

# تحلیل الگوی رفتاری پارامترهای مبنایی پیش‌لرزه‌ها با هدف پیش‌بینی زمین‌لرزه‌های بزرگ در ایران

علی ساکت<sup>۱\*</sup>، سیدمحمود فاطمی عقدا<sup>۲</sup>، حسین صادقی<sup>۳</sup> و احمد فهیمی‌فر<sup>۴</sup>

۱. دانش‌آموخته دکتری، دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

۲. استاد، دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

۳. دانشیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۴. استاد، دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

(دریافت: ۱۴۰۰/۹/۲۸، پذیرش نهایی: ۱۴۰۱/۱/۳۰)

## چکیده

تحلیل پارامترهای مبنایی پیش‌لرزه‌ها یکی از کاربردی‌ترین پژوهش‌های صورت‌گرفته در خصوص کاهش خطرات ناشی از زمین‌لرزه است. چراکه شناسایی الگوی رفتاری پیش‌لرزه‌ها می‌تواند، محققان را با شرایط حاکم بر گسل‌های فعال در هر منطقه آشنا کند؛ ضمن این‌که تحلیل پارامترهای مربوطه، مطالعات در خصوص پیش‌بینی زمین‌لرزه را به شکل هدفمندتری به نتیجه مورد نظر نزدیک خواهد کرد. در پژوهش حاضر شناسایی الگوی رفتاری پیش‌لرزه‌ها در پهنه‌های مختلف زمین‌ساختی در ایران، با هدف پیش‌بینی زمین‌لرزه‌های بزرگ‌تر از ۵، به‌عنوان هدف اصلی در نظر گرفته شد. بر این اساس با استفاده از تحلیل پارامترهای مبنایی پیش‌لرزه‌ها از جمله رابطه بین بزرگی و عمق آنها به بررسی احتمال رخداد زمین‌لرزه‌های بزرگ‌تر از ۵ در ایران برای یک دوره ۱۰ ساله (از ۱۳۸۶ تا ۱۳۹۶) پرداخته شده است. نتایج حاصل از این تحقیق حاکی از شباهت مشخص مدل‌های بزرگی عمق پیش‌لرزه‌ها در یک پهنه زمین‌ساختی خاص و تفاوت این مدل‌ها در پهنه‌های مختلف با یکدیگر است که می‌تواند به‌عنوان یک پیش‌نشانگر مناسب در پیش‌بینی زمین‌لرزه‌های بزرگ‌تر از ۵ در ایران مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: پیش‌بینی زمین‌لرزه، الگوی رفتاری، پیش‌لرزه‌ها، پارامترهای مبنایی، ایران، زمین‌لرزه‌های بزرگ‌تر از ۵.

## ۱. مقدمه

اثرات مخرب ناشی از رخداد زمین‌لرزه‌ها همواره در طول تاریخ، باعث شده، پیش‌بینی زمین‌لرزه‌های بزرگ به‌عنوان یکی از اهداف اصلی زمین‌لرزه‌شناسی مطرح شود. ضمن این‌که نمی‌توان ادعای شناخت یک پدیده را داشت بدون آنکه بتوان شرایط حاکم بر رخداد آن را پیش‌بینی کرد (بولت، ۱۹۹۹). بر این اساس، به‌ویژه با توسعه جوامع، همواره در کنار مباحث مهمی از قبیل پیشگیری از خسارات جانی و مالی و مقاوم‌سازی ساختمان‌ها، بحث پیش‌بینی زمین‌لرزه نیز به‌دلیل هدف‌گذاری آن به‌ویژه در خصوص نجات جان انسان‌ها به‌شکلی جدی مطرح بوده است. در این میان بسیاری از کشورهای لرزه‌خیز از جمله ژاپن، چین، ایالات متحده، یونان، نیوزلند به‌عنوان کشورهای با ریسک بالا در برابر

