



دانشکده علوم پایه - مرکز تحقیقات زمین‌لرزه‌شناسی دانشگاه فردوسی مشهد

**شبیه‌سازی عددی حرکات تکتونیکی در ایران
با روش اجزاء محدود**

نگارش:

نعمت‌اله غیور نجارکار

استاد راهنما:

دکتر سید کیوان حسینی

استادان مشاور:

دکتر رضا خواجه‌جوی

دکتر بهنام رحیمی

پایان نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد در رشته ژئوفیزیک گرایش زلزله‌شناسی

شهریور ۱۳۹۱

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

تقدیم به

پدر و مادرم

که هستی ام از آنهاست،

به همسرم

که دلسوزانه مرا در این راه همراهی نمود

و

به پسرم که آینده از آن اوست



تشکر و قدر دانی

بر خود لازم می دانم که از استاد راهنمای محترم آقای دکتر سید کیوان مسینی که با راهنمایی و ارائه نظرات ارزنده ایشان این رساله تهیه گردیده است و از استاد مشاور محترم آقای دکتر رضا فواجوی که با توانایی های بالای خود پیشنهادات سودمند و تشویق های دلگرم کننده ای ارائه نمودند و همچنین از استاد مشاور محترم آقای دکتر بهنام رمیمی به جهت ارائه پیشنهادات ارزنده ایشان، صمیمانه تشکر و قدردانی نمایم.

از آقای دکتر فرزین قائمی که زحمت داوری این پایان نامه را به عهده گرفته اند نیز صمیمانه تشکر می نمایم.

همچنین از آقای دکتر مسین صادقی و سایر کارکنان مرکز تحقیقات زمینلرزه شناسی دانشگاه فردوسی مشهد به خاطر زحمات آنها در طول دوره ی تمصیل سپاسگزاری می نمایم.

چکیده

هدف اصلی این تحقیق، شبیه سازی عددی حرکات تکتونیکی کوتاه مدت در ایران، بوسیله ی یک مدل رفتاری الاستیک و شرایط مرزی است. فرض می کنیم که سیستم مکانیکی همیشه در تعادل استاتیک بین نیروهای داخلی (تنش) و نیروهای خارجی (نیروهای جاذبه و نیروهای سطحی اعمال شده در شرایط مرزی) قرار دارد. در این تحقیق با استفاده از روش اجزاء محدود، نخست صفحات تکتونیکی داخل پلاتفرم ایران و اطراف آن باز سازی شده و سپس با تعیین شرایط مرزی و اعمال تنشهای فشارشی و برشی به مرز جنوبی مدل، رفتار الاستیک حرکات تکتونیکی در ایران بر اساس داده های حاصل از میدان سرعت GPS شبیه سازی و سپس توزیع جابجایی، تنش و کرنش برای بررسی نحوه ی حرکت صفحه ها به دست آمده است. این مدل مشتمل بر ۴۳۷ جزء سه بعدی و ۱۰۹۴ گره می باشد.

نتایج به دست آمده از مدل، چرخش پاد ساعت گرد ایران، عربستان و آناتولی را نسبت به صفحه اوراسیا و انطباق خوب بردار های سرعت حاصل از مدل را با بردارهای سرعت GPS نشان می دهد. جهت بردارهای جابجایی در مناطق مکران، شرق زاگرس، شرق ایران مرکزی، کپه داغ و شرق البرز، شمال-شمال شرق مدل سازی گردیده است. به تدریج به سمت غرب، در مناطق مرکز زاگرس، مرکز ایران مرکزی و مرکز البرز، جهت این بردارها تقریباً شمالی می شوند و در مناطق غرب زاگرس و شمال غرب ایران، جهت آنها به شمال-شمال غرب تغییر می یابد که این جهت ها با جهت های بردارهای سرعت افقی حاصل از GPS قابل مقایسه است.

بیشترین نرخ جابجایی، در منطقه مکران حدود ۲۰-۱۸ میلیمتر در سال بدست آمده است، به تدریج به سمت غرب نرخ جابجایی کاهش یافته به طوری که جابجایی در حد فاصل زاگرس و مکران حدود ۱۳-۱۱ میلیمتر در سال، در شرق زاگرس حدود ۱۱-۹ میلیمتر در سال، در مرکز زاگرس ۷-۹ میلیمتر در سال و در غرب زاگرس ۵-۳ میلیمتر در سال بدست آمده است. مدل سازی ما نشان دهنده نرخ جابجایی در منطقه ی کپه داغ حدود ۵-۳ میلیمتر در سال، در شرق البرز حدود ۸-۶ و در مرکز و غرب البرز حدود ۵-۳ میلیمتر در سال است. از طرف دیگر با استفاده از جهت محورهای اصلی کرنش می توانیم نوع گسلش در مناطق مختلف را بررسی و مقایسه نمائیم، به طوری که در منطقه ی بین مکران و زاگرس یک گسل امتدادلغز تقریباً شمالی- جنوبی قابل استنباط است که می توان آن را به گسل میناب نسبت داد. در مناطق شرق و مرکز زاگرس نوع گسلش از نوع معکوس (تراست) غالب می باشد. در منطقه ی غرب زاگرس، نوع گسلش امتداد لغز غالب است. در ایران مرکزی و البرز نوع گسلش امتدادلغز و در منطقه ی کپه داغ، هر دو نوع گسلش امتدادلغز و معکوس بدست آمده است.

همچنین جهت میدان تنش فشارشی افقی ماکزیمم پیش بینی شده بوسیله ی مدل، با نقشه ی تنش جهانی (WSM) برای ایران، قابل مقایسه است.

