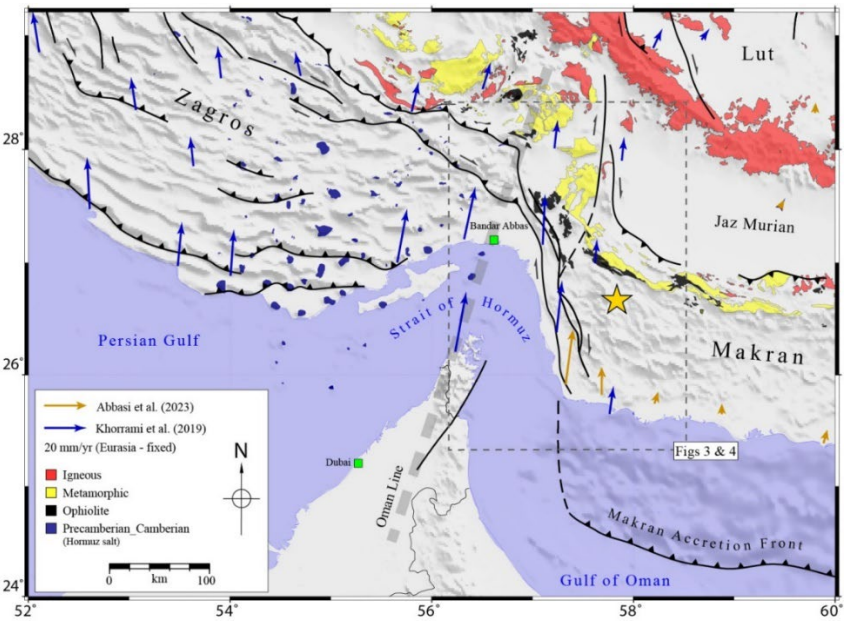


شکل ۱. نقشهٔ پیکره‌بندی زمین‌ساخت جنوب‌شرق ناحیهٔ برخورد – فرورانش عربی – اوراسیا. خط‌های سیاه گسله‌های فعال هستند (حسامی و همکاران، ۲۰۰۳) که ساختارهای بخش مکران و عمان به آن افزوده شده است. ستارهٔ قرمز رویداد اصلی زمین‌لرزه ۲۱ اردیبهشت ۱۳۹۲ گوهران (میناب) را نشان می‌دهد. مرزهای زمین‌ساختی اصلی با خط سیاه پررنگ مشخص شده است. چهارگوش شکل‌های ۲ و ۱۰ با خط‌چین زرد نشان داده شده است.

گونه‌های مختلف فرورانش از دیدگاه حرکت ورقه‌ها و زمین‌لرزه‌های رخداده در سه دستهٔ کلی قرار می‌گیرند. یک دسته، فرورانش‌هایی هستند که زمین‌لرزه‌های فشاری پی‌درپی با بزرگای متوسط تا بزرگ دارند (بخش‌هایی از فرورانش مکزیک). دستهٔ دوم، فرورانش‌هایی هستند که زمین لرزه‌های متوسط و کوچک همراه با زمین‌لرزه‌های بزرگ یا در بازهٔ زمانی میان آنها رخ می‌دهند (جنوب شیلی). دستهٔ سوم، فرورانش‌هایی که زمین‌لرزه‌های شناخته شده‌ای در طول تاریخ ندارند، مانند کاسکادیا، جاوا و آنتیلیس کوچک جنوبی (بایرن و همکاران، ۱۹۹۲). فرورانش مکران، به ویژه در بخش غربی، از گونهٔ سوم فرورانش‌ها است و مشخص کردن اینکه آیا این فرورانش بی لرزه است یا لرزه‌زا و همراه با زمین‌لرزه‌های ابراندگی با دورهٔ بازگشت طولانی، بسیار دشوار است.

در قرن گذشته بخش غربی مکران لرزه‌خیزی بسیار اندکی داشته است (نیازی و بسفورد، ۱۹۶۸؛ نوروزی، ۱۹۷۶؛ کیتمایر و جکوب، ۱۹۷۹). به تازگی عباسی و همکاران (۲۰۲۳) با اندازه‌گیری بردارهای جی‌پی‌اس در منطقهٔ مکران (از جاسک تا شرق چابهار) و استفاده از آنها در مدل‌سازی میزان جفت‌شدگی میان ورقهٔ اقیانوسی فرورونده و قارهٔ سوار بر آن (overriding continent) در مکران، تایید کرده‌اند که جفت‌شدگی در بخش غربی مکران بسیار کمتر از بخش شرقی آن است و خطر زمین‌لرزه‌ای ناشی از رویداد زمین‌لرزه‌های ابراندگی در آنجا کمتر است. این نظر پیش‌تر با استناد به شرایط زمین‌شناختی عنوان شده بود، اما مشاهده‌ای برای تایید آن در دست نبود (برای نمونه، نیازی، ۱۹۸۰؛ متقی و همکاران، ۲۰۲۰).

در نمونه‌های شناخته شده در دنیا، بسیاری از پهنه‌های گذار میان منطقه‌های برخوردی و فرورانش با گسله‌ای متمرکز جدا می‌شود که مانند گسله‌ای ترادیس (Transform Fault) عمل می کند و ممکن است لرزه‌خیزی بالایی داشته باشد؛ مانند غرب یونان (بکر و همکاران، ۱۹۹۷)، تایوان (کائو و همکاران، ۱۹۹۸) و نیوزلند (اندرسون و همکاران، ۱۹۹۳). در گذر از پهنهٔ برخوردی زاگرس به سوی مکران نیز، تغییرات ناگهانی در ویژگی‌های زمین‌شناسی در طول جغرافیایی ۵۷ درجه دیده می‌شود (اشتوکلین و نبوی، ۱۹۷۳)، طوری که ساختارهای مربوط به نمک هرمز و نیز چین‌های بزرگ زاگرس در خط عمان به طور ناگهانی ناپدید می‌شوند (شکل ۲). برخی از زمین‌شناسان مرز گذار زاگرس به مکران را همخوان با سامانه گسلی میناب – زندان – پالامی می‌دانند (روگر و همکاران، ۲۰۰۵)، برخی نیز خط عمان را با راستای N020°E به عنوان مرز معرفی کرده‌اند (کادینسکی-کید و برزنگی، ۱۹۸۲؛ گنسر، ۱۹۵۵). هرچند هویت این مرز در محل خط عمان به طور کامل مشخص نشده است (مک‌کنزی و اسکلتر، ۱۹۷۱؛ فالکون، ۱۹۷۴). نکتهٔ قابل تامل این است که پس از پایان یافتن ساختارهای زاگرس در خط عمان (شکل‌های ۱ و ۲) روند ساختارهای زمین‌شناسی و تاریخچه زمین‌ساختی



شکل ۲. نقشهٔ ساختاری ساده‌شدهٔ ناحیه جنوب ایران با مرکزیت پهنهٔ گذار میان برخورد زاگرس و فرورانش فعال مکران. خط‌های سیاه گسله‌های فعال هستند (برگرفته از حسامی و همکاران، ۲۰۰۳). زمین‌لرزه ۲۱ اردیبهشت ۱۳۹۲ گوهران با ستاره و چهارگوش شکل‌های ۳ و ۴ با خط‌چین نشان داده شده است. گسترش انواع سنگ‌های آذرین، دگرگونی، افیولیتی و نمک هرمز و نیز بردارهای سرعت به دست آمده از GPS مطابق راهنما نشان داده شده است.

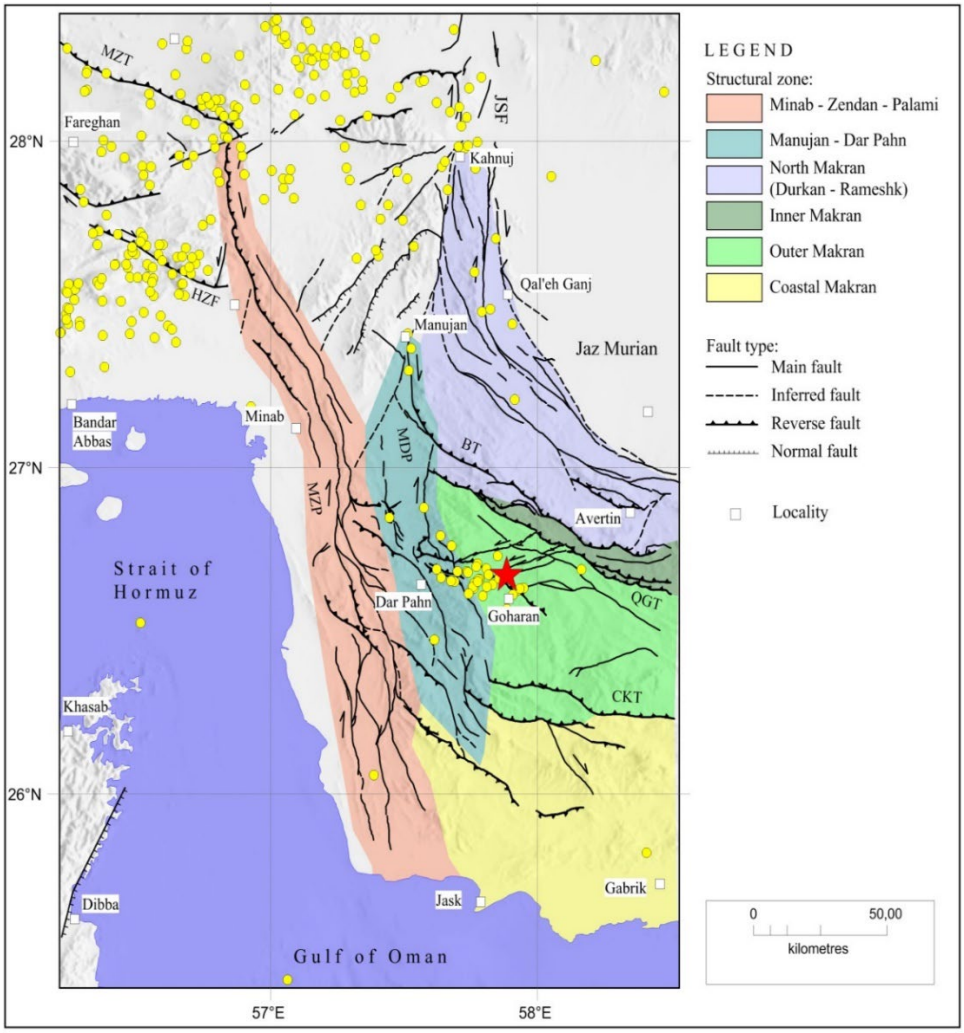
تشکیل آنها تغییر می‌کند تا اینکه ساختارهای اصلی مکران با خروج از عرض سامانهٔ میناب – زندان – پالامی در شرق آن ظاهر می‌شود (شکل‌های ۳ و ۴). از دیدگاه زلزله‌شناسی نیز، لرزه‌خیزی در این پهنه بیشتر در بخش‌های شمالی و به شکل ابر زمین‌لرزه‌ای متراکم در شمال دیده می‌شود (شکل ۳)، اما بخش‌های دیگر آن لرزه‌خیزی قابل توصیفی از خود نشان نمی‌دهد (یمینی‌فرد و همکاران، ۲۰۰۷؛ غلام‌زاده و همکاران، ۲۰۰۹).

از دیرباز، پژوهش‌های ارزشمندی برای شناخت و درک چگونگی جای‌گیری دگرشکلی در مزر گذار زاگرس به مکران انجام شده است (برای مثال فالکون، ۱۹۷۴؛ مک‌کنزی و اسکلتر، ۱۹۷۱؛ نیازی و بسفورد، ۱۹۶۸؛ نوروزی، ۱۹۷۶؛ کیتمایر و جکوب، ۱۹۷۹؛ بایرن و همکاران، ۱۹۹۲؛ رَووُ و همکاران، ۱۹۹۸). روگر و همکاران (۲۰۰۵) با مطالعه زمین‌ساخت فعال سامانهٔ میناب – زندان – پالامی، آن را مرز مشخص زاگرس و مکران قرار دادند که با حرکت راستالغز راست‌بر خود (۱۳ تا ۱۵ میلیمتر برسال) اختلاف جابه‌جایی میان پهنهٔ فرورانشی و برخوردی را جای می‌دهد (روگر و همکاران، ۲۰۱۰). یمینی فرد و همکاران (۲۰۰۷) پس از ثبت لرزه خیزی (از اواخر سال ۱۹۹۹ تا اوایل سال ۲۰۰۰ با ۲ شبکه محلی و ۴۹ ایستگاه) و مکان یابی دوباره خوشه‌های لرزه‌ای نشان دادند که لرزه‌خیزی در بخش شمالی پهنه گذار در ارتباط با گسلهٔ ویژه‌ای نیست بلکه میان گسله‌های جیرفت-سبزواران و میناب – زندان – پالامی پراکنده است. ایشان سازوکارهای زمین‌لرزه‌ای مختلفی را که به طور پراکنده در میان پهنهٔ برخورد قاره‌ای زاگرس و فرورانش اقیانوسی مکران وجود دارد، نشانهٔ این دانستند که سامانهٔ گسلی میناب – زندان – پالامی نمی‌تواند مانند یک گسله بزرگ‌مقیاس لیتوسفری میان این دو پهنه عمل می‌کند. این تفسیر از سامانهٔ گسلی در کار روگر و همکاران (۲۰۱۰) نیز به کار گرفته شد. پنی و همکاران (۲۰۱۵) نیز به دنبال رویداد زمین‌لرزهٔ ۲۱ اردیبهشت ۱۳۹۲ در منطقهٔ گوهران (معرفی شده با نام زمین‌لرزهٔ میناب با بزرگای گشتاوری ۶/۱) از این تفسیر بهره بردند و تلاش کردند دینامیک ایجاد این زمین‌لرزه را در ارتباط با تغییر هندسه ورقهٔ زیرراندهٔ عربی در گذر از زاگرس به مکران توضیح دهند. بر این اساس، تغییر در ماهیت ورقهٔ قاره‌ای ضخیم‌تر زیر زاگرس به ورقهٔ اقیانوسی نازک‌تر زیر مکران، در یک فاصلهٔ عرضی نزدیک به ۲۰۰ کیلومتر رخ می‌دهد؛ در این فاصله، ضخامت پوستهٔ ایران بر روی پی‌سنگ عربی برعکس تغییر می‌کند. این تغییر ضخامت سبب ایجاد گرادیان جابه‌جایی راست‌بر شمالی – جنوبی از غرب به شرق شده، عرض پهنهٔ گذار زاگرس – مکران را افزایش می‌دهد. هرچند، با توجه به پیچیدگی‌های زمین‌شناختی و ژئودینامیکی این بخش از مکران، به نظر می‌رسد استناد یک‌جانبه به اطلاعات زلزله‌شناسی نتواند رویداد این زمین‌لرزه را به درستی توضیح دهد. در ادامه، با ارائه اطلاعات و شواهد زمین‌شناختی به دست آمده در این پژوهش، این موضوع را با جزییات بیشتری بررسی خواهیم کرد.

