



مشخصات هندسی پهنه فرورانش مکران

احمد رشیدی^{۱*}، حمید زعفرانی^۲، محمد تاتار^۳

۱- استادیار، پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، تهران

۲- دانشیار، پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، تهران

۳- استاد، پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، تهران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۲/۲۳

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۹/۰۳



چکیده

با توجه به نقش قطعه‌بندی گسل در کنترل دگرشکلی، تعیین قطعات اصلی گسل مکران (در محل فرورانش) براساس گسل‌های انتقالی برای شناخت هر چه بیشتر میزان خطر احتمالی زمین‌لرزه و دریالرزه ناشی از آن ضروری است. از اینرو در این مطالعه گسل‌های انتقالی پهنه فرورانش مکران شناسایی و به دنبال آن قطعه‌بندی گسل مکران انجام گردید. گسل مکران واقع در دریای عمان از ۶ قطعه اصلی تشکیل شده است. اکثر این قطعات توسط گسل‌های انتقالی با روند NW-SE (مانند گسل سونه) از یکدیگر جدا شده‌اند. این گسل‌های انتقالی، از جمله عوامل جابه‌جایی منشورهای برافزایشی هستند. با توجه به تاثیر شیب فرورانش در برآورد خطر لرزه‌خیزی و دریالرزه یک پهنه فرورانش، ما چهار مقطع عرضی عمود بر پهنه فرورانش در طول جغرافیایی 58° ، 60° ، 63° و 66° بر روی پهنه ساختاری مکران پیشنهاد دادیم. بررسی این مقاطع نشان می‌دهد که در محل فرورانش، صفحه فرورونده شیب چندانی ندارد. اما میزان شیب در عرض‌های جغرافیایی یکسان، متفاوت می‌باشد. در این مطالعه، میزان شیب صفحه فرورونده در نقاط مختلف با فاصله گرفتن از محل فرورانش بر روی مقاطع عرضی مشخص گردیده است.

کلید واژه‌ها: گسل مکران، قطعه بندی گسل، شیب پهنه فرورانش، لرزه‌خیزی، مکران.

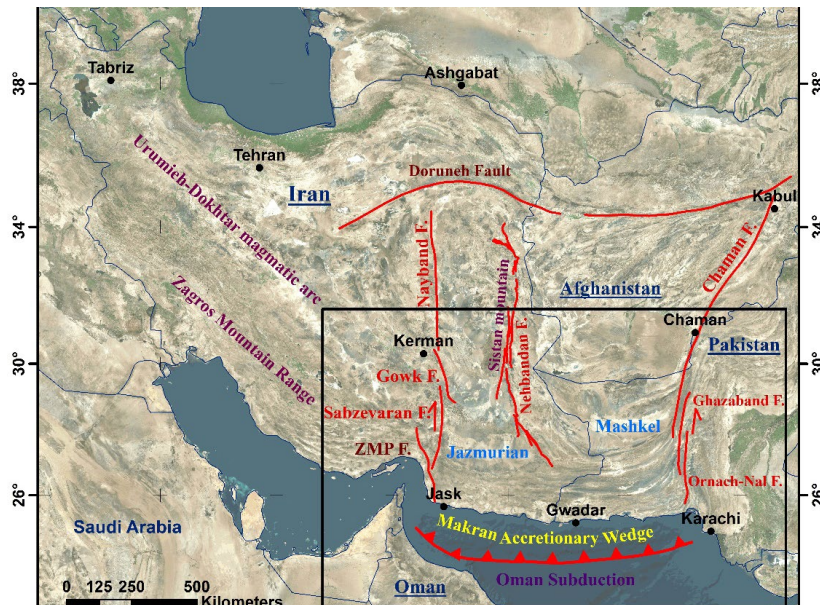
۱- مقدمه

پهنه ساختاری مکران با طولی حدود ۹۰۰ کیلومتر در جنوب خاور ایران (از خاور تنگه هرمز) و جنوب باختر پاکستان (باختر بندر کراچی) قرار دارد (شکل ۱). این منطقه که عموماً شامل کوه‌های خاوری - باختری است از ساحل دریای عمان تا فروافتادگی جازموریان در ایران (مکران باختری) و گودال مَشکَل در پاکستان (مکران خاوری) گسترش دارد (شکل ۱).

کوهزاد مکران توسط همگرایی صفحات عربی و اوراسیا ایجاد شده است (Dercourt et al., 1993; De Jong, 1982). این گوه زمین ساختی در حال حاضر با فرورانش مداوم سنگ کره اقیانوسی دریای عمان با نرخ ۲ سانتی متر در سال با جهت تقریبی شمالی - جنوبی به زیر خردقاره‌های ایران مرکزی، سیستان و افغان، مرتبط است (Bayer et al., 2006; Vigny et al., 2006; Masson et

al., 2003; McQuarrie et al., 2007). این فرورانش مسبب کمان آتشفشانی آندزیتی رخنمون یافته در ۵۰۰-۳۰۰ کیلومتری شمال خط ساحلی دریای عمان است (McCall, 1997).

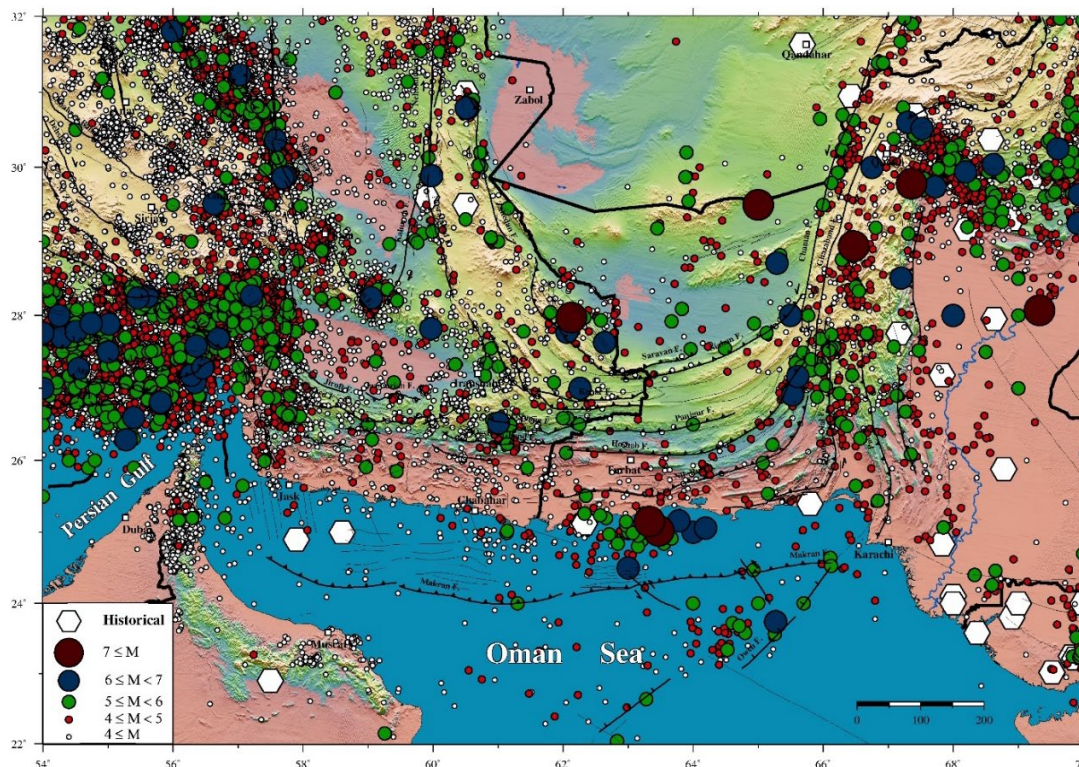
مرز جنوبی زون زمین ساخت مکران، گسل مکران واقع در دریای عمان است که در امتداد آن فرورانش در حال انجام می‌باشد (Far- houdi and Karig, 1977; McCall, 1997) (شکل ۱). مکران در مرز باختری، توسط سامانه گسلی زندان - میناب - پالامی (ZMP) از پهنه برخوردی زاگرس جدا می‌شود (Sattarzadeh et al., 2000; Regard et al., 2004) و در مرز خاوری پس از گذر از بلوچستان پاکستان تا گسل اُرنَاج نال (Ornach Nal) ادامه دارد (شکل ۱). گسل‌های اورناچ نال، قصابند و چمن معرف یک پهنه انتقالی بین پهنه فرورانش مکران (در خاور) و پهنه برخوردی هند - اوراسیا می‌باشند (Lawrence et al., 1992).