اثرات مخرب ناشی از رخداد زمین‌لرزه‌ها همواره در طول تاریخ، باعث شده، پیش‌بینی زمین‌لرزه‌های بزرگ به‌عنوان یکی از اهداف اصلی زمین‌لرزه‌شناسی مطرح شود. ضمن این‌که نمی‌توان ادعای شناخت یک پدیده را داشت بدون آنکه بتوان شرایط حاکم بر رخداد آن را پیش‌بینی کرد (بولت، ۱۹۹۹). بر این اساس، به‌ویژه با توسعه جوامع، همواره در کنار مباحث مهمی از قبیل پیشگیری از خسارات جانی و مالی و مقاوم‌سازی ساختمان‌ها، بحث پیش‌بینی زمین‌لرزه نیز به‌دلیل هدف‌گذاری آن به‌ویژه در خصوص نجات جان انسان‌ها به‌شکلی جدی مطرح بوده است. در این میان بسیاری از کشورهای لرزه‌خیز از جمله ژاپن، چین، ایالات متحده، یونان، نیوزلند به‌عنوان کشورهای با ریسک بالا در برابر

ناهمواری‌های موجود در صفحه گسل بوده که به ایجاد و گسترش لغزش‌های تدریجی در اطراف منطقه در برگیرنده کانون زمین‌لرزه اصلی منجر می‌شود. این لغزش‌های کوچک شرایط را برای حرکت اصلی گسل و غلبه بر ناهمواری‌های بزرگ‌تر جهت ایجاد زمین‌لرزه اصلی مهیا می‌سازد؛ بنابراین می‌توان تعریف ساده‌ای از پیش‌لرزه‌ها را این‌گونه مطرح کرد که در یک کاتالوگ لرزه‌ای، بزرگ‌ترین زمین‌لرزه رخ داده در یک منطقه را زمین‌لرزه اصلی و زمین‌لرزه‌های قبل از آن که ارتباط مشخص با رخداد زمین‌لرزه اصلی دارند را پیش‌لرزه می‌نامند.

بر این اساس و با توجه به اهمیت بحث یادشده در مطالعات زمین‌لرزه‌شناسی، پژوهش‌های متعددی در زمینه الگوی رفتاری پیش‌لرزه‌ها و مکانیزم‌های حاکم بر رخداد آنها توسط محققین متعددی در سراسر دنیا ارائه شده است. از جمله مطالعات صورت گرفته در این زمینه می‌توان به الگوریتم ارائه شده توسط (ورویه‌وا و پانزا، ۱۹۹۳) برای بررسی پیش‌لرزه‌ها در کشور ایتالیا اشاره کرد که مبتنی بر ارائه اطلاعات تحلیلی مربوط به داده‌های زمین‌لرزه‌های گذشته در نرم‌افزار طراحی شده بود که بر اساس حافظه نرم‌افزاری ایجاد شده، به بررسی و مقایسه پیش‌لرزه‌های به ثبت رسیده گذشته و پیش‌لرزه‌های زمین‌لرزه‌های جدید، به ارائه احتمال رخداد زمین‌لرزه‌های بزرگ، می‌پرداخت. با این حال خروجی این پژوهش به دلیل عدم کارایی مناسب در تحقق پیش‌بینی دقیق زمان رخداد زمین‌لرزه اصلی علی‌رغم توانایی آن در شناسایی نسبی مکان و بزرگی به‌طور کامل مورد توجه قرار نگرفت. از جمله این پژوهش‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: گراسیموس و همکاران (۲۰۲۰) با مطالعه بر روی پیش‌لرزه‌های زمین‌لرزه ۲۵ اکتبر ۲۰۱۸ در غرب یونان نشان دادند که پیش‌لرزه‌ها به شکل مشخصی به سمت کانون سطحی زمین‌لرزه اصلی حرکت کرده‌اند. هاکسون و همکاران (۲۰۱۰) به مطالعه توالی پیش‌لرزه‌های خلیج مکزیک پرداختند که حاصل مطالعه آنها شناسایی الگوی