کلید واژه ها: زمین ساخت، ایران، شبیه سازی، اجزاء محدود، تغییر شکل الاستیک، بردارهای سرعت

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱۰-۱۱	پیشگفتار.....
۱۲	فصل اول- مروری بر لرزه خیزی و لرزه زمینساخت ایران.....
۱۳-۱۵	۱-۱- مقدمه.....
۱۶-۱۸	۲-۱- لرزه خیزی ایران.....
۱۹	۳-۱- لرزه زمینساخت ایران.....
۱۹	۱-۳-۱- تقسیم بندی اشتهکلین(۱۹۶۸).....
۱۹	۲-۳-۱- تقسیم بندی تکین(۱۹۷۲).....
۱۹-۲۴	۳-۳-۱- تقسیم بندی نوروژی(۱۹۷۲).....
۲۵	۴-۳-۱- تقسیم بندی بربریان(۱۹۷۶).....
۲۶	۵-۳-۱- تقسیم بندی توکلی(۱۹۹۶).....
۲۷-۲۸	۶-۳-۱- تقسیم بندی Masson et al., 2005.....
۲۹	۷-۳-۱- تقسیم بندی Engdahl et al., 2006.....
۲۹	۱-۷-۳-۱- رشته کوههای البرز.....
۳۰	۲-۷-۳-۱- کمربند چین خورده زاگرس.....
۳۱	۳-۷-۳-۱- محدوده ی کپه داغ.....
۳۱	۴-۷-۳-۱- ایران مرکزی.....
۳۱	۵-۷-۳-۱- شرق ایران.....
۳۱	۶-۷-۳-۱- ناحیه ی مکران.....
۳۱	۷-۷-۳-۱- خط عمان.....
۳۲-۳۷	۴-۱- نرخ همگرایی در مناطق مختلف ایران.....
۳۸	فصل دوم- روش اجزای محدود و رئولوژی مواد.....
۳۹	۱-۲- مقدمه.....
۳۹	۲-۲- معرفی نرم افزار ABAQUS.....
۳۹	۳-۲- روش اجزاء محدود.....
۳۹-۴۰	۴-۲- هندسه ی مدل و شبکه بندی.....
۴۰-۴۱	۵-۲- رئولوژی و تغییر شکل مواد.....
۴۲	۱-۵-۲- رفتار الاستیک.....
۴۲	۲-۵-۲- قانون هوک.....
۴۳	۶-۲- مختصری از برخی شبیه سازی های انجام شده قبلی.....
۴۳	۱-۶-۲- تکامل تکتونیک شمال ایران در ترشیری پسین (Guest et al., 2006).....

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۲-۶-۲	میدان تنش نئوتکتونیک والگوی تغییر شکل در داخل زاگرس و نواحی متصل به آن با استفاده از مدل سازی اجزاء محدود (Islam and Shinjo,2010)..... ۴۴
۲-۶-۳	محاسبه ی موازی تغییر شکل قاره ای چند مقیاسی در غرب ایالات متحده به روش اجزاء محدود (Liu et al., 2007)..... ۴۵
۲-۶-۴	مدل سازی اجزاء محدود حال حاضر و دیرینه ی تنش درون صفحه ای (Dyksterhuis et al., 2003)..... ۴۶
۴۷	فصل سوم- مدل سازی حرکات تکتونیکی با استفاده از نرم افزار ABAQUS 6.9-1..... ۴۷
۳-۱	مقدمه..... ۴۸
۳-۲	باز سازی صفحات تکتونیکی..... ۴۸-۵۰
۳-۳	پارامتر های مواد..... ۵۰-۵۱
۳-۴	شرایط مرزی..... ۵۱
۳-۵	بررسی نیروها..... ۵۲-۵۳
۳-۶	شبکه بندی و آنالیز عددی..... ۵۴
۳-۷	درستی آزمایی مدل..... ۵۵
۳-۷-۱	توزیع جابجایی..... ۵۵-۵۶
۳-۷-۲	بردارهای جابجایی..... ۵۷
۳-۷-۳	الگوی گسلش..... ۵۸-۵۹
۳-۷-۴	جهت میدان تنش..... ۶۰
۳-۸	ناپایداری زمینساختی(حساسیت بردارهای جابجایی به تنشهای مرزی)..... ۶۱-۶۲
۶۳	فصل ۴- نتیجه گیری..... ۶۳
۴-۱	نتیجه گیری..... ۶۴
۴-۲	ارائه ی پیشنهاد..... ۶۵
۶۶	ضمیمه- ABAQUS 6.9-1..... ۶۶
۶۷-۷۹	الف- مراحل نصب نرم افزار..... ۶۷-۷۹
۸۰-۸۲	ب- روش کار با نرم افزار..... ۸۰-۸۲
۸۳	فهرست مراجع..... ۸۳
۸۴	فهرست مراجع فارسی..... ۸۴
۸۵-۸۹	فهرست مراجع انگلیسی..... ۸۵-۸۹
۹۰-۹۳	واژه نامه..... ۹۰-۹۳
۹۴-۹۶	نام نامه..... ۹۴-۹۶

فهرست شکلها

صفحه	عنوان
۱۵.....	شکل ۱-۱- نقشه ی توپوگرافی و گسلهای فعال ایران (Engdahl et al., 2006).....
۱۶.....	شکل ۱-۲- لرزه خیزی ایران از سال ۱۹۰۰ تا ۱۹۷۲.....
۱۷.....	شکل ۱-۳- نقشه ی گسلهای اصلی ایران در طرح مرکاتور.....
۲۴.....	شکل ۱-۴- نقشه ی پهنه بندی لرزه زمینساخت ایران (نوروزی، ۱۹۷۲).....
۲۵.....	شکل ۱-۵- استانهای لرزه زمینساختی ایران (بربریان، ۱۹۷۶).....
۲۶.....	شکل ۱-۶- تقسیم بندی ایران به بیست استان لرزه زمینساختی (توکلی، ۱۹۹۶).....
۲۷.....	شکل ۱-۷- نقشه ی توزیع زلزله های ایران (Masson et al., 2005).....
۲۸.....	شکل ۱-۸- نقشه ی لرزه خیزی ایران با در نظر گرفتن انرژی آزاد شده ی از زلزله ها (Masson et al., 2005).....
۲۹.....	شکل ۱-۹- تقسیم بندی ایران به هفت استان لرزه زمینساخت (Engdahl et al., 2006).....
۳۰.....	شکل ۱-۱۰- لرزه خیزی خاور میانه ۱۹۹۵-۱۹۷۵ (Ref, USGS).....
۳۲.....	شکل ۱-۱۱- نقشه ی گسلهای اصلی ایران (Khaled Hessami et al., 2006).....
۳۳.....	شکل ۱-۱۲- نقشه ی عمومی لرزه خیزی ایران (توکلی، ۱۹۹۶).....
۳۴.....	شکل ۱-۱۳- نقشه ی صفحات تکتونیکی خاور میانه (نوروزی، ۱۹۷۲).....
۳۶.....	شکل ۱-۱۴- بردارهای سرعت افقی GPS (Vernant et al., 2004a).....
۳۷.....	شکل ۱-۱۵- نرخ کوتاه شدگی و جابجایی در بخشهای مختلف ایران با استفاده از اندازه گیری GPS (Vernant et al., 2004a).....
۴۰.....	شکل ۲-۱- نمودار تنش- کرنش.....
۴۳.....	شکل ۲-۲- نقشه ی زون کالیژن عربستان- اوراسیا.....
۴۴.....	شکل ۲-۳- نقشه ی تکتونیک منطقه ای کمربند چین خورده و تراست زاگرس (Navabpour et al., 2007).....
۴۵.....	شکل ۲-۴- شبکه عددی و شرایط مرزی مدل اجزای محدود سیستم گسل سن آندریاس (Liu et al., 2007).....
۴۶.....	شکل ۲-۵- شبکه بندی حال حاضر مدل صفحه ای هند- استرالیا (Dyksterhuis et al., 2003).....
۴۹.....	شکل ۳-۱- استانهای لرزه زمینساختی ایران (بربریان، ۱۹۷۶).....
۴۹.....	شکل ۳-۲- نمایشی از بخشهای ساخته شده ی مدل.....
۵۰.....	شکل ۳-۳- صفحات تکتونیکی مدل.....
۵۳.....	شکل ۳-۴- شرایط مرزی و جهت کلی تنشهای اعمال شده بر مدل.....
۵۴.....	شکل ۳-۵- شبکه بندی و اجزاء مدل.....
۵۵.....	شکل ۳-۶- توزیع جابجایی پیش بینی شده بوسیله ی مدل الاستیک.....

