

## پهنه‌بندی لرزه‌های مکران با استفاده از رویکرد لرزه‌زمین‌ساختی

میثم خیری ملومه<sup>۱</sup>، اسماعیل شبانیان بروجنی<sup>۲</sup> و عبدالرضا قدس<sup>۳\*</sup>

<sup>۱</sup>دانشجوی دکتری، دانشکده علوم زمین، دانشگاه تحصیلات تکمیلی در علوم پایه، زنجان، ایران

<sup>۲</sup>دانشیار، دانشکده علوم زمین، دانشگاه تحصیلات تکمیلی در علوم پایه، زنجان، ایران

<sup>۳</sup>استاد، دانشکده علوم زمین، دانشگاه تحصیلات تکمیلی در علوم پایه، زنجان، ایران

(دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۱۸، پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۱۷)

### چکیده

شناسایی چشمه‌های لرزه‌ای مهم‌ترین مرحله از تحلیل خطر لرزه‌ای است. این مقاله با استفاده از رویکرد لرزه‌زمین‌ساختی یک پهنه‌بندی جدید برای منطقه فرورانشی مکران که نرخ لرزه‌خیزی پائینی دارد، ارائه می‌دهد. در رویکرد لرزه‌زمین‌ساختی کمبود اطلاعات لرزه‌ای، با اطلاعاتی نظیر اطلاعات ژئوفیزیکی، زمین‌ساختی، ژئودزی و تکیه بر فرض تشابه و قیاس زمین‌ساختی پهنه‌ها جبران می‌شود. اخیراً مطالعات میدانی زمین‌شناختی، زلزله‌شناختی و ژئودزی گسترده‌ای در مکران انجام شده است. با استفاده از اطلاعات جدید درباره قطعه‌بندی ابرراندگی، لرزه‌خیزی، هندسه و شیب فرورانش، مکران به ۱۴ پهنه لرزه‌ای تقسیم شده است. سه مورد از این پهنه‌های لرزه‌ای به طور کامل دارای ویژگی‌های فرورانشی و بقیه دارای ویژگی‌های قاره‌ای هستند. چشمه‌های لرزه‌ای سه‌بعدی در بازه‌های عمقی مختلف تعریف شدند تا بتوان هندسه فرورانش را به خوبی توصیف کرد. برای نمونه، زمین‌لرزه‌های نرمال با عمق کانونی متوسط (۷۵-۴۰ کیلومتر) در رابطه با خمش سنگ‌کره اقیانوسی در حال فرورانش هستند و زمین‌لرزه‌های ابرراندگی در ارتباط با منطقه ابرراندگی هستند که در بازه عمقی بین ۲۰ الی ۴۰ کیلومتر است. در پهنه‌بندی ارائه شده ابرراندگی مکران به دو پهنه شرقی و غربی تقسیم شده که قسمت غربی آن قفل‌شدگی بسیار کمتری از قسمت شرقی دارد. پهنه‌های مرتبط با دو لبه شرقی و غربی مکران نیز به ترتیب تحت تاثیر سامانه گسله‌های قاره‌ای راست‌الغز چپ‌بر اورناچ‌نال-چمن و راست‌الغز راست‌بر میناب-زندان-پالامی هستند. با توجه به نرخ کرنش زیاد مشاهده شده، پهنه‌بندی لرزه‌ای جدید بالاترین خطر لرزه‌ای را در دو منطقه تبدیلی پیش‌بینی می‌کند. به علت نسبت قفل‌شدگی بسیار بیشتر، خطر زمین‌لرزه و سونامی در شرق مکران بسیار بالاتر از غرب مکران خواهد بود. انتظار می‌رود ایران‌شهر دارای سطح خطر لرزه‌ای بالایی باشد چون در تقاطع سامانه گسله‌ای لبه غربی منطقه زمین‌درز سیستان و سامانه گسله‌ای شرقی-غربی جنوب فروافتادگی جازموریان واقع شده و علاوه بر آن بر روی پهنه لرزه‌ای مسبب زمین‌لرزه‌های با عمق متوسط قرار می‌گیرد.

**کلمه‌های کلیدی:** فرورانش مکران، پهنه‌بندی لرزه‌زمین‌ساختی، خطر زمین‌لرزه، قطعه‌بندی ابرراندگی، مکران غربی، مکران شرقی

## ۱ مقدمه

عموما پهنه‌های فرورانشی محل رویداد زمین‌لرزه‌های بزرگ و ویرانگر هستند. اکبرزاده و همکاران (۲۰۲۳) با مقایسه لرزه‌خیزی مکران با سایر مناطق فرورانشی جهان نشان دادند که لرزه‌خیزی در این منطقه کمتر از مناطق فرورانشی آلاسکا، شیلی، کوریل، مکزیک و نانکای ژاپن است. به علت عدم گسترش شبکه‌های لرزه‌نگاری و شتاب‌نگاری در این منطقه تا سال‌های اخیر، کاتالوگ زمین‌لرزه‌های مکران حاوی تعداد کمی رخداد است (مانند پنی و همکاران، ۲۰۱۷) و خطای قابل توجهی در مکان‌یابی دارد (اکبرزاده و همکاران، ۲۰۲۳). بنابراین به علت عدم وجود کاتالوگ‌های مناسب لرزه‌خیزی، پهنه‌بندی لرزه‌ای مکران با استفاده از روش‌های مرسوم متکی بر کاتالوگ‌های زمین‌لرزه، ممکن نیست.

از جمله پرسش‌های اساسی در مورد سامانه فرورانشی مکران (شکل ۱)، چگونگی توزیع چشمه‌های بالقوه لرزه‌ای در این منطقه است. تا سال‌های اخیر مطالعات جدی چندانی در حوزه‌های مختلف زمین‌شناسی، ژئوفیزیک و ژئودزی در مکران صورت نگرفته بود. بنابراین تاکنون پهنه‌بندی لرزه‌زمین‌ساختی جامع و مستقلی در این منطقه انجام نشده و سامانه فرورانشی مکران بدون ذکر جزئیات فقط به صورت یک یا دو پهنه در نظر گرفته شده است. محدوده مطالعاتی این مقاله همواره به عنوان بخشی از نقشه‌های کوچک مقیاس ملی ایران (نوروزی، ۱۹۷۶؛ نبوی، ۱۳۵۵؛ بربریان، ۱۹۷۶؛ نوگل سادات، ۱۹۹۳؛ توکلی و غفوری آشتیانی، ۱۹۹۹)، پاکستان (کاظمی و جان ۱۹۹۷) و یا کشورهای عربی حاشیه خلیج فارس (الحداد و همکاران، ۱۹۹۴؛ عبدالله و الحمود، ۲۰۰۴) بوده است.

پهنه‌بندی لرزه‌زمین‌ساختی یکی از پیچیده‌ترین و مهم‌ترین مسائل زلزله‌شناسی نوین است و مهم‌ترین حلقه در زنجیره پیچیده تخمین مخاطره و خطرپذیری لرزه‌ای محسوب می‌شود. پهنه‌های لرزه‌زمین‌ساختی مناطقی هستند

که در رژیم‌های ژئودینامیکی فعلی، دارای موقعیت زمین‌ساختی و الگوی لرزه‌خیزی مشابه، همگن و مختص به خود هستند (پی و همکاران، ۱۹۹۵). در گذشته، پهنه‌بندی‌های لرزه‌زمین‌ساختی در مناطق مختلف جهان، به طور معمول، فقط متکی به آمار و مکان رخداد‌های لرزه‌ای بودند، اما روش‌های نوین پهنه‌بندی لرزه‌زمین‌ساختی ماهیتی کاملاً میان رشته‌ای دارند و از لایه‌های گوناگون اطلاعات ژئوفیزیکی و ژئودینامیکی، ساختارهای زمین‌شناختی و شواهد ریخت‌زمین‌ساختی بهره می‌برند (کرنیت‌زسکی، ۱۹۹۵). چشمه لرزه‌ای پهنه‌ای را می‌توان یک گستره مکانی با مشابهت‌های زمین‌شناختی، زمین‌ساختی، ژئوفیزیکی، لرزه‌خیزی و ژئودتیکی در نظر گرفت که در سراسر آن پتانسیل لرزه‌ای می‌تواند یکسان در نظر گرفته شود. در این دیدگاه، گسله‌ها و ساختارهای فعال موجود یکی از مجموعه ورودی‌های زمین‌شناختی در تعیین پهنه‌های لرزه‌زمین‌ساختی هستند و برخلاف مدل‌های مرسوم چشمه خطی، جایگاه چشمه بزرگ‌ترین زمین‌لرزه در سراسر این پهنه شناور است.

با آشکارتر شدن جنبه‌های راهبردی و اهمیت اقتصادی مکران (مانند سهرابی و همکاران، ۱۳۹۹)، طرح‌های مطالعاتی مختلفی برای تهیه داده‌های پایه تحلیل مخاطرات طبیعی در این منطقه انجام شده است. امروزه، دانش و اطلاعات ما از این منطقه در زمینه‌های مختلف زمین‌شناختی (مانند بورگ و همکاران، ۲۰۱۳؛ بورگ، ۲۰۱۸)، ژئوفیزیکی (مانند هابرلند و همکاران، ۲۰۲۰؛ پرستلی و همکاران، ۲۰۲۲؛ خالدزاده و قدس، ۲۰۲۱؛ اکبرزاده و همکاران، ۲۰۲۳ و عنایت و قدس، ۲۰۲۳) و ژئودزی (عباسی و همکاران، ۲۰۲۳) بهبود یافته و اطلاعات ما در مورد هندسه، شیب، لرزه‌خیزی و قطعه‌بندی صفحه فرورانشی، نقش فرافتادگی‌های جازموریان و مشکِل و زمین‌درز سیستان در پیکربندی سامانه فرورانشی مکران، بسیار کامل‌تر و دقیق‌تر شده است. هدف اصلی این مقاله به

عربی نسخه‌ای از پهنه‌بندی لرزه‌زمین‌ساختی را برای بخش‌هایی از مکران ارائه کردند. با توجه به مقیاس، فاصله تا امارات متحده عربی و نیز دیدگاه علمی نویسندگان، این مطالعه فاقد هرگونه داده ژئوفیزیکی و ژئودزی بوده و نقش سایر داده‌های لرزه‌زمین‌ساختی نیز بسیار کم رنگ می‌باشد. به طور مثال برای تمام قسمت شمالی محدوده مورد مطالعه ما در مکران غربی فقط دو پهنه لوت و ایران مرکزی با روند شرقی-غربی و برای تمام کمربند جنوبی آن نیز یک پهنه واحد در نظر گرفته شده است. در این مطالعه همچنین به علت دوری مکران شرقی از امارات متحده عربی از مطالعه روی مکران شرقی و تاثیرات آن روی این کشور چشم‌پوشی شده است. کاظمی و جان (۱۹۹۷) پاکستان را بر اساس ویژگی‌های تکنونیک، ساختار زمین‌شناختی، تاریخ کوه‌زایی و رخساره‌های سنگی به ۹ زیرپهنه تکنونیک فعال تقسیم کردند. چهار مورد از این زیرپهنه‌ها با نام‌های "کمان ماگمایی چاگی، حوضه (فرونشست) خاران، پهنه گوه برفزایشی مکران، کمربند چین خورده و راندگی بلوچستان شرقی" در محدوده مورد مطالعه ما قرار داشته و بخش‌های زیادی از مکران شرقی را تشکیل می‌دهند.

بررسی مقالات و مستندات پیشین در مورد پهنه‌بندی لرزه‌زمین‌ساختی ایران نشان می‌دهد که این مطالعات دو رویکرد پهنه‌بندی متفاوت دارند. رویکرد اول، تعریف ایالت‌های لرزه‌زمین‌ساختی (seismotectonic province) مطابق با ایالت‌های رسوبی-ساختاری (tectono-sedimentary) است که خود بر اساس تفاوت‌های زمین‌شناختی از جمله تغییرات در انواع پوسته، رخساره‌های رسوبی، زمان سخت شدن پی‌سنگ، پتانسیل اقتصادی، تغییرات زمین‌ساختی و زمان رسوب‌گذاری تعریف شده‌اند (مانند آقاباتی، ۱۳۸۱). این رویکرد هرچند در مفهوم عمومی کارآمد است، اما از دیدگاه زمین‌ساخت فعال و لرزه‌زمین‌ساخت خالی از ایراد نیست. اشتوکلین (۱۹۶۸)

روزرسانی پهنه‌بندی لرزه‌زمین‌ساختی مکران با یک روش و دیدگاه نوین و با استناد به جدیدترین دستاوردهای علوم زمین در حوزه‌های مختلف ژئوفیزیک، زمین‌شناسی و ژئودزی است. با توجه به لرزه‌خیزی کم مکران، در این پژوهش چشمه‌های لرزه‌ای مکران به صورت چشمه‌های پهنه‌ای تعیین شده‌اند. این مطالعه با ارائه یک الگوی مستدل، تاکید می‌کند که استفاده از لایه‌های اطلاعاتی مختلف زمین‌شناختی، ژئوفیزیکی و ژئودزی در پهنه‌بندی لرزه‌زمین‌ساختی نتایج آموزنده و قابل اعتمادتری نسبت به استفاده صرف از داده‌های لرزه‌ای یا گسلش فعال به همراه دارد.

## ۲ پیشینه مطالعات پهنه‌بندی لرزه‌زمین‌ساختی

### مکران و مناطق پیرامون

ایران و کشورهای پیرامون آن به دلیل قرارگیری در کمربند لرزه‌خیز آلپ-همالیا و همگرایی میان ورقه‌های اوراسیا و عربی، از نظر تکنونیک فعال هستند و بخش مهمی از رخدادهای لرزه‌ای دنیا را به خود اختصاص می‌دهند (مانند هاتزفیلد و ملنار، ۲۰۱۰). با وجود اهمیت و کاربرد پهنه‌بندی لرزه‌زمین‌ساختی در موضوعات مختلف زیرساختی و راهبردی، تاکنون مطالعات زیادی از این دست در این مناطق انجام شده است. هر یک از مطالعات انجام شده نیز بسته به نیاز، منطقه و داده‌های در دسترس از رویکردهای متفاوتی استفاده کرده‌اند ولی سامانه فرورانشی مکران غالباً به عنوان یک زون لرزه‌ای همگن در نظر گرفته شده است. الحداد و همکاران (۱۹۹۴) در مطالعه خود با عنوان تعریف مبنایی برای ارزیابی خطر لرزه‌ای و معیارهای طراحی برای کشور عربستان سعودی تنها بخشی از مکران غربی را در ادغام با بخشی از زاگرس، به عنوان یک پهنه لرزه‌زمین‌ساختی واحد در شمال-شمال شرقی شبه‌جزیره عربی معرفی کرده‌اند. عبدالله و الحمود (۲۰۰۴) نیز در قالب مطالعات تحلیل خطر لرزه‌ای احتمالاتی امارات متحده

گرفته شده است. داده‌های اصلی مورد استفاده این نویسندگان، زمین‌لرزه‌های دستگاهی ۱۹۰۰ تا ۱۹۷۷ بوده است. از خروجی‌های این مطالعه تعداد پنج نقشه با عناوین نقشه هم‌لرزه ایران، نقشه لرزه‌خیزی تاریخی، نقشه هم‌شدت تاریخی، نقشه لرزه‌خیزی قرن بیستم و نقشه پهنه خطر گسله‌های جوان و اصلی است. بربریان (۱۹۸۱) با استفاده از داده‌های به روز شده شامل کاتالوگ ۱۹۸۰-۱۹۶۱، داده‌های تاریخی، نقشه جدید از گسله‌های فعال و تحقیقات میدانی، نسخه جدیدی از نقشه خطر زمین‌لرزه‌ها ارائه داد. او در نسخه جدید نقشه خطر زمین‌لرزه‌های ایران، کشور را به سه پهنه هم‌شدت تقسیم‌بندی کرد.