پیش‌لرزه‌ها در آن منطقه بود. همچنین زانریکا و همکاران (۲۰۰۳) و دادگ و همکاران (۱۹۹۵) به ترتیب توالی پیش‌لرزه‌های زمین‌لرزه هکتورماین (Hector mine) و لندرز (Landers) در کالیفرنیا را مورد بررسی قرار دادند. مطالعه صورت گرفته توسط دادگ و همکاران (۱۹۹۵) بر روی پیش‌لرزه‌های زمین‌لرزه لندرز که از حدود ۷ ساعت قبل از رخداد زمین‌لرزه اصلی تا زمان رخداد آن (به تعداد ۲۸ عدد پیش‌لرزه) رسید، نشان داد که پیش‌لرزه‌ها در این زمین‌لرزه نقشی در القای یکدیگر نداشته و آغاز فرایند رخداد زمین‌لرزه به بی‌قاعدگی زون لرزه‌ای مربوط بوده است. مطالعه مشابهی توسط مک‌گویر و همکاران (۲۰۰۵) بر روی توالی کوتاه دوره پیش‌لرزه‌های زمین‌لرزه‌های بزرگ رخ داده در گسل‌های انتقالی شمال شرقی اقیانوس آرام صورت گرفت و این مطالعه نشان داد در این منطقه پیش‌لرزه‌ها به تعداد زیاد به وقوع می‌پیوندند و می‌توانند به‌عنوان یک پیش‌نشانگر مناسب برای پیش‌بینی رخداد زمین‌لرزه‌های اصلی به کار گرفته شوند. همچنین کاتو و همکاران (۲۰۱۲) به مطالعه پیش‌لرزه‌های زمین‌لرزه ۲۰۱۱ ساحل شرقی ژاپن پرداختند که نتیجه این تحقیق ارائه الگوی رفتاری پیش‌لرزه‌ها برای زمین‌لرزه‌های منطقه مربوطه با بزرگی‌های مشابه بود. در پژوهش‌های مشابهی (هاکسون و همکاران، ۲۰۱۱) و (هوانگ، ۲۰۱۹) به شناسایی الگوی کاربردی درخصوص رفتار پیش‌لرزه‌ها با هدف پیش‌بینی زمین‌لرزه‌های بزرگ آینده به ترتیب برای زمین‌لرزه‌های خلیج مکزیک و منطقه سیچوان چین زمین‌لرزه ۲۰۰۸ سیچون چین پرداختند. مطالعه مهم دیگری در این زمینه توسط دادگ و همکاران (۱۹۹۶) بر روی توالی پیش‌لرزه‌های زمین‌لرزه‌های بزرگ کالیفرنیا با هدف ارائه مدلی مناسب برای پیش‌بینی زمین‌لرزه در این مناطق ارائه شد. در تحقیق یادشده بر روی شش زمین‌لرزه اصلی در دوره زمانی ۱۹۸۶ تا ۱۹۹۲ و پیش‌لرزه‌های آنها مطالعه جامعی صورت گرفت. نتایج این مطالعه نشان داد به دلیل نزدیکی زمین‌لرزه‌ها به هم و شباهت سازوکار کانونی آنها، الگوی رفتاری همسانی در