فهرست شکلهای

صفحه	عنوان
۵۵	شکل ۳-۷- نرخ کوتاه شدگی و جابجایی در قسمتهای مختلف ایران با استفاده از اندازه گیری GPS (Vernant et al., 2004a).....
۵۶	شکل ۳-۸- نقشه ی تکتونیکی شمال شرق ایران (Hollingsworth et al., 2010).....
۵۷	شکل ۳-۹- بردارهای جابجایی پیش بینی شده بوسیله ی مدل الاستیک.....
۵۷	شکل ۳-۱۰- بردارهای سرعت افقی GPS (Vernant et al., 2004a).....
۵۸	شکل ۳-۱۱- جهت محورهای اصلی تغییر شکل در مدل الاستیک.....
۵۹	شکل ۳-۱۲- نقشه ی گسلهای فعال ایران (Hessami et al., 2003).....
۶۰	شکل ۳-۱۳- جهت میدان تنش فشارشی ماکزیمم پیش بینی شده بوسیله ی مدل الاستیک.....
۶۰	شکل ۳-۱۴- نقشه ی تنش جهانی برای ایران (WSM, 2008).....
۶۱	شکل ۳-۱۵- توزیع جابجایی پیش بینی شده بوسیله ی مدل الاستیک.....
۶۲	شکل ۳-۱۶- حساسیت توزیع جابجایی به تغییر تنش
۶۲	شکل ۳-۱۷- حساسیت توزیع جابجایی به مدول یانگ.....
۶۵	شکل ۴-۱- تقسیم بندی ایران به بیست استان لرزه زمینساختی (توکلی، ۱۹۹۶).....

پیشگفتار

اندازه گیری های تغییر شکل پوسته به روش های نوین امروزی تأثیر مهمی در تحقیقات زمینساختی دارند. با وجود اینکه این اندازه گیری ها اطلاعات با ارزشی در مورد چگونگی تغییر شکل کنونی زمین می دهند، ولی جوابی برای علت این تغییر شکل ها ندارند. علاوه بر این، اندازه گیری های کنونی نمی-توانند رفتار زمینساختی آینده ی زمین و یا رفتار گذشته ی آن را تعیین کنند. به همین دلیل شاخه های گوناگون علوم زمین از مدل هایی بر پایه ریاضیات و فیزیک استفاده می کنند. در بررسی های تغییر شکل پوسته، مدل های گسلی که بر اساس اطلاعات زمین شناسی، ژئودتیکی و لرزه ای تنظیم شده اند، دید با ارزشی از ویژگی های گسل و رفتار آن در طول زمان فراهم می کنند. مدل ها بر اساس مشاهدات گذشته برآوردهایی از تغییر شکل های آینده و مخاطرات لرزه ای در اختیار انسان قرار می دهند که برای کلان شهرهای مجاور مناطق لرزه ای فعال بسیار با ارزش هستند (Rastbood and Voosoghi, 2009).

در زمین شناسی ایران این مهم وجود دارد که این سرزمین در بخش میانی کمربند کوهزایی آلپ-همیالیا قرار دارد که از غرب اروپا آغاز می شود و پس از گذر از ترکیه، ایران، افغانستان تا تبت و شاید تا نزدیکی برمه و اندونزی ادامه دارد (آقا نباتی، ۱۳۸۳). ایران منطقه ای با زمینساخت فعال است که می-توان آن را به صورت مرز عریضی بین صفحه های صلب اوراسیا و عربستان در نظر گرفت، به طوری که تغییر شکلهای حاصل از همگرایی صفحه های عربستان و اوراسیا مابین گسل های این منطقه توزیع می-شود. وضعیت توپوگرافی این منطقه، وجود گسل های فعال و وقوع زلزله های متعدد در منطقه بیانگر این واقعیت است. در این منطقه توزیع جابجایی، تنش و کرنش را می توان با استفاده از شبیه سازی های عددی بدست آورد.

در طول دهه ی گذشته ایستگاه های GPS متعددی در ایران احداث شده اند که منجر به تعیین بهتر بردارهای سرعت و نرخ تغییر شکل در منطقه شده است. تغییر شکل منتج از مشاهدات ایستگاههای GPS را می توان با سرعت های تعیین شده از روش های وابسته به زمین شناسی و زمین ریخت شناسی در بازه های زمانی بلندتر و یا با نتایج حاصل از مدل سازی مقایسه کرد (Vernant et al., 2004a; Nilforoushan et al., 2003).

وقوع زلزله های متعدد و فاجعه بار در ایران (بربریان، ۱۳۷۴؛ آمبراسیز و ملویل، ۱۹۸۲) و احتمال وقوع زلزله های مشابه در آینده، لزوم بررسی مدل های تکتونیکی بر اساس روشهای عددی را روشن می سازد. این منطقه شاهد برخورد مایل صفحه های عربستان و اوراسیا در رشته کوه های زاگرس، فرو رانش در منطقه مکران، و بیرون راندگی و فرورانش در محدوده آناطولی است.