نوگل سادات (۱۹۹۳) و به دنبال آن رمزی (۱۹۹۵) نیز نقشه‌ای با عنوان پهنه‌بندی ساختاری ایران، بر اساس برخی ویژگی‌های زمین‌شناختی و ساختاری ارائه کردند. منطقه مورد مطالعه ما در نقشه نوگل سادات (۱۹۹۳) سه پهنه نسبتاً وسیع به نام‌های مکران (از جنوب جازموریان تا ساحل دریای عمان)، جنوب لوت، ایران مرکزی و سه پهنه خیلی کوچک به نام‌های نایبند، کهنوج و کوهبنان تقسیم‌بندی شده است. پس از آن، میرزایی و همکاران (۱۹۹۸) ایران را بر مبنای زمین‌شناسی و زمین‌ساخت کلی، به پنج پهنه البرز-آذربایجان، کپه‌داغ، ایران مرکزی- شرقی، مکران و زاگرس تقسیم کردند. این تقسیم‌بندی بسیار کلی بوده و واحدهای اصلی زمین‌ساختاری ایران را بدون ذکر جزئیات و زیرپهنه‌ها به تصویر می‌کشد. توکلی و غفوری آشتیانی (۱۹۹۹) با استفاده از داده‌های لرزه‌ای (دیرینه، تاریخی و دستگاهی ۱۹۹۷-۱۹۰۰)، داده‌های زمین‌شناختی و فعالیت گسله‌ها، ایران را به ۲۰ پهنه لرزه‌خیز مختلف تقسیم کردند. این نقشه، پهنه‌بندی بیشینه شتاب جنبش زمین در ایران را برای میانگین دوره بازگشت ۴۷۵ سال نشان می‌دهد. با بررسی این نقشه مشهود است که عملاً هیچ گونه داده ژئودینامیکی و ژئودزی به کار نرفته و نحوه برخورد با منطقه فرورانشی مکران مانند مناطق قاره‌ای بوده است.

اولین گزارش مستند پهنه‌های رسوبی-ساختاری ایران را منتشر کرد و پس از آن گزارش‌های بعدی منتشر شد (نبوی، ۱۳۵۵؛ افتخارنژاد، ۱۳۵۹؛ بربریان، ۱۹۸۱؛ علوی ۱۹۹۱؛ آقاباتی، ۱۳۸۱). هر یک از این نویسندگان، ایران را به تعداد متفاوتی از پهنه‌های رسوبی-ساختاری تقسیم کردند. در رویکرد دوم که به دیدگاه امروزی نزدیک‌تر است، پهنه‌بندی ایران بر مبنای تفاوت‌های لرزه‌زمین‌ساختی است. مطالعات رویکرد دوم پیش‌تر در قالب بخشی از مطالعات تحلیل خطر لرزه‌ای و ارائه نقشه‌های مربوطه شکل گرفته‌اند و بیشترین کارکرد آنها تعیین چشمه‌های لرزه‌ای و به دنبال آن تحلیل خطر لرزه‌ای بوده است (مانند نوروزی، ۱۹۷۶؛ بربریان، ۱۹۷۶؛ توکلی و غفوری آشتیانی، ۱۹۹۹).

نوروزی (۱۹۷۶) پهنه‌بندی لرزه‌زمین‌ساختی ایران را برای اولین بار ارائه داد. این محقق، ایران را با استفاده از ویژگی‌های جغرافیایی، زمین‌ریختی و زمین‌شناسی منطقه‌ای نظیر اطلاعات گنبد‌های نمکی و توزیع گسله‌های فعال و ۶۰۰ رخداد لرزه‌ای از سال‌های ۱۹۲۰ تا ۱۹۷۲ به ۲۳ ایالت لرزه‌ساخت‌ساختی تقسیم کرد. بربریان (۱۹۷۶) a و b) پس از ارائه نقدی بر مطالعات نوروزی، مدل خود را منتشر کرد که در آن ایران بر اساس اطلاعات زمین‌شناختی، زمین‌ریختی، لرزه‌زمین‌ساختی و لرزه‌خیزی به ۹ ایالت تقسیم شده است که در آن از اطلاعات لرزه‌خیزی برای اعتبارسنجی مشخصات ایالت‌های لرزه‌خیز استفاده شده است. بربریان و مهاجر اشجعی (۱۹۷۷) برای تهیه نقشه خطر تعیینی زمین‌لرزه با روش بیشینه شدت، نقشه لرزه‌زمین‌ساخت ایران را تهیه کردند. در این نقشه ایران به ۲۳ ایالت مختلف تقسیم شده است. مکران در این تقسیم‌بندی با نام ایالت شماره ۳، از غرب محدود به سامانه گسله‌ای میناب-زندان-پالامی بوده و از شرق تا جنوب پاکستان کشیده شده است. مرزهای جنوبی و شمالی مکران ایران نیز به ترتیب محدود به خط ساحلی دریای عمان و گسله‌های واقع در جنوب فروافتادگی جازموریان در نظر

رخدادهای لرزه‌ای را به طور قطع توجیه کنند (اکبرزاده و همکاران، ۲۰۲۳).

تاکنون راهکارهای زیادی برای رفع مشکل کمبود اطلاعات زمین‌لرزه‌ای و دستیابی به نتایج منطقی‌تر در زمینه تعیین چشمه‌های لرزه‌ای و تحلیل خطر لرزه‌ای، معرفی شده است. به عنوان مثال، شی و همکاران (۱۹۹۲) با اعمال تغییراتی در فرآیند تعیین چشمه‌های لرزه‌زا، به بهبود و اصلاح روش تحلیل خطر لرزه‌ای احتمالاتی ارائه شده توسط کرنل (۱۹۶۸) پرداختند. در این روش کمبود اطلاعات لرزه‌ای، با اطلاعات لرزه‌زمین‌ساختی و زمین‌شناختی تکمیل می‌شود. تکیه اصلی این روش بر روی فرض تشابه زمین‌ساختی یا به اصطلاح قیاس تکنونیک و نیز فرضیه تکرارپذیری زمین‌لرزه است. بنابراین روش شی و همکاران (۱۹۹۲)، روشی تحلیلی و چندنظامه است و برای تعیین چشمه‌های بالقوه زمین‌لرزه دو فرض کلیدی را در نظر می‌گیرد؛ فرض اول بیان می‌کند که ساختارهای با ویژگی‌های زمین‌ساختی مشابه، قادر به تولید زمین‌لرزه‌های با بزرگی یکسان هستند و ثبت نشدن زمین‌لرزه روی یک ساختار، دلیلی بر ناتوانی بالقوه رخداد زمین‌لرزه در آن نیست و فرض دوم این است که زمین‌لرزه‌های بزرگ، معمولاً در نزدیکی مکان رخداد زمین‌لرزه‌های قبلی رخ می‌دهند (مانند ژانگ، ۱۹۹۳؛ یی و همکاران، ۱۹۹۳).

#### ۴ جایگاه تکتونیک و زمین‌شناختی مکران

فرورانش رو به شمال بخش اقیانوسی ورقه عربی به زیر خرد قاره ایران مرکزی (بلوک لوت) در غرب، و به زیر اوراسیا (بلوک هلمند) در شرق (شکل ۱) موجب شکل‌گیری سامانه فرورانشی مکران به طول حدود ۹۰۰ کیلومتر در جنوب شرقی ایران و جنوب پاکستان شده است (مانند آیت و روس، ۱۹۷۹؛ بورگ، ۲۰۱۸). مکران از لحاظ زمین‌ساختی و ژئودینامیکی یک‌دست نیست و به دو بخش متفاوت شرقی و غربی قابل تقسیم است. بر پایه

همان‌گونه که ملاحظه می‌شود تاکنون هیچ پهنه‌بندی لرزه‌زمین‌ساختی مستقلی از مکران ارائه نشده است و نقشه‌های پهنه‌بندی موجود در بردارنده مکران، همواره بخش کوچکی از نقشه‌های کوچک مقیاس ایران و کشورهای همسایه هستند و بنابراین جزئیات لازم را ندارند. از همه مهم‌تر اینکه، اطلاعات به‌روز شده در مورد زمین‌شناسی، زلزله‌شناسی و ژئودینامیک مکران در هیچ یک لحاظ نشده است.

#### ۳ داده‌ها و روش

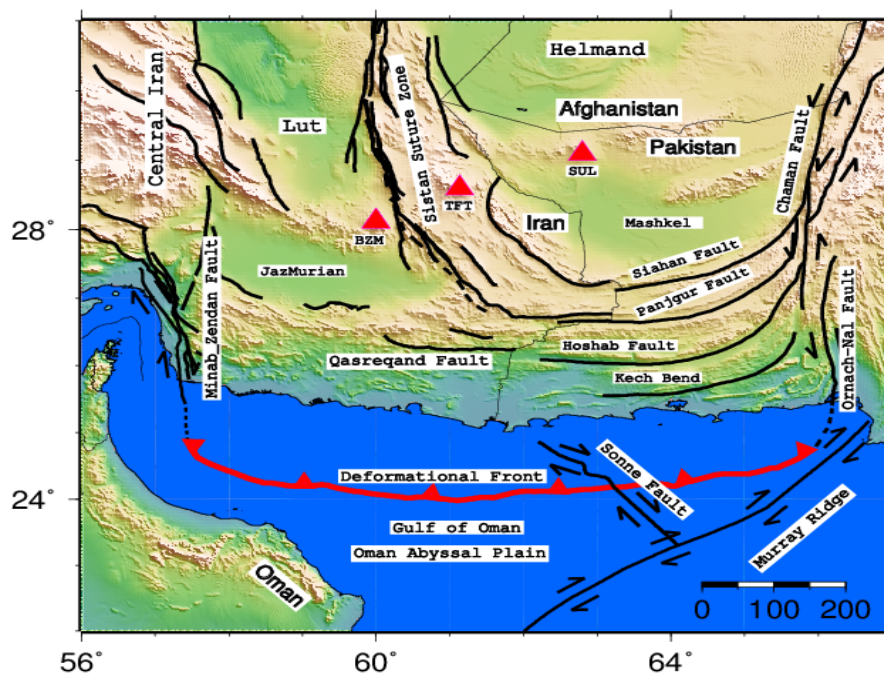
در مجموع هیچ روش استاندارد برای شناسایی چشمه‌های لرزه‌ای وجود ندارد و تصمیم نهایی در مورد چگونگی مدل‌سازی هندسه چشمه‌های لرزه‌ای تا حد زیادی به قضاوت شخصی و نظر کارشناسی بستگی دارد (مانند یوسمن و گولکان، ۱۹۹۴). کاتالوگ زمین‌لرزه‌های مکران و مناطق پیرامون از نظر موارد مختلف از جمله طول دوره زمانی ثبت دقیق رخدادها به شدت ناقص است به نحوی که کل منطقه مطالعاتی با وجود مساحتی بسیار زیاد (حدود هشتصد هزار کیلومتر مربع) از سال ۱۹۰۰ تا ۲۰۲۲ تنها حدود ۲۶۷۷ رخداد لرزه‌ای مستقل (زمین‌لرزه‌های وابسته به مانند پس‌لرزه‌ها حذف شده‌اند) دارد. به علاوه خطای زیادی در تعیین بزرگی، رومرکز و عمق رخدادها وجود دارد که البته تلاش‌های زیادی در مورد مکان‌یابی دوباره و کاهش خطاهای تعداد معدودی از زمین‌لرزه‌ها توسط برخی محققین (مانند قدس و همکاران، ۲۰۲۱) انجام شده است. از سوی دیگر با وجود مطالعات صورت گرفته، هنوز اطلاعات زمین‌ساختی و ژئودینامیکی مکران در اندازه‌ای نیست که به درستی و دقت بتوان سهم فعالیت لرزه‌ای ناشی از فرورانش و دگرریختی‌های پوسته قاره‌ای را از یکدیگر تفکیک و تعیین نمود. بنابراین حداقل در شرایط فعلی، گسله‌های فعال شناسایی شده نمی‌توانند بسیاری از

جنوبی بوده و با شیب کم به سمت شمال در جریان است. منطقه فرورانش مکران از لحاظ دارا بودن گوه برافزایشی ضخیم و با پهنای زیاد در خشکی و یک کمان آتشفشانی با روند شمال شرقی-جنوب غربی که با روند شرقی-غربی گوه برافزایشی موازی نیست منحصر به فرد است (عنایت و قدس، ۲۰۲۳).

مرز غربی مکران سامانه گسله‌ای میناب-زندان-پالامی و مرز شرقی این پهنه، سامانه گسله‌ای اورناچ‌نال-چمن است (مانند بورگ، ۲۰۱۸). سامانه گسله‌ای میناب-زندان-پالامی راستالغز راست‌بر با مولفه فشارشی و راستای شمال‌شمال شرقی است که از تنگه هرمز به سوی شمال امتداد یافته و به گسله اصلی وارون زاگرس می‌پیوندد (ریگارد و همکاران، ۲۰۰۵). سامانه گسله‌ای اورناچ‌نال-چمن (حدوداً در ۶۶ درجه طول شرقی) راستالغز چپ‌بر با راستای تقریبی شمال-شمال شرقی است و ورقه‌های هند و اوراسیا را از هم جدا می‌کند (اقبال و

مشاهدات زمین‌ساختی ژئوفیزیکی موجود در مکران، مرز این قطعه‌بندی طول جغرافیایی حدود ۶۱ الی ۶۲ شرقی پیشنهاد می‌شود (مانند برن و همکاران، ۱۹۹۲؛ اکبرزاده و همکاران، ۲۰۲۳). تغییر سرعت فرورانش (بورگ، ۲۰۱۸)، تفاوت در لرزه‌خیزی (مانند برن و همکاران، ۱۹۹۲؛ پنی و همکاران، ۲۰۱۷)، اختلاف در میزان قفل‌شدگی و همچنین تغییر شکل ورقه‌های سوار (overriding plate) لوت و هلمند (عباسی و همکاران، ۲۰۲۳) و نیز ساختارهای پوسته‌ای متفاوت (عنایت و قدس، ۲۰۲۳) بخشی از این مشاهدات هستند.