تا مطالعه تغییرات در پهنه‌های مختلف، به‌شکلی یکسان دنبال شود. لذا با توجه به مطالعات یادشده در بالا و همچنین برخی پژوهش‌های دیگر شامل: مطالعه درخصوص گسل سان‌اندریاس (جونز، ۱۹۸۴) بررسی‌های صورت گرفته در مورد پیش‌لرزه‌های زمین‌لرزه ۲۰۱۰ شیلی در زون فرورانشی محدوده مورد نظر (میناداکیس و پاپاداپولوس، ۲۰۱۶) مطالعات مشابه برای زمین‌لرزه‌های بزرگ مناطق مختلف جهان (پاپاداپولوس و همکاران، ۲۰۱۱) و (بوچان و همکاران، ۲۰۱۳) و نیز بررسی‌های صورت گرفته بر روی پیش‌لرزه‌های زمین‌لرزه‌های بزرگ در شرق تایوان (لین، ۲۰۰۴)، برای تمامی این موارد، بازه چند روزه تا چند ماهه و شعاع چند ده کیلومتری از کانون زمین‌لرزه اصلی برای مطالعه پیش‌لرزه‌ها در نظر گرفته شده است. بر اساس مطالعات یاد شده برای بیش از ۹۰ درصد زمین‌لرزه‌های مورد مطالعه که پیش‌لرزه‌های آنها به ثبت رسیده، بیشترین تعداد پیش‌لرزه‌ها در شعاع ۵۰ کیلومتری کانون سطحی زمین‌لرزه اصلی رخ داده است (کاتو و همکاران، ۲۰۱۲). این مورد همچنین توسط ساکت و همکاران (۱۳۹۹) برای زمین‌لرزه آذرماه ۱۳۹۱، در منطقه زهان از توابع استان خراسان جنوبی نیز مورد بررسی قرار گرفت و نتایج آن بررسی نیز تأیید مطالعات یاد شده بود. البته این شعاع، وابستگی زیادی به بزرگی زمین‌لرزه اصلی داشته و از شعاع ۲۰ تا ۵۰ کیلومتری کانون سطحی آن (برای زمین‌لرزه‌های بزرگ معمول در ایران که از حدود ۵/۵ تا حداکثر بزرگی ۷/۵ به ثبت رسیده‌اند) متغیر است. چراکه هر چه بزرگی زمین‌لرزه اصلی بیشتر باشد، پیش‌لرزه‌ها در پهنه وسیع‌تری گسترش خواهند یافت که دلیل این مورد نیز به حرکت قطعه بزرگ‌تری از گسل برای رخداد زمین‌لرزه‌های بزرگ‌تر مربوط می‌شود. همچنین درخصوص زمان در نظر گرفته شده برای مطالعه پیش‌لرزه‌ها، این زمان برای زمین‌لرزه‌های بین صفحه‌ای و حاشیه اقیانوس‌ها طولانی‌تر و برای زمین‌لرزه‌های درون قاره‌ای کوتاه‌تر است. ضمن این‌که نتایج حاصل از این مطالعات نشان داد که به‌طور معمول

خصوصاً پیش‌لرزه‌های رخ داده قبل از وقوع هر یک از این زمین‌لرزه‌ها وجود دارد که می‌تواند به‌عنوان مدلی برای پیش‌بینی زمین‌لرزه‌های آینده در این منطقه در نظر گرفته

شود. مطالعه مهم دیگری توسط گولیا و ویمر (۲۰۱۹) به تحلیل زمین‌لرزه‌های یک توالی لرزه‌ای برای شناسایی راهکاری جهت تشخیص زمین‌لرزه اصلی و زمین‌لرزه‌های بزرگی که ممکن است پیش‌لرزه یک زمین‌لرزه اصلی باشند، اختصاص داده شد. همچنین در ایران نیز برخی از محققین در دهه اخیر مطالعه در خصوص پیش‌لرزه‌ها را آغاز کرده‌اند. نتایج بررسی‌های صورت گرفته در زمینه پیش‌نشانگر لرزه‌خیزی در ایران حاکی از این نکته است که تنوع ساختاری باعث شده تا شرایط متفاوتی بر رخداد زمین‌لرزه‌ها در پهنه‌های زمین‌ساختی اصلی در ایران حکمفرما باشد (زارع و کامران‌زاد، ۱۳۹۳؛ ساکت، ۱۳۸۶؛ پورکرمانی و آراین، ۱۳۷۶). بر این اساس در پژوهش حاضر برای بررسی عوامل تأثیرگذار بر روی رخداد یا عدم‌رخداد پیش‌لرزه‌ها قبل از رخداد زمین‌لرزه‌های بزرگ‌تر از ۵ در طی یک دهه (سال‌های ۱۳۸۶ تا ۱۳۹۶) به شناسایی الگوهای درخصوص پیش‌بینی زمین‌لرزه‌های بزرگ در پهنه‌های زمین‌ساختی مختلف در ایران پرداخته شده است. علت انتخاب این محدوده زمانی، وجود اطلاعات کامل و یکدست موجود در کاتالوگ مرکز لرزه‌نگاری مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران بوده که در این پژوهش به‌عنوان بانک اطلاعاتی، مورد استفاده قرار گرفته است.