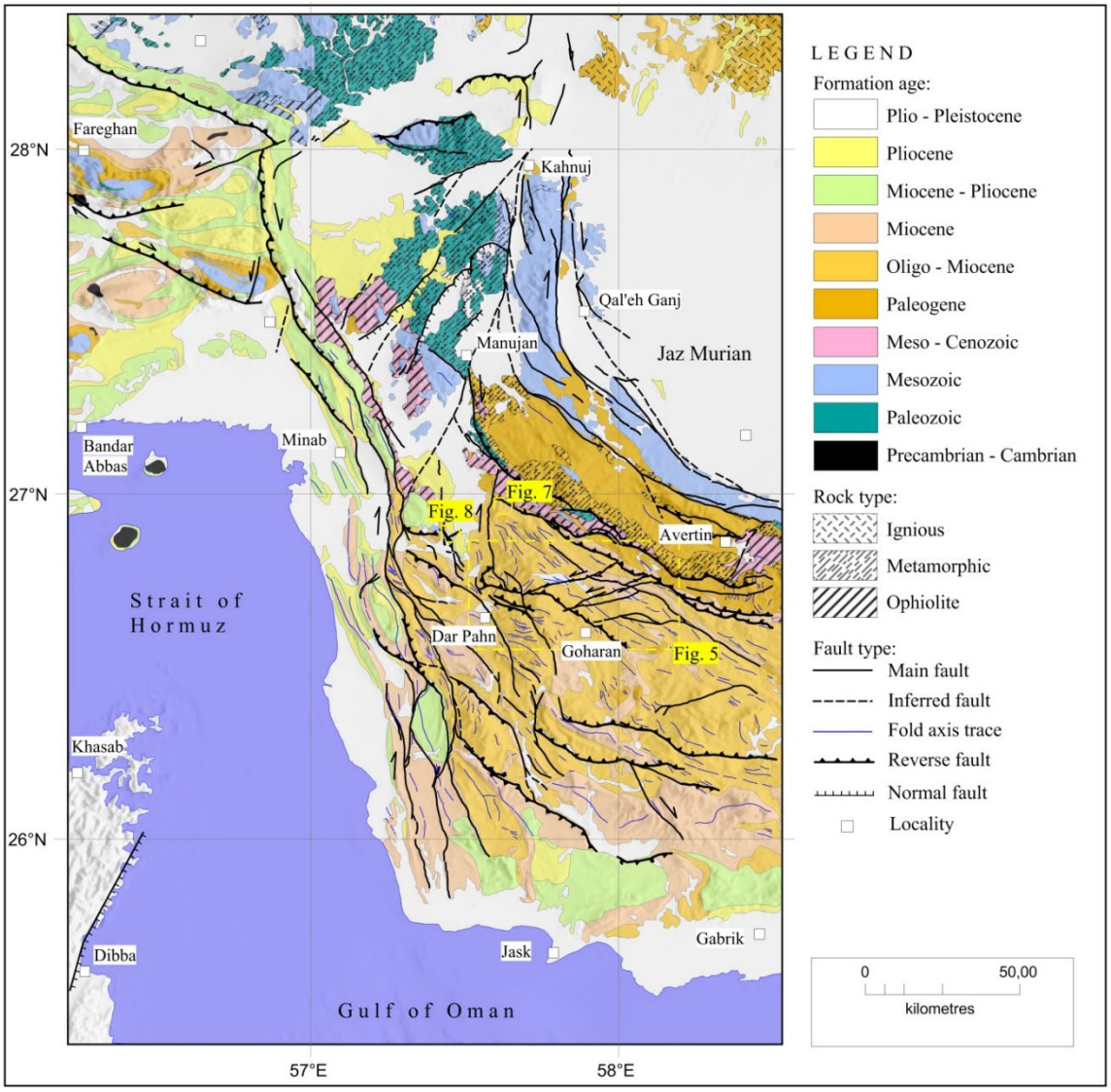
۳ روش تحقیق

ما در این پژوهش، الگوی گسلش کواترنری منطقه را با بهره‌گیری از تحلیل‌های دورسنجی تصاویر ماهواره‌ای و مدل‌های توپوگرافی رقومی و با استناد به مبانی زمین-شناسی ساختاری و شواهد زمین‌ریخت‌شناسی تهیه کرده‌ایم. به طور دقیق‌تر، رد سطحی گسله‌های کواترنری از روی شواهد ساختاری و زمین‌ریختی شناسایی شده و به نقشه درآمده است (شکل‌های ۳ تا ۵). این نقشه حاصل برهم نهی مجموعه‌ای از اطلاعات موجود در نقشه‌های زمین‌شناسی منطقه (میناب و طاهرویی) به مقیاس ۱: ۲۵۰,۰۰۰ (مورگان، ۱۹۸۲ و ۱۹۸۳) و رد سطحی گسله‌هایی است که با استناد به شواهد زمین‌شناختی و

ریخت‌زمین‌ساختی در این مطالعه شناسایی شده است. باید اشاره کرد که اطلاعات از پیش موجود در منابع مرتبط، نخست رقومی شده، بر روی تصویرهای ماهواره‌ای منطقه با قدرت تفکیک بالا (تصاویر بینگ در محیط SAS.Planet) پیاده شده و پس از تصحیح و بازنگری، در نقشه وارد شده است. برای تعیین سازوکار امروزی گسله‌ها نیز از نوع و سوی جابه‌جایی‌های جوان ایجاد شده در واحدها و لایه‌های زمین‌شناسی، زمین‌ریخت‌ها و سیماهای زمین‌ریختی مرتبط با گسلش استفاده شده است. از آنجایی که گسله‌های راستالغز چپ‌بر مجموعه ساختارهای چین‌خورده – گسلیدهٔ میوسن – پلیوسن مکران بیرونی را بریده‌اند، جابه‌جایی در نشانه‌های زمین‌شناسی نیز معرف سازوکار پس از پلیوسن این گسله‌هاست. به جرات می‌توان گفت زمان‌برترین بخش



شکل ۳. نقشه گسله‌های اصلی و پهنه‌بندی ساختاری غرب مکران. رد سطحی همهٔ گسله‌ها (از پیش موجود و نوشناخته) بر پایهٔ شواهد زمین‌شناسی ساختاری، زمین‌ساخت فعال و زمین‌ریخت‌شناسی از روی تصاویر ماهواره‌ای ترسیم شده است. به این روش، موقعیت گسله‌های از پیش موجود نیز تصحیح شده است. دایره‌های زرد رومرکز زمین‌لرزه‌های بزرگتر از ۴/۵ را برگرفته از فهرست دوباره مکان‌یابی شدهٔ ISC-EHB (http://www.isc.ac.uk/isc-ehb) و ستارهٔ قرمز رویداد اصلی زمین‌لرزه ۲۱ اردیبهشت ۱۳۹۲ گوهران را نشان می‌دهد. حروف بزرگ نام کوتاه‌شدهٔ ساختارهای اصلی است: "BT"، راندگی بشاگرد؛ "CKT"، راندگی چاه‌خان؛ "HZF"، گسلهٔ زاگرس بلند؛ "JSF"، گسلهٔ جیرفت – سبزواران؛ "MDP"، پهنهٔ گسله منوجان – درپهن؛ "MZP"، سامانهٔ گسلهٔ میناب – زندان – پالامی؛ "MZT"، راندگی اصلی زاگرس؛ "QGT"، راندگی قصرقند.



شکل ۴. نقشهٔ زمین‌شناسی ساختاری غرب مکران – جنوب‌شرق زاگرس. واحدهای زمین‌شناسی بر مبنای چهارگوش‌های زمین‌شناسی سری ۱:۲۵۰،۰۰۰ سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور است (مورگان، ۱۹۸۲ و ۱۹۸۳). گسله‌ها با شکل ۳ یکسان است. چهارگوش شکل‌های ۵، ۷ و ۸ با خط‌چین زرد نشان داده شده است.

این پژوهش، تهیه نقشه ساختاری بوده است. یکی از نکات بسیار مهمی که به آن توجه کرده‌ایم، روابط بریده شدن‌های ساختاری و ترتیب و توالی نسبی فعالیت ساختارهای زمین‌شناسی است. توجه به این روابط کمک کرده‌است تکامل ساختاری منطقه در نئوژن با دقت بیشتری بررسی شود و با استناد به آن بتوانیم الگوی گسلش کواترنری منطقه را توصیف کنیم. این مجموعه کارها این امکان را فراهم کرد تا برای نخستین بار یک نقشهٔ تکمیل و بازنگری شده از گسلش کواترنری منطقه ارائه شود. تلفیق مجموعه اطلاعات لرزه‌خیزی و زمین‌شناسی نیز توضیح الگوی ساختاری را در ارتباط با فعالیت زمین‌لرزه‌ای در این بخش از مکران غربی ممکن کرده است.

۴ زمین شناسی ساختاری و الگوی گسلش منطقه

تاکنون، ویژگی‌های ساختاری و روابط سنی ساختارهای زمین‌شناسی در غربی‌ترین بخش مکران به تفصیل بررسی و توصیف نشده است. کارهای پیشین یا بر مکران شمالی و شرق مکران (بخش ایرانی) متمرکز بوده (حقی‌پور و همکاران، ۲۰۱۲؛ بورگ و همکاران، ۲۰۱۳؛ بورگ، ۲۰۱۸)، یا به شناسایی سامانهٔ گسلهٔ میناب – زندان – پالامی معطوف شده است (روگر و همکاران، ۲۰۰۴ و ۲۰۱۰). نقشه تهیه شده از گسله‌ها و چین‌های منطقه (شکل‌های ۳ تا ۵)، نخستین نقشهٔ گسلش کواترنری برای این منطقه است که با تکیه بر روابط سنی، ساختاری و سازوکار امروزی گسله‌ها ارائه می‌شود. پهنه‌های ساختاری شش‌گانهٔ تعریف شده در شکل (۳) نیز بر تقسیم‌بندی کلی مکران (بورگ، ۲۰۱۸) و مشاهدات ما در این پژوهش استوار شده است. بر پایهٔ نقشهٔ گسلش کواترنری، چهار روند اصلی الگوی گسلش را در پهنه‌های ساختاری کنترل می‌کنند: (۱) روند ساختاری شمالی – جنوبی شامل محور چین‌ها و گسله‌هایی که به طور مشخص در پهنه‌های زندان – میناب، سبزواران و منوجان – درپهن چیرگی دارد (شکل ۳)، (۲) روند ساختاری شمال‌غرب – جنوب‌شرقی که سرتاسر پهنهٔ دورکان – رامشک (مکران شمالی) و در بخش‌هایی از پهنهٔ میناب– زندان دیده می‌شود، (۳) روند ساختاری شرق، شمال‌شرق – غرب، جنوب‌غربی که به طور مشخص چارچوب ساختاری ناحیه گوهران را می‌سازد (گوشهٔ شمال‌غربی پهنهٔ مکران بیرونی)، و (۴) روند شرقی – غربی که در بخش جنوب‌شرقی منطقه (مکران ساحلی) چیرگی دارد (شکل‌های ۳ و ۴). یکی از نکات جالب در نقشهٔ شکل (۴) کاهش تراکم ساختاری (چین‌ها و گسله‌ها) و پیرو آن، کاهش شدت دگریختی از نیمهٔ شمال‌غربی به جنوب‌شرق منطقه است. این تراکم ساختاری در تقاطع مجموعه گسله‌های چپ‌بر با گسله‌های راست‌بر پهنهٔ منوجان – درپهن به بیشینه مقدار خود می‌رسد.