گوه برافزایشی مکران با طول حدود ۹۰۰ کیلومتر و پهنای حدود ۳۵۰ کیلومتر در جنوب شرقی ایران و جنوب غربی پاکستان واقع است (شکل ۱). به عقیده بسیاری از محققین (مانند فروهن و همکاران، ۱۹۹۷؛ کوپ و همکاران، ۲۰۰۰؛ اسلوتر و همکاران، ۲۰۰۲) شواهد مختلف نشان می‌دهند که راستای فرورانش تقریباً شمالی-



شکل ۱. نقشه ساختاری محدوده مطالعاتی. برخی گسله‌های مهم با خطوط سیاه پررنگ و پیشانی دگرشکلی فرورانش مکران با خط قرمز نشان داده شده است. مثلث‌های قرمز به ترتیب از غرب به شرق، محل آتشفشان‌های بزمان، تفتان و سلطان هستند. مرز جغرافیایی ایران، پاکستان و عمان با خطوط نازک پیوسته سیاه نشان داده شده است. داده‌های مربوط به مکان‌نگاری، طول و سازوکار گسله‌های چمن، اورناچ‌نال، سیاهان، پنجگور، هوشاب و خم کچ از تونیرشاه و همکاران (۲۰۲۰) است.

همکاران، ۲۰۱۷). سامانه گسله‌ای اورناچ‌نال-چمن به طور کلی از سه گسله اورناچ‌نال، قصابند و چمن تشکیل شده است و از سمت غرب گسله‌های زیادی از جمله سیاهان، پنجگور و هوشاب به آن متصل می‌شوند (شکل ۱). این سامانه حرکت رو به شمال هند نسبت به اوراسیا (با نرخ حدود ۳ سانتی‌متر بر سال) را همراهی می‌کند (جولیوت و همکاران، ۲۰۱۴). مرز شمالی ایالت لرزه‌زمین‌ساختی مکران به فروافتادگی جازموریان در ایران و معادل آن مشکَل در پاکستان منتهی و با رسوبات ضخیم این دو فروافتادگی پوشیده شده است (عنایت و قدس، ۲۰۲۳). مرز جنوبی مکران نیز عمدتاً بر اساس زمین‌ریخت‌شناسی و داده‌های لرزه‌خیزی مشخص می‌شود که محدود به نواحی رومرکزی زمین‌لرزه‌ها در جنوب مکران است (شکل‌های ۲، ۳ و ۴). فرآیند فرورائش در مکران از کرتاسه پسین آغاز شده، اما هنوز بر خورد ورقه‌ای قاره‌ای دو طرف رخ نداده است (لپیچون، ۱۹۶۸).

از دیدگاه زمین‌شناختی، گوه‌برافزایشی خشکی مکران به چهار پهنه‌چینه‌زمین‌ساختی به نام‌های مکران ساحلی، بیرونی، داخلی و شمالی تقسیم می‌شود. میانگین سنی توالی رسوبات از جنوب پیشانی دگرشکلی به مرز شمالی گوه‌برافزایشی به صورت یکنواخت افزایش می‌یابد (بورگ و همکاران، ۲۰۱۳). مکران ساحلی با تغییر شکل ضعیف و رسوبات جوان‌تر نسبت به سایر واحدها، از میوسن بالایی شروع به تشکیل کرده است. در مکران خارجی عمدتاً رسوبات میوسن زیرین و میانی محیط آبی عمیق با جنس ماسه‌سنگ و مارن رخنمون دارند. در مکران داخلی چیرگی با توالی‌های ماسه‌سنگ-شیل (فلیش) ائوسن بالایی تا میوسن پایینی است که رسوبات پلاژیک پالتوسن تا ائوسن میانی و سنگ‌های آذرین را پوشانده است. مکران شمالی حاوی رسوبات عمیق دریایی کرتاسه تا حدافل پالتوسن و سنگ‌های آذرین و آمیزه‌های افیولیتی است. سنگ‌های اولترامافیک مکران شمالی به یک مجموعه

افیولیتی ژوراسیک-پالتوسن نسبت داده شده‌اند. پی‌سنگ مکران شمالی احتمالاً همان پی‌سنگ قسمت جنوبی فروافتادگی جازموریان است که در زیر پوشش رسوبی پنهان شده است (بورگ و همکاران، ۲۰۱۳؛ بورگ، ۲۰۱۸). با وجود قطعه‌بندی شرقی-غربی مشخص در سامانه فرورائشی مکران، شواهد و مطالعات نشان می‌دهند که سراسر این پهنه همچنان یکپارچه بوده و تقریباً سرگذشت زمین‌شناسی واحدی را گذرانده است (بورگ، ۲۰۱۸). روند تقریبی چین‌خوردگی‌های گوه‌برافزایشی مکران شرقی، شرقی-غربی است و با جهت پیشینه کوتاه‌شدگی و پیشینه فشار در راستای شمال شرقی هماهنگی دارند (آقاباتی، ۱۳۸۳). در مکران غربی چین‌خوردگی‌های گوه‌برافزایشی روند خاصی نشان نمی‌دهد (عباسی و همکاران، ۲۰۲۳؛ اکبرزاده و همکاران، ۲۰۲۳). کوتاه‌شدگی‌ها بیشتر با راندگی همراه هستند به گونه‌ای که به تقریب مرز بسیاری از واحدهای سنگ‌چینه‌ای از نوع راندگی است و به مکران ساختاری با الگوی فلسی داده است. این باریکه‌های فلسی با گسله‌های معکوس پرشیب مرزبندی می‌شوند و نتیجه فرآیند عمومی راندگی از پس‌بوم (hinterland) (شمال‌شمال شرقی)، به سمت پیش‌بوم (foreland) (جنوب-جنوب غربی)، است. از شمال به جنوب، شدت چین‌خوردگی کاهش می‌یابد، به گونه‌ای که در مکران ساحلی چین‌خوردگی و گسلش معکوس وجود ندارد یا بسیار ناچیز و اتفاقی است. در انتهای غربی پهنه مکران، حاشیه شرقی تنگه هرمز، پوسته قاره‌ای سپر عربی را از پوسته اقیانوسی آن متمایز می‌کند (وایت و روس، ۱۹۷۹).

مکران با توالی رسوب‌های آوری ضخیم و زاویه مخروطی کم (تقریباً ۴ درجه) شناخته می‌شود (کوپ و همکاران، ۲۰۰۰). تکنیک و قدس (۲۰۱۷) برای بررسی ضخامت پوشش رسوبی گوه‌برافزایشی مکران (ایران) از روش تحلیل طیفی داده‌های مغناطیس هوابرد استفاده کردند و پیشینه عمق پی‌سنگ مغناطیسی برای ساحل مکران

همکاران، ۲۰۱۷). سامانه گسله‌ای اورناچ‌نال-چمن به طور کلی از سه گسله اورناچ‌نال، قصابند و چمن تشکیل شده است و از سمت غرب گسله‌های زیادی از جمله سیاهان، پنجگور و هوشاب به آن متصل می‌شوند (شکل ۱). این سامانه حرکت رو به شمال هند نسبت به اوراسیا (با نرخ حدود ۳ سانتی‌متر بر سال) را همراهی می‌کند (جولیوت و همکاران، ۲۰۱۴). مرز شمالی ایالت لرزه‌زمین‌ساختی مکران به فروافتادگی جازموریان در ایران و معادل آن مشکَل در پاکستان منتهی و با رسوبات ضخیم این دو فروافتادگی پوشیده شده است (عنایت و قدس، ۲۰۲۳). مرز جنوبی مکران نیز عمدتاً بر اساس زمین‌ریخت‌شناسی و داده‌های لرزه‌خیزی مشخص می‌شود که محدود به نواحی رومرکزی زمین‌لرزه‌ها در جنوب مکران است (شکل‌های ۲، ۳ و ۴). فرآیند فرورائش در مکران از کرتاسه پسین آغاز شده، اما هنوز بر خورد ورقه‌ای قاره‌ای دو طرف رخ نداده است (لپیچون، ۱۹۶۸).

از دیدگاه زمین‌شناختی، گوه‌برافزایشی خشکی مکران به چهار پهنه‌چینه‌زمین‌ساختی به نام‌های مکران ساحلی، بیرونی، داخلی و شمالی تقسیم می‌شود. میانگین سنی توالی رسوبات از جنوب پیشانی دگرشکلی به مرز شمالی گوه‌برافزایشی به صورت یکنواخت افزایش می‌یابد (بورگ و همکاران، ۲۰۱۳). مکران ساحلی با تغییر شکل ضعیف و رسوبات جوان‌تر نسبت به سایر واحدها، از میوسن بالایی شروع به تشکیل کرده است. در مکران خارجی عمدتاً رسوبات میوسن زیرین و میانی محیط آبی عمیق با جنس ماسه‌سنگ و مارن رخنمون دارند. در مکران داخلی چیرگی با توالی‌های ماسه‌سنگ-شیل (فلیش) ائوسن بالایی تا میوسن پایینی است که رسوبات پلاژیک پالتوسن تا ائوسن میانی و سنگ‌های آذرین را پوشانده است. مکران شمالی حاوی رسوبات عمیق دریایی کرتاسه تا حدافل پالتوسن و سنگ‌های آذرین و آمیزه‌های افیولیتی است. سنگ‌های اولترامافیک مکران شمالی به یک مجموعه

مغناطیسی در زیر مکران داخلی و خارجی (حدود ۸ کیلومتر) نسبت به پی سنگ مکران ساحلی (حدود ۱۶ کیلومتر؛ تکنیک و قدس، ۲۰۱۷)، نشان می‌دهد که گوه برافزایشی دیرینه علاوه بر سنگ‌های دگرگون‌شده ممکن است از حجم قابل توجهی از سنگ‌های آذرین تراشیده شده از بالای ورقه فرورونده یا از پایین ورقه رورنده تشکیل شده باشد. با توجه به حجم بالای رسوبات ورودی به منطقه فرورانش مکران، هیچ‌گونه درازگودالی در مکران وجود ندارد (مانند اسمیت و همکاران، ۲۰۱۲).

غرب محدوده مطالعاتی به رشته کوه‌های زاگرس می‌رسد که به عنوان یکی از واحدهای اصلی زمین‌ساختاری ایران دارای توالی ضخیمی از سنگ‌های رسوبی پالئوزوئیک تا ترشیری است. این توالی در قالب تاقدیس‌ها و ناودیس‌های با روند عمومی شمال‌غرب-جنوب‌شرق چین‌خورده است. همچنین در بخش شرقی زاگرس گنبد‌های نمکی متعددی دیده می‌شود. چین‌های زاگرس ساختارهای نمکی به صورت ناگهانی در شرق سامانه گسله‌ای میناب-زندان-پالامی، جایی که ناحیه فرورانش مکران آغاز می‌شود قطع می‌شوند (وایت و روس، ۱۹۷۹). تغییر ناگهانی در ساختار پی سنگ در نیمرخ‌های لرزه‌ای بازتابی در پهنه گسله‌ای میناب-زندان-پالامی مشهود است. همچنین، یک تغییر ناگهانی از لرزه‌خیزی شدید در زاگرس تا سکون نسبی در غرب مکران مشاهده می‌شود (به عنوان مثال ریگارد و همکاران، ۲۰۰۴؛ یمینی‌فرد و همکاران، ۲۰۰۷). یک حرکت راست‌بر با ۱۷-۱۵ میلی‌متر بر سال برای گسله میناب-زندان-پالامی محاسبه شده است (مانند پیرت و همکاران، ۲۰۰۹ و عباسی و همکاران، ۲۰۲۳).

##### ۵ پهنه‌بندی لرزه‌زمین‌ساختی مکران

با تلفیق توزیع مکانی زمین‌لرزه‌ها، هندسه و شیب ورقه فرورونده، ساختارهای زمین‌ریخت‌شناختی و روندهای

در ایران را ۱۶ کیلومتر تخمین زدند. عمق پی سنگ مغناطیسی با حرکت به سمت شمال کاهش یافته و در بخش شمالی گوه برافزایشی به ۷ کیلومتر می‌رسد. برآورد بیشینه ضخامت پی سنگ مغناطیسی به دلیل اندازه پنجره مورد استفاده در تخمین پی سنگ مغناطیسی می‌تواند یک برآورد دست‌پائین باشد. در ضمن، عمق پی سنگ مغناطیسی همیشه نشان دهنده ضخامت پوشش رسوبی نیست. وجود سنگ‌های مغناطیسی به مانند بازالت‌ها و سنگ‌های افیولیتی در میان لایه‌های سنگ‌های رسوبی باعث می‌شود که عمق پی سنگ مغناطیسی کمتر از ضخامت پوشش رسوبی تخمین زده شود.

متقی و همکاران (۲۰۲۰) و پریستلی و همکاران (۲۰۲۲) با تحلیل همزمان توابع گیرنده و امواج سطحی دورلرز، ضخامت گوه رسوبی در مکران ساحلی را به ترتیب در بازه ۹-۱۵ کیلومتر و ۲۸-۲۲ کیلومتر برآورد کرده‌اند. سرعت موج برشی در این رسوبات از ۲.۵ کیلومتر بر ثانیه در سطح به ۳.۲ کیلومتر بر ثانیه در عمق ۲۲ کیلومتری زیر ایستگاه چابهار افزایش می‌یابد. مطالعه اخیر عنایت و قدس (۲۰۲۳) در مورد مدل سرعت موج برشی سه بعدی به وضوح نشان می‌دهد که گوه برافزایشی خشکی به ترتیب از دو ناحیه با سرعت بالا در شمال و با سرعت پایین در جنوب با میانگین پوشش رسوبی به ترتیب ۲۲ و ۳۰ کیلومتر تشکیل شده است. این مدل همچنین پوسته قاره‌ای به ضخامت حدود ۴۰ کیلومتر و پوشش رسوبی حدود ۲۰ کیلومتری را برای بخش شرقی فروافتادگی جازموریان پیشنهاد می‌کند. سرعت متوسط موج برشی در گوه برافزایشی دیرینه در شمال مکران ۳.۱ کیلومتر بر ثانیه است که بسیار سریعتر از آن چیزی است که برای پوشش رسوبی مکران داخلی و خارجی پیش‌بینی می‌شود. هابرلند و همکاران (۲۰۲۱) زیرراندگی رسوبات به اعماق بیشتر را به عنوان سازوکار ممکن برای چرایی سرعت بالای مشاهده شده پیشنهاد کردند با این حال، مشاهده عمق کم پی سنگ

سطحی، جهت و اندازه بردارهای سرعتی حاصل از جی‌پی‌اس، ۱۴ پهنه لرزه‌ای برای منطقه مکران و مناطق مجاور آن تعریف شد (شکل ۴ و جدول ۱). گستره طرح در این مطالعه، از هر طرف به میزان حدود ۲-۳ درجه، فراتر از منطقه فرورانش مکران در نظر گرفته شد تا تمام چشمه‌های موثر بر حوزه مکران لحاظ گردد. در جدول (۱) مشخصات و توصیف حدود هر یک از چشمه‌های مذکور (دلایل تمایز هر چشمه از چشمه‌های مجاور) به صورت خلاصه ارائه شده است. در ادامه به ارائه دلایل مورد استفاده برای پهنه‌بندی لرزه‌زمین‌ساختی خواهیم پرداخت.

جدول ۱. خلاصه مشخصات و توصیف حدود هر یک از چشمه‌های لرزه‌زمین‌ساختی مکران و مناطق پیرامون.