براین اساس با توجه به تجربه مطالعات صورت گرفته در مناطق مختلف جهان در این زمینه، مطالعه حاضر به بررسی روش‌های موردنظر در مطالعات یاد شده و ارزیابی این روش‌ها برای پیش‌بینی زمین‌لرزه‌های بزرگ در ایران پرداخته است. به‌عنوان نمونه، در این تحقیق بررسی شرایط حاکم بر پیش‌لرزه‌ها، در بازه زمانی و مکانی مشخصی (با الگو گرفتن از مطالعات دیگر مناطق جهان) صورت گرفته

می‌توان به بزرگی، عمق کانونی، موقعیت مکانی، زمان رخداد و سازوکار کانونی پیش‌لرزه‌ها اشاره کرد.

## ۲. موارد و روش‌ها

برای ارائه روش در نظر گرفته شده در این مقاله، با توجه به مطالعات صورت گرفته در مناطق مختلف جهان، ذکر این نکته لازم است که زمین‌لرزه‌ها بسته به موقعیت زمین‌ساختی محل رخداد، بزرگی، عمق‌لرزه‌زایی منطقه، نوع گسل، ناهمسانی زون گسلی، با رخداد یا عدم رخداد پیش‌لرزه‌ها مواجه هستند (دادگک و همکاران، ۱۹۹۶). در تحقیق حاضر که بر اساس مطالعه زمین‌لرزه‌های با بزرگی ۵ و بیشتر رخ داده در ایران برای یک دهه (از ۱۳۸۶ تا ۱۳۹۶ و با حذف کلیه پس‌لرزه‌های بزرگ در این بازه بزرگی) انجام گرفته نیز برخی از پارامترهای یادشده به‌عنوان عوامل اصلی موثر در شناسایی رفتار حاکم بر رخداد زمین‌لرزه‌ها مورد بررسی قرار گرفته‌اند. بر اساس نتایج مطالعات یاد شده در مناطق مختلف جهان در این زمینه با توجه به قرارگیری ایران در پهنه‌ای درون قاره‌ای و با فرض این که زمین‌لرزه‌ها در این مناطق با تعداد پیش‌لرزه‌های کمتر، در محدوده مکانی با گستردگی کمتر از کانون زمین‌لرزه اصلی و در زمانی نزدیکتر به رخداد آن اتفاق می‌افتند (جونز و مولنار، ۱۹۷۹)، دوره زمانی و فاصله مکانی از کانون زمین‌لرزه اصلی برای بررسی پارامترهای مبنایی پیش‌لرزه‌ها در ایران و بر اساس مقایسه تحلیلی صورت گرفته با توجه به مزالعات انجام شده در دیگر مناطق جهان، برای این تحقیق به ترتیب حداکثر دو هفته از لحاظ زمان و ۵۰ کیلومتر از نظر موقعیت مکانی رخداد پیش‌لرزه‌ها از کانون سطحی زمین‌لرزه اصلی در نظر گرفته شده است (کاتو و همکاران، ۲۰۱۲). این شرایط به‌عنوان یک الزام برای شناسایی پیش‌لرزه‌ها از بقیه زمین‌لرزه‌ها و تفکیک آنها بر اساس استانداردهای جهانی موجود در هر منطقه مدنظر قرار گرفته است. ضمن این که بررسی پیش‌لرزه‌ها را می‌توان از جنبه‌های دیگری نیز مطالعه کرد. به‌عنوان مثال برخی محققین از جمله لین