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد پژوهش در جنوب خاور ایران - باختر پاکستان و افغانستان (کادر سیاه رنگ). دگرشکلی این منطقه تحت تاثیر فرورانش پوسته اقیانوسی عمان است.

مختلف آن کمک شایانی در شناخت ویژگی‌های لرزه زمین ساختی منطقه خواهد کرد. از اینرو بر آن شدیم تا تمامی داده های لرزه نگاری بازتابی و انکساری انجام شده در مکران پاکستان و مکران ایرانی را جمع آوری کرده و با استفاده از کاتالوگ تصحیح شده در این مطالعه (از نظر کانون روستحی و عمقی) (شکل ۲) در ۴ مقطع عرضی شمالی - جنوبی میزان شیب صفحه فرورنده را مشخص کنیم. در این مطالعه با توجه به تاثیر طول قطعات گسل مکران در رویداد زمین لرزه‌های آتی، قطعه‌بندی گسل مکران نیز با استفاده از تعیین گسل‌های انتقالی (Transfer Faults) موجود در دریای عمان مورد بررسی قرار گرفت.

زمین لرزه ۱۹۴۵ پاسنی اورمارا پاکستان با بزرگی ۸/۱ (Pendse, 1992; Byrne et al., 1948) و زمین لرزه ۲۰۱۳ بلوچستان پاکستان با بزرگای ۷/۷ (Jolivet et al., 2014; Avouac et al., 2014) رویدادهایی مهمی هستند که در اثر فرورانش این زون زمین ساختی اتفاق افتاده‌اند. در اغلب مناطق کره زمین که پدیده فرورانش رخ می‌دهد، توان لرزه‌خیزی بسیار بالا است. این در حالی است که در مکران، به عنوان یک پهنه فرورانش فعال، لرزه‌خیزی نسبتاً کمی ثبت شده است. یکی از دلایل لرزه‌خیزی نسبتاً کم آن نسبت به سایر مناطق فرورانش جهان می‌تواند شیب کم پهنه فرورانش باشد (Penney et al., 2017). بررسی شیب پهنه فرورانش در بخش‌های



شکل ۲. نقشه تصحیح شده رو کانون سطحی زمین لرزه‌ها در منطقه مورد مطالعه. تصحیح رو کانون زمین لرزه‌ها در این مطالعه انجام شده است.

۲- ویژگی‌های زمین‌شناختی و زمین‌ساختی پهنه فروانش مکران

در ناحیه مکران، صفحه رورانده، سنگ کره قاره‌ای است. کمان ماگمایی حاصل از فروانش، شامل سه مرکز آتشفشانی اصلی کوه سلطان در پاکستان، تفتان و بزمان در ایران (شکل ۳)، با ویژگی آتشفشانی کمان ماگمایی می‌باشد (Berberian et al., 1982). فاصله این کمان تا ژرفنای مکران از ۴۰۰ کیلومتر در باختر (در ایران) تا ۵۰۰ کیلومتر در خاور (در پاکستان) متغیر است. سن کمان آتشفشان‌های مکران پیشنهاد می‌کند که فروانش در کرتاسه پایانی آغاز شده است (Arthurton et al., 1982; Berberian et al., 1982; McCall and Kidd, 1982). اما گوه برافزایشی از میوسن آغازین - میانی توسعه یافته و باعث ایجاد یک کمربند چین خورده - رانده منحصر به فرد با انتشار و تشکیل راندگی‌ها به سمت پیشانی شده است (Dolati, 2010). رسوبات در جلوی گوه به زیر رانده شده و پیامد آن ضخیم شدگی و بالا آمدگی مجموعه برافزایشی بوده است (Clauser, 1994; Kopp et al., 2000; Schluter et al., 2002). انباشتگی در پیشانی و به زیر راندگی متداوم رسوبات در طول یک سطح جدایشی با شیب به سمت شمال رخ می‌دهد (Fruehn et al., 1997; Harms et al., 1984).

پی‌سنگ ناحیه مکران همان پوسته اقیانوسی است که با توالی از

رسوب‌های فلیش گونه و گاه شبه مولاس که ممکن است تا حدود ۱۰ هزار متر ضخامت داشته باشند، پوشیده شده است (McCall, 1982; McCall and Kidd, 1997). به دلیل شرایط حاکم بر پهنه فروانش، واحدهای چین‌نگاری زمین‌ساختی (تکتونواستراتیگرافی)، گاهی نظم چین‌های ندارند. بورگ و همکاران (Burg et al., 2013) و دولتی (Dolati, 2010) براساس پهنه‌های راندگی، مکران را به چهار واحد مجزا تقسیم کرده‌اند. این واحدهای چین‌شناسی از شمال به جنوب عبارت‌اند از ۱- مکران شمالی ۲- مکران داخلی ۳- مکران خارجی و ۴- مکران ساحلی.

به گمان گانسر (Gansser, 1955) میان ساختارهای سطحی و زیرسطحی ژرف‌تر تفاوت اساسی وجود دارد. ژاکوب و کیتیمیر (Jacob and Quittmeyer, 1979) بر این گمانند که سنگ کره فرو رانده تا محل خمش یکپارچه است. ولی صفحه فرو رانده از محل خمش در اثر گسل‌های بزرگ انتقالی عمود بر ژرفنا به قطعاتی مختلف تقسیم شده است. سامان‌گیری کانون‌های زمین لرزه در امتداد شمالی - جنوبی، مؤید وجود گسل‌های انتقالی می‌باشد (Nemati, 2019).

اشمیت و همکاران (Smith et al., 2013) گسل‌های راندگی فعال موجود در مکران خاوری که در مطالعات لرزه‌نگاری بازتابی قابل رؤیت بودند را مشخص نمودند. آن‌ها گسل‌های راندگی که باعث



ایجاد اختلاف ارتفاع در کف دریا شده‌اند را فعال در نظر گرفتند. گسل‌های فعال موجود در پهنه‌های برافزایشی (در بخش دریایی) می‌توانند رسوبات کف دریا را بریده و در امتداد آن‌ها، اختلاف ارتفاع‌هایی (ناشی از فعالیت آن‌ها) ایجاد کنند.

برخاستگی در سراسر طول مکران (مکران باختری و خاوری) یکسان نیست. نرمنند و همکاران (Normand et al., 2019) با استفاده از تعیین سن پادگانه‌های حاشیه ساحلی دریای عمان در گستره تنگ و پسابندر میزان نرخ برخاستگی را بدست آوردند. بررسی‌های آن‌ها نرخ‌های برخاستگی متفاوتی بین ۰/۰۵ تا ۱/۲ میلی متر در سال را در راستای خاوری-باختری (در پیرامون ساحل مکران ایرانی) نشان می‌دهند.

ویژگی‌های ساختاری و زمین‌شناسی منطقه مکران نشان می‌دهد، در کرتاسه پسین محل فروانش در جنوب فروافتادگی ماشکل و جازموریان بوده ولی از آن زمان به بعد، ضمن برجای گذاری نهشته‌های فیلیشی، به تدریج به سمت جنوب حرکت و در حال حاضر به ژرفنای دریای عمان رسیده به گونه‌ای که هنوز فروانش ادامه دارد (McCall and Kidd, 1982). گسل قصر قند که در پیرامون آن‌ها سنگ‌های افیولیتی رخنمون قابل توجهی دارند، به عنوان محل بخیه اقیانوس قدیمی‌تر (Makran Suture Zone) می‌باشند (McCall and Kidd, 1982).