۴-۱ چین‌خوردگی‌ها

چین‌خوردگی منطقه نیز در ارتباط با الگوهای گسلش چهارگانه در پهنهٔ ساختاری تغییر می‌کند (شکل‌های ۳ و ۴). در پهنه‌های شمارهٔ ۱ (میناب – زندان - پالامی) و شمارهٔ ۲ (منوجان – درپهن) مجموعه‌ای از طاقدیس و ناودیس‌های کم‌عرض (طول موج کوتاه) با طول میانگین ۵ کیلومتر و با اثر محوری خمیده و تاب‌خورده، در لابه‌لای گسله‌های راستالغز تا مورب‌لغز راست‌بر ایجاد شده‌اند و لایه‌های رسوبی میوسن – پلیوسن را چین داده‌اند. بیشتر این چین‌ها طول محوری ۳ کیلومتر دارند و به ندرت چین‌های درازی با طول محوری حدود ۱۰ کیلومتر در میان آنها دیده می‌شود (شکل ۴). این درحالی است که در غرب پهنهٔ ۱ (بخش ساحلی میناب) طول چین‌ها از ۲۰ تا ۳۰ کیلومتر تغییر می‌کند و چندان متحمل پیچش‌های ساختاری نشده‌اند. پهنهٔ شمارهٔ ۳ (مکران شمالی) میزبان کهن‌ترین ساختارهای منطقه از زمان مزوزوییک است و مجموعه‌ای از سنگ‌های رسوبی، آذرین و دگرگونی به همراه توالی‌های افیولیتی در یک مدت زمان طولانی و در طی فازهای مختلف زمین‌ساختی، با شدت زیاد دگریخت شده‌اند (بورگ، ۲۰۱۸)، طوری که راندگی‌های بزرگی مانند گسلهٔ بشاگرد مرز واحدهای سنگی را ساخته‌اند. تشخیص چین‌خوردگی‌های اولیه در چنین جایگاهی بسیار دشوار است.

ویژگی بارز چین‌خوردگی‌ها در پهنهٔ شمارهٔ ۴ (مکران بیرونی) حضور چین‌های موازی با حداقل پیچش‌های ساختاری است که طول اثر محوری آنها تا ۳۵ کیلومتر نیز می‌رسد. این ساختارها با روند عمومی شمال‌غرب – جنوب‌شرقی در میان دو پهنهٔ راندگی موازی ایجاد شده و مجموعه واحدهای رسوبی الیگوسن و میوسن نوار داخلی مکران را چین داده‌اند. نکتهٔ بارز در این پهنه، بریده شدن محور این چین‌های متوازی با دسته گسله‌های چپ‌بر است (منطقهٔ گوهران) بدون اینکه در آنها پیچش یا چرخش

ساختاری محسوسی ایجاد شود (شکل‌های ۴ و۵). تراکم این چین‌خوردگی به سوی جنوب‌شرق کاهش می‌یابد. پهنهٔ شمارهٔ ۵ که بخشی از مکران ساحلی است، دربرگیرنده واحدهای سنگی اواخر میوسن و پلیوسن است که بیشتر در قالب ناودیس‌های باز و جدای از هم چین خورده‌اند. روند این چین‌خوردگی که در دوران پلیوسن – کواترنری رخ داده، شرقی – غربی است و به طور مشخص با پهنه‌های دیگر متفاوت است.

۴-۲ الگوی ساختاری پهنه‌های چهارگانه

مشاهدات مشروح در بالا به طور خلاصه نشان می‌دهد بخش غربی منطقه (پهنه‌های شمارهٔ ۱ و ۲) از نظر ساختاری در کنترل گسله‌های اصلی شمالی – جنوبی با سازوکار اصلی راستالغز راست‌بر است که یک سامانهٔ گسلی مرتبط با هم را در یک‌سوم غربی منطقه می‌سازند. این مجموعه ناحیه‌ای به پهنای ۳۲ تا ۵۰ کیلومتر را متاثر کرده و برش فعال راستالغز راست‌بر در سرتاسر آن پخش شده است (شکل‌های ۳ و۴). با استناد به سن واحدهای زمین‌شناسی درگیر در دگریختی این ناحیه (شکل ۴)، زمان آغاز دگریختی در آن نمی‌تواند کهن‌تر از پلیوسن باشد. بیشتر چین‌ها به مرز بلوک‌های گسلی محدود می‌شوند و به جز مواردی انگشت‌شمار، نشانی از تشکیل مستقل چین‌ها و جابه‌جا شدن بعدی آنها با گسله‌های راستالغز راست‌بر دیده نمی‌شود. مطالعات روگر و همکاران (۲۰۰۵) نیز گویای همزمانی تشکیل چین‌ها و گسله‌ها در یک رژیم تنش فشارشی است که در پلیوسن – پلیستوسن به رژیم راستالغز امروزی تغییر کرده است.

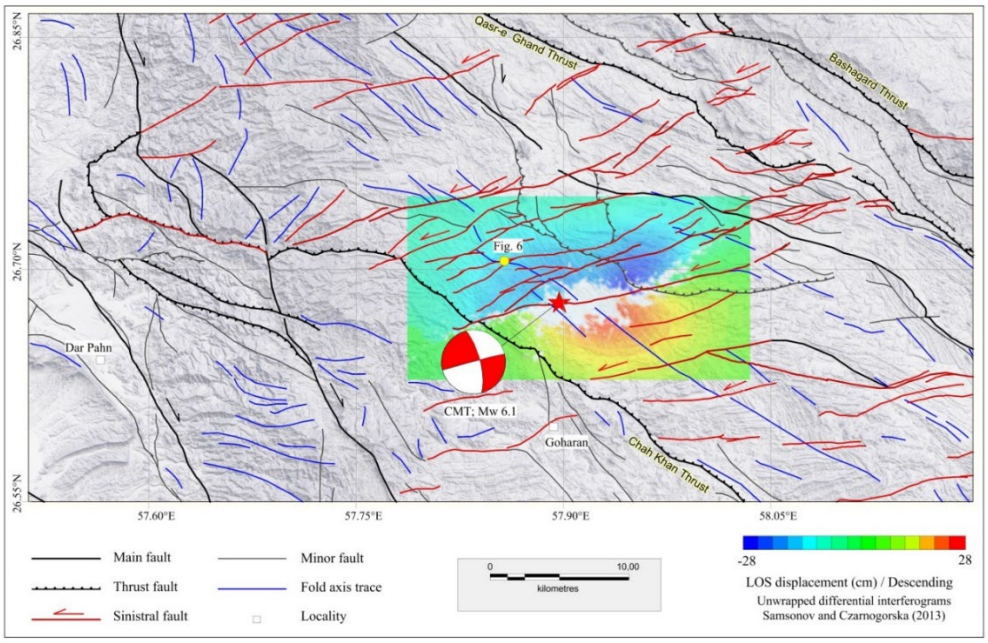
در برابر، بخش شمالی و شمال‌شرقی منطقه (پهنهٔ شمارهٔ ۳ در شکل ۳) با مجموعه ساختارهای به جای مانده از مراحل نخستین فرورانش مکران (کرتاسه پسین) کنترل می‌شود که بیشتر راندگی‌های بزرگ شمال‌غرب– جنوب‌شرقی هستند. این راندگی‌ها بارها در فازهای زمین‌ساختی پی‌درپی فعالیت کرده و آخرین‌بار در زمان میوسن پسین بازفعال شده‌اند (بورگ، ۲۰۱۸). آخرین فعالیت آنها سبب راندگی رو به جنوب واحدهای مکران شمالی بر روی واحدهای رسوبی با سن الیگوسن – میوسن شده و این فعالیت، همزمان با چین‌خوردگی‌های واحدهای رسوبی الیگوسن – میوسن پیشین ادامه داشته است. با استناد به راستای راندگی‌ها و روند محور چین‌های متوازی ایجاد شده در واحدهای رسوبی الیگوسن – میوسن پیشین مکران بیرونی، این الگوی ساختاری باید در اثر کارکرد یک فشارش بیشینه ناحیه‌ای شمال‌شرق – جنوب‌غربی باشد که از میانهٔ ائوسن به بعد رخ داده و با سوی شناخته شدهٔ همگرایی میان ایران و ورقهٔ عربی در هماهنگی‌است. گوشهٔ جنوب‌شرقی منطقه (پهنهٔ شمارهٔ ۵) تنها جایی است که در آن نشانه‌هایی از الگوی ساختاری مرتبط با فرورانش امروزی مکران را می‌توان دید. این بخش با ساختارهای جوان (پلیوسن – کواترنری) موازی با لبهٔ فرورانش فعال مکران ویژگی می‌یابد و کمترین تاثیر را از زمین‌ساخت پهنه‌های شمارهٔ ۱ و ۲ گرفته است (شکل ۳). سن تشکیل ساختارها نیز به وضوح در این بخش جوان‌ترین است و نشان از کارکرد یک کوتاه‌شدگی کلی نزدیک به شمالی – جنوبی دارد که از زمان پلیوسن – پلیستوسن برقرار است. روابط سنی مشابهی برای تشکیل مجموعه‌های ساختاری در بخش شرقی مکران ایران نیز گزارش شده است و به نظر می‌رسد کوتاه‌شدگی زمین‌ساختی (چین‌خوردگی - راندگی) از مکران داخلی تا ساحلی در سرتاسر گوه برافزایشی در بازهٔ زمانی ۲۵ تا ۴ میلیون سال پیش رخ داده باشد (بورگ و همکاران، ۲۰۱۳).

در این میان اگر بخواهیم الگوی ساختاری فعال در پهنهٔ زمین‌لرزه‌ای گوهران (پهنهٔ شمارهٔ ۴) را به طور خاص توصیف کنیم، باید پیش از هر چیزی، به تحولات ساختاری روی داده در آن بپردازیم که به طور مشخصی

سبب ایجاد تغییر در ساختار نخستین این منطقه شده است. در اینجا تنها به این نکته بسنده می‌کنیم که شالودهٔ ساختاری این پهنه همزمان با فعالیت‌های زمین‌ساختی زمان میوسن پسین تا پلیوسن تشکیل شده است. این فعالیت‌های زمین‌ساختی گسله‌های راندگی و چین‌های موازی با آن را در مکران بیرونی ایجاد کرده‌اند. اما این شالودهٔ ساختاری با حرکات زمین‌ساختی جوان‌تر پلیوسن – پلیستوسن متاثر شده و تغییرات مهمی در آن ایجاد شده است که در ادامه به آن می‌پردازیم.

۳-۴ سامانهٔ گسلی چپ‌بر کواترنری

سامانهٔ گسلی چپ‌بر کواترنری متشکل از ده‌ها گسلهٔ با شیب نزدیک به شاقولی است که با راستای عمومی $20^{\circ} \pm$ N060°E در بخش مرکزی منطقه (پهنهٔ شمارهٔ ۴) فراوانی ویژه‌ای دارند (شکل‌های ۴ و ۵). رد سطحی آنها به صورت بریدگی‌های بسیار خطی و بارز در توپوگرافی و بر روی تصویرهای ماهواره‌ای دیده می‌شود (شکل ۶). این گسله‌های چپ‌بر در جاهایی با گسله‌های راست‌بر شمالی – جنوبی (با تغییر راستای ۱۰ ± درجه) همراه‌اند و به عنوان گسله‌های هم‌یوغ (conjugate) فعالیت کرده‌اند (شکل ۷). طول شناخته شده گسله‌های چپ‌بر به ۳۷ کیلومتر می‌رسد و با طول میانگین ۱۵ کیلومتر نقش ساختاری مهم‌تر و بارزتری نسبت به گسله‌های هم‌یوغ راست‌بر (با بیشینه طول ۸ کیلومتر) در منطقه دارند (شکل‌های ۵ و ۷). این مجموعه گسله‌ها به قدری جوان هستند که مجموعه ساختارهای زمین‌شناسی



شکل ۵. نقشهٔ ساختارهای زمین‌شناسی (چین‌ها و گسله‌ها) منطقهٔ گوهران. رد سطحی گسله‌ها و سازوکار آنها و نیز روابط بریدگی میان گسله‌های راستالغز با راندگی‌ها و اثر محوری چین‌ها بر مبنای مشاهدات زمین‌شناختی و ریخت‌زمین‌ساختی تعیین شده است. رومرکز زمین‌لرزهٔ اصلی گوهران با ستارهٔ قرمز و حل سازوکار کانونی آن با توپک قرمز مشخص شده است. ناحیهٔ چهارگوش رنگی در پیرامون رومرکز زمین‌لرزه، میدان جابه‌جایی زمین‌لرزهٔ گوهران را در جهت خط‌دید ماهواره پایین‌گذر (سامسونوف و چارنوگورسکا، ۲۰۱۳) نشان می‌دهد که گویای لغزش چپ‌بر بر روی یکی از گسله‌های اصلی در پهنهٔ گسلی راستالغز نزدیک به شرقی – غربی شناخته شده است. پنی و همکاران (۲۰۱۵) بخش کوچکی از این گسله را به همراه شواهد گسیختگی سطحی زمین‌لرزه‌ای محدود آن گزارش کرده‌اند. تک‌دایرهٔ زرد جای شکل (۶) را نمایش می‌دهد. به روابط ساختاری این گسله‌های چپ‌بر با راندگی‌ها و گسله‌های راست‌بر توجه شود. آنچه به عنوان راندگی چاه‌خان نشان داده شده، شمالی‌ترین تکهٔ گسله این پهنهٔ راندگی در این بخش از مکران است. جابه‌جایی ساختاری در برخی نقاط تقاطع کوچک‌تر از چیزی است که در مقیاس نقشه دیده شود و ظاهر پیوسته به خود گرفته است.