شماره چشمه	دلایل و توضیحات
۱ و ۲	در این پهنه‌بندی بر اساس مجموعه‌ای از مشاهدات و دلایل (در جدول ۲) ابرراندگی مکران به دو قطعه شرقی و غربی تقسیم شده است. مرز فرضی بین این دو قطعه در عرض جغرافیایی حدود ۶۱-۶۲ درجه قابل تعیین است. اخیراً عباسی و همکاران (۲۰۲۳) با اضافه کردن تعداد ۱۷ بردار سرعت جی‌پی‌اس در بخش ایزانی مکران به این نتیجه رسیدند که مکران غربی به مراتب دارای قفل‌شدگی کمتری از مکران شرقی است و احتمال وقوع زمین‌لرزه‌های ابرراندگی در مکران غربی به مراتب (حدود ۷ برابر) کمتر از مکران شرقی است. در مکران غربی به جز یک گزارش مشکوک از زمین‌لرزه ابرراندگی (۱۸ فوریه ۱۴۸۳) (آمبرسیس و ملویل، ۱۹۸۲)، هیچ‌گونه زمین‌لرزه بزرگ و کم عمق با سازوکار راندگی ثبت نشده است. پهنه ۲ محل رخداد خوشه‌ای از زمین‌لرزه‌ها از جمله رخداد لرزه‌های عظیم پاستی (۱۹۴۵، Mw ۸/۱) است که باعث ایجاد سونامی نیز شد. سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌های این پهنه، راندگی با بیشینه عمق کانونی حدود ۲۰ کیلومتر است.
۳	قسمت جوان گوه‌برافزایی در امتداد همان خطی که ابرراندگی مکران به قسمت غربی و شرقی تقسیم شده به دو پهنه غربی (پهنه ۳) و شرقی (پهنه ۴) تقسیم شده است. در پهنه ۳ ساختارهای زمین‌ریخت‌شناختی آشفته بوده و نظم خاصی ندارند. در پهنه‌های جنوبی گوه (مانند پهنه‌های ۳ و ۴) نسبت به پهنه‌های شمالی‌تر، پوشش رسوبی سرعت موج برشی کم‌تری دارد (عنایت و قدس، ۲۰۲۳) بنابراین در صورت بروز زمین‌لرزه اثرات ساختگاهی بیشتری محتمل است که باید در تحلیل خطر لرزه‌ای لحاظ گردد.
۴	در پهنه ۴ ساختارهای زمین‌ریخت‌شناختی تا حد زیادی منظم، خطی و هم‌روند با گسله‌های محدوده هستند و از این نظر تفاوت بارزی با پهنه ۳ دارد. بر اساس بررسی داده‌های عمق کف دریا عرض گوه از شرق به غرب مکران به طور پیوسته افزایش می‌یابد. عرض گوه بخاطر حرکت چپ‌بر گسله سونه در عرض ۶۱-۶۲ درجه یک کاهش محسوس نشان می‌دهد و لذا ضخامت گوه برافزایی در پهنه ۴ کمتر از پهنه ۳ است.
۵	پهنه ۵ از شمال تا جازموریان و مشکِل و از جنوب تا حوالی سامانه‌های گسله‌ای قصرقند و هوشاب گسترش دارد. این چشمه در حقیقت دربرگیرنده قسمت قدیمی گوه‌برافزایی است که حاوی سنگ‌های رسوبی، دگرگونی و آذرین تراشیده شده از صفحه فرورونده است (مانند هابرلند و همکاران، ۲۰۲۰). سرعت بالای موج برشی این پهنه (عنایت و قدس، ۲۰۲۳) نسبت به سرعت موج برشی قسمت جنوبی و جوان گوه این منطقه، علت اصلی جدایش آن از قسمت جنوبی گوه بوده است.
۶	پهنه ۶ منطقه گذار مکران به زاگرس است و روند ساختاری تقریباً شمالی-جنوبی دارد که با روند عمومی آن با روند مکران (شرقی-غربی) متفاوت است. عارضه زمین‌ساختاری غالب در این بخش، سامانه گسله‌ای میناب-زندان-پالامی با سازوکار راست‌الغز راست‌بر می‌باشد (ریگارد و همکاران، ۲۰۰۵). لذا زمین‌لرزه‌های این پهنه که در راستای پهنه میناب-زندان-پالامی هستند به طور معمول دارای سازوکار راست‌الغز هستند. بر اساس برخی مطالعات منتشر شده (مانند یمینی فرد و همکاران، ۲۰۰۷) این بخش به احتمال زیاد لیتوسفر قاره‌ای دارد. عباسی و همکاران (۲۰۲۳) یک نرخ لغزش ۱۷ میلی‌متر در سال را برای پهنه گسله‌ای میناب-زندان-پالامی محاسبه کردند. با بررسی کاتالوگ لرزه‌ای منطقه مطالعاتی (شکل ۲) مشخص است که پهنه ۶ دارای لرزه‌خیزی بیشتری نسبت به پهنه‌های مکران است.
۷	پهنه ۷ را جازموریان می‌نامیم. جازموریان با روند ساختاری غالب شرقی-غربی، بین رشته‌کوه‌های جبال بارز در شمال و بشاگرد در جنوب محصور است. از نظر زمین‌ساختی، این ایالت دارای یک فروافتادگی پیش‌کمانی (جازموریان) مرتبط با فرورانش مکران و عملکرد گسله‌های هم‌روند با فروافتادگی است (مانند مک‌کال، ۱۹۹۷). جازموریان تقریباً محدوده‌ای بدون زمین‌لرزه است و زمین‌لرزه‌ها فقط به حاشیه‌های آن (به ویژه حاشیه شرقی و جنوب شرقی) محدود هستند.

۸	هامون مَشکَل در پاکستان به عنوان پهنه‌ای از مکران شرقی، معادل جازموریان در مکران غربی است و خصوصیات مشترکی با آن دارد. با توجه به موقعیت جغرافیایی و نیز تمایز آشکار ساختاری، لرزه‌ای و رسوبی با پهنه‌های مجاور، به عنوان پهنه لرزه‌زمین‌ساختی مجزا در نظر گرفته شده است.
۹	پهنه ۹ تحت تاثیر روند شمالی-جنوبی سامانه گسله‌های راستالغز و چپ‌بر اورناچ‌نال-چمن است. بنابراین روندی تقریباً شمالی-جنوبی یا شمالشرقی-جنوب غربی دارد و زمین‌لرزه‌ها به طور معمول سازوکار راستالغز چپ‌بر دارند. منطقه گذار یا جداکننده مکران از همگرایی هند-اوراسیا است (اقبال و همکاران، ۲۰۱۷). ویژگی‌های مناطق گذار را داشته و از پهنه‌های فرورانشی مکران متمایز است. واحدهای زمین‌ریخت‌شناختی و ساختاری دارای نظم خطی واضح هم‌روند با چین‌ها و گسله‌ها هستند.
۱۰	پهنه ۱۰ در قلمرو پهنه لرزه‌زمین‌ساختی ایران مرکزی قرار دارد. ایران مرکزی منطقه‌ای است که به عنوان یک بلوک قاره ای صلب شناخته می‌شود (مانند ورنانت و همکاران، ۲۰۰۴) و بین ورقه عربی در سمت جنوب غربی و ورقه اوراسیا در شمال فشرده شده است. این منطقه گسله‌های متعددی را در خود جای داده که تاریخچه حرکتی آنها بیان‌گر جایجایی‌های زیاد در کواترنر است (مانند واکر و جکسون، ۲۰۰۴). گسله‌های پی‌سنگی این منطقه راستالغز راست‌بر با راستای شمالی-جنوبی تا شمال غربی-جنوب شرقی مهم‌ترین نقش را در تطبیق با تغییر شکل و الگوهای لرزه‌ای دارند (مانند بربریان و همکاران، ۲۰۰۱). زمین‌لرزه‌های ایران مرکزی دارای بزرگی زیاد و دوره بازگشت طولانی بوده و غالباً توأم با گسیختگی و دگرریختی سطحی هستند (مانند بربریان، ۱۹۸۱).
۱۱	پهنه ۱۱ در ارتباط با بلوک لوت است که روند ساختاری غالب آن شمال غربی-جنوب شرقی است. این بلوک صلب در نظر گرفته شده است و اکثر زمین‌لرزه‌ها در پیرامون این بلوک اتفاق می‌افتند (مهاجر اشجعی و همکاران، ۱۹۷۵).
۱۲	پهنه ۱۲ را حوضه رسوبی سیستان می‌نامیم. حوضه رسوبی سیستان پهنه‌ای با منشاء پوسته‌ای است. از نظر رسوبی-ساختاری حوضه رسوبی سیستان دارای ویژگی‌های از جمله ستبرای زیاد رسوب (مانند عنایت و قدس، ۲۰۲۳)، محدود بودن حوضه به گسله‌های اطراف، است. از جمله مشخصه‌های اصلی این پهنه ضخامت زیاد رسوبات و زمین‌لرزه‌های با عمق کانونی کم (اکبرزاده و همکاران، ۲۰۲۳) است.
۱۳	پهنه ۱۳ در قلمرو بلوک هلمند قرار دارد. هلمند با داشتن نوار کوهزایی آلپی و پالتوزوئیک، از بلوک‌های پیرامون شناخته می‌شود و سرگذشت و سرشت زمین‌شناختی-تکتونیکی متمایزی از بلوک لوت و ایران مرکزی دارد و بنابراین مرزبندی واضحی بین آنها وجود دارد (می‌هالاسکی و همکاران، ۲۰۰۷). بر اساس بردارهای جی‌پی‌اس معدودی که در بلوک هلمند وجود دارد، این بلوک تقریباً نسبت به اوراسیا دارای حرکت بسیار کمی است (خرمی و همکاران، ۲۰۱۹).
۱۴	پهنه ۱۴ محدوده زمین‌لرزه‌های با عمق کانونی متوسط (۴۰ تا ۷۵ کیلومتر) است. این زمین‌لرزه‌ها در رابطه با خمش سنگ‌کره اقیانوسی و ساختارهای عمیق فرورانشی هستند و سازوکار نرمال دارند. رومرکز این زمین‌لرزه‌ها در مکران شرقی، موازی با کمان آتشفشانی مکران (شمال شرقی-جنوب غربی) به خط شده‌اند. این روند در مکران غربی تقریباً در راستای شمال غرب، غرب-جنوب شرق، شرق است و تا مرز پهنه گذار زاگرس-مکران پیش می‌رود.

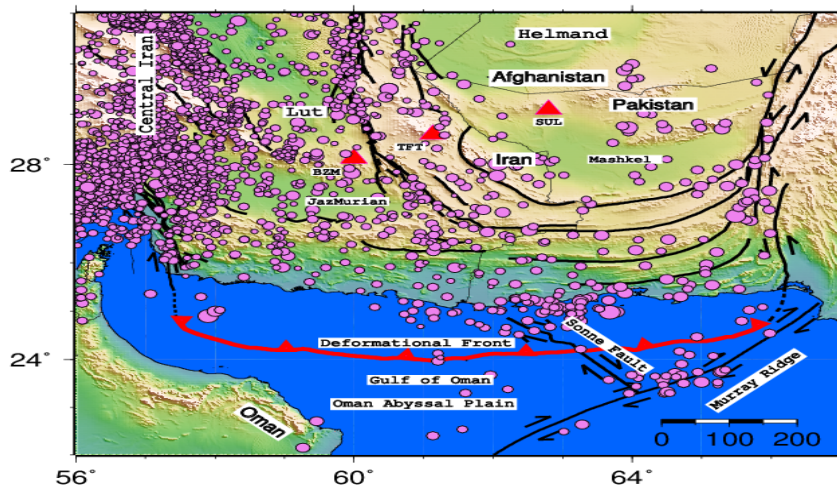
## ۱-۵ قطعه‌بندی ابراندگی مکران (پهنه‌های او)

منطقه ابراندگی سامانه‌های فرورانشی مختلف به علت دارا بودن ظرفیت ایجاد زمین‌لرزه‌های عظیم مانند زمین‌لرزه‌های ۱۹۶۰ شیلی و ۱۹۶۴ آلاسکا به ترتیب با بزرگای ۹/۵ و ۹/۲ (بریس و بایرلی، ۱۹۶۶)، اهمیت ویژه‌ای در پهنه‌بندی لرزه‌ای و لرزه‌زمین‌ساختی این سامانه‌ها دارد. بزرگای رخدادهای ابراندگی با مساحت پهنه لرزه‌زای واقع در سطح ابراندگی ارتباط مستقیم دارند. در پهنه‌بندی لرزه‌زمین‌ساختی حاضر بر اساس مجموعه‌ای از مشاهدات و دلایل (در جدول ۲) ابراندگی مکران به دو قطعه شرقی و غربی تقسیم شده است.

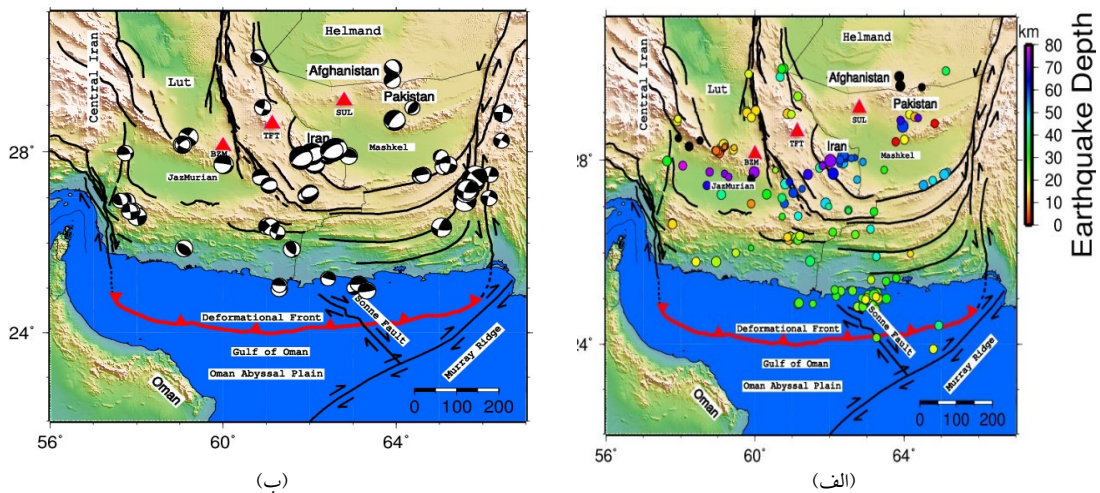
لرزه‌خیزی مکران اغلب توسط ایستگاه‌های لرزه‌نگاری در فواصل دور ثبت شده و کیفیت مکان‌یابی حاصل از این ایستگاه‌ها بسته به زمان وقوع و بزرگای زمین‌لرزه‌ها متغیر است. بر اساس کاتالوگ‌های لرزه‌ای موجود، فعالیت لرزه‌ای مکران بیش‌تر در بخش راندگی‌های فلسی گوه متمرکز است و با دور شدن از این پیشانی دگرشکلی، از شدت رفتار لرزه‌ای منطقه به طور قابل ملاحظه‌ای کاسته می‌شود (شکل‌های ۲ و ۳ الف). ابراندگی مکران بر اساس مطالعات مختلف ژئوفیزیکی (مانند برن و همکاران، ۱۹۹۲؛ خالدزاده، ۱۴۰۱؛ اکبرزاده و همکاران، ۲۰۲۳)، زمین‌شناختی (مانند بورگ و همکاران، ۲۰۱۳)،

کو کاوسکی، ۲۰۰۰؛ حقی پور و همکاران، ۲۰۱۳) (جدول ۲). بنابراین می‌توانیم توضیح و توصیف ویژگی‌های لرزه‌زمین‌ساختی ابرراندگی مکران را در قالب دو زیر پهنه‌ی ابرراندگی مکران شرقی و غربی دنبال کنیم. در جدول (۲) خلاصه‌ای از مشاهدات علمی در مورد قطعه‌بندی شرقی-غربی ابرراندگی مکران به همراه منابع اطلاعاتی آنها ارائه شده است.