در این تحقیق نخست به منظور درک نحوه فعالیت زمینساختی ایران و تأثیر آن در تحولات زمین-شناسی مناطق گوناگون داخل این منطقه، با استفاده از روش اجزاء محدود و با بهره گیری از نرم افزار ABAQUS 6.9-1، رفتار الاستیک حرکات تکتونیکی در ایران را بر اساس داده های حاصل از میدان سرعت GPS، شبیه سازی نموده و سپس توزیع جابجایی، تنش و کرنش را برای بررسی نحوه ی حرکت صفحه ها به دست آورده ایم.

خطوط کلی فصل های آتی در این تحقیق به صورت زیر می باشد:

فصل اول حاوی لرزه خیزی و لرزه زمینساخت ایران و نرخ همگرایی در مناطق مختلف ایران می باشد.
فصل دوم به توضیح خلاصه ای از روش اجزاء محدود، رئولوژی مواد و مختصری از کارهای انجام شده ی قبلی در زمینه ی این تحقیق می پردازد.
فصل سوم حاوی انجام مدل سازی با نرم افزار ABAQUS 6.9-1 و تحلیل حرکات تکتونیکی در ایران است.

فصل چهارم شامل نتیجه گیری و ارائه ی پیشنهاد برای ادامه ی تحقیقات است.

فصل اول

مروری بر لرزه خیزی و لرزه زمینساخت ایران

۱-۱- مقدمه

ایران در منطقه‌ای با عرض جغرافیایی ۲۵ تا ۴۰ درجه‌ی شمالی و طول جغرافیایی ۴۴ تا ۶۳ درجه‌ی شرقی واقع شده است. به دلیل قرار گرفتن در کمربند لرزه خیز آلپ- هیمالیا (که بیش از ۹۵٪ زلزله‌های جهان در آن رخ می‌دهد)، ایران یکی از کشورهای لرزه خیز دنیا محسوب می‌شود. وقوع زلزله‌های مخرب در گذشته، همچون زلزله طبرس در سال ۱۹۷۸ با بزرگی ممانی ۷/۷، زلزله منجیل- رودبار در سال ۱۹۹۰ با بزرگی ممانی ۷/۲، زلزله زیرکوه (قائنات) در سال ۱۹۹۷ با بزرگی ۷/۲ و زلزله بم در سال ۲۰۰۳ با بزرگی ممانی ۶/۶ که سبب کشته و زخمی شدن هزاران نفر از ساکنین این مناطق شدند، می‌تواند شاهی بر این ادعا باشد.

ایران در منطقه‌ای با تنوع زیاد لرزه زمینساختی قرار گرفته است که مشخصه‌های زمینساختی خود را از همگرایی شمالی- جنوبی صفحه عربستان به شمال شرق و صفحه اوراسیا به سمت جنوب غرب کسب کرده است (Jackson & Mackenzie, 1984). این همگرایی سبب ایجاد چین خوردگی، کوتاه- شدگی درون قاره‌ای، گسلش معکوس، گسلش امتداد لغز و در ناحیه کوچکی سبب فرورانش در این کشور شده است. شکل (۱-۱) نقشه توپوگرافی و گسل‌های فعال ایران را نشان می‌دهد.

پلاتفرم ایران در طول دوره‌های زمین‌شناسی، چندین پدیده‌ی تکتونیکی را در نتیجه‌ی انواع پیچیده و مختلف حوزه‌های تکتونیکی تجربه کرده است. حالت امروزی پلاتفرم ایران در طول دوران سنوزوئیک، بعد از بسته شدن اقیانوس تتیس و برخورد قاره- قاره صفحه‌های عربستان- اوراسیا تشکیل شده است. این پدیده سبب ایجاد ساختمانهای تکتونیکی فعال و جوانی داخل این پلاتفرم شامل زونهای برخوردی زاگرس، البرز و کپه داغ و زونهای فرو رانش مکران و حوزه‌ی خزر جنوبی شده است. معروفترین واحد تکتونیکی ایران کمربند زاگرس است که منطقه‌ای جوان، مرتفع، با لرزه خیزی فعال و شدیداً چین خورده و دارای زون تراست می‌باشد و به وضوح از ایران مرکزی غیر لرزه‌ای تشخیص داده می‌شود (Shad Manaman et al., 2011).