(چین‌ها و گسله‌های راندگی میوسن – پلیوسن) و شبکهٔ زهکشی گسترش یافته در آنها را به صورت بسیار متمرکز و خطی بریده‌اند. این گسله‌ها در امتداد خود سبب جابه‌جایی‌های چند ده متری تا چند صد متری در لایه‌های سنگی، شبکهٔ زهکشی و زمین‌ریخت‌های کواترنری شده‌اند. مقدار جابه‌جایی انباشتی ثبت شده در واحدها و ساختارهای زمین‌شناسی با جابه‌جایی کل ایجاد شده در زمین‌ریخت‌ها و سیماهای پلیو-پلیستوسن برابر است که نشانگر شکل‌گیری این گسله‌ها و آغاز فعالیتشان در دورهٔ کواترنری است. این مجموعه جابه‌جایی‌ها و شواهد زمین‌ریختی در امتداد این گسله‌ها گویای سازوکار راستالغز محض آنهاست (شکل ۶) و هیچ نشانی از مولفهٔ حرکت شاقولی دیده نمی‌شود.

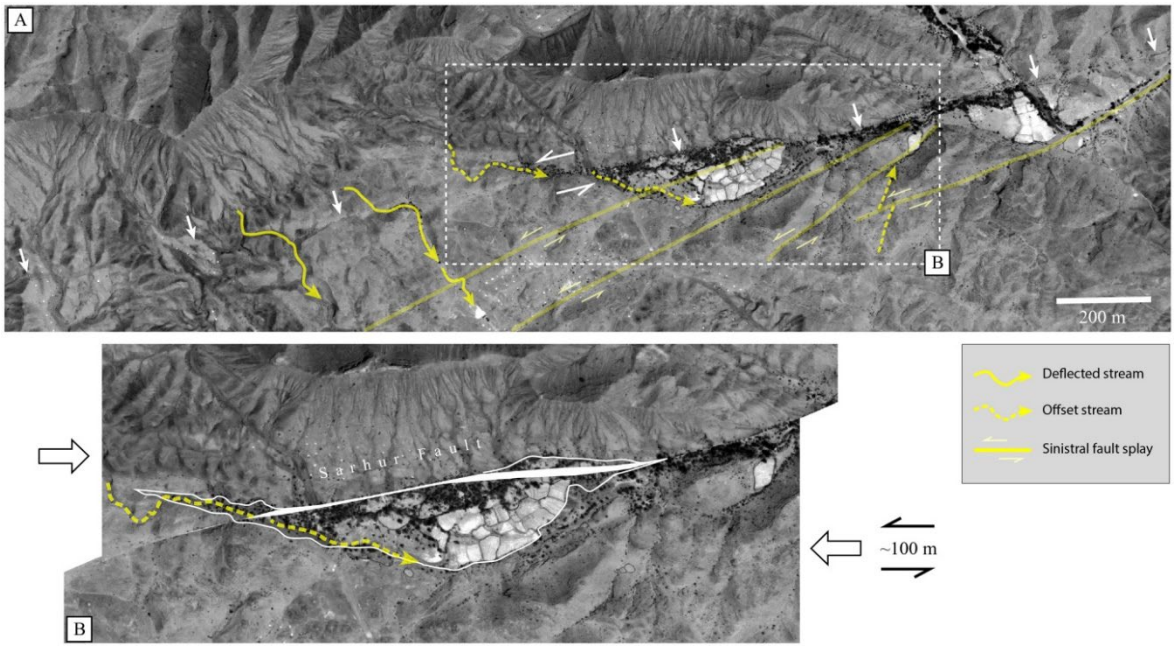
از نشانه‌های ساختاری بسیار بارز در اثبات جوانی این گسله‌ها بریده شدن گسله‌های راندگی مرزی با آنهاست. شکل (۵) نمونه‌هایی از این ارتباط و تقاطع ساختاری را نشان می‌دهد. گسلهٔ بشاگرد مرز مکران شمالی را با مکران داخلی، گسلهٔ قصرقند مرز مکران شمالی را با مکران بیرونی، و گسلهٔ چاه‌خان مرز مکران بیرونی را با مکران ساحلی شکل داده‌اند و از جمله ساختارهای مهم و اصلی در چهارچوب زمین‌ساختی این بخش از مکران به شمار می‌روند (شکل ۵). هر سه گسله در جاهایی با دسته گسله‌های راستالغز چپ‌بر یا راست‌بر هم‌یوغ آنها بریده و جابه‌جا شده‌اند (شکل ۵). این ارتباط ساختاری گویای این است که راندگی‌های بزرگ کهن منطقه در رژیم زمین‌ساختی امروزی فعالیت مستقلی ندارند و گسله‌های راستالغز به عنوان فعال‌ترین ساختارهای این منطقه، سبب تغییر بنیادین در الگوی ساختاری منطقه در دوران کواترنری شده‌اند.

نکتهٔ مهم دیگری که باید به آن اشاره کرد، ارتباط ساختاری مشخص گسله‌های راستالغز چپ‌بر با سامانهٔ گسلی میناب – زندان – پالامی و پهنهٔ گسلهٔ منوجان – درپهن است. به طور بسیار مشخصی، گسله‌های چپ‌بر در محدودهٔ تاثیر میناب – زندان – پالامی وجود ندارند و نقشی در دگریختی این بخش از منطقه بازی نمی‌کنند (شکل‌های ۳ و ۵). این گسله‌ها با رسیدن به پهنهٔ گسلهٔ منوجان – درپهن ناپدید شده، به بلوک غربی این پهنهٔ گسله وارد نمی‌شوند (شکل ۵). تنها نقطهٔ کلیدی که اندرکنش جنبشی – ساختاری این دو دسته گسله را نشان می‌دهد، در میانهٔ پهنهٔ گسلهٔ منوجان – درپهن است؛ در آنجا، بزرگترین شاخه گسلهٔ چپ‌بر با گسله‌های راست‌بر منوجان – درپهن تداخل کرده و یک گره ساختاری به نسبت پیچیده ایجاد کرده است (شکل ۵). این گسله‌ها مانند آنچه در فعالیت دسته گسله‌های هم‌یوغ رخ می‌دهد، یکدیگر را جابه‌جا کرده‌اند و در میان آنها ناحیه‌ای متشکل از گسله‌های فشاری با راستای شمال‌غرب – جنوب‌شرقی (شکل ۸) و چین‌های چرخیده با محورهای شمالی – جنوبی تا شمال‌شرق – جنوب‌غربی (عمود بر روند اصلی آنها) ایجاد شده است (شکل ۵ و ۹). این الگوی ساختاری نشانگر جای‌دهی یک کوتاه‌شدگی عمومی فعال در جهت نزدیک به شمال‌شرق – جنوب‌غربی است (شکل ۹) که به طور مشخصی با آنچه در مکران ساحلی و ناشی از فرورانش فعال مکران در جریان است (نزدیک به شمالی - جنوبی) تفاوت دارد.

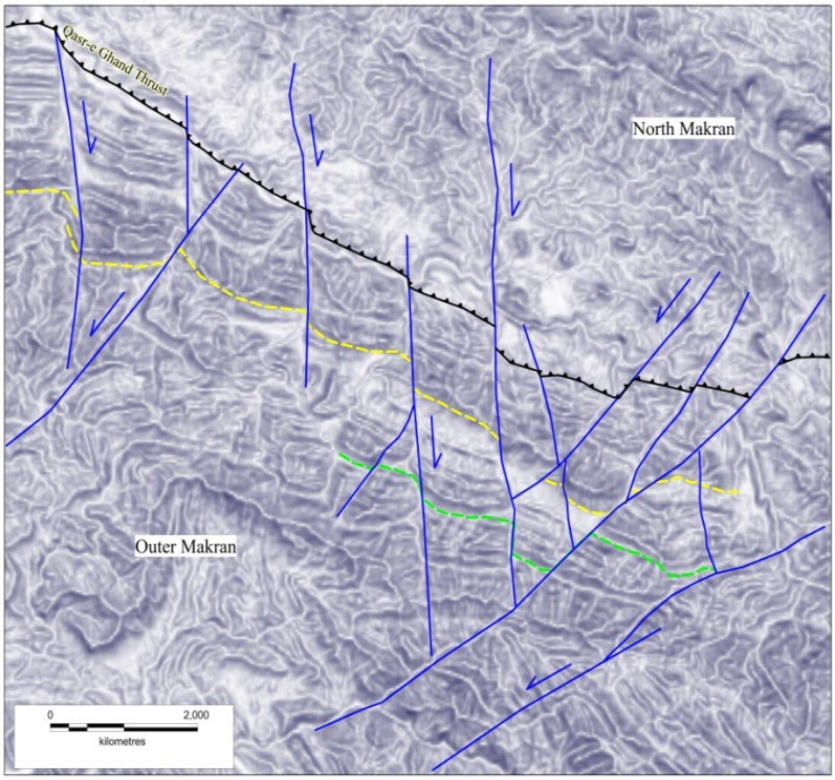
نمونه‌ای از فعالیت کواترنری راندگی‌های شمال‌غرب – جنوب‌شرقی در محدودهٔ اندرکنش روندهای راستالغز چپ‌بر و راست‌بر اصلی در شکل (۸) نشان داده شده است. این شکل نقشهٔ ریخت‌زمین‌ساختی ساده‌ای از گسلش کواترنری در پیرامون روستاهای شیوه‌ای و بنه‌کن است (شکل ۸) که ترتیب و توالی زمانی جالبی را از تکامل سیمای زمین‌ریختی و زمین‌ساخت کواترنری منطقه نمایش می‌دهد. در نگاه کلی، به جز لکه‌ها یا باریکه‌هایی از زمین‌های پیش از کواترنری، سرتاسر گستره با نهشته‌های کواترنری پوشیده شده و شبکهٔ زهکشی

گسترش یافته‌ای در آن ایجاد شده است. در گوشهٔ جنوب‌غربی شکل (۸)، گسله‌هایی دیده می‌شود که سطوح کواترنری مختلف را بریده و جابه‌جایی‌های پلکانی در سطوح مخروط‌افکنه‌ای ایجاد کرده‌اند. همهٔ این نشانه‌ها گویای فعالیت بارز این گسله‌های راندگی/واژگون در این بخش از منطقه است.

گسلهٔ راندگی اصلی در شرق شیوه‌ای، با شیب رو به شمال‌شرق، مجموعه‌ای از نهشته‌های مخروط‌افکنه‌ای کواترنری را که بر روی نهشته‌های پلیوسن نشسته‌اند، در فرادیوارهٔ خود برافراشته و بر روی باریکه‌ای از مخروط‌افکنه‌های جوان کواترنری در سمت جنوب غربی رانده است (گسلهٔ مرکزی در شکل ۸). این فرآیند منجر به ایجاد یک تپهٔ موازی با گسله راندگی در حدفاصل روستاهای شیوه‌ای و بنه‌کن شده است. کج‌شدگی رو به شمال شرق سطح کواترنری بالای این تپه سبب شده است بستر کهن آبراههٔ اصلی که از بنه‌کن به شمال‌غرب جریان داشته‌است، متروک شده (آبراهه متروک در شکل ۸) و بستر امروزی آن به پایین‌دست منتقل شود. از سوی دیگر، سرشاخه‌ای از رودخانهٔ اصلی که در عرض راندگی جریان دارد، با نفوذ در بستر آبراههٔ متروک، تا نقطهٔ "A" (شکل ۸) پیش رفته و همهٔ آبراهه‌های پیرامون بستر متروک را به سوی جنوب برگردانده است (پیکان‌های خمیدهٔ آبی در شکل ۹). در لبهٔ جنوب‌غربی تپه نیز (لبهٔ خط پرتگاه گسله) فرسایش پسگرا حوضه‌های زهکشی جوانی را در واحد پلیوسن ایجاد کرده است که با گسترش به بالادست پرتگاه، در حال خوردن تدریجی سطح کواترنری و آبراهه‌هایی است که پیش از کج‌شدگی زمین‌ساختی در سطح بالای تپه ایجاد شده‌اند.



شکل ۶. نمونه‌ای از نمود بارز گسله‌های چپ‌بر کواترنری در توپوگرافی و سیمای زمین‌ریختی منطقه. الف) سیمای عمومی ناحیهٔ برگزیده که رد گسلهٔ اصلی با پیکان‌های سفید و شاخه‌های آن با خط‌های زرد کم‌رنگ مشخص شده است. گسلهٔ اصلی مجموعه‌ای از سیماهای زمین‌ریختی را بریده است. لکه‌های روشن در تصویر، فروافتادگی‌های کششی کواترنری را نشان می‌دهند که در گوشهٔ گوه‌های گسلی چپ‌بر در تقاطع شاخه‌ها با گسلهٔ اصلی پدید آمده‌اند و به باغ و کرت‌های کشاورزی تبدیل شده‌اند. ب) بازسازی جابه‌جایی نزدیک به ۱۰۰ متری یکی از این حوضه‌های کواترنری و آبراههٔ ورودی آن را نشان می‌دهد که با گسلهٔ اصلی جابه‌جا شده است. پیدایش این حوضه‌ها به همراه جابه‌جایی‌های ایجاد شده در مرز آنها و آبراهه‌ها نشاندهندهٔ فعالیت بارز گسله‌های چپ‌بر در کواترنری است.