زمین‌ریخت‌شناختی (مانند حقی پور و بورگ، ۲۰۱۳) و ژئودزی (مانند عباسی و همکاران، ۲۰۲۳) به دو قطعه شرقی و غربی متمایز تقسیم می‌شود. مرز فرضی بین این دو قطعه در عرض جغرافیایی حدود ۶۱-۶۲ درجه و نزدیک مرز ایران و پاکستان قابل تعیین است و تاکنون موارد متعددی از تمایز آشکار بین مکران شرقی و غربی شناسایی شده است (مانند پیچ و همکاران، ۱۹۷۹؛ برن و همکاران، ۱۹۹۲؛



شکل ۲. نقشه لرزه‌خیزی مکران و مناطق پیرامون. کاتالوگ دستگاهی مورد استفاده در این نقشه شامل تمام زمین‌لرزه‌ها ۲۰۲۲-۱۹۰۰ است که بر اساس کاتالوگ مرکز لرزه‌نگاری کشوری (IRSC) و پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله (IIIES) تهیه شده است. کاتالوگ تاریخی مورد استفاده نیز بر اساس آمبرسیس و ملویل (۱۹۸۲) است.



شکل ۳. الف. نقشه زمین‌لرزه‌های دوباره مکان‌یابی شده، کاتالوگ لرزه‌ای از قدس و همکاران (۲۰۲۰) است. رنگ و اندازه دایره‌ها به ترتیب عمق کانونی و بزرگی زمین‌لرزه‌ها را نشان می‌دهند. ب. سازوکارهای کانونی زمین‌لرزه‌های منطقه. داده‌های سازوکار کانونی از (پنی و همکاران ۲۰۱۷) است.

جدول ۲. خلاصه شواهد و توضیحات مختصر مربوط به قطعه‌بندی ابرراندگی مکران.

ردیف	دلیل	توضیحات	منابع
۱	روندهای ساختاری	مکران شرقی دارای روندهای ساختاری منظم و خطی شرقی-غربی است ولی مکران غربی فاقد هرگونه ساختار با روند قاعده‌مند و راستای مشخص است.	(مانند برن و همکاران، ۱۹۹۲؛ کواوسکی، ۲۰۰۰؛ بورگ و همکاران، ۲۰۱۳).
۲	کوتاه شدگی عرض گوه برافزایشی	عرض گوه از شرق به غرب مکران به طور پیوسته افزایش می‌یابد. عرض گوه بخاطر حرکت چپ‌برگسله سونه در عرض ۶۱-۶۲ درجه یک کاهش محسوس نشان می‌دهد.	بر اساس بررسی داده‌های عمق کف دریا
۳	وجود گسله سونه و تغییر تعداد رخدادهای زمین‌لرزه‌ای در دو طرف آن	تعداد رخدادهای لرزه‌ای در شرق سونه (به عنوان یک مرز) بیشتر از غرب آن است و اکثر رویدادهای زمین‌لرزه‌ای در شرق گسله سونه متمرکز هستند.	(مانند برن و همکاران، ۱۹۹۲؛ رانی و همکاران، ۲۰۱۱؛ راجندران و همکاران، ۲۰۱۳؛ عابدی و بهرودی، ۲۰۱۶؛ قدس و همکاران، ۲۰۲۱؛ اکبرزاده و همکاران، ۲۰۲۳).
۴	نرخ بالآمدگی سواحل مکران و رشد ارتفاعی قسمت دریایی گوه برافزایشی	نرخ بالآمدگی سواحل مکران از غرب به شرق بیشتر می‌شود. بررسی بی‌هنجاری عمق کف دریا و هوای آزاد نشان می‌دهد که قسمت دریایی گوه برافزایشی مکران شرقی دارای نرخ بالآمدگی بیشتری است.	(مانند پیچ و همکاران، ۱۹۷۹؛ خالدزاده، ۱۴۰۱).
۵	ارتباط بین الگوی کانال‌های زهکشی رودخانه‌ها و شکل مقطع آنها با رشد فعال گوه	رودخانه‌های مکران غربی در تعادل ریخت‌شناختی هستند در حالی که رودخانه‌های مکران شرقی مقاطع با تحدب برجسته و آبشاری دارند و به طور قابل توجهی از تعادل زمین‌ریختی فاصله می‌گیرند.	(مانند حقی پور و بورگ، ۲۰۱۳).
۶	تغییرات نرخ دگرریختی بر اساس مطالعات جی‌پی‌اس	بر اساس مطالعات جی‌پی‌اس میزان جفت‌شدگی ورقه فرورانشی با ورقه رورانده در مکران غربی بسیار کمتر از مکران شرقی است و در نتیجه نرخ کرنش در گوه برافزایشی مکران غربی بسیار کمتر از مکران شرقی است.	(عباسی و همکاران، ۲۰۲۳).
۷	تغییرات لرزه‌خیزی	تفاوت‌های واضحی در رفتار لرزه‌ای غرب و شرق ابرراندگی مکران وجود دارد. لرزه‌خیزی در ابرراندگی مکران شرقی برای همه بزرگ‌گاو و عمق‌ها بیشتر از مکران غربی است	(مانند برن و همکاران، ۱۹۹۲؛ رانی و همکاران، ۲۰۱۱؛ راجندران و همکاران، ۲۰۱۳؛ عابدی و بهرودی، ۲۰۱۶؛ قدس و همکاران، ۲۰۲۱؛ اکبرزاده و همکاران، ۲۰۲۳).
۸	هندسه و ژئودینامیک سامانه فرورانشی	یک مرز واضح سرعتی بین مکران شرقی و غربی وجود دارد.	(عنایت و قدس، ۲۰۲۳).

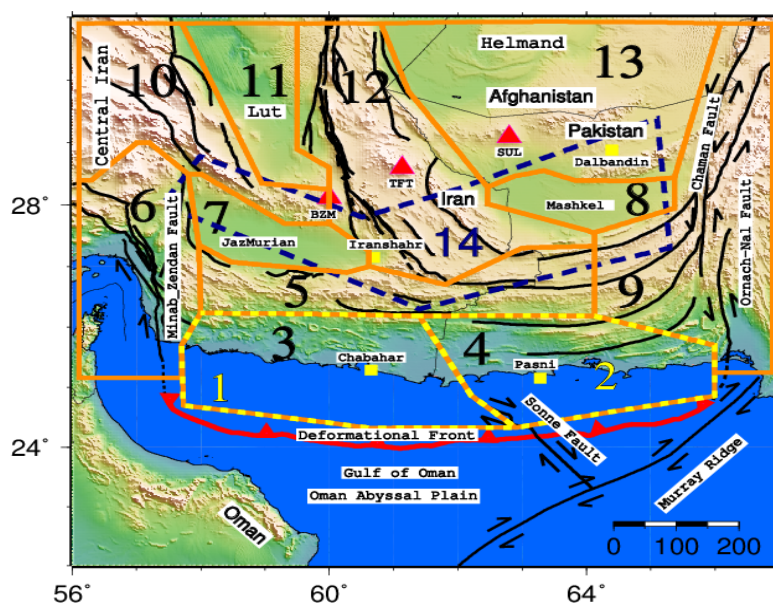
شرق گسله سونه (غرب ۶۴ درجه طول شرقی)، در نزدیکی پاسنی است (برن و همکاران، ۱۹۹۲) (شکل‌های ۲ و ۳). همه زمین‌لرزه‌های ثبت شده در اطراف پاسنی دارای راندگی محض هستند و به عنوان رخدادهای مرز ورقه تفسیر می‌شوند (برن، ۱۹۹۲؛ کویتیر و کافکا ۱۹۸۴)

امروزه ابرراندگی مکران شرقی فعالیت لرزه‌ای بسیار کمی دارد. بیشتر این زمین‌لرزه‌ها بر روی ورقه فرورانشی رخ می‌دهد. بیشتر زمین‌لرزه‌های ابرراندگی مکران شرقی به صورت خوشه‌ای از رخدادهای لرزه‌ای شامل رخدادهای عظیم‌لرزه‌ای سونامی‌زای  $MW$  ۸/۱ در ۲۷ نوامبر ۱۹۴۵ در

نتیجه رسیدند که مکران غربی از نظر گرمایی (از نظر اندازه پهنه ابراندگی نه ضرورتاً قفل‌شدگی لرزه‌ای) توان ایجاد رویداد ابراندگی با بزرگی گشتاوری  $0.26 \pm 8.65$  را دارد. وجود تخته سنگ‌هایی منفرد با ارتفاعی بین ۶ تا ۸ متر (هافمن و همکاران، ۲۰۱۳)، بر روی صخره‌های بلند با ارتفاعی تا ۵۰ متر بلندتر از سطح متوسط دریا در امتداد سواحل عمان نشان می‌دهد که در مکران غربی نیز با وجود نادر بودن، احتمال رخداد زمین‌لرزه‌های ابراندگی و سونامی وجود دارد. در بازگشت به تاریخ، ممکن است که مکران غربی رویداد یک زمین‌لرزه با بزرگا و آثاری مشابه زمین‌لرزه‌های راندگی و سونامی‌زا، در ۲۹ بهمن سال ۸۶۱ شمسی (۱۸ فوریه ۱۴۸۳) (آمبرسیس و ملویل، ۱۹۸۲) را در پیشینه خود ثبت کرده باشد (موسون، ۲۰۰۶). اثرات این زمین‌لرزه در جزیره هرمز که در گذشته زرون (به عربی، جرون) نامیده می‌شد دیده شده و سبب ویرانی یا آسیب برخی ساختمان‌های بلند، مناره‌های مساجد و بادگیر خانه‌ها شده است. این گزارش تاریخی بیان می‌کند که در حدود همین زمان، شمال شرقی عمان نیز در اثر زمین‌لرزه آسیب دید. جزئیات اثرات زمین‌لرزه در تنگه هرمز این گمان را ایجاد می‌کند که زمین‌لرزه‌ای با بزرگای زیاد روی داده و منطقه رومرکزی آن مقداری از جزیره دور بوده است. بنابراین به دلیل نبود داده‌هایی از مناطق ساحلی ایران و اشاره به زمین‌لرزه‌ای در عمان، نتیجه‌گیری می‌شود که امکان این که خاستگاه این زمین‌لرزه در فراساحل مکران غربی بوده باشد، بیش‌تر است. آمبرسیس و ملویل (۱۹۸۲) مختصات رومرکزی  $57.90$  درجه طول جغرافیایی و  $24.90$  عرض جغرافیایی و بزرگای  $7.7$  Mw را برای این زمین‌لرزه پیشنهاد کرده‌اند.

(شکل ۳ ب). لرزه‌خیزی محدوده پشته موری، تقریباً فقط به بخش شمالی آن محدود است و لرزه‌خیزی ورقه اورمارا نیز بیشتر در شرق گسله سونه متمرکز است (شکل ۲). کوکاووسکی و همکاران (۲۰۰۰) پیشنهاد می‌کنند که چنین مواردی پیامد این واقعیت است که نرخ همگرایی بین ورقه اورمارا و ورقه اوراسیا بیشتر از نرخ همگرایی بین ورقه عربی و اوراسیا است که موجب می‌شود تنش بیشتری در لبه شرقی اورمارا تجمع یافته و نهایتاً به صورت زمین‌لرزه آزاد شود. خالدزاده و قدس (۲۰۲۱) با در نظر گرفتن شیب صفحه فرورانشی به دست آمده از مطالعات پریستلی و همکاران (۲۰۲۲) و مدل‌سازی حرارتی دریافتند از نظر حرارتی ابراندگی مکران شرقی ظرفیت تولید رخداد ابراندگی با بزرگی گشتاوری  $0.26 \pm 8.75$  را دارد.

مکران غربی بر خلاف مکران شرقی، با نبود رخداد‌های بین‌ورقه‌ای مشخص می‌شود. شبکه محلی موقت چهار ساله دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان نیز لرزه‌خیزی قابل توجهی در مکران غربی شناسایی نکرد (اکبرزاده و همکاران، ۲۰۲۳). نیازی و همکاران (۱۹۸۰) با توجه به ثبت نشدن رخداد زمین‌لرزه‌ای توسط لرزه‌نگارهای نصب شده در کف اقیانوس به مدت دو هفته به این نتیجه رسیدند که مکران غربی فعالیت لرزه‌ای خاصی ندارد. مشاهداتی از این دست، منجر به این تصور شده است که ابراندگی در مکران غربی به جای تجمع کرنش کشسان، به طور دائم در حال لغزش است (برن و همکاران، ۱۹۹۲). خالدزاده و قدس (۲۰۲۱) با فرض اینکه هندسه ورقه فرورانشی به دست آمده برای انتهای غربی مکران شرقی (پریستلی و همکاران، ۲۰۲۲)، به مکران غربی نیز قابل تعمیم است، از این هندسه در مدل‌سازی حرارتی مکران غربی استفاده کردند و به این



شکل ۴. موقعیت هریک از چشمه‌های لرزه‌زمین‌ساختی مکران و مناطق پیرامون. خطوط نارنجی پیوسته، نشان دهنده محدوده چشمه‌های پهنه‌ای سطحی (چشمه‌های ۳-۱۳) هستند. خط چین آبی محدوده چشمه پهنه‌ای ۱۴ (دربرگیرنده زمین‌لرزه‌های با عمق متوسط) را نشان می‌دهد. خط چین زرد نشان دهنده محدوده چشمه‌های پهنه‌ای ابرراندگی (چشمه‌های ۱ و ۲) است. مثلث‌های قرمز نشان دهنده سه مرکز آتشفشانی کوآترنری با نام‌های بزمان، تفتان و سلطان هستند. خطوط سیاه پررنگ نشان دهنده گسله‌های مختلف هستند. خط پیوسته قرمز دنداندار، محدوده پهنه فرورانشی و جبهه دگرشکلی آن را نشان می‌دهد. دندانها بیان‌گر جهت فرورانش هستند.