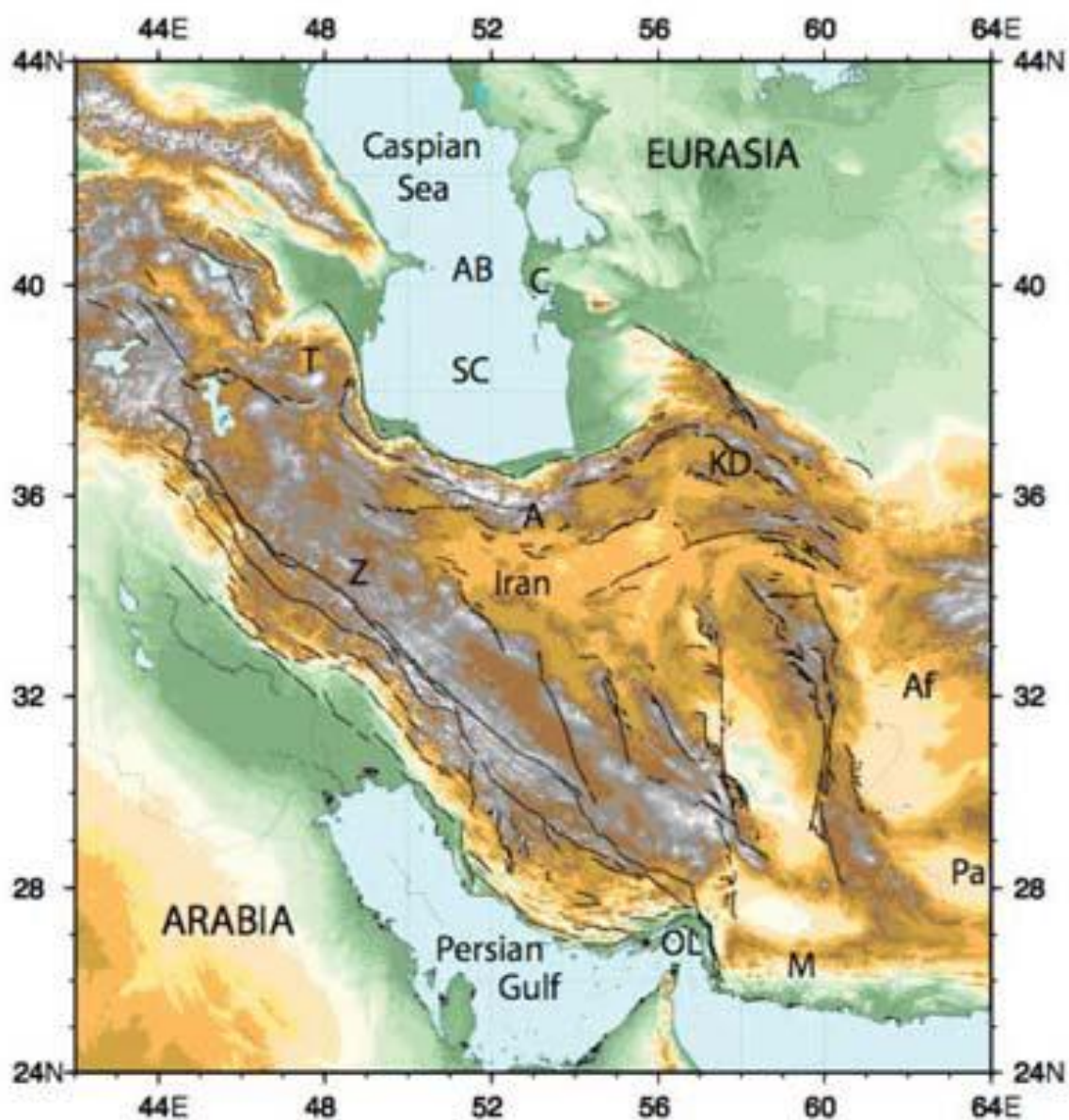
تشکیل کمربند چین خورده و تراست زاگرس، بعد از بسته شدن اقیانوس نفوتتیس و برخورد صفحه‌های عربستان و ایران مرکزی در تراست اصلی زاگرس شروع شده است (Koyi, 1988). زمان این برخورد توسط زمین‌شناسان نقل شده و از کرتاسه پسین (Berberian and King, 1981; Agard et al., 2005) تا الیگوسن- میوسن (Koop and Stoneley, 1982) متغیر است. همگرایی شمال- شمال شرق (N-NE) صفحه عربستان به سمت اوراسیا به گسلش تراست و امتداد لغز در کوههای زاگرس تقسیم بندی می‌شود (Talebian and Jackson, 2002; Maggi and Priestley, 2005).

در جنوب شرق ایران، پوسته اقیانوسی صفحه عربستان به زیر کمربند مکران فرو رانش می‌شود. زون فرو رانش مکران به بخشهای شرقی و غربی با خصوصیات لرزه‌ای و تکتونیکی متفاوت تقسیم می‌شود (Byrne et al., 1992; Zarifi, 2006). در بخش غربی مکران، فرورانش نسبتاً با شیبهای تند تری نسبت به بخش شرقی رخ می‌دهد (Zarifi, 2006)، علیرغم وقوع زلزله‌های بزرگ تا این زمان، در مکران غربی، پتانسیل لرزه‌ای این منطقه زیاد مطرح می‌شود.

در بخش شمالی پلاتفرم ایران، حرکت به سمت غرب پوسته ی اقیانوسی حوزه ی کاسپین جنوبی در پاسخ به برخورد صفحات عربستان- اوراسیا، باعث فرورانش این حوزه زیر کوههای تالش و البرز می-شود (Priestley et al., 1994 ; Jackson et al., 2002).

بیشترین زلزله هایی که در ایران رخ می دهند، کم عمق هستند و در نتیجه ی برخورد صفحات عربستان- اوراسیا اتفاق می افتند (Engdahl et al., 2006 ; Talebian and Jackson, 2004). در کمربند چین خورده و تراست زاگرس، زلزله ها اکثرا داخل پوسته فوقانی رخ می دهند (با عمق کمتر از ۲۰ کیلومتر) به استثنای زلزله های عمیقی که احتمالا فرو رانش با شیب به سمت شمال شرقی به زیر ایران مرکزی را مشخص می کنند (Engdahl et al., 2006). با این وجود، در زون فرو رانش مکران، وجود زلزله های عمیق (با عمق کمتر از ۱۵۰ کیلومتر) حاکی از فرورانش پوسته اقیانوسی عربستان با شیب به سمت شمال می باشد. در شمال ایران، حوزه ی خزر جنوبی بوسیله ی کمربند فعال با زلزله های کم عمق احاطه شده است.