شکل ۷. نقشهٔ ساختاری ساده از گسله های هم‌یوغ راست‌بر و چپ‌بر کواترنری که مرز راندگی مکران شمالی و مکران بیرونی (انتهای غربی راندگی قصرقند؛ خط سیاه با دندانه‌های رو به شیب آن) را جابه‌جا کرده‌اند. روابط بریدگی کاملا واقعی است؛ مرز گسلهٔ راندگی و لایه‌بندی (خط‌چین‌ها) بر اساس موقعیت آنها بر روی تصویر ماهواره‌ای کشیده شده و بر مدل ارتفاعی رقومی (SRTM-V3 slope shaded) پیاده شده است. موقعیت در شکل (۴) نشان داده شده است.

محل اندرکنش این دو رژیم زهکشی با دایره‌های زرد در شکل ۸ (نقاط رودگیری) مشخص شده است. این سیماهای زمین‌ریختی، به طور مشخص، بازفعال شدن این راندگی‌ها را در کواترنری و پس از یک آرامش زمین‌ساختی نسبی، نشان می‌دهد. ما این دست از مشاهدات را در منطقه تنها پیرامون راندگی‌هایی دیده‌ایم که یا در ارتباط ساختاری با گسله‌های راستالغز چپ‌بر هستند یا در محدودهٔ اندرکنش ساختاری آنها با پهنهٔ منوجان – درپهن قرار دارند (شکل ۹).

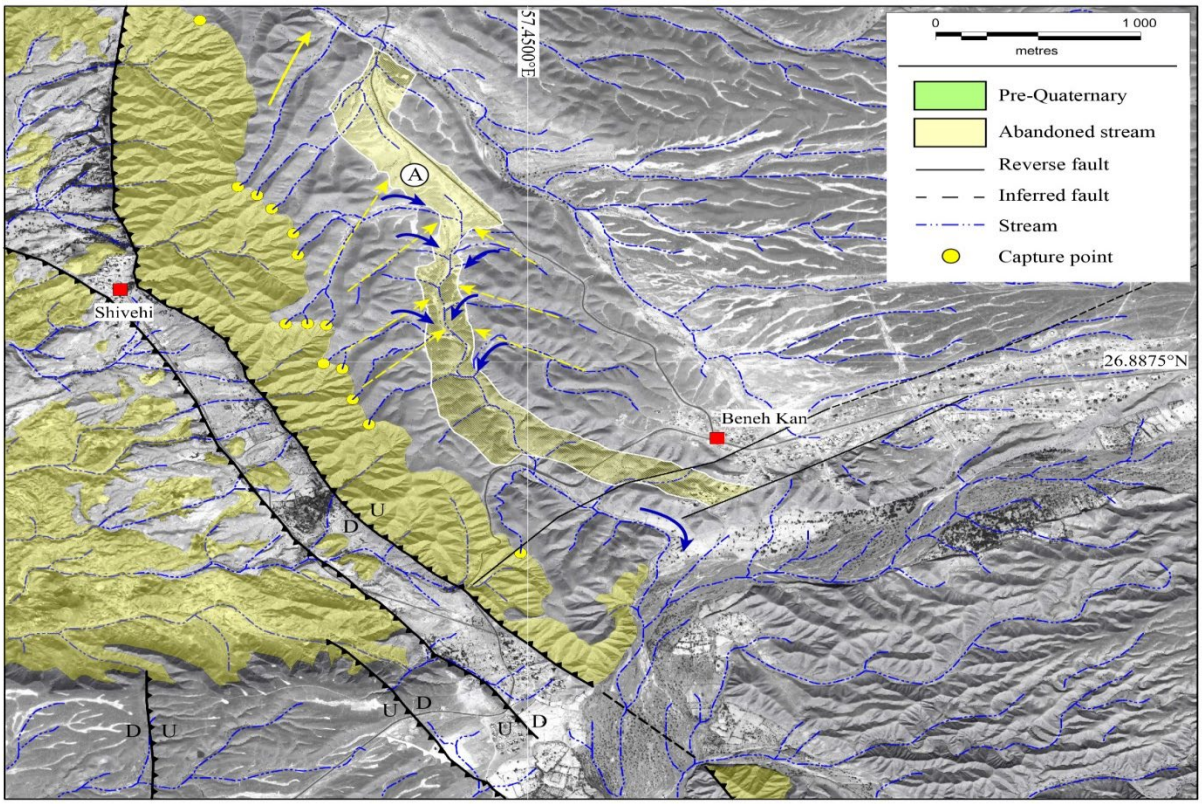
۵ بحث و تحلیل مشاهدات

۵-۱ جایگاه زمین‌ساختی و نقش ساختاری گسله‌های چپ‌بر در گوهٔ برافزایشی مکران

بررسی نقش گسله‌های چپ‌بر منطقهٔ گوهران بدون در نظر گرفتن بخش‌های دیگر گوهٔ مکران چندان واقعی نخواهد بود. برای درک بهتر اهمیت ساختاری این گسله‌ها و توضیح نقش آنها در جای‌دهی دگریختی فعال مکران، به بررسی کوتاهی دربارهٔ ساختارهای مشابه در جاهای دیگر مکران خواهیم پرداخت. بارزترین نمود گسله‌های راستالغز چپ‌بر کواترنری در سرتاسر مکران در حدفاصل بنت تا قصرقند (شمال چابهار) دیده می‌شود که همراه با دسته گسله‌های راست‌بر هم‌یوغ، هرچند با اهمیت ساختاری کمتر، مجموعه ساختاری مکران شمالی و مکران داخلی را دگرشکل کرده‌اند

توصیف و نقشهٔ کاملی از این گسله‌ها در کار بورگ و همکاران (بورگ و همکاران، ۲۰۱۳) ارائه شده است. در آنجا، گسله‌های چپ‌بر راستای شمال‌شرق – جنوب‌غربی

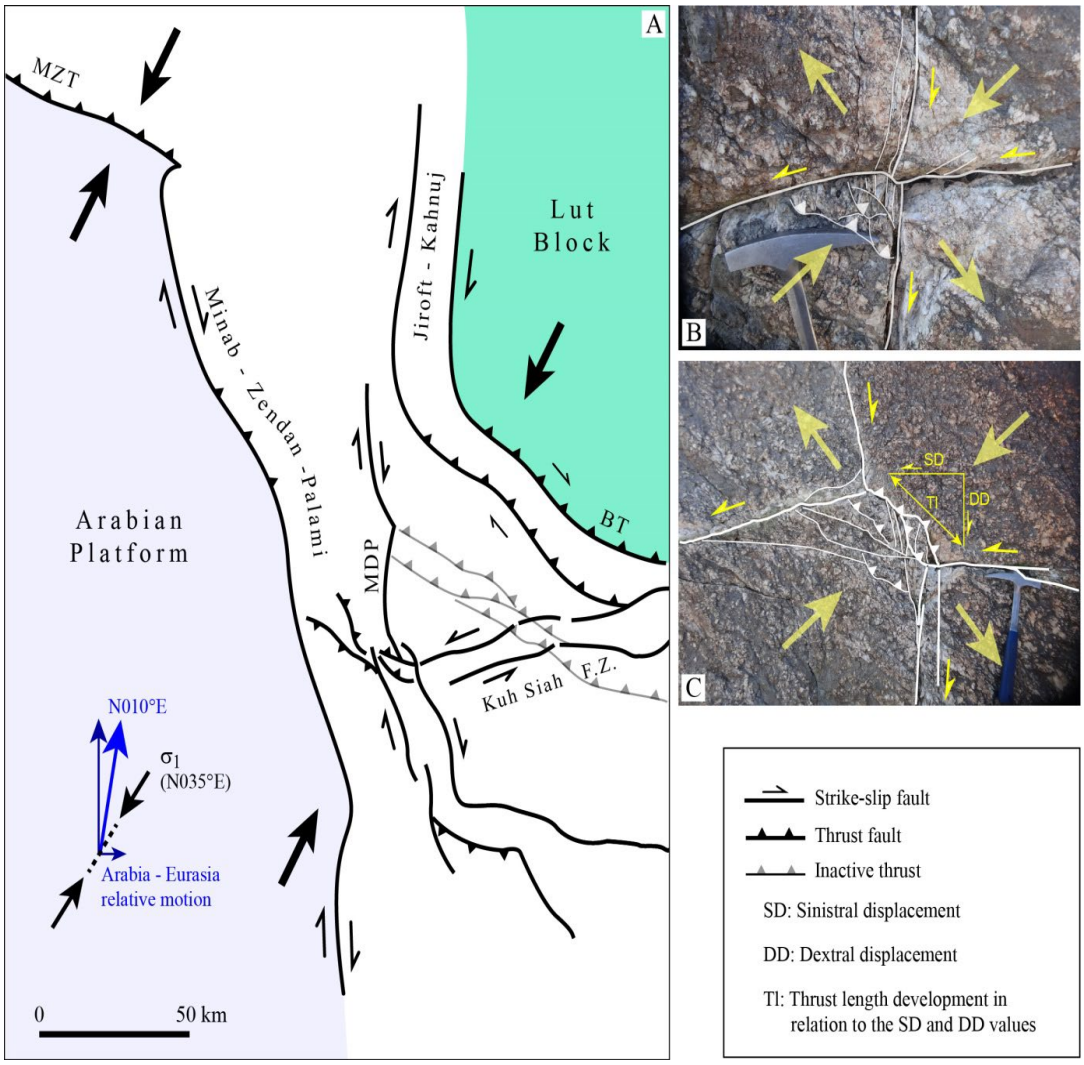
(میانگین ۴۵ درجهٔ شرقی) دارند و با تراکم، طول و مقدار جابه‌جایی کل بیشتری نسبت به گسله‌های مشابه در ناحیهٔ گوهران گسترش یافته‌اند. میانگین طول آنها نزدیک به ۳۰ کیلومتر است اما بیشینه طول در برخی پهنه‌های گسلی به ۸۰ کیلومتر می‌رسد. اصلی‌ترین پهنهٔ گسلهٔ چپ‌بر در این بخش مرز جنوب‌شرقی هامون جازموریان را دربرگرفته و



شکل ۸. نقشهٔ ریخت‌زمین‌ساختی راندگی‌های شمال‌غرب – جنوب‌شرقی پیرامون ناحیهٔ اندرکنش گسله‌های راستالغز چپ‌بر و راست‌بر هم‌بوغ. خط‌های سیاه گسله‌های اصلی هستند که واحدهای آبرفتی کواترنری را بریده و جابه‌جا کرده‌اند؛ دندانه‌ها سوی شیب گسله‌های راندگی را مشخص می‌کند. حرف "D" فرودیوارهٔ پایین افتاده و حرف "U" فرادیواره بالا آمده را نشان می‌دهد. نواحی زرد رنگ شفاف رسوبات و سنگ‌های پیش از کواترنری (بیشتر پلیوسن و لکه‌هایی از واحدهای سنگی کهن‌تر) است. گسله‌های راندگی در کواترنری بازفعال شده و با فرآیش مجموعه‌ای از نهشته‌های کواترنری – پلیوسن سامانهٔ زهکشی پلیستوسن را به‌هم ریخته‌اند. پیکان‌های خط‌چین بلند به رنگ زرد مسیر آبراهه‌ها را به درون بستر قبلی رودخانهٔ بنه‌کن (ناحیهٔ محاط شده با خط سفید) پیش از این به‌هم ریختگی (به سوی شمال)، و پیکان‌های خمیدهٔ آبی رنگ تغییر مسیر بعدی آنها را پس از فرآیند رودگیری به سوی جنوب نشان می‌دهند. "A" جایی است که تعادل کنونی میان فرسایش پسگرای لبهٔ شمالی و رودگیری از سوی جنوب برقرار است.

با طول مجموع بیش از ۱۲۰ کیلومتر از جنوب ایرانشهر تا بنت قابل پیگیری است (شکل ۱۰). ما نامی برای این پهنهٔ گسله نمی‌شناسیم، از این‌رو آن را پهنهٔ گسلهٔ تنگ سُرحه نامیده‌ایم. مقدار جابه‌جایی زمین‌شناسی قابل مشاهده در راستای این پهنهٔ گسله در واحدهای قدیمی‌تر مکران شمالی و مکران داخلی (بیش از ۱۰ کیلومتر) بسیار بیشتر از مقدار جابه‌جایی‌هایی است که همین پهنه در راندگی‌های کهورکان – قصرقند (به عنوان مرز مکران داخلی با مکران بیرونی) ایجاد کرده‌است. با توجه به اینکه آخرین فعالیت این گسله‌های راندگی میوسن پسین – پلیوسن بوده است (بورگ، ۲۰۱۸)، این اختلاف در اندازهٔ جابه‌جایی کل نشان می‌دهد که پهنهٔ تنگ سرحه از دیرباز

(دست کم از پس از تشکیل مکران شمالی و داخلی؛ اوایل میوسن) در شکل‌گیری هندسه و چهاچوب ساختاری این بخش از گوه فرورانشی مکران نقش داشته است و به عنوان بخشی از مرز زمین‌ساختی جنوب جازموریان فعالیت داشته است. واقعیتی که در تغییر الگوی ساختارها از شرق به غرب در عرض پهنهٔ گسله تنگ سرحه می‌توان اشاره کرد، تغییر قابل توجه در پهنای نوارهای مکران شمالی و داخلی است که در میان گسله‌های راندگی اصلی مکران شکل گرفته‌اند.