مکران غربی به طور کامل قفل شده است. پذیرش این دیدگاه به معنی احتمال بالای رویداد زمین‌لرزه‌های ابرراندگی و سونامی در مکران غربی است. در تضاد با نتایج پنی و همکاران (۲۰۱۷)، خرمی و همکاران (۲۰۱۹) برای مکران غربی درجات بسیار پائین‌تری از قفل‌شدگی و در نتیجه سطوح پائین‌تری از خطر را قائل شدند. هر دوی این مطالعات شکل دقیق ورقه فرورانشی زیر منطقه ابرراندگی را نداشتند و با توجه به الگوهای معمول، شیب فرضی محدوده راندگی را ۱۰-۱۱ درجه در نظر گرفته‌اند. دانستن شیب ورقه فرورانشی برای تعیین مساحت و عمق محدوده ابرراندگی و در نتیجه عمق و بزرگای زمین‌لرزه‌های ابرراندگی ضروری است که خود تعیین‌کننده ویژگی سونامی‌های مرتبط و نیز عمق و محل زمین‌لرزه‌های نرمال با عمق متوسط خواهد بود. پرستلی و همکاران (۲۰۲۲) هندسه و شیب ورقه فرورونده در مکران غربی را به روش

جواب به سوال آیا مکران غربی دچار قفل‌شدگی است یا خیر؟ چالش بزرگی بود و نظرات مختلفی در این باره وجود داشت (مانند پنی و همکاران، ۲۰۱۷). نبود زمین‌لرزه‌های ابرراندگی دستگامی در مکران غربی را می‌توان به دوره‌های طولانی مدت بین‌لرزه‌ای (یعنی پهنه ابرراندگی در حالت قفل‌شدگی شدید است)، فرورانش بی‌لرزه (خزش)، یا رفتار ترکیبی میان این دو حالت مرتبط دانست (مانند اللزکی و همکاران، ۲۰۱۴) که تشخیص آن کار ساده‌ای نیست. مشاهدات ژئودتیکی جی‌پی‌اس ظرفیت زیادی برای روشن کردن دلایل نبود زمین‌لرزه‌های ابرراندگی در نواحی فرورانشی دارند، اما کمبود بردارهای سرعت جی‌پی‌اس در مکران منجر به نتایج متفاوت مدل‌سازی و ایجاد دیدگاه‌های متفاوت و گاه متناقض درباره وضعیت قفل‌شدگی ورقه‌ها منجر شده بود. برای نمونه، پنی و همکاران (۲۰۱۷) معتقدند که پهنه ابرراندگی

جی‌پی‌اس معدودی که در بلوک هلمند وجود دارد، این بلوک تقریباً نسبت به اوراسیا دارای حرکت بسیار کمی است (خرمی و همکاران، ۲۰۱۹).

حوضه رسوبی سیستان پهنه‌ای با منشأ پوسته‌ای است. از جمله مشخصه‌های اصلی این پهنه ضخامت زیاد رسوبات (تکنیک و قدس، ۲۰۱۷؛ عنایت و قدس، ۲۰۲۳) و زمین‌لرزه‌های با عمق کانونی کم (اکبرزاده و همکاران، ۲۰۲۳) است. پهنه ۱۱ در ارتباط با بلوک لوت است که روند ساختاری غالب آن شمال غربی-جنوب شرقی است. این بلوک صلب در نظر گرفته شده است و اکثر زمین‌لرزه‌ها در پیرامون این بلوک اتفاق می‌افتد (مهاجر اشجعی و همکاران، ۱۹۷۵). پهنه ۱۰ در قلمرو پهنه لرزه‌زمین‌ساختی ایران مرکزی قرار دارد. ایران مرکزی منطقه‌ای است که به عنوان یک بلوک قاره‌ای صلب شناخته می‌شود (مانند ورنانت و همکاران، ۲۰۱۲) و بین ورقه عربی در سمت جنوب غربی و ورقه اوراسیا در شمال فشرده شده است. این منطقه تحت تأثیر باز و بسته شدن متوالی سامانه‌های اقیانوسی بزرگ یا حوضه‌های حاشیه‌ای باریک است و گسل‌های متعددی را در خود جای داده که تاریخچه حرکتی آنها بیان‌گر جابجایی‌های زیاد در کوتاه‌تر است (مانند واکر و جکسون، ۲۰۰۴). در این منطقه، گسل‌های پی‌سنگی راست‌الغز راست‌بر با راستای شمالی-جنوبی تا شمال غربی-جنوب شرقی مهم‌ترین نقش را در تطبیق با تغییر شکل و الگوهای لرزه‌ای ایفا می‌کنند (مانند بربریان و همکاران، ۲۰۰۱). زمین‌لرزه‌های ایران مرکزی دارای بزرگی زیاد و دوره‌ی بازگشت طولانی بوده و غالباً توأم با گسیختگی و دگرریختی سطحی هستند (مانند بربریان، ۱۹۸۱). ایران مرکزی در یک قرن گذشته چندین رویداد لرزه‌ای مرگبار از جمله زمین‌لرزه بم را تجربه کرده است. فروافتادگی جازموریان در بخش غربی و ایرانی مکران دارای روند ساختاری غالب شرقی-غربی است. این پهنه از نظر زمین‌ساختی یک فروافتادگی پیش‌کمانی مرتبط

تابع‌گیرنده در راستای یک مقطع لرزه‌ای واقع در مرز بین مکران شرقی و مکران غربی مطالعه کردند و شیبی در حدود ۳ درجه برای محدوده ابرراندگی مکران در محدوده مرز بین مکران شرقی و غربی محاسبه کردند. قدس و همکاران (۲۰۲۱) با مکان‌یابی دقیق زمین‌لرزه‌ها نشان دادند که شیب صفحه فرورونده در عرض مکران تغییر قابل توجهی ندارد. اخیراً عباسی و همکاران (۲۰۲۳) با اضافه کردن تعداد ۱۷ بردار سرعت جی‌پی‌اس در بخش ایرانی مکران به این نتیجه رسیدند که مکران غربی به مراتب دارای قفل‌شدگی کمتری از مکران شرقی است و در نتیجه به طور واضحی اثبات کردند که احتمال وقوع زمین‌لرزه‌های ابرراندگی در مکران غربی به مراتب (حدود ۷ برابر) کمتر از مکران شرقی است.

## ۲-۵ پهنه‌بندی ورقه سوار (پهنه‌های ۳، ۴، ۵، ۷، ۸، ۱۰، ۱۱، ۱۲ و ۱۳)

به طور کلی از دیدگاه نئوتکتونیک می‌توان ورقه سوار سامانه فرورانشی مکران را به پهنه‌های مستقلی شامل پهنه‌های ۳ و ۴ به عنوان دو پهنه لرزه‌زمین‌ساختی مجزا در دو قطعه غربی و شرقی مکران ساحلی، پهنه ۵ از حوالی گسله‌های هوشاب و قصرقند در جنوب تا مرز فروافتادگی‌های جازموریان و مشکل در شمال، پهنه جازموریان (پهنه ۷) و پهنه مشکل (پهنه ۸) پهنه ۱۰ (در قلمرو ایران مرکزی)، پهنه ۱۱ (در قلمرو بوک لوت)، پهنه رسوبی سیستان (پهنه ۱۲)، پهنه ۱۳ (در قلمرو بلوک هلمند)، تقسیم کرد.

پهنه ۱۳ در قلمرو بلوک هلمند قرار دارد. هلمند با داشتن نوار کوهزایی آلپی و پالتوزوئیک، از بلوک‌های پیرامون شناخته می‌شود و سرگذشت و سرشت زمین‌شناختی و تکتونیک متمایزی از بلوک لوت و ایران مرکزی داشته و مرزبندی واضحی بین آنها وجود دارد (می‌هالاسکی و همکاران، ۲۰۰۷). بر اساس بردارهای

جی‌پی‌اس (عباسی و همکاران، ۲۰۲۳) است. ساختارهای زمین‌ریخت‌شناختی (محور چین‌ها) پهنه ۳ آشفته هستند و نظم مشخصی ندارند. این پهنه از سمت جنوب به وسیله جبهه دگرشکلی محدود می‌شود. برعکس در پهنه ۴ ساختارهای زمین‌ریخت‌شناختی (چین‌ها) تا حد زیادی منظم، خطی و هم‌روند با گسله‌های این محدوده هستند. بر اساس بررسی داده‌های عمق کف دریا، عرض گوه از شرق به غرب مکران به طور پیوسته افزایش می‌یابد. عرض گوه بخاطر حرکت چپ‌بر گسله سونه در عرض ۶۱-۶۲ درجه یک کاهش محسوس نشان می‌دهد (کوکاوسکی و همکاران، ۲۰۰۰). پهنه‌های ۳ و ۴ نسبت به پهنه ۵، ضخامت پوشش رسوبی کمتر ولی سرعت موج برشی کمتری دارند (عنایت و قدس، ۲۰۲۳). عنایت و قدس (۱۴۰۲) حدس زدند که در صورت بروز زمین‌لرزه، اثرات ساختمانی در پهنه‌های ۳ و ۴ بیشتر از پهنه ۵ است.

### ۳-۵ پهنه میناب-زندان-پالامی (پهنه ۶)

پهنه میناب-زندان-پالامی (پهنه ۶)، منطقه گذار مکران به زاگرس است و روند ساختاری تقریباً شمالی-جنوبی دارد که با روند عمومی مکران (شرقی-غربی) متفاوت است. عارضه زمین‌ساختاری غالب در این بخش، سامانه گسله‌ای میناب-زندان-پالامی با سازوکار راستالغز راست‌بر می‌باشد (ریگارد و همکاران، ۲۰۰۵). لذا زمین‌لرزه‌های این پهنه که در راستای پهنه میناب-زندان-پالامی هستند به طور معمول دارای سازوکار راستالغز هستند. بر اساس برخی مطالعات منتشر شده (مانند یمینی فرد و همکاران، ۲۰۰۷) این بخش به احتمال زیاد لیتوسفر قاره‌ای دارد. عباسی و همکاران (۲۰۲۳) یک نرخ لغزش ۱۷ میلی‌متر در سال را برای پهنه گسله‌ای میناب-زندان-پالامی محاسبه کردند. با بررسی کاتالوگ لرزه‌ای منطقه مطالعاتی (شکل ۲) مشخص است که پهنه ۶ دارای لرزه‌خیزی بیشتری نسبت به پهنه‌های مکران است و زمین‌لرزه‌های آن

با فرورانش مکران و عملکرد گسله‌های هم‌روند با فروافتادگی است (مانند مک‌کال، ۱۹۹۷؛ بورگ و همکاران، ۲۰۱۳؛ بورگ، ۲۰۱۸). فروافتادگی جازموریان و مشکل به ترتیب به صورت پهنه‌های لرزه‌ای ۷ و ۸ در نظر گرفته شدند. اکبرزاده و همکاران (۲۰۲۳) جازموریان را یک حوضه بدون لرزه‌ای معرفی می‌کند و نشان می‌دهد که زمین‌لرزه‌ها فقط به پیرامون آن محدود است. فروافتادگی مشکل در بخش شرقی و پاکستانی مکران، معادل فروافتادگی جازموریان است و خصوصیات مشترکی با آن دارد هر چند اکبرزاده و همکاران (۲۰۲۳) به این نتیجه رسیدند که به علت کم‌بودن تفاوت اندازه بردارهای جی‌پی‌اس در مرز جنوبی مشکل با نواحی شمالی آن، باید لرزه‌خیزی در پیرامون مشکل نسبت به پیرامون جازموریان کمتر باشد. بنابراین در پهنه‌بندی حاضر، مشکل با توجه به موقعیت جغرافیایی و نیز تمایز آشکار ساختاری، لرزه‌ای و رسوبی با پهنه‌های مجاور، به عنوان پهنه لرزه‌زمین‌ساختی مجزا در نظر گرفته شده است. پهنه ۵ از شمال تا جازموریان و نیمه غربی مشکل و از جنوب تا حوالی سامانه‌های گسله‌ای قصرقند و هوشاب گسترش دارد. این چشمه در حقیقت دربرگیرنده قسمت قدیمی گوه‌برافزایی است که حاوی سنگ‌های رسوبی و دگرگونی و مواد آذرین تراشیده شده از صفحه فرورونده است (هاپرلند و همکاران، ۲۰۲۰؛ عنایت و قدس، ۲۰۲۳). سرعت بالای موج برشی این پهنه (عنایت و قدس، ۲۰۲۳) نسبت به سرعت موج برشی در قسمت جنوبی و جوان گوه‌برافزایی، علت اصلی جدایش این پهنه از قسمت جنوبی گوه‌برافزایی بوده است. لرزه‌خیزی پهنه ۵ اندک و کم عمق است.

قسمت جوان گوه‌برافزایی در راستای همان خطی که ابرراندگی مکران به قسمت غربی و شرقی تقسیم شده به دو پهنه غربی (پهنه ۳) و شرقی (پهنه ۴) تقسیم شده است. معیار اساسی برای این تقسیم‌بندی تفاوت زمین‌ریخت‌شناختی و ساختاری و میزان جایدهی کرنش بدست آمده از مطالعات

بیشترین خطر لرزه‌ای در پهنه‌های میناب-زندان-پالامی و اورناچ‌نال-چمن اتفاق بیافتد. نرخ تغییر شکل پوسته در این دو پهنه به ترتیب بیش از ۱۵ و ۲۰ میلی‌متر در سال تخمین زده شده است و همه زمین‌لرزه‌های این دو پهنه کم‌عمق هستند. در نقشه خطر زمین‌لرزه جدید میزان خطر زمین‌لرزه و سونامی در مکران شرقی به مراتب بیشتر از مکران غربی است که در ارتباط مستقیم با مقدار بسیار بیشتر قفل‌شدگی لرزه‌ای ابرراندگی مکران شرقی است (عباسی و همکاران، ۲۰۲۳). از آنجائیکه که شکل صفحه فرورنده و زمین‌لرزه‌های بزرگ عمق متوسط آن برای اولین بار در مکران نظر گرفته شده است، ما پیش‌بینی می‌کنیم که میزان خطر زمین‌لرزه به خصوص در دوره‌های لرزه‌ای بالا برای یک منطقه بزرگ که می‌تواند شامل کشورهای حاشیه جنوبی خلیج فارس و دریای عمان هم باشد زیاد شود.

بندر مهم چابهار در منتهی‌الیه مکران شرقی قرار دارد و در نتیجه دارای خطر زمین‌لرزه و سونامی بیشتری نسبت به مکران غربی است. پیشنهاد می‌شود احداث نیروگاه‌های اتمی و آب‌شیرین‌کن‌ها و سایر تاسیسات حساس و حیاتی که نیاز به هم‌جواری با آب‌های آزاد دارند در حدفاصل بندر کنارک تا سی‌کیلومتری شرق بندر جاسک احداث گردد. محدوده بین جاسک و سی‌کیلومتری شرقی آن در درون پهنه میناب-زندان-پالامی دارای نرخ بالای لغزش گسله‌ها است و بنابراین اکیدا توصیه می‌گردد تاسیسات حساس در این منطقه احداث نگردد.

همه شهرهای ساحلی درون قسمت جوان گوه برافزایشی قرار دارند. عنایت و قدس (۲۰۲۳) نشان دادند که ضخامت پوش رسوبی در قسمت جوان گوه برافزایشی زیاد است و سرعت متوسط موج برشی برای آنها کم است. با توجه به این یافته‌ها، عنایت و قدس (۱۴۰۲) پیش‌بینی کردند که اثر حوضه رسوبی بر روی دامنه امواج لرزه‌ای در مناطق ساحلی مکران قابل ملاحظه است. همچنین اکبرزاده (۱۴۰۲) نشان داد که دامنه در بسامدهای پائین در سواحل

دارای بزرگی متوسط تا زیاد، دوره بازگشت کوتاه و به طور معمول عمق کانونی بین ۱۰ تا ۲۰ کیلومتر هستند (پنی و همکاران، ۲۰۱۷).