فراوانی پیش‌لرزه‌ها در زمین‌لرزه‌های حاشیه اقیانوسی بیشتر از زمین‌لرزه‌های درون قاره‌ای است (جونز و مولنار، ۱۹۷۹؛ مک گویر و همکاران، ۲۰۰۵؛ بوچان و همکاران، ۲۰۱۳).

در زمینه پارامترهای مبتنی بر پیش‌نشانگر زمانی زمین‌لرزه، نیز مطالعات متعددی انجام شده است. از جمله این موارد می‌توان به پژوهشی که توسط سیافریانی و همکاران (۲۰۱۸) در خصوص بررسی وضعیت لرزه‌خیزی غرب سوماترا در اندونزی بر اساس ضریب  $b$  صورت گرفت که نتایج حاصل از آن حاکی از این بود که کاهش مشخص لرزه‌خیزی در منطقه یادشده در بین سال‌های ۱۹۸۱ تا ۲۰۱۵ برداشت شد که این شرایط نشان از تجمع تنش زیادی در پوسته و احتمال رخداد زمین‌لرزه‌های بزرگ در این منطقه بود. لذا از این پارامتر به اشکال مختلف می‌توان برای شناسایی وضعیت لرزه‌خیزی به‌عنوان یک پیش‌نشانگر بلند و میان‌دوره برای پیش‌بینی زمین‌لرزه‌های بزرگ استفاده کرد. در پژوهش دیگری که توسط ساکت و همکاران (۲۰۲۱) صورت گرفت، بررسی فراوانی پیش‌لرزه‌ها در دوره‌های هفتگی و ماهانه با تاکید بر سکون‌لرزه‌ای قبل از رخداد زمین‌لرزه اصلی بر اساس مطالعه موردی زمین‌لرزه تسوج در استان آذربایجان شرقی مورد تحلیل قرار گرفت و نتایج این پژوهش نشان داد که بررسی پارامتر زمانی در مقیاس کوتاه دوره در خصوص پیش‌لرزه‌ها نیز می‌تواند به‌عنوان یک پیش‌نشانگر لرزه‌ای مورد استفاده قرار گیرد. از آنجا که در این تحقیق هدف اصلی، بررسی و مطالعه پارامترهای مبنایی پیش‌لرزه‌ها و تحلیل آنها برای کاربری در بحث پیش‌بینی زمین‌لرزه است، ضرورت معرفی این پارامترها به‌عنوان مبنای شناسایی پیش‌لرزه‌ها در این تحقیق وجود دارد. براین اساس می‌توان پارامترهای مبنایی برای شناسایی و تفکیک پیش‌لرزه‌ها از زمین‌لرزه‌های دیگر را بر اساس پژوهش‌های صورت گرفته در مناطق مختلف جهان، برای شرایط لرزه زمین‌ساختی حاکم بر ایران در یک پهنه قاره‌ای معرفی کرد. از جمله این پارامترها