شکل ۹. مدل ساختاری منطقه با تکیه بر مشاهدات ساختاری ارائه شده در متن. (A) مجموعه گسله‌های هم‌یوغ چپ‌بر (پهنهٔ کوه‌سیاه) و راست‌بر (پهنهٔ منوجان – درپهن) با بازفعال‌کردن بخش‌هایی از راندگی‌های مرزی یا ایجاد راندگی‌های فرعی جدید در ناحیهٔ اندرکنش ساختاری خود، بخشی از کوتاه‌شدگی میان بلوک لوت و سکوی عربی را در جهت شمال، شمال‌شرقی جذب کرده، بخش مهمی از آن را به مجموعهٔ ساختاری شمالی (سامانهٔ جیرفت – کهنوج – سبزواران) منتقل می‌کنند. این فرآیند، انتقال دگرریختی فعال را در نبود ارتباط ساختاری مستقیم میان سامانه‌های میناب – زندان – پالامی و جیرفت – سبزواران ممکن می‌کند. راندگی‌های بازفعال‌شده در کواترنری به رنگ سیاه و راندگی‌های نافعال در کواترنری به رنگ خاکستری هستند. (B) نمونهٔ واقعی از مرحلهٔ آغازین شکل‌گیری ناحیهٔ اندرکنش میان گسله‌های راستالغز متقاطع (چکش زمین‌شناسی مقیاس است). (C) مرحلهٔ تکامل یافتهٔ ناحیهٔ اندرکنش میان گسله‌های راستالغز؛ افزایش جابه‌جایی‌های راستالغز (SD) و (DD) گسترش پهنهٔ راندگی میانی (Tl) و انتقال هرچه بیشتر جابه‌جایی را در مرزهای راستالغز به همراه دارد.

(شکل ۱۰). برای نمونه، پهنای مکران داخلی از ۸۰ کیلومتر در شرق گسله، به میانگین ۱۵ کیلومتر در غرب گسله می‌رسد و در نزدیکی طول جغرافیایی ۵۸ درجهٔ شرقی در منطقهٔ گوهران به کلی ناپدید می‌شود (شکل ۱۰). از سوی دیگر، نوار مکران شمالی که به عنوان مانعی در پشت گوهٔ برافزایشی تعریف می‌شود (بورگ، ۲۰۱۸) در غرب گسله پهن‌تر است و ساختار بسیار پیچیده‌تر و متکامل‌تری دارد. با وجود این تغییرات در مرز شمالی، مرز جنوبی نوار مکران داخلی (پهنهٔ راندگی کهورکان – قصرقند) از این الگو پیروی نمی‌کند و با چشم‌پوشی از جابه‌جایی‌های چپ‌بر کوچک‌تری که در دورهٔ کواترنری در آن ایجاد شده‌است، در مقیاس کلی به طور پیوسته از شرق به غرب ادامه دارد (شکل ۱۰). این تغییرات ساختاری را می‌توان با نقش کلیدی پهنهٔ گسلهٔ چپ‌بر تنگ سرحه توضیح داد. در واقع، این گسله در زمان‌های پیش از کواترنری به عنوان یک گسلهٔ انتقالی (transfer fault) نقش انتقال جابه‌جایی را از شمال‌شرق به راندگی‌ها و چین‌های شرقی – غربی در لبهٔ راندگی مکران شمالی (در جنوب‌غرب گسله) برعهده داشته است (شکل ۱۰). این انتقال جابه‌جایی سبب گسترش راندگی‌های مکران شمالی در غرب پهنهٔ گسلهٔ چپ‌بر تنگ سرحه شده و حذف زمین‌ساختی بخش زیادی از نوار مکران داخلی را به همراه داشته است. گسله‌هایی با این کارکرد، همزمان با رویداد چین‌خوردگی – راندگی قدیمی‌تری که ساختار نخستین گوهٔ برافزایشی مکران را شکل داده است، فعالیت داشته‌اند.

با این شرح، روند باریک‌شدگی و در نهایت، حذف نوار مکران داخلی را به سوی غرب شاید بتوان به عنوان کلیدی در توضیح نقش گسله‌های چپ‌بر مکران به کار برد. با نگاه دقیق‌تری بر روی نقشه‌های موجود (برای نمونه در شکل ۴ مقالهٔ بورگ، ۲۰۱۸) و حتی تصویر ماهواره‌ای منطقه، نوار مکران شمالی و مرز جنوبی آن (پهنهٔ راندگی بشاگرد) دوباره در طول جغرافیایی ۵۸/۳۸ درجهٔ شرقی، حدود ۱۲۰ کیلومتر غرب پهنهٔ گسلهٔ تنگ سرحه، نزدیک به ۲۰ کیلومتر رو به جنوب‌غرب جابه‌جا می‌شود (شکل ۱۰). اما در همین موقعیت، مرز جنوبی مکران داخلی دستخوش تغییر زیادی نشده و پیشروی راندگی رو به جنوب‌غرب نوار مکران شمالی بر روی آن سبب حذف کامل این نوار در منطقهٔ گوهران شده است (شکل ۱۰). نکتهٔ کلیدی اینجاست که این پلهٔ ساختاری درست جایی است که دسته گسله‌های چپ‌بر کواترنری منطقه گوهران پدیدار می‌شوند (شکل‌های ۴ و ۹)، طوری که فراوانی این گسله‌های چپ‌بر در شرق این پله به ناگهان کاهش یافته و ناپدید می‌شوند. هم‌خوانی مکانی این پله‌های ساختاری در لبهٔ مکران شمالی که در اثر کوچ و گسترش رو به جنوب‌غرب راندگی‌ها در امتداد پهنه‌های انتقالی چپ‌بر ایجاد شده‌اند، و بازفعال شدن گسله‌های چپ‌بر کواترنری در جنوب آنها اتفاقی نیست و ارتباط تنگاتنگ دینامیکی و جنبشی این دو مجموعهٔ ساختاری را نشان می‌دهد.

به طور خلاصه، مجموعه مشاهدات و اطلاعات ارائه شده در این پژوهش دربارهٔ الگو، سن فعالیت و جایگاه ساختاری دسته گسله‌های چپ‌بر (با راستای شمال‌شرق – جنوب‌غربی در شرق مکران تا شرق، شمال‌شرق – غرب، جنوب‌غربی در منطقهٔ گوهران) گویای این است که این روندهای گسلی ساختارهای مهم پوسته‌ای هستند که از نخستین مراحل شکل‌گیری گوهٔ برافزایشی مکران (در غرب طول جغرافیایی ۶۱ درجه) فعالیت داشته‌اند. بخش اصلی فعالیت این روندها، با استناد به مقدار دگرریختی برشی در امتداد آنها و سن چینه‌شناختی تغییرات ایجادکرده در ساختار گوه، مربوط به رویدادهای زمین‌ساختی زمان میوسن (بورگ و همکاران، ۲۰۱۳) بوده است. نبود نشانه‌های فعالیت در امتداد این روندها در دورانی که نوارهای مکران بیرونی و ساحلی شکل می‌گرفته‌اند (میوسن پایانی – اوایل پلیوسن) نشان می‌دهد

که گسترش رو به جنوب گوهٔ برافزایشی در این دوران (تشکیل راندگی‌های چاه‌خان و جنوب آن) به سبک پوست‌نازک (thin-skinned) اتفاق افتاده و ساختارهای پوسته‌ای چپ‌بر در تشکیل آنها نقشی نداشته‌اند. این رویداد را بیشتر در ارتباط با انباشت ناگهانی حجم زیادی از مواد آواری حاصل از ریزش‌های گرانشی درمکران شمالی و داخلی می‌توان دانست (نهشته شدن واحد الیستوستروم؛ بورگ و همکاران، ۲۰۱۳) که با تغییر ناگهانی توزیع جرم در بخش‌های شمالی، سبب کوچ مکانیکی راندگی‌ها به جنوب شده‌است (اسمیت و همکاران، ۲۰۱۰). تا اینکه در زمان کواترنری، به دلیل افزایش استرین در بخش‌های شمالی‌تر گوه برافزایشی، دوباره ساختارهای پوسته‌ای به سبک پوست‌کلفت (thick-skinned) درگیر جای‌دهی کوتاه‌شدگی کلی شده و با بریدن و جابه‌جا کردن مجموعه ساختارهای قبلی شامل راندگی‌ها و چین‌خوردگی‌های میوسن – پلیوسن، الگوی ساختاری منطقه را در جاهایی که حضور داشته‌اند در کنترل خود گرفته‌اند. در منظر امروزی منطقه، این گسله‌های چپ‌بر در ناحیهٔ گوهران وارد مکران بیرونی نیز شده‌اند؛ مرزهای راندگی آن را بریده، آنها را جابه‌جا کرده و برخی از تکه‌های راندگی را در زمان کواترنری بازفعال کرده‌اند (نمونه‌هایی مانند آنچه در شکل ۸ نشان داده شده است). اما چون فعالیت گسله‌های چپ‌بر در این ناحیه بسیار جوان است (کواترنری) و پس از تشکیل نوار مکران بیرونی و مرزهای راندگی آن رخ داده‌است، این فرآیند نتوانسته تغییر چشم‌گیری در هندسهٔ این مرزها در مقیاس منطقه‌ای (مانند آنچه در مکران داخلی دیده می‌شود) ایجاد کند. امروزه، گسله‌های چپ‌بر در اندرکنش با گسله‌های راست‌بر نزدیک به شمالی – جنوبی، در قالب جفت گسله‌های هم‌یوغ کواترنری، نقش جای‌دهی کوتاه‌شدگی منطقه‌ای گوه برافزایشی را در پاسخ به همگرایی شمال، شمال شرقی ورقهٔ عربی در برابر بلوک لوت بر عهده دارند.

۵-۲ مدل زمین‌ساختی پیشنهادی

در توضیح پیدایش و فعالیت امروزی گسله‌های گسله‌های راستالغز چپ‌بر منطقهٔ گوهران، پنی و همکاران (۲۰۱۵) فعالیت زمین‌لرزه‌ای آنها را ناشی از چرخش ساعت‌گرد آنها به دور محورهای شاقولی در میان پهنهٔ برش سامانهٔ گسلهٔ میناب – زندان – پالامی تفسیر کرده‌اند. طبق مدل پیشنهادی آنها، گسله‌های راستالغز چپ‌بر ساختارهای فرعی و ثانویه هستند که در یک پهنهٔ برشی راست‌بر شمالی – جنوبی اصلی محصور شده و پیرو حرکت راست‌بر آنها، می‌چرخند؛ این چرخش ساعت‌گرد سبب لغزش چپ‌بر در مرز باریکه‌های گسلی در حال چرخش می‌شود. اما مشاهدات ما نشان داد که (۱) گسله‌های راستالغز چپ‌بر ساختارهای فرعی نیستند و در واقع، از دیرباز یکی از عناصر ساختاری اصلی در شکل‌گیری گوه برافزایشی مکران بوده و مرزهای راندگی اصلی را کنترل یا جابه‌جا کرده‌اند، (۲) این گسله‌ها نه تنها ارتباط جنبشی مستقیمی با سامانهٔ راست‌بر میناب – زندان – پالامی ندارند، بلکه به روشنی دور و بیرون از این پهنهٔ برش میان قاره‌ای شکل گرفته‌اند. در این صورت، پهنهٔ برش راست‌بری وجود ندارد که گسله‌های راستالغز چپ‌بر در آن بچرخند، و (۳) این گسله‌ها در تاریخ تکامل خود چرخش ساختاری قابل مشاهده‌ای متحمل نشده‌اند؛ چرا که در صورت درستی فرضیهٔ چرخش ساعت‌گرد، محور چین‌های متوازی که با این گسله‌ها بریده شده و کهن‌تر از آنها هستند بایستی متحمل این چرخش می‌شدند. حال آنکه، تغییری در هندسه آنها درون و بیرون پهنهٔ متاثر از گسله‌های چپ‌بر رخ نداده‌است (شکل ۵).