#### ۴-۵ پهنه اورناچ‌نال-چمن (پهنه ۹)

پهنه ۹ تحت تاثیر روند شمالی-جنوبی سامانه گسله‌ای راست‌الغز چپ‌بر اورناچ‌نال-چمن است و روندی تقریباً شمالی-جنوبی یا شمال‌شرقی-جنوب غربی دارد و به طور معمول زمین‌لرزه‌ها دارای سازوکار راست‌الغز چپ‌بر هستند. این پهنه، منطقه گذار یا جدا کننده مکران از همگرایی هند-اوراسیا است (اقبال و همکاران، ۲۰۱۷). پهنه اورناچ‌نال-چمن ویژگی‌های مناطق گذار را داشته و از پهنه‌های فرورانشی مکران متمایز است. واحدهای زمین‌ریخت‌شناختی و ساختاری دارای نظم خطی واضح و هم‌روند چین‌ها و گسله‌ها هستند. سامانه گسله‌ای اورناچ‌نال-چمن به طور کلی از سه گسله اورناچ‌نال، قضابند و چمن تشکیل شده است و از سمت غرب گسله‌های زیادی از جمله سیاهان، پنجگور و هوشاب به آن متصل می‌شوند (شکل ۱). با توجه به طول زیاد سامانه گسله‌ای اورناچ‌نال-چمن (بیشتر از ۱۰۰۰ کیلومتر) و نرخ لغزش بیش از ۲ سانتی‌متر در سال آن، لرزه‌خیزی تاریخی روی گسل چمن به طور قابل توجهی کم است (آمبرسیس و بیهم، ۲۰۰۳). سامانه گسله‌ای اورناچ‌نال-چمن میزان زمین‌لرزه‌های بزرگی مانند زمین‌لرزه راست‌الغز ۲۴ سپتامبر ۲۰۱۳ بلوچستان (جنوب غربی پاکستان) با بزرگای Mw ۷/۷ بوده است (آوآک و همکاران، ۲۰۱۴) و بنابراین رخداد زمین‌لرزه‌های بزرگ و مخرب در طول این سامانه گسله‌ای دور از ذهن نبوده و همواره محتمل است.

#### ۶ بحث‌ها

در صورت استفاده از پهنه‌بندی ارائه شده در این مطالعه در محاسبه خطر زمین‌لرزه مکران، می‌توان انتظار داشت که

۱- دارای ۱۴ پهنه لرزه‌زمین‌ساختی است که از این میان ۱۳ پهنه در عمق‌های کمتر از ۲۰ کیلومتر و یک پهنه در عمق‌های بین ۴۰ تا ۷۵ کیلومتر است.

۲- ابرراندگی مکران به دو پهنه شرقی و غربی تقسیم شد و شواهد متعددی برای این پهنه‌بندی ارائه گردید. پهنه غربی دارای لرزه‌خیزی بسیار کمتری است.

۳- گوه‌برافزایشی عریض مکران به یک پهنه شمالی و دو پهنه جنوبی هم‌خوان با مرزهای ابرراندگی شرقی و غربی تقسیم شد.

۴- فروافتادگی جازموریان، مَشکِل و بلوک‌های لوت و هلمند به عنوان سه پهنه غیرلرزه‌زا در نظر گرفته شد.

۵- پهنه زمین‌درز سیستان به عنوان یک پهنه لرزه‌ای با زمین‌لرزه‌های کم عمق در نظر گرفته شد.

۶- مناطق گذار میناب-زندان-پالامی و اورناچ‌نال-چمن به عنوان دو پهنه لرزه‌ای با زمین‌لرزه‌های کم عمق راستالغز در نظر گرفته شد.

#### تشکر و قدردانی

در پایان از نظرات اعضای محترم دانشکده علوم زمین، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان کمال تشکر و قدردانی را داریم. همچنین ما از مرکز لرزه‌نگاری کشوری (IRSC)، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله (IIIES) و دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان که از کاتالوگ زمین‌لرزه‌های آنها در این مطالعه استفاده شده است تشکر می‌کنیم.

#### منابع

افتخارنژاد، جمشید (۱۳۵۹). تفکیک بخش‌های مختلف ایران از نظر وضع ساختمانی در ارتباط با حوضه‌های رسوبی، نشریه انجمن نفت، شماره ۸۲، ۱۹-۲۸.

آقاباتی، سید علی (۱۳۸۱). واحدهای اصلی رسوبی-ساختاری ایران. تهران. انتشارات سازمان زمین‌شناسی کشور. ۱۰۰ ص.

مکران دارای بزرگ‌نمایی است. بنابراین نقشه‌های خطر زمین‌لرزه آتی باید علاوه بر لحاظ کردن اثر ساختگاه، اثر حوضه رسوبی را هم در نظر بگیرند (عنایت و قدس، ۲۰۲۳).

ایران شهر یکی از شهرهای مهم استان سیستان و بلوچستان است که در لبه جنوب‌شرقی چاله جازموریان و در محل تلاقی گسله‌های شمالی-جنوبی لبه شرقی پهنه زمین‌درز سیستان و گسله‌های شرقی-غربی لبه جنوبی جازموریان واقع است. گسله‌های مذکور همگی زمین‌لرزه‌های کم‌عمق تولید می‌کنند و می‌توانند باعث گسیختگی سطحی نیز شوند. این شهر همچنین در درون پهنه مربوط به فروانش ورقه فروانشی قرار دارد و در نتیجه بطور مستقیم تحت تاثیر زمین‌لرزه‌های عمق متوسط نرمال این پهنه نیز قرار خواهد گرفت. بنابراین باید توجه ویژه‌ای به ساخت‌وساز بناهای مهم در شهرستان ایرانشهر صورت گیرد. شهرهای بنت، تفتان و تا اندازه‌ی کمتری نیک‌شهر متاثر از زمین‌لرزه‌های لبه جنوبی چاله جازموریان هستند.

#### ۷ نتیجه‌گیری

نقشه پهنه‌بندی لرزه‌زمین‌ساختی مکران برای نشان دادن پهنه‌های همگن لرزه‌ای و به کارگیری آن در تحلیل خطر لرزه‌ای این منطقه تهیه شد. با توجه به کمبود رخدادهای لرزه‌ای و پیچیدگی زمین‌ساختی و ژئودینامیکی مکران، در این مقاله چشمه‌های لرزه‌ای به صورت چشمه‌های پهنه‌ای تعیین شده است. برخلاف روش لرزه‌ای مرسوم، پهنه‌بندی لرزه‌زمین‌ساختی نوین فقط متکی به آمار و مکان رخدادهای لرزه‌ای نیست و ماهیتی چند نظامه دارد. این روش با وجود دشواری بیشتر، منعطف‌تر و دقیق‌تر است و بنابراین سازگاری بهتری با محیط زلزله‌شناختی واقعی دارد. به طور کلی نقشه پهنه‌بندی لرزه‌زمین‌ساختی تهیه شده در این مقاله دارای ویژگی‌های زیر است:

- Abedi, M., Bahroudi, A. (2016). A geophysical potential field study to image the Makran subduction zone in SE of Iran. *Tectonophysics* 688, 119-134.
- Akbarzadeh Aghdam, M., Ghods, A., Mokhtarzadeh, R., Sobouti, F., Motaghi, K., Priestley, K., Enayat Govarchin Ghaleh, M. (2023). Seismicity around the boundary between eastern and western Makran. *Journal of Asian Earth Sciences*, Volume 259, 105926.
- Alavi, M. (1991). Sedimentary and structural characteristics of the Paleotethys remnants in northeastern Iran. *Geological Society of America Bulletin* 103, 983-992.
- Al-Haddad, M., EERI, M., Siddiqi, G.H., Al-Zaid, R., Arafah, A., Necioglu, A., Turkelli, N. (1994). A basis for evaluation of seismic hazard and design criteria for Saudi Arabia. *Earthquake Spectra*. 10 (2), 231258.
- Al-Lazki, a. I., Al-Damegh, K. S., El-Hadidy, S. Y., Ghods, a., & Tatar, M., (2014). Pn-velocity structure beneath Arabia-Eurasia Zagros collision and Makran subduction zones. *Geological Society, London, Special Publications*, 392(1), 45-60.
- Ambraseys, N., Bilham, R. (2003). Earthquakes and associated deformation in Northern Baluchistan 1892-2001. *Bulletin of the Seismological Society of America* 93, 1573- 1605.
- Ambraseys, N., Melville, C. (1982). *A History of Persian Earthquakes*. Cambridge Univ. Press, New York.
- Avouac, J.P., Ayoub, F., Wei, S., Ampuero, J.P., Meng, L., Leprince, S., Jolivet, R., Duputel, Z., Helmberger, D. (2014). The 2013, Mw 7.7 Balochistan earthquake, energetic strike-slip آقنابتی، سید علی (۱۳۸۳). زمین‌شناسی ایران. تهران. انتشارات سازمان زمین‌شناسی کشور. ۵۸۶ ص.
- اکبرزاده اقدم، مریم (۱۴۰۲). بررسی لرزه‌زمین‌ساخت مکران. رساله دکتری. به راهنمایی عبدالرضا قدس. زنجان. دانشگاه تحصیلات تکمیلی در علوم پایه.
- خالدزاده، متین (۱۴۰۱). تعیین زون لرزه‌زا در ساختار فرورانشی مکران با استفاده از مدل‌سازی حرارتی عددی، داده‌های ماهواره‌های گرانی و توپوگرافی کف دریا. رساله دکتری. به راهنمایی عبدالرضا قدس. زنجان: دانشگاه تحصیلات تکمیلی در علوم پایه.
- سهرابی، امین، لطفی، حیدر، ولی شریعت پناهی، مجید و حسن آبادی، داوود، (۱۳۹۹). رقابت‌های ژئوپلیتیکی قدرت‌های منطقه‌ای و بین‌المللی در سواحل دریای عمان و اثر آن بر توسعه ایران، فصل‌نامه علمی پژوهشی جغرافیا (برنامه‌ریزی منطقه‌ای) سال ۱۱، شماره ۱۰، ۶۳۱-۶۵۱.
- عنایت گورچین قلعه، محمد، قدس، عبدالرضا، (۱۴۰۲). ساختار سرعت گوه برافزایشی مکران مرکزی و پیامدهای آن در اکتشاف منابع هیدروکربنی و خطر زمین‌لرزه، مجله ژئوفیزیک ایران، جلد ۱۷، شماره ۵، ۹۱-۱۱۵.
- نبوی، محمد حسن، (۱۳۵۵). دیباچه‌ای بر زمین‌شناسی ایران، تهران. گزارش سازمان زمین‌شناسی کشور. ۳۸، ۱۰۹ ص.
- Abbasi, M., Ghods, A., Najafi, M., Abbasy, S., Shabanian, E., Kheradmandi, M., Asgari, J. (2023). Why western Makran does not have megathrust earthquakes ?. *Tectonophysics*, Volume 869, 230134.
- Abdalla, J.A. and Al-Homoud, A.S. (2004). Seismic hazard assessment of United Arab Emirates and its surroundings. *Journal of Earthquake Engineering*. 8 (6), 817 837.

- and tectonic interpretation. *Earth Science Reviews* 185, 1210-1231.
- Burg, J. P., Dolati, A., Bernoulli, D., & Smit, J. (2013). Structural style of the Makran Tertiary accretionary complex in SE-Iran. In *Lithosphere dynamics and sedimentary basins: The Arabian Plate and analogues* (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 Makran subduction zone. *J. Geophys. Res.*, 79, 449- 478. *Am.*, 77, 1479-1484.
- Cornell, C. A. (1968). Engineering seismic risk analysis, *bull. Seism. Soc. Am.*, 58, 1583-1606.
- Enayat, M., & Ghods, A. (2023). 3D shear-wave velocity model of Central Makran using ambient-noise adjoint tomography. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 128, e2023JB026928.
- Flueh, E. R., Kukowski, N. and Reichert, C. (1997). RV Sonne, cruise Report SO123, "MAMUT" (Makran Murray Traverse). *Geomar Report No. 62*, 291.
- Fruehn, J., White, R. S., & Minshull, T. A. (1997). Internal deformation and compaction of the Makran accretionary wedge. *Terra Nova*, 9(3), 101–104.
- Ghods, A. (2020). Makran relocated Seismic events catalogue. Institute for Advanced Studies in Basic Sciences (IASBS), (Not yet published).
- Ghods, A., Bergman, E., Shabanian, S., Akbarzadeh Aghdam, M., Khaledzadeh, M. (2021). Alignment of intermediate-depth events along NE-SW lineaments points to dehydration embrittlement of the Makran subducting plate. (Not yet published).
- Haberland, C., Mokhtari, M., Babaei, H. A., Ryberg, T., Masoodi, M., Partabian, A., Lauterjung, J. (2020). reactivation of a thrust fault. *Earth Planet. Sci. Lett.* 391, 128–134.
- Barnhart, W.D., Hayes, G.P., Samsonov, S.V., Fielding, E.J., Seidman, L.E. (2014). Breaking the oceanic lithosphere of a subducting slab: the 2013 Khash, Iran earthquake. *Geophys. Res. Lett.* 41 (1), 32–36
- Berberian, M. (1976a). Contribution to Seismotectonics of Iran (part II). Geological Survey of Iran Report no. 39, 518 pp.
- Berberian, M. (1976b). Seismotectonic map of Iran (1:2 500 000). Geological Survey of Iran Report no. 39.
- Berberian, M. (1979). Discussion of the paper A. A. Nowroozi, 1976, Seismotectonic Provinces of Iran. *Bulletin of the Seismological Society of America* 69, 293–297.
- Berberian, M. (1981). Active faulting and tectonics of Iran, in Zagros, Hindu Kush, Himalaya: Geodynamic Evolution. *American Geophysical Union, Geodynamics Series* 3, 33–69.
- Berberian, M., & Mohajer-Ashjai, A. (1977). Seismic risk map of Iran. a proposal. *Geol. Surv. Iran*, 40, 121-148.
- Berberian, M., Jackson, J. A., Fielding, E., Parsons, B. E., Priestley, K., Qorashi, M., Talebian, M., Walker, R., Wright, T. J., & Baker, C. (2001). The 1998 March 14 Fandoqa earthquake (Mw 6.6) in Kerman province, southeast Iran: re-rupture of the 1981 Sirch earthquake fault, triggering of slip on adjacent thrusts and the active tectonics of the Gowk fault zone. *Geophysical Journal International*, 146(2), 371-398
- Brace W F, & Byerlee J D. (1966). Stick-Slip as a Mechanism for Earthquakes. *Science*, 153(3739), 990–992.
- Burg, J. P. (2018). Geology of the onshore Makran accretionary wedge: Synthesis