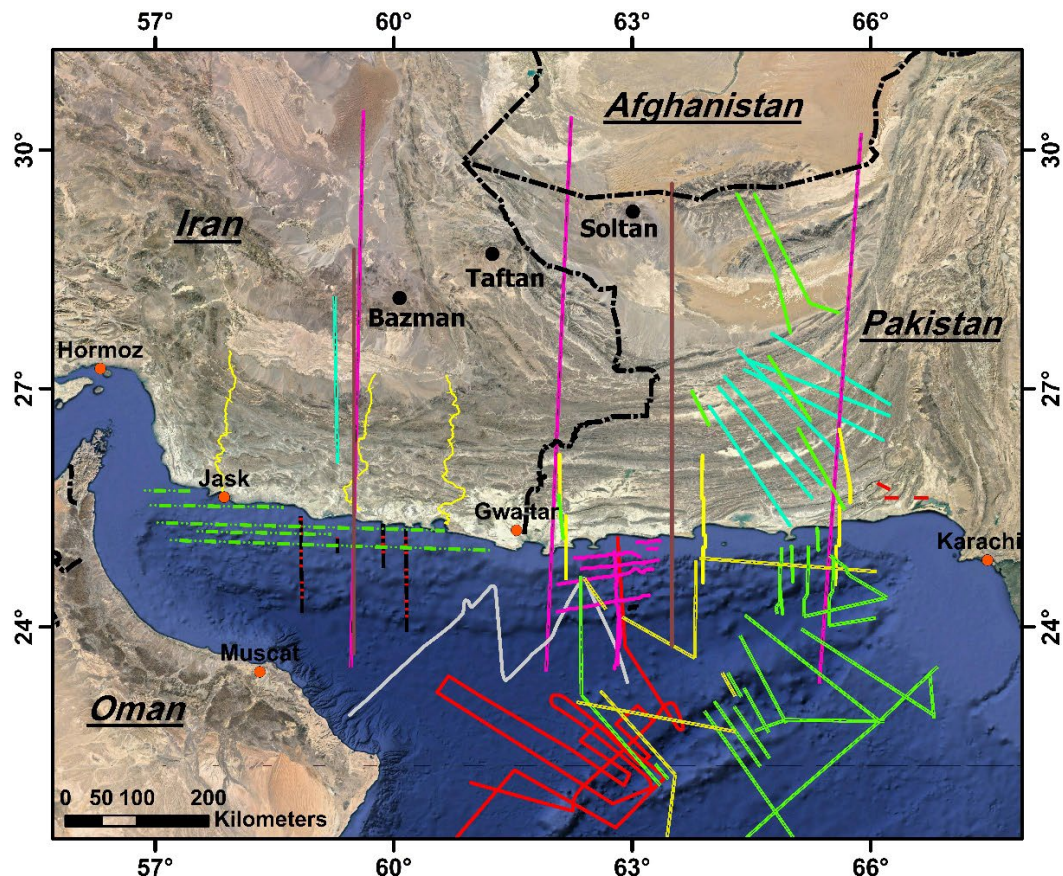
برای پهنه فروانش مکران پیشنهاد شد. در این مطالعه تشکیل یک کاتالوگ همگن در چهار مرحله مجزاء صورت گرفت. در مرحله اول ضمن پاکسازی و انتخاب اطلاعات مربوط به کاتالوگ‌های ارائه شده، ISC، NEIC، EMSC، Arabian، Pakistan و BIN یک کاتالوگ واحد از ترکیب اطلاعات ثبت شده توسط این مراکز بدست آمد و مرحله دوم شامل ترکیب اطلاعات زمین‌لرزه‌های ثبت شده در بازه زمانی سال ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۹ توسط دو مرکز لرزه‌نگاری مستقل و فعال در ایران، IRSC و BIN، بود. در مرحله سوم کاتالوگ‌های بدست آمده در دو مرحله قبل، همراه با کاتالوگ‌های موجود از مطالعات لرزه‌خیزی توسط شبکه‌های محلی، بر اساس قواعد و شرایط مشخص ترکیب و در مرحله آخر با کاتالوگ EHB مقایسه و ادغام گردید. نتیجه منجر به تشکیل یک کاتالوگ واحد برای منطقه فروانش مکران در محدوده عرض جغرافیایی ۲۲° تا ۳۳° و طول جغرافیایی ۵۴° تا ۷۰° شد.

۴- قطعه بندی گسل مکران

برپا توجه به نقش قطعه‌بندی در کنترل دگرشکلی در مناطق فروانش (Bocchini et al., 2018)، تعیین قطعات اصلی یک پهنه فروانش براساس گسل‌های انتقالی برای شناخت هر چه بیشتر خطرات احتمالی زمین‌لرزه و دریالرزه ناشی از آن ضروری است. جمع‌آوری و استفاده از مطالعات زیرسطحی انجام شده در منطقه مکران ایران و پاکستان از جمله پروفیل‌های لرزه‌نگاری بازتابی، انکساری، مغناطیس، ثقل‌سنجی، پروفیل‌های Parasounde، مدل‌سازی حرارتی و پروفیل‌های لرزه‌خیزی (شکل ۳)، فرصتی است جهت تعیین گسل‌های انتقالی موجود در پهنه فروانش مکران و قطعه‌بندی گسل مکران که در امتداد آن فروانش در حال انجام است.

۳- روش انجام کار

در این مطالعه از شواهد موجود بر روی داده‌های ارتفاعی رقومی، تصاویر ماهواره‌ای، سازوکار کانونی زمینلرزه‌ها، مطالعات لرزه‌نگاری انجام شده توسط محققین مختلف، گسل‌های انتقالی موجود در دریای عمان شناسایی و براساس آن‌ها قطعات اصلی گسل مکران (که در امتداد آن فروانش در حال انجام است) تعیین شد. همچنین در این مطالعه، زمین‌لرزه‌های مهم روی داده در پهنه فروانش مکران جمع‌آوری و از لحاظ روکانون سطحی و عمقی تصحیح گردیدند. از این فهرست داده‌ای و همچنین از توالی‌های راندگی فعال نمایش داده شده در مقالاتی همچون (Hilal, 1991; Minshull et al., 1992; Roeser et al., 1997; Kopp et al., 2000; Wiedicke et al., 2001; Schluter et al., 2002; Grando and McClay.,



References and (Methods):

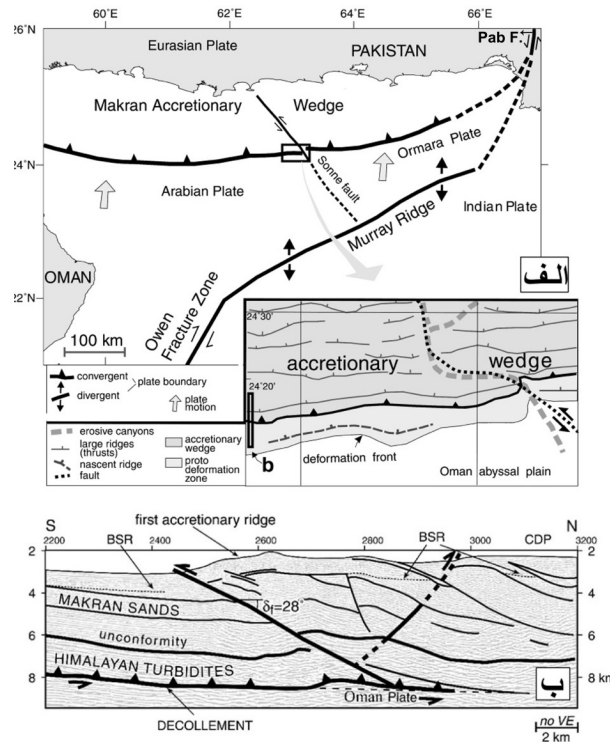
- Byrne and Sykes, 1992 (Method: Seismicity)
- Grando and McClay., 2007 (Method: Reflection Seismic Profiles)
- Harms et al., 1982 (Method: Reflection Seismic Profiles)
- Hilal, 1991 (Method: Reflection Seismic Profiles)
- Jolivet et al., 2014 (Method: Surface Displacement Profiles by correlation of pre- and post-earthquake Landsat 8 images)
- Kopp et al., 2000 (Method: Reflection Seismic Profiles)
- Minshull et al., 1992 (Method: Reflection Seismic Profiles)
- Haberland et al., 2020 (Method: Wide Angle Refraction and Reflection Profiles)
- Najafi, 2018 (Method: Reflection Seismic)
- Namaki et al., 2011 (Method: Magnetic Flight Line)
- Penny et al., 2017 (Method: Seismicity & Receiver Functions)
- Raza Khan et al., 2015 (Method: Reflection Seismic Profiles)
- Roeser et al., 1997 (Methods: Gravity; Magnetics; Hydrosweep and Parasound Profiles)
- Roeser et al., 1997 (Methods: Reflection Seismic; Gravity; Magnetics, Hydrosweep and Parasound Profiles)
- Smith et al., 2013 (Method: Seismicity)
- White and Kiltgord, 1976 (Method: Reflection Seismic Profiles)
- Wiedicke et al., 2001 (Method: Reflection Seismic Profiles)