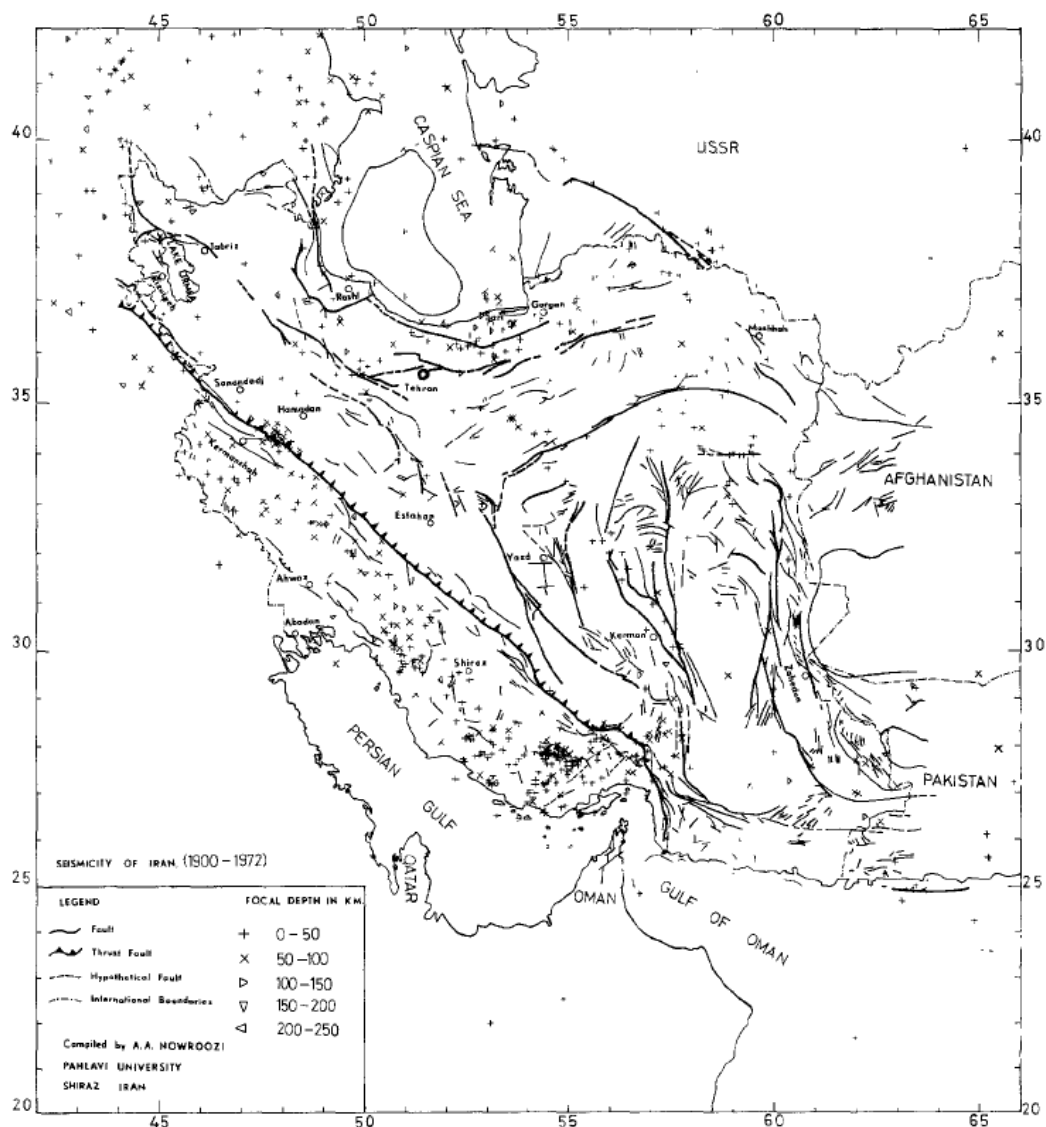
علاوه بر این، کاتالوگ EHB (Engdahl et al., 1998)، بعضی زلزله ها در محدوده ی عمق ۳۵ تا ۴۰ کیلومتر را زیر کوههای البرز و تالش نشان می دهد که ممکن است حاکی از حرکت به سمت غرب حوزه- ی کاسپین جنوبی به زیر شمال غرب ایران باشد (Engdahl et al., 2006).



شکل ۱-۱- نقشه توپوگرافی و گسل‌های فعال ایران. مناطق جغرافیایی نشان داده شده: افغانستان (Af)، پاکستان (Pa)، البرز (A)، کپه داغ (KD)، رشته کوه زاگرس (Z)، خط عمان (OL)، و مکران (M)، گسل‌های فعال با خطوط ممتد سیاه رنگ نمایش داده شده اند (Engdahl et al., 2006).