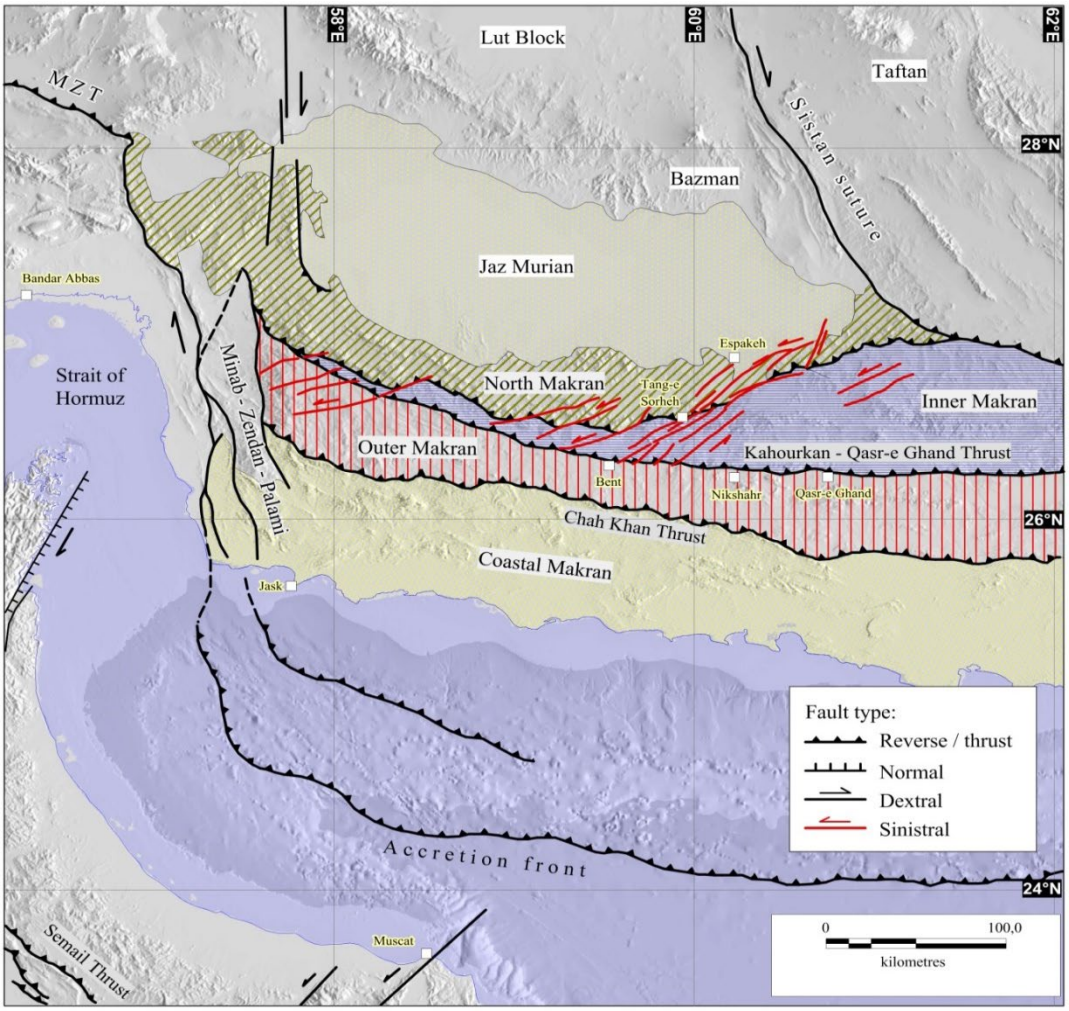
با این شرح، باید پذیرفت که دگرریختی جای‌داده شده در پهنهٔ تاثیر گسله‌های راستالغز چپ‌بر در مقیاس زمانی –

مکانی تشکیل و تکامل گوه رخ داده است و اهمیت بسیار بیشتری از جای‌دهی دگریختی درونی گوه دارد. در واقع، این گسله‌ها به همراه دسته گسله‌های راست‌بر هم‌یوغ خود، از جمله پهنهٔ گسلهٔ منوجان – درپهن، بخش مهمی از کوتاه‌شدگی میان‌ورقه‌ای را در قالب حرکات راستالغز محض جبران می‌کنند. این مجموعهٔ ساختاری درست در زیر گوشهٔ جنوب‌غربی بلوک لوت قرار دارد (شکل ۹)؛ یعنی جایی که برش راست‌بر میان‌ورقه‌ای در راستای سامانهٔ میناب – زندان – پالامی باید بدون ارتباط ساختاری مستقیم به گسله‌های قلعه گنج و جیرفت – کهنوج در شمال منتقل شود (شکل‌های ۹ و ۱۰). چنین سازوکاری برای انتقال دگریختی در ایران مرکزی به عنوان فرآیند اصلی انتقال دگرشکلی مستند شده است (بنی‌آدم و همکاران، ۲۰۱۹). مطابق این سازوکار که "فرآیند محصورسازی گوشه‌ها" نامیده شده است، همگرایی میان سکوی عربی – بلوک لوت (در جهت نزدیک به ۲۰ درجهٔ شرقی) به طور اصلی با برش راست‌بر در راستای شمالی – جنوبی جای داده می‌شود و در این فرآیند قلمروهای زمین‌ساختی جنوبی به سوی شمال جابه‌جا می‌شوند. کوتاه‌شدگی در لبه‌های متقابل بلوک‌های پوسته‌ای (بلوک لوت – سکوی عربی در شکل ۹) با رشد گسله‌های فشاری (راندگی / واژگون) در گوشه‌های فشرده شده میان گسله‌های راستالغز هم‌یوغ یا عمود برهم (crosswise) با سازوکار چپ‌بر (پهنهٔ کوه سیاه در شکل ۹) و راست‌بر (پهنهٔ منوجان – درپهن در شکل ۹) محض جبران می‌شود. این گسله‌های فشاری، عمود بر روند بیشینه فشارش افقی ناشی از همگرایی (پیکان‌های سیاه بزرگ در شکل ۹) رشد می‌کنند، در حالی که گسله‌های راستالغز محض پیرامون آنها (محصورکنندهٔ گوشه‌ها) جابه‌جایی و انتقال بلوک‌های پوسته‌ای را به سوی شمال بر عهده دارند. هر چه این فرآیند پیشرفته‌تر شود، اندازهٔ جابه‌جایی‌های انباشتی در راستای گسله‌های راستالغز بیشتر خواهد شد و پهنهٔ گسله‌های راندگی برای جذب هر چه بیشتر کوتاه‌شدگی، بیشتر رشد می‌کنند. چنین اندرکنش هندسی – جنبشی میان ساختارها، همگرایی مورب را در مقیاس منطقه‌ای بدون نیاز به چرخش بلوک‌های گسلی به دور محورهای شاقولی و بدون حضور پهنه‌های چین‌خورده – راندهٔ بزرگ جای می‌دهد.

۵-۳ کاربرد نتایج در توصیف الگوی دگریختی زمین‌لرزه‌ای گوه برافزایشی مکران

یکی از هدف‌های اصلی مطالعات زمین‌ساخت فعال در یک منطقه، رسیدن به الگویی است که بتواند سازوکار و هندسه ساختاری دگریختی زمین‌لرزه‌ای را توضیح دهد تا با استناد به آن بتوان برآورد نزدیک به واقع‌تری از خطر زمین‌لرزه – گسلش در آن منطقه ارائه کرد. این مسئله در مناطقی مانند مکران اهمیت دوچندانی می‌یابد؛ چرا که گوه‌های برافزایشی به طور معمول دربرگیرنده مجموعه ساختارهای بی‌ریشه‌ای هستند که از انباشت دوره‌ای و پی‌درپی باریکه‌های راندگی تراشیده شده از روی ورقهٔ اقیانوسی فرورونده و الحاق شدن آنها به لبهٔ قارهٔ سوار ساخته شده‌اند. در چنین جایگاهی، شرایط رئولوژیک (رفتار جریانی مواد) و زمین‌شناسی (نبود پی‌سنگ یا مقاومت مکانیکی کافی) گوهٔ فرورانشی برای زایش زمین‌لرزه‌های متوسط تا بزرگ قاره‌ای چندان فراهم نیست. به ویژه اینکه بخش مهمی از ساختار گوه در ارتباط با فعالیت راندگی‌ها و سطوح جدایش کم‌عمقی ایجاد می‌شود که به دلیل حضور رسوبات آبدار و نامتراکم، شرایط انباشت استرین و لغزش اصطکاکی منجر به زمین‌لرزه را ندارد. از سوی دیگر، این جایگاه زمین‌ساختی میزبان مجموعه‌ای متنوع از گسله‌هاست که در تعامل با یکدیگر دگریختی فعال در گوه برافزایشی را جای می‌دهند؛ هرچند این دگریختی ممکن است در قالب

زمین‌ساخت نازک‌پوست رخ دهد و هیچ‌یک از گسله‌ها به عمق فعالیت لرزه‌ای نرسند. بنابر این، تنها گسله‌هایی اهمیت زمین‌لرزه‌ای پیدا می‌کنند که یا با ساختارهای پوسته‌ای ژرف در ارتباط باشند، یا به شرایط رئولوژیک لغزش اصطکاکی برسند. آنچه گسله‌های راستالغز چپ‌بر منطقهٔ گوهران را از این دست ساختارهای ضعیف (تاب مکانیکی کم) جدا می‌کند، رویداد زمین‌لرزهٔ ۱۳۹۲ گوهران با بزرگای گشتاوری ۶/۱ و پس‌لرزه‌های مرتبط با آن است که نشان می‌دهد، دست‌کم، این بخش از گوهٔ برافزایشی مکران و گسله‌های راستالغز آن دارای شرایط لازم برای ایجاد لرزه‌خیزی قاره‌ای است. پس، این دسته از گسله‌ها را نمی‌توان در قالب گسله‌های راستالغز معمول در گوه‌های برافزایشی جای‌داد که تنها نقش جای‌دهی دگرریختی درونی گوهٔ رسوبی را در پهنهٔ فرورانش برعهده داشته باشند.



شکل ۱۰. نقشهٔ ساده شدهٔ زمین‌ساخت مکران و عناصر ژئودینامیکی مرتبط. عناصر ساختاری و پهنه‌های زمین‌ساختی مکران بر مبنای کارهای بورگ (۲۰۱۸) است، اما موقعیت مرزها با رعایت آن تعاریف و معیارها در مقیاس دقیق‌تری بازنگری شده است. موقعیت و ارتباط میان گسله‌های چپ‌بر (هر دو پهنهٔ گسلی تنگ سرحه و کوه‌سیاه) و مرزهای راندگی کاملا واقعی است و از اطلاعات بزرگ‌مقیاس به دست‌آمده از تحلیل تصاویر ماهواره‌ای منطقه، پس از ساده‌سازی در مقیاس نمایش این نقشه، استخراج شده است.

الگوی ساختاری پیشنهاد شده نشان می‌دهد رویداد زمین‌لرزهٔ گوهران در این بخش از مکران اتفاقی نیست و چنین رخدادی را نمی‌توان در همه جای مکران محتمل دانست. بلکه تنها نواحی خاصی از مکران دارای جایگاه‌های بسیار مشخصی هستند که از نظر جنبشی، دینامیکی و ارتباط ساختاری شرایط ایجاد لرزه‌خیزی مشابه را داشته باشند. با استناد به این تفسیر، پله‌های ساختاری ایجاد شده در نوار مکران شمالی (شکل ۱۰) جایگاه‌هایی هستند که در آنها بخش مهمی از جای‌دهی و انتقال دگرریختی از دیرباز با گسله‌های راستالغز چپ‌بر انجام می‌شده است. بنابر این، احتمال اینکه این پهنه‌های ساختاری لرزه‌خیزی قاره‌ای متفاوت و بیشتری نسبت به جاهای دیگر گوه برافزایشی مکران داشته باشند بسیار زیاد است. پیشنهاد می‌شود این پهنه‌ها در مطالعات پهنه‌بندی لرزه‌زمین‌ساختی و برآورد خطر زمین‌لرزه – گسلش منطقهٔ مکران به طور خاص و به عنوان چشمه‌های لرزه‌ای محتمل کم‌عمق (قاره‌ای) منظور شوند.

۶ نتیجه گیری

رخداد زمین‌لرزهٔ ۱۳۹۲ گوهران با بزرگای گشتاوری ۶/۱ در غربی‌ترین بخش مکران نشان می‌دهد بر خلاف برداشت معمول ما از ساختار بی‌ریشهٔ گوهٔ برافزایشی، گسله‌های راستالغز چپ‌بر نزدیک به شرقی – غربی ساختارهای مهم پوسته‌ای در غرب طول جغرافیایی ۶۱ درجه هستند. این گسله‌ها نه تنها ارتباط جنبشی مستقیمی با سامانهٔ راست‌بر میناب – زندان – پالامی ندارند، بلکه به روشنی بیرون از این پهنهٔ برش میان قاره‌ای شکل گرفته‌اند و با توجه با اینکه در شکل‌گیری و تکامل پهنه‌های مکران شمالی و داخلی نقش داشته‌اند، می‌توان گفت از دیرباز یکی از عناصر ساختاری اصلی در شکل‌گیری گوه برافزایشی مکران بوده‌اند. گسله‌های چپ‌بر به همراه دسته گسله‌های راست‌بر هم‌یوغ، از جمله پهنهٔ گسلهٔ منوجان – درپهن، بخش مهمی از کوتاه‌شدگی میان‌ورقه‌ای را در قالب حرکات راستالغز محض و بدون حضور چین‌خوردگی و گسله‌های راندگی اصلی جای می‌دهند. این مجموعهٔ ساختاری درست در زیر گوشهٔ جنوب‌غربی بلوک لوت قرار دارد و بخشی از برش راست‌بر میان ورقه‌ای در راستای سامانهٔ میناب – زندان – پالامی را بدون ارتباط ساختاری مستقیم، به گسله‌های قلعه گنج و جیرفت – کهنوج در شمال منتقل می‌کنند. بازفعال شدن گسله‌های چپ‌بر کواترنری در جنوب پله‌های ساختاری در لبهٔ مکران شمالی، ارتباط تنگاتنگ دینامیکی و جنبشی این دو مجموعهٔ ساختاری را نشان می‌دهد. در واقع، این پله‌های ساختاری جایگاه‌هایی هستند که در آنها بخش مهمی از جای‌دهی و انتقال دگرریختی از دیرباز با گسله‌های راستالغز چپ‌بر انجام می‌شده است. بنابر این، احتمال اینکه این مجموعه‌های ساختاری لرزه‌خیزی قاره‌ای متفاوت و بیشتری نسبت به جاهای دیگر گوه برافزایشی مکران داشته باشند بسیار زیاد است. در نگاه کاربردی، با توجه به گسترش تراکم جمعیتی و سرمایه گذاری های صنعتی و شهری در گسترهٔ مکران پیشنهاد می‌شود این پهنه‌ها در مطالعات پهنه‌بندی لرزه‌زمین‌ساختی و برآورد خطر زمین‌لرزه – گسلش منطقه به عنوان چشمه‌های لرزه‌ای محتمل کم‌عمق (قاره‌ای) منظور شوند.