شکل ۳. نیمرخ‌های تهیه شده توسط محققین مختلف به همراه روش مطالعه در پیرامون پهنه فرورانش مکران.

است (Zaigham and Mallick., 2000).

در پروفیل‌های جمع‌آوری شده در بخش خاوری دریای عمان علاوه بر گسل‌های همسو با گسل مکران (با روند E-W)، حضور سیستم گسل‌های انتقالی (با روند NW-SE) از جمله گسل سونه، محرز است (شکل ۴ الف). این گسل‌های انتقالی گسل مکران را قطع کرده و باعث جابه‌جایی منشورهای برافزایشی شده‌اند (Wiedicke et al., 2001; Kukowski et al., 2001).

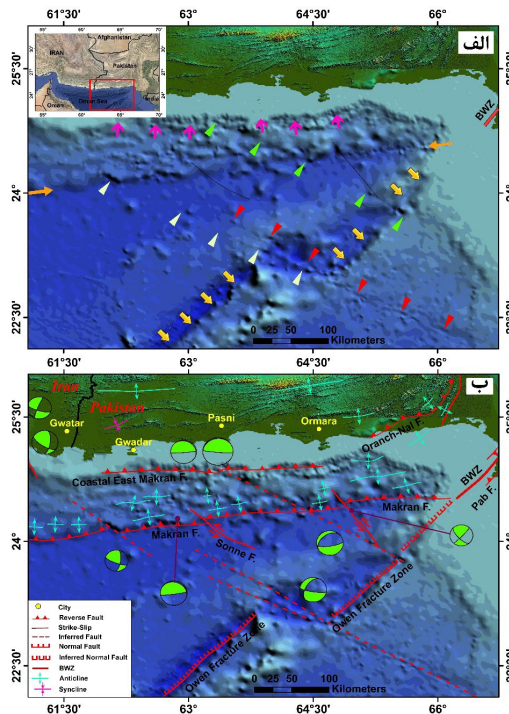
گسل مکران در بخش خاوری یکی از شاخه‌های پیوسته سه‌گانه‌ی (Triple Junction) ایجاد شده در آن منطقه است. دو شاخه دیگر این پیوسته‌گاه سه‌گانه عبارت‌اند از پهنه شکستگی اُون (Owen Fracture Zone) با سازوکار نرمال که به آن پشته ماری (Murray Ridge) نیز اطلاق می‌شود و گسل پاب (Pab Fault) با سازوکار معکوس همراه با مؤلفه چپبر (شکل ۴). بر روی فرادیاره گسل پاب، سنگ‌های افیولیتی معروف به بلا- وزیرستان (BWZ: Bela-Whaziristan Ophiolite Zone) قرار دارد. این واحدهای سنگی افیولیتی نشانگر حضور یک پهنه فرورانش در آن منطقه بوده



شکل ۴. الف) موقعیت هندسی و ساز و کار چمبر گسل سونه (Wiedicke et al., 2001). پروفیل حاصل از لرزهنگاری بازتابی عمود بر گسل مکران (Kukowski et al., 2001).

برافزایشی دیده می شود. سازوکار کانونی زمین لرزه های روی داده در این منطقه (برگرفته از سایت دانشگاه هاروارد) با نوع جابه جایی که در امتداد این گسل ها دیده می شود، همخوان است (شکل ۵ب).

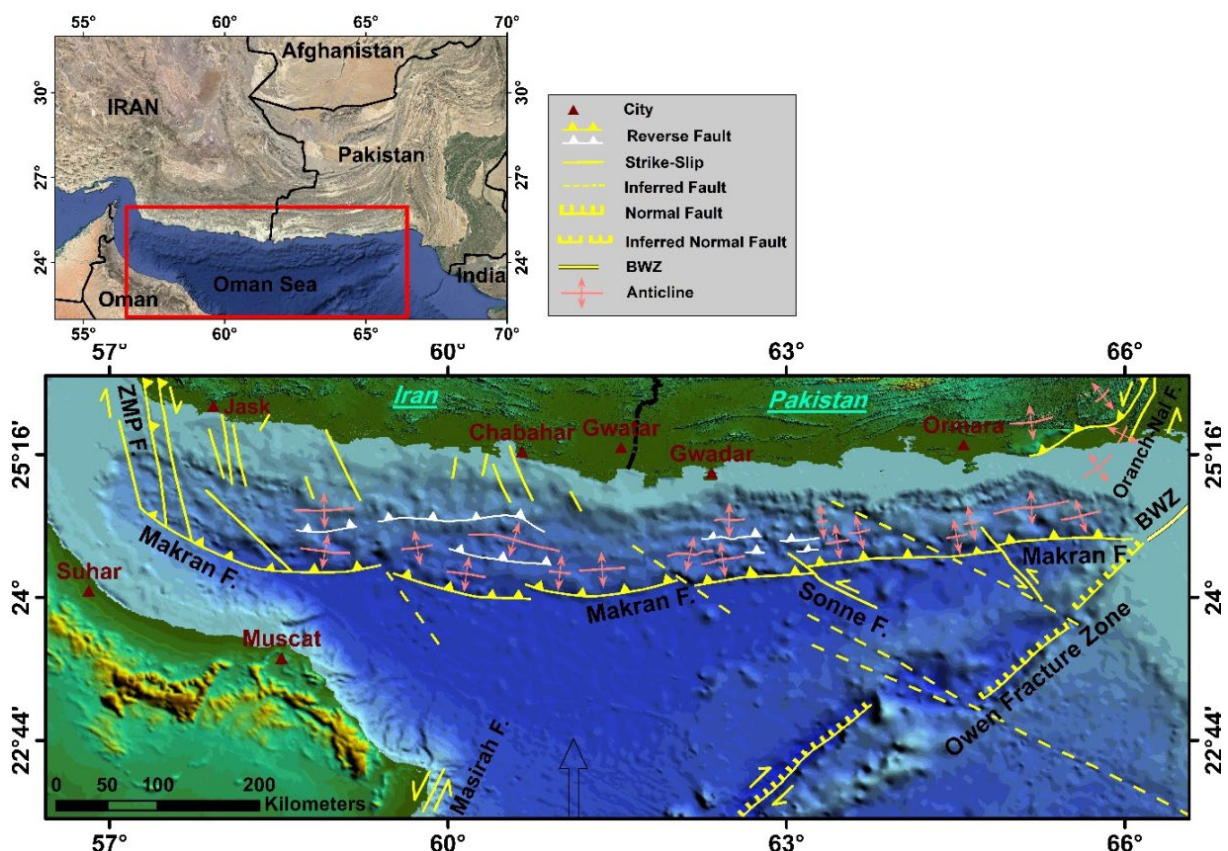
بر روی تصاویر توپوگرافی کف دریا نیز گسل سونه و گسل های انتقالی دیگری که گسل مکران را قطع کرده اند، قابل ردیابی اند (شکل ۵). به طوریکه ادامه آنها در خشکی نیز قابل مشاهده می باشد. در امتداد این خطواره های گسلی، جابه جایی های مشهورهای



شکل ۵. الف) آثار سطحی گسل های موجود در بخش خاوری دریای عمان. ب) گسل ها به همراه تعدادی از سازوکار زمین لرزه های روی داده در منطقه (سازوکارها برگرفته از سایت دانشگاه هاروارد).