- Thermal Modelling. *Geophysical Journal International*, Volume 228, Issue 3, March 2022, Pages 1530–1540.
- Khorrami, F., Vernant, P., Masson, F., Nilfouroushan, F., Mousavi, Z., Nankali, H., Alijanzade, M. (2019). An up-to-date crustal deformation map of Iran using integrated campaign-mode and permanent GPS velocities. *Geophysical Journal International*, 209(3), 1800-1830.
- Kopp, C., Fruehn, J., Flueh, E.R., Reichert, C., Kukowski, N., Bialas, J., Klaeschen, D. (2000). Structure of the Makran subduction zone from wide-angle and reflection seismic data. *Tectonophysics*, 329 (1–4), 171–191.
- Krinitzsky, E.L. (1995) Deterministic versus Probabilistic Seismic Hazard Analysis for Critical Structures. *Int. Jour. Eng. Geol.*, Vol. 40, pp. 1-7.
- Kukowski, N., Schillhorn, T., Flueh, E. R., Huhn, K. (2000). Newly identified strike-slip plate boundary in the northeastern Arabian Sea. *Geology* 28 (4): 355–358.
- Le Pichon, X. (1968). Sea-floor spreading and continental drift. *J. Geophys. Res.*, 73 (12), 3661-3697.
- Martin, S.S., Kakar, D.M. (2012). The 19 January 2011 Mw 7.2 Dalbandin earthquake, Balochistan. *Bulletin of the Seismological Society of America* 102, 1810–1819.
- McCall, G. J. H. (1997). The geotectonic history of the Makran and adjacent areas of southern Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*, Vol. 15, No. 6, pp. 517–531.
- Mihalasky, M. J., Doebrich, J. L., Wahl, R. W., Ludington, S. D., Orris, G. J., Bliss, J. D., Sutphin, D. M., Schruben, P. G., Bolm, K. S., Hubbard, B E., Mars, J. C., Peters, S. G., Wandrey C. J. and Chirico, P. (2007). Geographic Data of the Western Makran Seismic Transects (Iran). GFZ Data Services.
- Haberland, C., Mokhtari, M., Babaei, H. A., Ryberg, T., Masoodi, M., Partabian, A., Lauterjung, J. (2021). Anatomy of a crustal-scale accretionary complex: Insights from deep seismic sounding of the onshore western Makran subduction zone. *Iran. - Geology*.
- Haghipour, N., Burg, J. P. (2013). Geomorphological analysis of the drainage system on the growing Makran accretionary wedge. *Geomorphology*, 209, 111-132.
- Hatzfeld D, Molnar P. (2010). Comparisons Of The Kinematics And Deep Structures Of The Zagros And Himalaya And Of The Iranian And Tibetan Plateaus And Geodynamic Implications. *Reviews of Geophysics*, 48, 1-48.
- Hoffmann, G, Rupprechter, M., Al Balushi, N., Grütznert, C., & Reicherter, K. (2013). The impact of the 1945 Makran tsunami along the coastlines of the Arabian Sea (Northern Indian Ocean)-a review. *Z. Geomorphol. Suppl*, 57(4), 257–277.
- Iqbal, J., Jadoon, I.A.K., Raja, I.A. (2017). The Baluchistan earthquake of 24 September 2013, Mw 7.7: Emergence of a new island in the Arabian Sea. *Journal of Earth Sciences and Environmental Studies* 2, 1-13.
- Jolivet, R. et al. (2014). The 2013 Mw 7.7 Balochistan Earthquake: seismic Potential of an Accretionary Wedge. *Bulletin of the seismological Society of America*, 104 (2), 1020-1030.
- Kazmi, A.H., Jan, M.Q. (1997). *Geology and Tectonics of Pakistan*. Graphic Publishers, Karachi, 554 pp.
- Khaledzadeh, M., Ghods, A. (2021). Estimation of Size of Megathrust Zone in the Makran Subduction System by

- Nogol Sadat, M.A.A. (1993). Seismotectonic map of Iran (scale 1:1 000 000), Geological Survey of Iran.
- Nowroozi, A.A. (1976). Seismotectonic provinces of Iran. *Bulletin of the Seismological Society of America* 66, 1249–1276.
- Page, W. D., Alt, J. N., Cluff, L. S. and Plafker, G. (1979) Evidence for the recurrence of large magnitude earthquakes along the Makran coast of Iran and Pakistan. *Tectonophysics*, 52, 533-547.
- Penney, C., Tavakoli, F., Saadat, A., Nankali, H. R., Sedighi, M., Khorrami, F., Sobouti, F., Rafi, Z., Copley, A., Jackson, J. and Priestley, K. (2017). Megathrust and accretionary wedge properties and behaviour in the Makran subduction zone. *Geophysical Journal International*, 209 (3), 1800-1830.
- Peyret, M., Djamour, Y., Hessami, K., Regard, V., Bellier, O., Vernant, P., Daignieres, M., Nankali, H., Van Gorp, S., Goudarzi, M., Chery, J., Bayer, r., and Rigoulay, M. (2009). Present-day strain distribution across the Minab-Zendan-Palami fault system from dense GPS transects. *Geophys. J. Int.* 179, 751–762.
- Priestley, K., Sobouti, F., Mokhtarzadeh, R., A. Irandoust, M., Ghods, R., Motaghi, K., & Ho, T. (2022). New Constraints for the On-Shore Makran Subduction Zone Crustal Structure. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 127(1).
- Quittmeyer, R. C., and Kafka, A. L. (1984). Constraints on plate motions in southern Pakistan and the northern Arabian Sea from the focal mechanisms of small earthquakes. *Journal of Geophysical Research*, v. 89, p. 2444–2458.
- Rajendran, C. p., Rajendran, K., Shah-Hosseini, M., Beni, A. N., Nautiyal, C. information system (GIS) to accompany the non-fuel mineral resource assesment of Afghanistan, appendix 1, In: Preliminary non-fuel mineral resource assessment of Afghanistan. (Eds. Peters, S. G., Ludington, S. D., Orris, G. J., Sutphin, D. M., Bliss, J. D., and Rytuba, J. G., Ludington, S. D., Orris, G. J., Sutphin, D. M., Bliss, J. D., Rytuba, J. J. and U. S. Geological Survey-Afghanistan Ministry of Mines Joint Mineral Resource Assessment Team). U.S. Geological Survey, Available on web at: <http://pubs.usgs.gov/of/2007/1214/>.
- Mirzaei, N., Gao, M., Chen, Y.T. (1998). Seismic source regionalization for seismic zoning of Iran: major seismotectonic Provinces. *Journal of Earthquake Prediction Research* 7, 465–495.
- Mohajer-Ashjai, A., Behzadi, H., Berberian, M. (1975). Reflections on the rigidity of the Lut Block and recent crustal deformation in eastern Iran. *Tectonophysics*, Volume 25, Issues 3–4, pp. 281-301.
- Motaghi, K., Shabanian, E., Nozad-Khalil, T. (2020). Deep structure of the western coast of the Makran subduction zone, SE Iran. *Tectonophysics*, 776, 228314.
- Musson, R.M.W., Northmore, K. J., Sargeant, S., Pillips, E., Boon, D., Long, D., Mccue, K., Ambraseys, N.N. (2006). The geology and geophysics of the United Arab Emirates. Vol. 4: Geological Hazards. British Geological Survey, Key worth, 237 p.
- Niazi, M., Shimamura, H. and Matsuura, M. (1980). Microearthquakes and crustal structure off the Makran coast of Iran. *Geophys. Res. Lett.*, 7, 297-300.

- results of the trial in north China. *Acta Seismologica Sinica*, 5, 305-314.
- Smith, G., McNeill, L., Henstock, I. J., & Bull, J. (2012). The structure and fault activity of the Makran accretionary prism. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 117(7), 1–17.
- Stocklin, J. (1968). Structural history and tectonics of Iran, a review. *The American Association of Petroleum Geologists Bulletin* 52, 1229–1258.
- Tanvir Shah, S., Arda Özacar, A., Gülerce, Z. (2020). Fault-based probabilistic seismic hazard assessment of the eastern Makran subduction and the Chaman transform fault, Pakistan: Emphasis on the source characterization of megathrust. *Journal of Asian Earth Sciences*.
- Tavakoli, B., Ghafory-Ashtiany, M. (1999). Seismic Hazard Assessment of Iran. *Annali di Geofisica* 42, 1013-1021.
- Teknik, V., and Ghods, A. (2017). Depth of magnetic basement in Iran based on fractal spectral analysis of aeromagnetic data. *Geophysical Journal International*, 209(3), 1878–1891.
- Vernant, Ph., Nilforoushan, F., Hatzfeld, D., Abbassi, M.R., Vigny, C., Masson, F., Nankali, H., Martinod, J., Ashtiani, A., Bayser, R., Tavakoli, F., & Chery, 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*, Volume 157(1), 381-398.
- Walker, R., & Jackson, J. (2004). Active tectonics and late Cenozoic strain distribution in central and eastern Iran. *Tectonics*, 23(5).
- White, R. S. and Ross, D. A., (1979). *Tectonics of the western Gulf of Oman*. M., Andrews, R. (2013). The Hazard potential of the western segment of the Makran subduction zone, northern Arabian Sea. *Nat. Hazards* 65 (1), 219-239.
- Ramazi, H. (1995). Seismotectonic map of Iran, 1/2500000 scale. Ph.D Dissertation. Engineering Geophysics, Charles University, Prague, Czech Republic, 100 pp.
- Rani, V. S., Srivastava, K., Srinagesh, D., & Dimri, V. P. (2011). Spatial and temporal variations of b-Value and fractal analysis for the Makran Region. *Marine Geodesy*, 34(1), 77–82.
- Regard, V., Bellier, O., Thomas, J. C., Bourlès, D., Bonnet, S., Abbassi, M. R., Braucher, R., Mercier, J., Shabanian, E., Soleymani, Sh., & Fegghi, Kh., (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. *Geophys. J. Int.*, 162, 177–203.
- Regard, V., Bellier, O., Thomas, J.-C., Abbassi, M.R., Mercier, J., Shabanian, E., Fegghi, Kh. & Soleymani, Sh. (2004). The accommodation of Arabia-Asia convergence in the Zagros-Makran transfer zone, SE Iran: a transition between collision and subduction through a young deforming system. *Tectonics*, 23, TC4007, (24p.)
- Schluter, H. U., Prexl, A., Gaedicke, Ch., Roeser, H., Reichert, Ch., Meyer, H. and Von Daniels, C. (2002). The Makran accretionary wedge: sediment thicknesses and ages and the origin of mud volcanoes. *Marine Geology*, 185, 219-232.
- Shi, Z., Yan, J. and Gao, M. (1992). Research on the principles and methodology of seismic zonation-

- J. Geophys. Res.-Sol. Ea, 84, 3479-3489.
- Yamini-Fard, F., Hatzfeld, D., Farahbod, A. M., Paul, A., Mokhtari, M. (2007). the diffuse transition between the Zagros continental collision and the Makran oceanic subduction (Iran): microearthquake seismicity and crustal structure. Geophys. J. Int. (2007) 170, 182–194.
- Ye, H., Chen, G., and Zhou, Q. (1995). Study on the intraplate potential seismic sources. In: Proc. Fifth International Conf. Seismic Zonation, 2, Nice, France, pp. 1424–1430.
- Ye, H., Zhou, Y., Zhou, Q., Yang, W., Chen, G. and Hao, C. (1993). Study on potential seismic sources for seismic zonation and engineering seismic hazard analysis in continental areas. In: Continental Earthquakes, IASPEI Publication Series for the IDNDR 3, pp. 473–478.
- Yucemen, M.S. and Gulkan, P. (1994). Seismic hazard analysis with randomly located sources, Natural Hazards 9, 215–233.
- Zhang, Y. (1993). Principles and methods on delineation of potential earthquake source area. In: Proc. PRC/USSR Workshop on Geodynamics and Seismic Risk Assessment, Beijing, China, pp. 201–207.

## Seismic zonation of Makran using seismotectonic approach

Meysam Kheyri Moloumeh<sup>1</sup>, Esmail Shabaniyan Borojeni<sup>2</sup> and Abdolreza Ghods<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup> Ph.D. Student, Department of Earth Sciences, Institute for Advanced Studies in Basic Science, Zanjan, Iran

<sup>2</sup> Associate Professor, Department of Earth Sciences, Institute for Advanced Studies in Basic Sciences, Zanjan, Iran

<sup>3</sup> Professor, Department of Earth Sciences, Institute for Advanced Studies in Basic Sciences, Zanjan, Iran

(Received: 08 March 2024, Accepted: 06 May 2024)

### Abstract

Earthquake hazard of the Makran subduction zone have been studied as a part of national and/or small-scale earthquake hazard maps. Due to the ever-rising strategic and economic importance of Makran, calculation of a reliable seismic hazard map of Makran has already become a necessity. Seismic zonation is the most important step in any seismic hazard analysis. This paper uses a seismotectonic approach to present a reliable seismotectonic zonation for Makran where the earthquake catalogs show very low level of seismicity. The sparsity of the observed earthquakes is compensated by geophysical, geological, and geodetic data and also the assumption of similarity and analogy of tectonic zones. Recently, extensive geological, seismological and geodetical field studies have been conducted in Makran. Using the new information about segmentation of Makran megathrust, geometry and dip of the subducting plate, crustal structure of the wide accretionary prism, Jaz Murian and Mashkal Depression, improved seismicity and GPs velocity vectors, Makran and its surroundings were divided into 14 seismic zones. To take into account the Makran subducting plate, three-dimensional seismic zones are defined in different depth ranges. For example, normal earthquakes with intermediate-depth focal depth (40-75 km) are related to bending of the subducting oceanic lithosphere and megathrust earthquakes are related to the Makran megathrust zone lying in the depth range of 20-40 km. One seismic zone at depth range of 40-75 km is considered to represent the seismic hazard arising from the intermediate-depth earthquakes. The southern younger part of Makran megathrust zone is divided into two eastern and western zones where the western part has a much smaller locking ratio than the eastern part. The northern and older part of the wide accretionary prism of Makran is considered as a separate seismic zone because it is consisted of very thick high seismic-velocity sedimentary cover. The eastern and western ends of Makran are regions with large rate of geodetic strain accommodated by almost N-S left-lateral strike-slip motion on the Chaman and right-lateral strike-slip motion on the Minab-Zendan-Palami fault systems, respectively. The transfer zones are represented by two seismic zones. Two seismic zones are related to aseismic Jaz Murian and Mashkel depressions. Lut block and Helmand blocks, and Sistan Suture Zone acts a backstop of Makran accretionary wedge. Three separate seismic zones are considered to account for different kinematics and crustal structure of the Lut and Helmand blocks, and Sistan Suture Zone. Due to the large observed geodetic strain rate, the new seismic zonation would predict the highest seismic hazard in Minab-Zendan-Palami and Ornachnal-Chaman zones. Due to much larger locking ratio, the earthquake and tsunami hazard in eastern Makran would be much higher than that of western Makran. Iranshahr is expected to have large seismic hazard level because it is located at the intersection of N-S trending fault system along the western edge of Sistan Suture Zone and the E-W trending fault system south of Jaz Murian Depression and additionally located on top of the seismic zone responsible for production of the intermediate-depth earthquakes.

**Keywords:** Makran subduction, seismotectonic zonation, earthquake hazard, megathrust segmentation, western makran, eastern makran

---

\*Corresponding author:

aghods@iasbs.ac.ir