سپاسگزاری

نویسندگان از سردبیر گرامی مجله و سه داور ناشناس که با پیشنهادها و تصحیحات بسیار سودمند سبب بهبود کیفیت مقاله شدند، صمیمانه سپاسگزاری می‌کنند. این مقاله بخشی از کار رسالهٔ دکتری میرعلی حسن‌زاده است که در دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم‌پایهٔ زنجان به انجام رسیده است.

منابع

آزادفر، مجیدرضا و قیطانچی، محمدرضا (۱۳۹۴). شناسایی گسل مسبب زمین‌لرزه ۲۱ اردیبهشت ۱۳۹۲ گوهران با استفاده از مکان‌یابی مجدد پس لرزه‌ها و سازوکار کانونی آن، مجله ژئوفیزیک ایران، ۹(۴)، ۶۷-۵۴.

Abbasi, M., Ghods, R., Najafi, M., Abbasy, S., Shabanian, E., Kheradmandi, M., and Asgari, J. (2023). Why Western Makran has a Low Seismicity Rate? Tectonophysics 869, 230164, https://doi.org/10.1016/j.tecto.2023.230134.

Anderson, H., Webb, T. and Jackson, J., 1993. Focal mechanisms of large earthquakes in the South Island of New Zealand: implications for the accommodation of Pacific-Australia plate motion. Geophysical journal international, 115(3), pp.1032-1054.

Baker, C., Hatzfeld, D.L., Lyon-Caen, H., Papadimitriou, E. and Rigo, A., 1997. Earthquake mechanisms of the Adriatic Sea and Western Greece: implications for the oceanic subduction-continental collision transition. Geophysical Journal International, 131(3), 559-594.

Baniadam, F., Shabanian, E., and Bellier, O. (2019). The kinematics of the Dasht-e Bayaz earthquake fault during Pliocene-Quaternary: implications for the tectonics of eastern Central Iran. Tectonophysics, 772, 228218.

Burg, J.-P. (2018). Geology of the onshore Makran accretionary wedge: Synthesis and tectonic interpretation, Earth-Science Reviews 185, 1210–1231, https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.09.011.

Burg, J.-P., Dolati, A., Bernoulli, D., Smit, J. (2013). Structural style of the Makran Tertiary accretionary complex in SE-Iran. In: Al Hosani, K., Roure, F., Ellison, R., Lokier, S. (Eds.), Lithosphere Dynamics and Sedimentary Basins: The Arabian Plate and Analogues. Springer Verlag, Heidelberg, pp. 239–259.

Byrne, D. E., Sykes, L. R., and Davis, D. M. (1992). Great thrust earthquakes and aseismic slip along the plate boundary of the Makran subduction zone. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 97(B1), 449-478.

Falcon, N. L. (1974). An outline of the geology of the Iranian Makran. Geographical Journal, 284-291.

Gansser, A. (1955). New aspects of the geology in central Iran. Paper presented at 4th World Petroleum Congress, Roma, 279–300.

Gholamzadeh, A., Yamini-Fard, F., Hessami, K., and Tatar, M. (2009). The February 28, 2006 Tiab earthquake, Mw 6.0: Implications for tectonics of the transition between the Zagros continental collision and the Makran subduction zone. Journal of Geodynamics, 47(5), 280–287.

Haghipour, N., Burg, J.-P., Kober, F., Zeilinger, G., Susan, I.-O., Kubik, P.W., Mohammad, F., 2012. Rate of crustal shortening and non-Coulomb behaviour of an active accretionary wedge: the folded fluvial terraces in Makran (SE, Iran). Earth Planet. Sci. Lett. 355-356, 187–198.

Hessami, K. and Jamali, F., 2006. Explanatory notes to the map of major active faults of Iran. Journal of Seismology and earthquake Engineering, 8(1), pp.1-11.

Kadinsky-Cade, K., and Barazangi, M. (1982). Seismotectonics of southern Iran: the Oman line. Tectonics, 1(5), 389-412.

https://doi.org/10.1016/j.tecto.2019.228314.

Niazi, M., (1980). Microearthquakes and crustal structure off the Makran coast of Iran. Geophysical Research Letters, 7(5), 297-300.

Niazi, M., and Basford, J. R. (1968). Seismicity of Iranian plateau and Hindu Kush region. Bulletin of the Seismological Society of America, 58(1), 417-426.

Nowroozi, A. A. (1976). Seismotectonic provinces of Iran. Bulletin of the Seismological Society of America, 66(4), 1249-1276.

Penney, C., Copley, A., and Oveisi, B. (2015). Subduction tractions and vertical axis rotations in the Zagros–Makran transition zone, SE Iran: The 2013 May 11 M w 6.1 Minab earthquake. Geophysical Journal International, 202(2), 1122-1136.

Quittmeyer, R. C., and Jacob, K. H. (1979). Historical and modern seismicity of Pakistan, Afghanistan, northwestern India, and southeastern Iran. Bulletin of the Seismological Society of America, 69(3), 773-823.

Ravaut, P., Carbon, D., Ritz, J. F., Bayer, R., and Philip, H. (1998). The Sohar Basin, Western Gulf of Oman: description and mechanisms of formation from seismic and gravity data. Marine and Petroleum Geology, 15(4), 359-377.

Regard, V., Bellier, O., Thomas, J. C., Abbassi, M. R., Mercier, J., Shabanian, E., and Solaymani, S. (2004). Accommodation of Arabia-Eurasia convergence in the Zagros-Makran transfer zone, SE Iran: A transition between collision and subduction through a young deforming system. Tectonics, 23(4).

Regard, V., Bellier, O., Thomas, J. C., Bourlès, D., Bonnet, S., Abbassi, M.

Kao, H., Jian, P. R., Ma, K. F., Huang, B. S., and Liu, C. C. (1998). Moment-tensor inversion for offshore earthquakes east of Taiwan and their implications to regional collision. Geophysical Research Letters, 25(19), 3619-3622.

Khorrami, F., Vernant, P., Masson, F., Nilfouroushan, F., Mousavi, Z., Nankali, H., and Alijanzade, M. (2019). An up-to-date crustal deformation map of Iran using integrated campaign-mode and permanent GPS velocities. Geophysical Journal International, 217(2), 832-843.

McCall, G. J. H. (2002). A summary of the geology of the Iranian Makran,.In: Clift PD, Kroon FD, Gaedecke C, Craig J (Eds.) The tectonic and climatic evolution of the Arabian Sea Region, Geological Society, London, 195. Special Publication, 147–204.

McKenzie, D., and Sclater, J. G. (1971). The evolution of the Indian Ocean since the Late Cretaceous. Geophysical Journal International, 24(5), 437-528.

Monsef, I., Rahgoshay, M., Pirouz, M., Chiaradia, M., Grégoire M., & Ceuleneer, G. (2018). The Eastern Makran Ophiolite (SE Iran): evidence for a Late Cretaceous fore-arc oceanic crust, International Geology Review, doi: 10.1080/00206814.2018.1507764.

Morgan, (1982). Geological Quadrangle Map of Iran 1:250,000 series, Sheet J14, Taherui, Geol. Survey of Iran.

Morgan, (1983). Geological Quadrangle Map of Iran 1:250,000 series, Sheet J13, Minab, Geol. Survey of Iran.

Motaghi, K., Shabanian, E., Nozad-Khalil T. (2020). Deep structure of the western coast of the Makran subduction zone, SE Iran, Tectonophysics, 776, 228314,

R., and Feghhi, K. (2005). Cumulative right-lateral fault slip rate across the Zagros—Makran transfer zone: role of the Minab—Zendan fault system in accommodating Arabia—Eurasia convergence in southeast Iran. Geophysical Journal International, 162(1), 177-203.

Regard, V., et al., (2010). The transition between Makran subduction and the Zagros collision: recent advances in its structure and active deformation. Geological Society of London, Special Publications, 330(1), 43–64.

Samsonov, S. V. and Czarnogorska, M. (2013). Ground deformation produced by 2013 M6.1 Minab earthquake in Iran mapped with RADARSAT-2 InSAR, Geological Survey of Canada Open File 7528, 7p.

Smit, J., Burg, J.-P., Dolati, A., Sokoutis, D. (2010). Effects of mass waste events on thrust wedges: analogue experiments and application to the Makran accretionary wedge. Tectonics 29, TC3003.

Stöcklin, J., and Nabavi, M. H. (1973). Tectonic map of Iran. Geological Survey of Iran, 1(5).

Vernant, P., Nilforoushan, F., Hatzfeld, D., Abbassi, M. R., Vigny, C., Masson, F., and Chéry, J. (2004). Present-day crustal deformation and plate kinematics in the Middle East constrained by GPS measurements in Iran and northern Oman. Geophysical Journal International, 157(1), 381-398.

Yamini-Fard, F., Hatzfeld, D., Farahbod, A. M., Paul, A., and Mokhtari, M. (2007). The diffuse transition between the Zagros continental collision and the Makran oceanic subduction (Iran): Microearthquake seismicity and crustal structure. Geophysical Journal International, 170(1), 182–194.

Iranian Journal of Geophysics, Vol 18, No 5, 2024, P. 1 (Research article)
DOI: 10.30499/ijg.2024.444475.1576

Tectonic setting of the 2013 May 11 Mw 6.1 Goharan earthquake in western Makran

Mir Ali Hassanzadeh [1] and Esmail Shabnian Borojeni [2*]

[1] *Ph.D. Student, Zanjan Department of Earth Sciences, Institute for Advanced Studies in Basic Sciences (IASBS), Zanjan, Iran*
[2] *Associate Professor, Department of Earth Sciences, Institute for Advanced Studies in Basic Sciences (IASBS), Zanjan, Iran*

(Received: 18 February 2024, Accepted: 30 March 2024)

Summary
The Minab–Zendan–Palami (MZP) fault system separates the Makran accretionary wedge in the east from the Zagros fold and thrust belt in the west. The Goharan earthquake of May 21, 2012, with a moment magnitude of 6.1, affected the western part of the Makran accretionary wedge and is located outside of the tectonic domain affected by the MZP. This earthquake was associated with a left-lateral strike-slip surface rupture in the east-west direction. The continental nature of this event is apparently inconsistent with its tectonic setting in the western part of the accretionary wedge of the Makran active subduction. In fact, the causal fault is sub-parallel to the Makran accretionary front and affects an apparently rootless accretionary wedge in which, moderate to large shallow earthquakes are not expected. This study presents new structural geology and active tectonic observations on the area affected by the Goharan earthquake and neighboring regions tectonically related to the earthquake in order to find a seismotectonic explanation for the occurrence of the earthquake. The remote sensing analysis of high-resolution satellite images (Bing satellite image of 0.6 m resampled pixel size in SAS.Planet) and combination of results with available geological and seismological information reveal that active deformation is mainly accommodated by a series of sinistral faults oriented ENE, which are in close structural and kinematic interaction with dextral faults oriented almost N-S. These conjugate fault networks intersect pre-Quaternary geological structures and are independent of structural processes that directly affect both the MZP and the Makran subduction zone. ENE-trending sinistral faults are accompanied by steep structural steps in the North Makran thrust boundaries and correspond to places where abrupt changes in the width of the Inner Makran occur. Our observations imply that (1) west of longitude 61°E, the sinistral faults have been important crustal structures since the initial stage of the Makran wedge formation, (2) interacting with the dextral conjugate series, these Quaternary structures have taken up part of the active NNE-SSW shortening between the Arabian platform and Lut block, without the need for main folding processes and thrust faulting. Those also transfer part of the deformation to the north, and (3) the presence of the sinistral strike-slip faults in this part of the Makran wedge is not accidental; these structures define distinct seismotectonic zones which may host moderate to large continental earthquakes, with a great impact on seismic hazard. This study reveals that structural interactions in complex tectonic settings can produce deformation patterns seemingly inconsistent with our classical understanding of the region's geology.

Keywords: Accretionary wedge, conjugate faults, continental deformation, minab earthquake, Zagros - makran transition zone

[*]Corresponding author: shabanian@iasbs.ac.ir