با گسل مکران در داخل دریا دیده می‌شوند (Grando and Mc-Clay, 2007; Harms et al., 1982; Hilal, 1991; Kopp et al., 2000; Minshull et al., 1992; Reza Khan et al., 2015; White and Kiltgrd, 1976 and Wiedicke et al., 2001) (شکل ۶). گاهی گنبد چین خوردگی‌ها و سطح ضعف راندگی‌ها موجود در پیرامون منطقه ساحلی محل خروج گلفشان‌هایی می‌باشند که در پهنه برافزایشی مکران به وفور دیده می‌شوند (Wiedicke et al., 2001; Reza Khan et al., 2015).

ما در بخش باختری دریای عمان نیز براساس مطالعات لرزه نگاری انجام شده (e.g. Grando and McClay, 2007 and White and Kiltgrd, 1976) و شواهد جابه‌جایی سطحی بر روی تصاویر توپوگرافی (سی متر)، گسل‌های انتقالی را شناسایی و بر روی شکل (۶) نمایش دادیم. بررسی‌های ما نشان می‌دهد گسل مکران از ۶ قطعه اصلی با آرایش پلکانی تشکیل شده است (شکل ۶). در مطالعات لرزه نگاری بازتابی مختلفی که بر روی فرادیواره این شش قطعه صورت پذیرفته است، چین خوردگی‌ها و راندگی‌هایی موازی

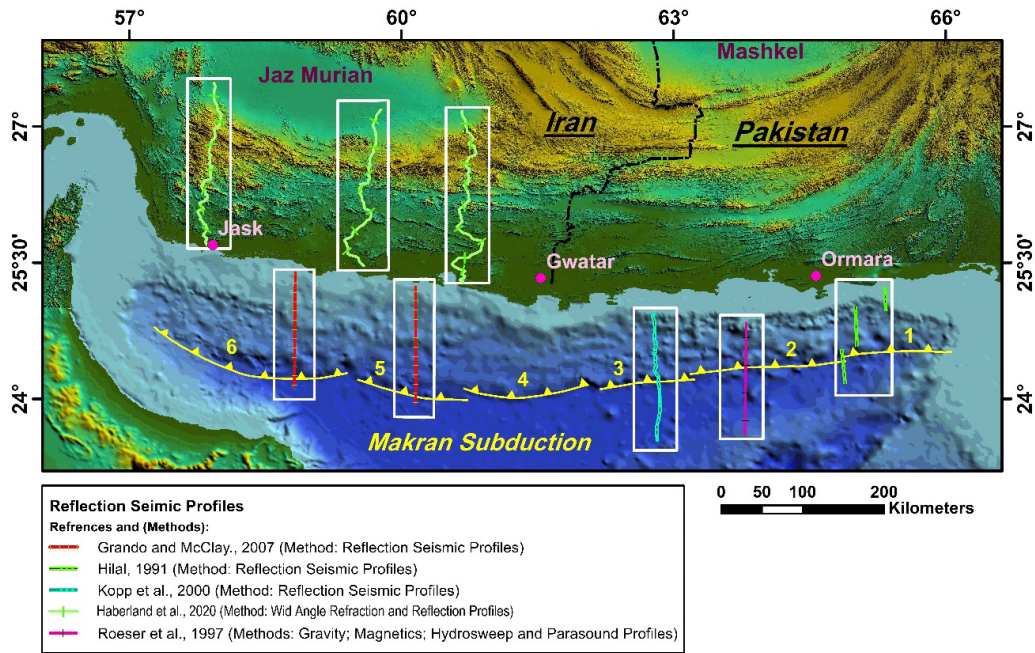


شکل ۶. نقشه ساختاری گسل مکران و گسل‌های تاثیرگذار بر روی هندسه آن. گسل مکران در بخش خاوری به پیوسته سه گانه و در بخش باختری به حاشیه تراگذر میناب (ZMPF) ختم می‌شود.

داده‌های لرزه نگاری بازتابی در بخش خشکی گوه برافزایشی مکران باختری در طول ۳ پروفیل شمالی - جنوبی (به طول ۲۰۰ کیلومتر) توسط مختاری و همکاران (۱) یک ساختار شبه گوه برافزایشی را نشان می‌دهد که قسمت زیادی از گوه سرعت لرزه‌ای نسبتاً پایینی دارند.

۵- بحث و نتایج

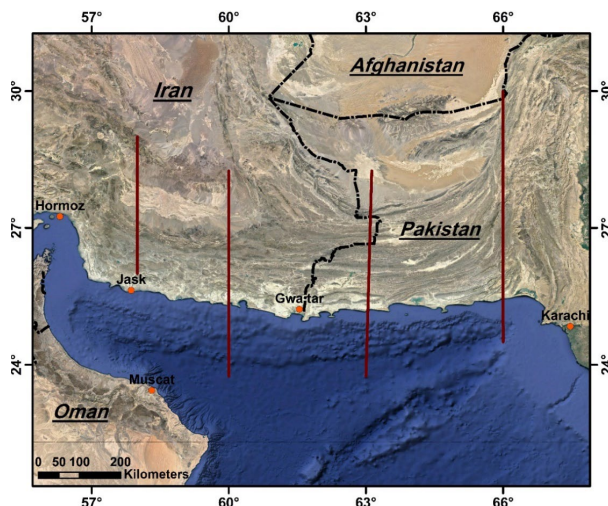
جهت بررسی و مقایسه شیب قطعات مختلف گسل مکران و بررسی ساختارهای زیرسطحی آن علاوه بر کاتالوگ زمینلرزه‌ای بدست آمده در این پژوهش از ۸ پروفیل لرزه نگاری بازتابی و انکساری کمک گرفته شد (شکل ۷). در قطعه شماره (۱) پروفیل بدست آمده توسط هیلال (Hilal, 1991)، در قطعه شماره (۲) روسر و همکاران (Rosser et al., 1997)، در قطعه شماره (۳) کوپ و همکاران (Kopp et al., 2000)، در قطعه شماره (۵) و (۶) گرنندو و مک‌کلی (Grando and McClay, 2007) مورد استفاده قرار گرفت.



شکل ۷. پروفیل‌های لرزه‌نگاری انعکاسی و انکساری انتخاب شده برای استفاده در تعیین شیب صفحه قطعات مختلف گسل مکران. برای قطعه شماره (۴) پروفیل مناسبی یافت نشد.

(2002). از اینرو در تحلیل لرزه‌خیزی و دریالرزه یک پهنه فرورانش، ترسیم مقاطع ساختاری دقیق عرضی در سطح عمودی زمین توسط متخصصین لرزه زمین ساخت جهت استفاده مهندسیین زلزله‌شناس در تحلیل خطر دریالرزه ضروری است. در این مطالعه چهار مقطع عرضی (شکل ۸ و ۹) در طول جغرافیایی حدود ۵۸°، ۶۰°، ۶۳° و ۶۶° بر روی پهنه ساختاری مکران پیشنهاد می‌شود.

با توجه به آنکه منشاء دریالرزه تغییر شکل بستر دریا ناشی از زمین لرزه است، تغییر هر پارامتر از گسل می‌تواند بر میزان تغییر شکل بستر دریا و طبیعتا دامنه امواج دریالرزه اثر گذار باشد. یکی از پارامترهای موثر بر دامنه موج، شیب گسل لرزه‌زا می‌باشد. تغییر شیب به مقدار زیاد، می‌تواند اثر قابل توجهی بر دامنه موج دریالرزه بگذارد، اما در صورتیکه تغییر شیب ناچیز باشد با وجود اثر گذاری بر دامنه موج، تغییر قابل ملاحظه‌ای حاصل نمی‌شود (Ward).



شکل ۸. چهار مقطع عرضی بررسی شده در این مطالعه در طول جغرافیایی حدود ۵۸°، ۶۰°، ۶۳° و ۶۶°.