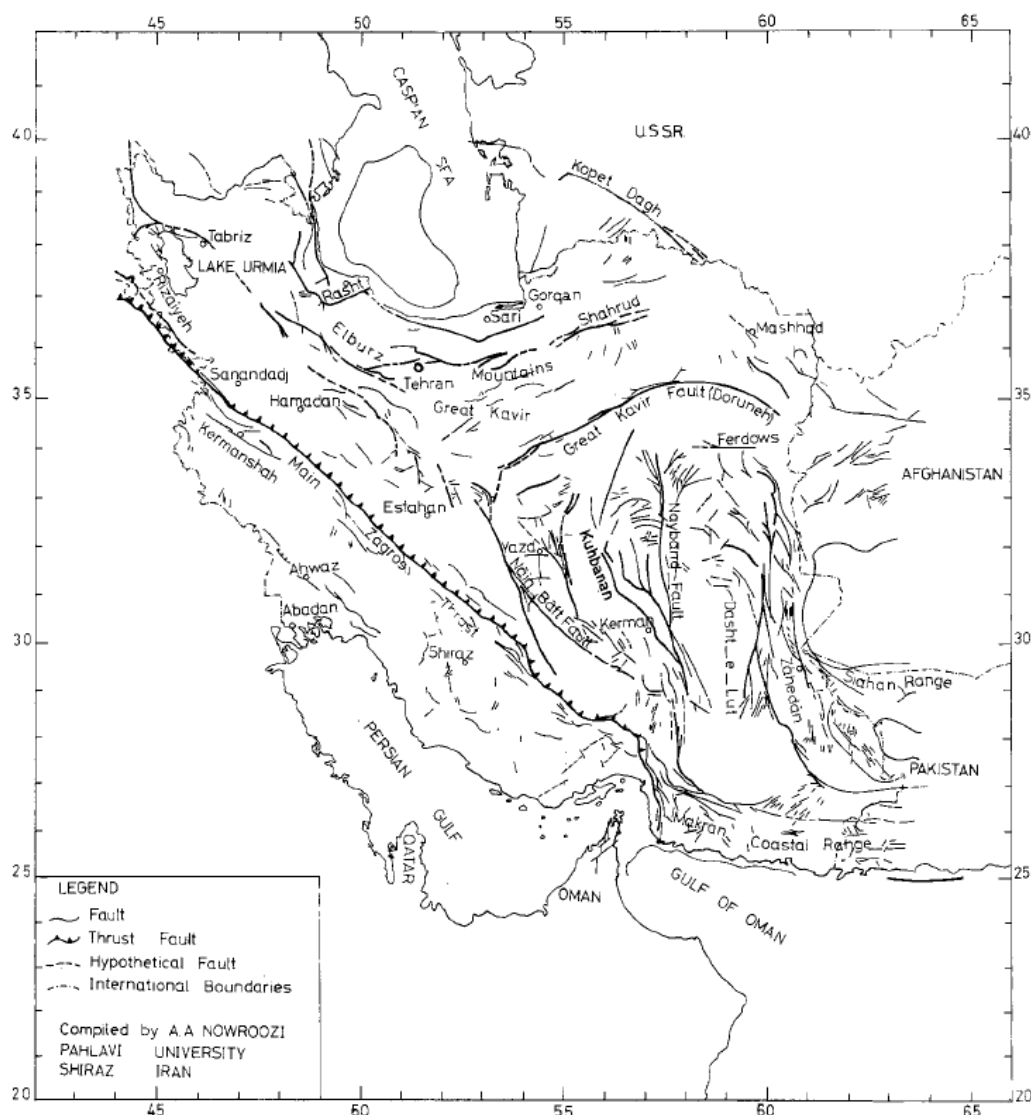
۱-۲- لرزه خیزی ایران

لرزه خیزی ایران توسط افرادی چون نیازی (۱۹۶۸ و ۱۹۶۹)، نیازی و باسفورد (۱۹۶۸)، نوروزی (۱۹۷۱، ۱۹۷۲، ۱۹۷۶)، امبراسیز و معین فر (۱۹۷۳)، بربریان (۱۹۷۹)، Jackson et al., (1995)، Masson et al., (2005) و Engdahl et al. (2006). مورد مطالعه قرار گرفته است. احمدی و نوروزی (۱۹۸۱)، تحلیل هایی از ریسک لرزه ای را برای مناطق مختلف ایران ارائه نمودند. نوروزی تمامی زمینلرزه های بزرگ رخ داده بین سالهای ۱۹۰۰ تا ۱۹۷۲ را که ۶۶۲ زمینلرزه بود مورد توجه قرار داد که از این میان ۲۴ زمینلرزه به علت نارسایی در زمان دریافت امواج P و S تعیین محل نگردیدند ولی بقیه را با دقت هر چه ممکن تعیین محل نموده و بر روی نقشه رسم کرد (شکل ۱-۲).



شکل ۱-۲- لرزه خیزی ایران از سال ۱۹۰۰ تا ۱۹۷۲. از میان ۶۶۲ زمینلرزه ثبت شده در این فاصله زمانی، تنها ۲۴ زمینلرزه به علت نارسایی در دریافت امواج ورودی تعیین محل نگردیده و ۶۳۸ زمینلرزه تعیین محل و بر روی نقشه نشان داده شده اند (نوروزی، ۱۹۷۲).

اکثر گسل‌های اصلی در ایران در شکل (۱-۳) نشان داده شده است. حرکت محسوس این گسل‌ها اهمیت فراوانی در تغییرات زمین‌شناسی ناحیه ایران دارد. حرکات بعضی از گسل‌ها بر اساس جابجایی زمینلرزه‌ای یا توسط عکسبرداری‌های هوایی شناخته شده است، در زمینلرزه‌ی دشت بیاض در آگوست ۱۹۶۸، ۴/۵ متر جابجایی در گسل فردوس مشاهده شد (نیازی، ۱۹۶۹). مطالعه عکس‌های هوایی توسط ولمن (۱۹۶۶) مشخص می‌کند که گسل شاهرود و گسل درونه و یا گسل بزرگ کویر چپگرد و احتمالاً گسل زاگرس راستگرد است. حرکت بسیاری از گسل‌ها هنوز ناشناخته مانده است و حرکت تعدادی از گسل‌های موجود در شرق ایران توسط مهاجر اشجعی (۱۹۷۵)، ارائه گردید.



شکل ۱-۳- نقشه گسل‌های ایران در طرح مرکاتور، گسل‌های موجود بر اساس نقشه زمینساختی اشتوکلین و نبوی (۱۹۷۳)، نقشه زمین‌شناسی ایران (۱۹۵۹) و نوروزی (۱۹۷۱) مجدداً ترسیم گردیده است.

مناطق مختلف ایران، به دلیل شرایط متفاوت، رفتار لرزه‌ای مشابه‌ای نشان نمی‌دهند: در منطقه زاگرس که در واقع منطقه برخورد صفحه عربستان با ایران است، نیروها فشاری است. در جنوب شرق زاگرس، وجود لایه‌های شکل‌پذیر تبخیری چون نمک‌های هرمز باعث شده است تا زمینلرزه‌ها اغلب دوره بازگشت کوتاهی را نشان دهند و در نتیجه به علت فاصله زمانی کوتاه بین رویداد زمینلرزه‌ها، انرژی انباشته شده در حدی نیست که زمینلرزه‌هایی با بزرگی بالا را سبب شود. هر چه به سمت شمال غرب زاگرس پیش برویم مولفه‌های امتداد لغز بیشتر شده و زمینلرزه‌های بزرگتری رخ می‌دهند.

منطقه‌های البرز و کپه داغ که در جنوب اوراسیا واقع شده‌اند عموماً رفتار لرزه‌ای متفاوتی را در مقایسه با زاگرس نشان می‌دهند. زمینلرزه‌ها در این مناطق فراوانی کمتری را نشان می‌دهند و نسبت به زاگرس انرژی بیشتری را رها می‌سازند.

ایران مرکزی که بین زاگرس و کپه داغ واقع شده است لرزه‌خیزی ناپیوسته‌ای را نشان می‌دهد و اغلب زمینلرزه‌های بزرگی را به همراه دارد. این زمینلرزه‌ها معمولاً دوره بازگشت طولانی دارند و می‌توان آنها را به گسل‌های بارزی نسبت داد.

منطقه مکران که در جنوب شرقی ایران واقع شده است در واقع متأثر از فرورفتن پوسته اقیانوس هند به زیر صفحه ایران است. فعالیت لرزه‌ای این منطقه در مقایسه با زاگرس کمتر است. در قرن حاضر دو زمینلرزه با بزرگی بیش از ۷ در آنجا واقع شده است.

رشته کوه‌های شرق ایران با یکسری از سیستم‌های گسل با امتداد شمالی-جنوبی مشخص می‌گردد و این امتداد در نزدیکی جازموریان امتداد شمال غربی-جنوب شرقی پیدا می‌کند. در چند دهه اخیر زمینلرزه‌های بزرگی در این ناحیه به وقوع پیوسته است.

۱-۳- لرزه زمینساخت ایران

چندین مدل زمینساختی برای ایران و اطراف آن ارائه شده است:

۱-۳-۱- اشتوکلین (۱۹۶۸)، ۹ منطقه ساختاری متفاوت را منظور کرده است که عبارتند از: (۱) صفحه شط العرب، (۲) کمربند چین خورده زاگرس، (۳) ناحیه رورانده زاگرس، (۴) محدوده سنندج-سیرجان، (۵) ایران مرکزی، (۶) رشته کوه البرز، (۷) کپه داغ، (۸) بلوک لوت، (۹) شرق ایران و محدوده مکران.