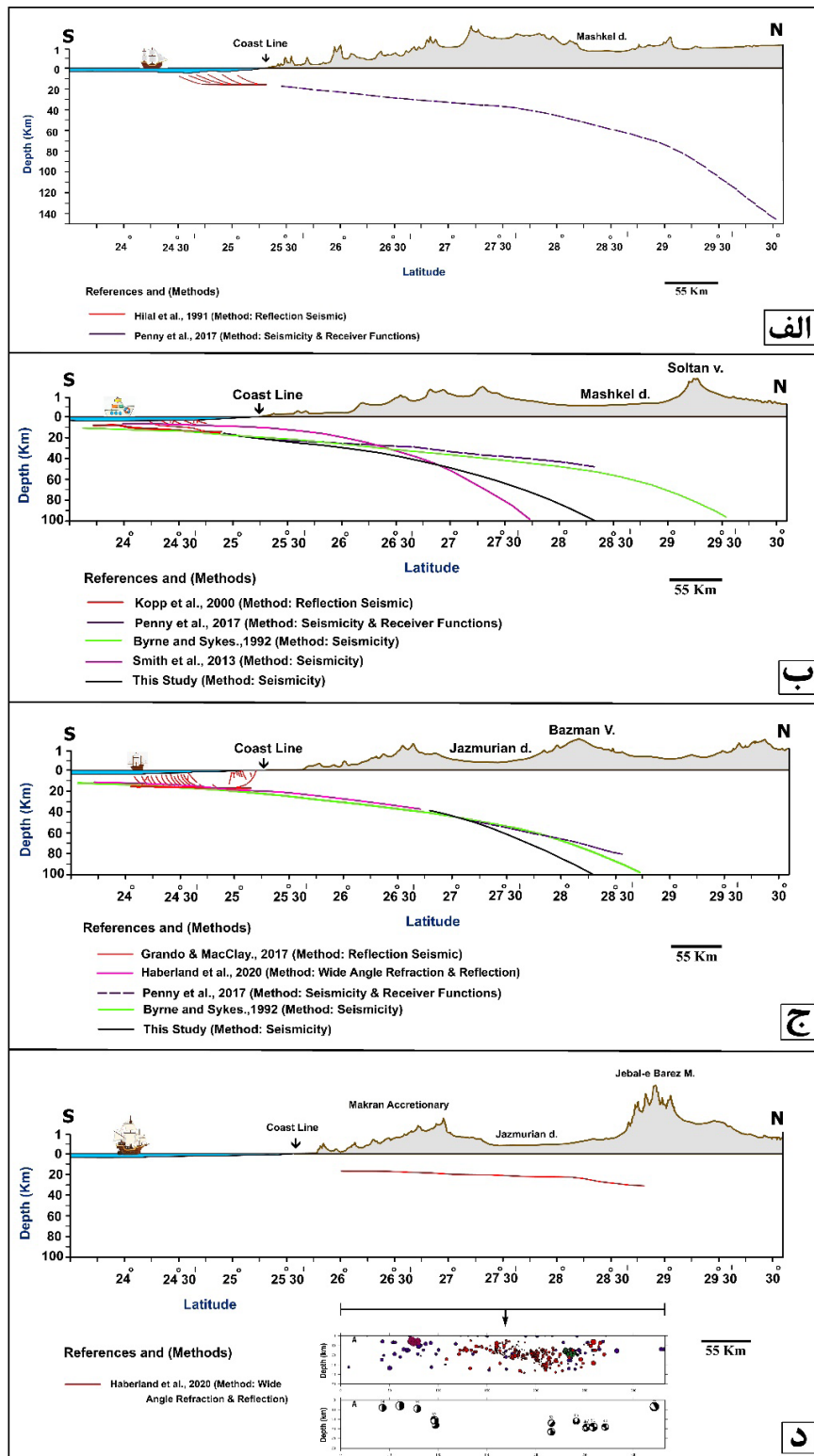
به دست آمده توسط محققین مختلف، برای پهنه ساختاری مکران، مقیاس عمودی تا حدودی بزرگ نمایشی شده است. از این رو در نگاه کلی در مطالعات مختلف میزان شیب صفحه فرورونده متفاوت به

در مقیاس عمودی سطح زمین اگر لازم باشد می‌توان تا حدودی بزرگ نمایشی اغراق آمیز به کار برد. اما وجود اغراق در مقیاس عمودی تمام شیب‌ها را تغییر خواهد داد. در تعدادی از مقاطع عرضی



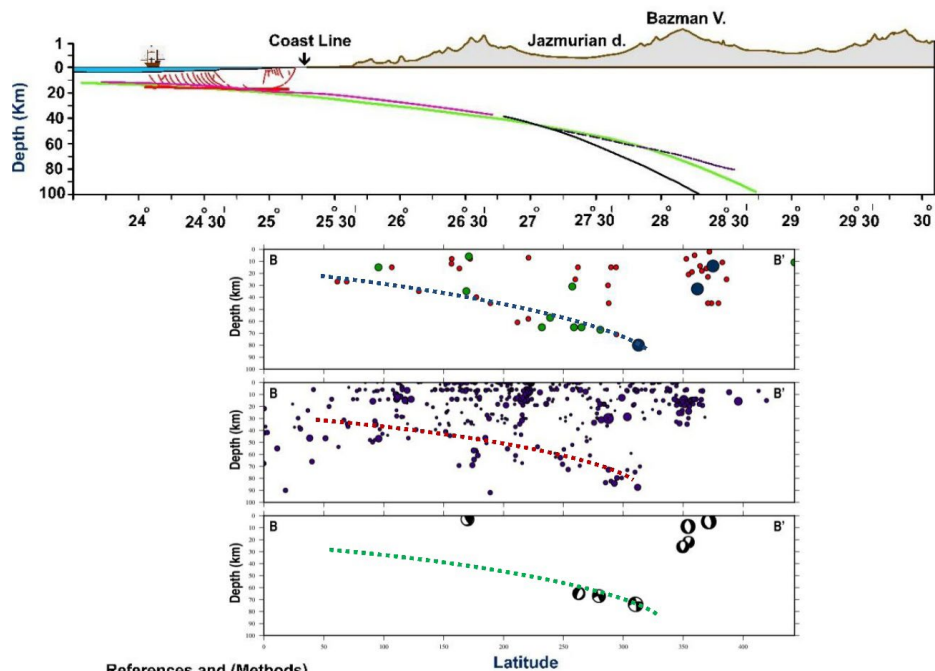
بر اساس کاتالوگ تصحیح شده در این مطالعه (شکل ۲) از نظر کانون روستحی و عمقی، مقاطع لرزه خیزی در راستای چهار مقطع عرضی پیشنهادی (شکل ۸)، ترسیم و با سایر مطالعات مقایسه گردید (شکل ۹، ۱۰ و ۱۱).

نظر می آید. اما نوع روش به کار برده شده در ترسیم مقاطع عرضی در مطالعات مختلف نیز عاملی دیگر در اختلاف شیب صفحه فرورونده است. از اینرو تمامی مقاطع جمع آوری شده در شکل (۳) هم مقیاس گردیده و مورد بررسی قرار گرفتند (شکل ۹). همچنین



شکل ۹. مقاطع عرضی به دست آمده توسط محققین در طول جغرافیایی ۶۶° (الف)، ۶۳° (ب)، ۶۰° (پ)، ۵۸° (ت). موقعیت مقاطع در شکل (۸) آورده شده است.

با بررسی مقاطع عرضی مختلف؛ برای طول‌های جغرافیایی 66° و 60° شکل‌های ۱۰ و ۱۱ پیشنهاد می‌شوند. 58° شکل‌های ۹ (الف) و (ت) و برای طول‌های جغرافیایی 63° و

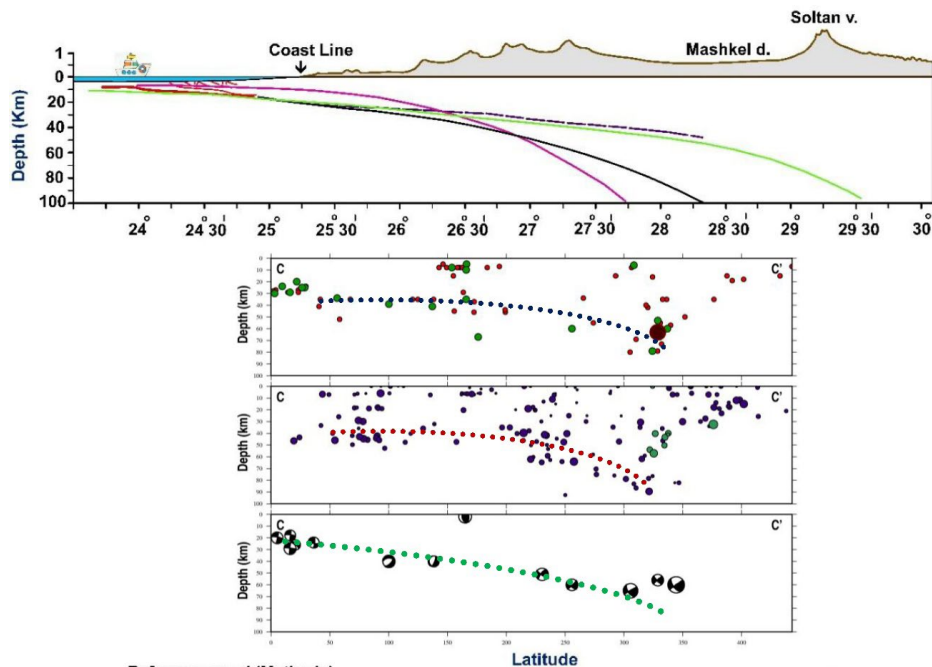


References and (Methods)

- Grando & MacClay, 2017 (Method: Reflection Seismic)
- Haberland et al., 2020 (Method: Angle Refraction & Reflection)
- Penny et al., 2017 (Method: Seismicity & Receiver Functions)
- Byrne and Sykes.,1992 (Method: Seismicity)
- This Study (Method: Seismicity)

55 Km

شکل ۱۰. مقاطع عرضی در طول جغرافیایی 60° به همراه مقاطع لرزه‌خیزی این مطالعه.



References and (Methods)

- Kopp et al., 2000 (Method: Reflection Seismic)
- Penny et al., 2017 (Method: Seismicity & Receiver Functions)
- Byrne and Sykes.,1992 (Method: Seismicity)
- Smith et al., 2013 (Method: Seismicity)
- This Study (Method: Seismicity)

55 Km

شکل ۱۱. مقاطع عرضی بدست آمده در طول جغرافیایی 63° به همراه مقاطع لرزه‌خیزی این مطالعه.



فرورونده با فاصله گرفتن از محل فرورانش به صورت یکنواخت افزایش پیدا می کند و میزان شیب آن ها در عرض های جغرافیایی یکسان، متفاوت می باشد.

منابع

مختاری، م.، تاتار، م.، ری برگ، ت.، زعفرانی، ح.، علی بابایی، ح.، مهشادینا، ل.، مسعودی، م.، و هابرلند، ک.، (۱۳۹۷). انجام مطالعات برداشت مشخصات لرزه ای گسل مکران - تحلیل داده های بخش خشکی (گزارش ۲). پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله. ۹۶ صفحه.

- Arthurton, R.S., Farah, A. and Ahmed, W., 1982. The Late-Cretaceous- Cenozoic history of western Baluchistan Pakistan- the northern margin of the Makran subduction complex. In, J. K. Leggett (Ed.), Trench-forearc geology: Sedimentation and tectonics on modern and ancient active plate margins. Geological Society, London. 10, 373-385.
- Avouac, J.P., Ayoub, F., Wei, S., Ampuero, J.P., Meng, L., Leprince, S., Jolivet, R., Duputel, Z. and Helmberger, D., 2014. The 2013, Mw7.7 Balochistan earthquake, energetic strike-slip reactivation of a thrust fault. *Earth Planet. Sci. Lett.* 391, 128-134.
- Bayer, R., Chéry, J., Tatar, M., Vernant, P., Abbassi, M., Masson, F., Nilforoushan, F., Doerflinger, E., Regard, V. and Bellier, O., 2006. Active deformation in Zagros-Makran transition zone inferred from GPS measurements. *Geophys. J. Int.* 165, 173-181.
- Berberian, F., Muir, I.D., Pankhurst, R.G. and Berberian, M., 1982. Late Cretaceous and early Miocene Andean-type plutonic activity in northern Makran and Central Iran. *Journal of the Geological Society of London.* 139 (5), 605-614.
- Bocchini, G.M., Brüstle, A., Becker, D., Meier, T., Van Keken, P.E., Ruscic, M., Papadopoulos, G.A., Rische, M., and Friederich, W., 2018. Tearing, segmentation, and backstepping of subduction in the Aegean: New insights from seismicity. *Tectonophysics.* 734- 735, 96-118.
- Burg, J.-P., Dolati, A., Bernoulli, D. and Smit, J., 2013. Structural style of the Makran Tertiary accretionary complex in SE-Iran. In: Al Hosani, K., Rore, F., Ellison, R., Lokier, S., (Eds.), *Lithosphere Dynamics and Sedimentary Basins: The Arabian Plate and Analogues.* Springer Verlag, Heidelberg, pp. 239-259.
- Burg, J.-P., 2018. Geology of the onshore Makran accretionary wedge: Synthesis and tectonic interpretation. *Earth-Science Reviews.* 185, 1210-1231.
- Byrne, D. E., Sykes, L. R. and Davis, D. M., 1992.

۷- نتیجه گیری

- گسل مکران از ۶ قطعه اصلی تشکیل شده است. اکثر این قطعه ها توسط گسل های انتقالی از یکدیگر جدا شده اند.

- گسل های انتقالی مکران روند NW-SE دارند. آن ها عامل جابه جایی منشورهای برافزایشی در پهنه فرورانش مکران هستند.

- چهار مقطع عرضی عمود بر پهنه فرورانش مکران در طول جغرافیایی 58° ، 60° ، 63° و 66° نشان می دهد که در محل فرورانش، صفحه فرورونده شیب چندانی ندارد؛ به طوریکه صفحه فرورونده تقریباً افقی می باشد. این مقاطع نشان می دهند، میزان شیب صفحه

Great thrust earthquakes and aseismic slip along the plate boundary of the Makran subduction zone. *J Geophys Res.* 97(B1), 449-478.

- DeJong, K. A., 1982. Tectonics of the Persian Gulf, Gulf of Oman, and southern Pakistan region. In, A. E. M. Nairn and F. G. Stehli (Ed). *The Indian Ocean*, Plenum Press, New York. 6, 315- 351.
- Dercourt, J., Ricou, L. E. and Vrielynck, B., 1993. Atlas Tethys palaeoenvironmental maps. Gauthier-Villars, Paris. 307p.
- Dolati, A., 2010. Stratigraphy, Structure Geology and Low- Temperature Thermochronology Across the Makran Accretionary Wedge in Iran. PhD Thesis, ETH Zurich, Zürich (ETH). 168 p.
- Farhoudi, G. and Karig, D. E., 1977. Makran of Iran and Pakistan as an active arc system. *Geology.* 5 (11), 664 -668.
- Fruehn, J., White, R.S. and Minshull, T. A., 1997. Internal deformation and compaction of the Makran accretionary wedge. *Terra Nova.* 9, 101-104.
- Gansser, A., 1955. New aspects of the geology in central Iran. Paper presented at 4th World Petroleum Congress, Roma. 279-300.
- Grando, G. and McClay, K., 2007. Morphotectonics domains and structural styles in the Makran accretionary prism, offshore Iran. *Sedimentary Geology.* 196 (1-4), 157-179.
- Haberland, c., Mokhtari, M., Babaei, H.A., Ryberg, T., Masoodi, M., Partabian, A. and Lauterjung, J., 2020. Anatomy of a crustal-scale accretionary complex: Insights from deep seismic sounding of the onshore western Makran subduction zone, Iran. *Journal of Geology.* DOI: 10.1130/g47700.1.
- Harms, J. C., Cappel, H. N. and Francis, D. C., 1984. The Makran coast of Pakistan: its stratigraphy and hydrocarbon potential. In, B. U. Haq and J. D. Milliman (Ed.), *Marine Geology and Oceanography of Arabian Sea and Coastal Pakistan.* 4, 3-27.
- Hilal, A.R., Riaz, A. and Manshoor, A., 1991. A new