۱-۳-۲- تکین (۱۹۷۲)، تقسیم بندی ساده تری ارائه نمود و ایران را به چهار ناحیه تقسیم کرد: (۱) کمربند چین خورده زاگرس، (۲) کمربند کوهزایی اسفندقه-ارومیه، (۳) ایران مرکزی و شرقی، (۴) پهنه زاگرس.

۱-۳-۳- نوروزی (۱۹۷۲)، با استفاده از مفهوم زمینساخت صفحه ای، ایران و اطراف آن را به چندین صفحه تقسیم بندی نمود. وی ارتباط بین مناطق لرزه خیز با ساختارهای زمین شناسی را مورد توجه قرار داده و بر اساس آن نواحی لرزه زمینساختی را تعیین کرد (شکل ۱-۴). بر پایه این تقسیم بندی، نوروزی ۲۳ ناحیه را معرفی می نماید:

(۱) صفحه عربستان، (۲) خلیج فارس، (۳) مکران، (۴) دریای عمان، (۵) اروند-شط العرب، (۶) سری چین خوردگی تپه ای، (۷) سری چین خورده فارس، (۸) سری چین خورده زاگرس مرتفع، (۹) ارومیه، (۱۰) اصفهان-سیرجان، (۱۱) جازموریان، (۱۲) ایران مرکزی (شامل پهنه قم و یزد)، (۱۳) کویر، (۱۴) طبس، (۱۵) فردوس، (۱۶) لوت، (۱۷) شاهرود-درونه، (۱۸) شرق ایران، (۱۹) ماکو-زنجان، (۲۰) البرز، (۲۱) کپه داغ، (۲۲) ساحل دریای خزر، (۲۳) دریای خزر.

در ترسیم مرزهای هر ناحیه از اطلاعات مربوط به فراوانی و بزرگی زمینلرزه ها استفاده گردیده است، در ادامه به اختصار هر ناحیه را مورد مطالعه قرار می دهیم.

۱) صفحه عربستان:

این صفحه پوشیده شده از یک لایه رسوبی متراکم جوان است، شکل گیری آن مربوط به دوره پرکامبرین تا ترشیری است که از لایه های محکم قاره ای تشکیل شده است و امتداد تقریباً شمالی-جنوبی دارد، از نظر لرزه خیزی غیر فعال بوده و تعداد کمی زمینلرزه با بزرگی های کوچک در آن به ثبت رسیده است.

۲) خلیج فارس:

این ناحیه نمونه جالبی از فرورفتگی تدریجی در قسمت شمالی صفحه عربستان می باشد، بخش شرقی آن بر پایه مراکز زمینلرزه های ثبت شده از نظر لرزه خیزی فعال بوده و بخش غربی آن نسبت به شرق از فعالیت لرزه ای پایین تری برخوردار است. نواحی بین بخش غربی و سواحل ایران فعالیت های قابل توجهی در خلال چند دهه گذشته نشان نداده است.

۳) مکران:

گسل زاگرس در نزدیکی محل ۵۷ درجه شرقی و ۲۸ درجه شمالی به دو شاخه تقسیم می‌شود، یکی از شاخه‌ها به طرف جنوب خم شده و شامل گسل‌های ساحلی مکران در غرب می‌شود و دیگری به سمت شرق خم گشته و به سوی فرورفتگی جازموریان ادامه می‌یابد، هر دو قسمت نشان‌دهنده فعالیت لرزه-خیزی بوده و مرزهای شمالی و شرقی ناحیه لرزه زمینساختی مکران را مشخص می‌کنند. اگرچه در چند دهه گذشته در ساحل مکران بین چابهار و جاسک زمینلرزه‌ی عمده‌ای رخ نداده اما بالا آمدن ساحل و وجود رسوبات آتشفشانی مختلف نشان از لرزه‌خیزی این ناحیه است. وقوع زمینلرزه ۵ آگوست ۱۹۴۷ با بزرگی ۷/۳ در این ناحیه دلیلی بر این ادعا می‌باشد.

۴) دریای عمان:

اطلاعات لرزه‌شناسی حاکی از وجود گسل‌های عمده در این ناحیه است و زمینلرزه‌های بزرگی در آن به وقوع پیوسته است، بزرگترین آنها زمینلرزه ۲۷ نوامبر سال ۱۹۴۵ با بزرگی ۸/۳ می‌باشد. اطلاعات لرزه‌شناسی در طی چند دهه گذشته نشان می‌دهد که لرزه‌خیزی در امتداد غرب این دریا افزایش یافته است.

۵) اروند- شط العرب:

لرزه‌خیزی این ناحیه کاملاً پایین بوده و فقط تعداد اندکی زمینلرزه با بزرگی‌های بزرگتر از ۴ در آن ثبت گردیده است. شهرهای آبادان، خرمشهر، بندر امام و بغداد در این ناحیه قرار دارند، حداکثر بزرگی زمینلرزه‌های ثبت شده در این ناحیه ۵/۶ می‌باشد. بر اساس شواهد تاریخی شهر بغداد چندین بار در اثر زمینلرزه‌های قوی مورد تخریب قرار گرفته است.

۶) سری چین خوردگی‌های تپه‌ای:

شهرهای اهواز، دزفول، شوشتر، بوشهر و برازجان در این ناحیه قرار دارند. این ناحیه بخشی از منطقه فعال و لرزه‌خیز زاگرس می‌باشد، حداکثر بزرگی زمینلرزه‌ها در این ناحیه که ثبت گردیده اند برابر ۶ می‌باشد.

۷) سری چین خورده فارس:

شهرهای شیراز، جهرم، لار، فسا و بندر عباس در این ناحیه قرار گرفته‌اند. لرزه‌خیزی در این ناحیه بالا بوده و تعداد بسیاری زمینلرزه با بزرگی بیش از ۴ در قرن حاضر در آن به وقوع پیوسته است و در طول تاریخ بارها شاهد وقوع زمینلرزه‌های بزرگ و مخرب بوده است.

۸) سری چین خورده زاگرس مرتفع:

شهرهای کرمانشاه، خرم‌آباد، بروجرد، یاسوج و شهرکرد در آن قرار دارند. این ناحیه از نظر لرزه‌خیزی فعال بوده و بزرگی زمینلرزه‌ها در آن از ناحیه فارس کوچکتر و از ناحیه چین خوردگی تپه‌ای بزرگتر است.