- concept related to structural and tectonic behavior of Balochestan basin, Pakistan and its implication on Hydrocarbon prospects. *Pakistan Journal of Hydrocarbon Research*. 3 (1), 1-17.
- Jacob, K.H. and Quittmeyer, R.C., 1979. The Makran Region of Pakistan and Iran: Trench-arc system with active plate subduction. In: Farah, A., Dejong, K.A. (Eds.), *Geodynamics of Pakistan*. Geological Survey of Pakistan, Quetta. 305–317 p.
 - 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.
 - Kopp, C., Fruehn, J., Flueh, E. R., Reichert, C., Kulkowski, N., Bialas, J. and Klaeschen, D., 2000. Structure of the Makran subduction zone from wide-angle and reflection seismic data. *Tectonophysics*. 329, 171-191.
 - Kukkonen, I. T. and Clauser, C., 1994. Simulation of heat transfer at the Kola deep-hole site - implications for advection, heat refraction and palaeoclimatic effects. *Geophysical Journal International*, 116, 409-420.
 - Kulkowski, N., Schillhorn, T., Huhn, K., Von Rad, U., Husen, S. and Flueh, E. R., 2001. Morphotectonics and mechanics of the central Makran accretionary wedge of Pakistan. *Marine Geology*. 173 (1-4), 1-19.
 - Lawrence, R. D., Khan, S.H., and Nakata, T. 1992. Chaman Fault, Pakistan Afghanistan. *Annales Tectonicae Special Issue, VI (Supplement)*, 196-223.
 - Masson, F., Anvari, M., Djamour, Y., Walpersdorf, A., Tavakoli, F., Daignières, M., Nankali, H. and Van Gorp, S., 2007. Large-scale velocity field and strain tensor in Iran inferred from GPS measurements: new insight for the present-day deformation pattern within NE Iran. *Geophysical Journal International*. 170, 436-440.
 - McCall, G. J. H., 1997. The geotectonic history of the Makran and adjacent areas of southern Iran. *J. Asian Earth Sci.* 15 (6), 517–531.
 - McCall, G.J.H. and Kidd, R.G.W., 1982. The Makran, Southeastern Iran: the anatomy of a convergent plate margin active from Cretaceous to Present. In: Leggett, J.K. (Ed.), *Trench–Fore-Arc Geology: Sedimentation and Tectonics of Modern and Ancient Plate Margins*. Geological Society, London. 387–397 Special Publications.
 - McQuarrie, N., Stock, J. M., Verdel, C., and Wernicke, B. P., 2003. Cenozoic evolution of Neotethys and implications for the causes of plate motions. *Geophysical Research Letters*. 30, 20-36, doi:10.1029/2003GL017992.
 - Minshull, T.A., White, R.S., Barton P.J. and Collier J.S., 1992. Deformation at plate boundaries around the Gulf of Oman. *Geology*, 104 (1992), 265- 277.
 - Nemati, M., 2019. Seismotectonic and seismicity of Makran, a bimodal subduction zone, SE Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*. 169, 139-161.
 - Normand, R., Simpson, G., Herman, F., Biswas, R.H, Bahroudi, A., and Schneide, R. B., 2019. Dating and morpho-stratigraphy of uplifted marine terraces in the Makran subduction zone (Iran). *Earth Surface Dynamics*. 7 (1), 321-344.
 - Pendse, C. G., 1948. The Mekran earthquake of the 28th November 1945. *Sci Notes Indian Meteorol Dep*. 10, 141–144.
 - 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 behavior in the Makran subduction zone. *Geophys. J. Int.* 209, 1800–1830.
 - Regard, V., Bellier, O., Thomas, J. C., Abbassi, M.R., Mercier, J., Shabanian, E., Feghhi, Kh. and Soleymani, Sh., 2004. The accommodation of ArabiaAsia convergence in the Zagros-Makran transfer zone, SE Iran: a transition between collision and subduction through a young deforming system. *Tectonics*. 23, 1-24.
 - Roeser, H.A., Adam, J., Bargeloh, H.O., Block, M., Damm, V., Dohmann, H., Fritsch, J., Kewitsch, P., Puskeppeleit, K., von Rad, U., Reichert, C., Schrader, U., Schreckenberger, B., Sievers, J., Steinmann, D., VoM, W., Schillhorn, T., Inam, A., Tahir, M., Cheema, A.H., 1997. The Makran Accretionary Wedge of Pakistan: Tectonic evolution and fluid migration, part 1. Unpubl. BGR Report, no.116643, 111 p.
 - Sattarzadeh, Y., Cosgrove, J.W. and Vita-Finzi, C., 2000. The interplay of faulting and folding during the evolution of the Zagros deformation belt, in 'Forced folds and fractures'. 169, 187–196.
 - Schlüter, H.U., Prexl, A., Gaedicke, C., Roeser, H., Reichert, C., Meyer, H. and Daniels, C., 2002. The Makran accretionary wedge: sediment thicknesses and ages and the origin of mud volcanoes. *Mar. Geol.* 185, 219–232
 - Smith, G.L., McNeill, L.C., Wang, K., He, J. and Henstock, T.J., 2013. Thermal structure and megathrust seismogenic potential of the Makran subduction zone. *Geophysical Research Letters*, 40, 1528–1533.
 - Vigny, C., Huchon, P., Ruegg, J., Khanbari, K. and Asfaw, L. M ., 2006. Confirmation of Arabia plate



- slow motion by new GPS data in Yemen. *Journal of Geophysical Research*. 111 (B02402), doi:10.1029/2004JB003229.
- Ward, S. N., 2002, Tsunamis, In: Meyers, R. A. (Ed.), *The Encyclopedia of Physical Science and Technology*, Academic Press. 17, 175-191.
 - White, R.S. and Klitgord, K., 1976. Sediment deformation and and plate tectonics in the gulf of oman. *Earth and Planetary Science Letters*. 32,199- 209.
 - Wiedicke, M., Neben, S. and Spiess, V., 2001. Mud volcanoes at the front of the Makran accretionary complex, Pakistan. *Mar. Geol.* 172 (1), 57–73.
 - Zaigham, N. A. and Mallick, K. A., 2000. Bela ophiolite zone of southern Pakistan: Tectonic setting and associated mineral deposits. *GSA Bulletin*. 112 (3), 478–489.

Geometric characteristics of the Makran subduction zone

Ahmad Rashidi^{1*}, Hamid Zafarani², Mohamad Tatar³

1- Assistant Professor, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES), Tehran, Iran

2- Associate Professor, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES), Tehran, Iran

3- Professor, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES), Tehran, Iran



Abstract:

Based on the role of fault segmentation in the deformation, it is necessary to determine the main segments of the Makran fault by transfer faults for the potential risk of earthquake and tsunami. Therefore, in this study, the transfer faults of Makran subduction zone were identified. Our research shows that Makran fault consists of 6 main segments with step- arrangement which most of these segments are separated by NW-SE transfer fault (such as sonne fault). These transfer faults have cutted the Makran fault and caused the displacement in the acceleration zone. According to the effect of the slope of the subduction slab in the seismic risk and the tsunami assessment, we proposed four cross-sections perpendicular to the subduction zone at longitude 58°, 60°, 63°, and 66°. Review of these sections shows that at the subduction wedge, the slab plate does not have a slight slope, so that the slope is horizontal. In these cross-sections, slope of the slab plate in different points are determined.

Keywords: Makran Fault, Fault Segmentation, Dip of Subduction Zone, Seismicity, Makran.