در شکل ۱ ارائه شده است، بزرگی تأثیر چندانی بر وجود یا عدم‌وجود پیش‌لرزه‌ها ندارد و لذا این شرایط برای زمین‌لرزه‌ها به عوامل دیگری وابسته است. با این حال برای زمین‌لرزه‌های دارای پیش‌لرزه که در جدول ۱ ارائه شده، تعداد میانگین محاسبه شده برای پیش‌لرزه‌های زمین‌لرزه‌ها با بزرگی ۶ تا ۶/۹ برابر با عدد ۳/۶ برای هر زمین‌لرزه بوده در حالی که این میانگین برای هر زمین‌لرزه با بزرگی ۵ تا ۵/۹ برابر عدد ۲/۵ به‌ازای هر زمین‌لرزه بوده است که این نکته حاکی از تأثیر بزرگی بر تعداد پیش‌لرزه‌ها دارد. همچنین با نگاهی کلی به رابطه بین تعداد پیش‌لرزه‌ها و عمق کانونی آنها (جدول ۱ و ۲)، می‌توان یک ارتباط منطقی بین این دو پارامتر برای زمین‌لرزه‌های بزرگ‌تر از ۵ در یک دهه اخیر ایران، برخلاف مطالعات صورت‌گرفته در دو پژوهش یادشده متصور کرد. به‌طوری‌که طبق شکل ۲-الف تعداد زمین‌لرزه‌ها و پیش‌لرزه‌های آنها با کاهش عمق در ایران روند افزایشی را نشان داده‌اند. همچنین همان‌طور که در شکل ۲-ب مشخص شده برای زمین‌لرزه‌ها با عمق کمتر از ۱۰ کیلومتر بیشترین تعداد پیش‌لرزه به ثبت رسیده است.

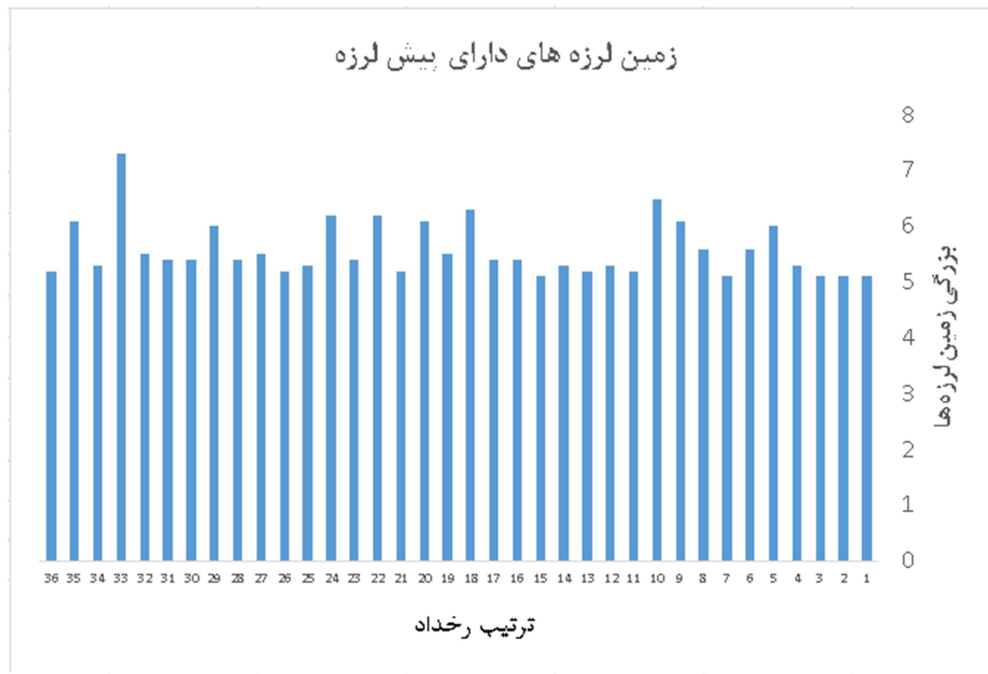
همچنین با مقایسه داده‌های جدول ۱ بر اساس رابطه نوع گسل و رخداد پیش‌لرزه‌ها برای زمین‌لرزه‌های مورد مطالعه، این نکته قابل ذکر است که زمین‌لرزه‌های با گسل مسبب معکوس نسبت بیشتری از زمین‌لرزه‌های دارای پیش‌لرزه را به خود اختصاص داده‌اند. به‌طوری‌که بیش از ۷۰ درصد زمین‌لرزه‌های دارای پیش‌لرزه (جدول ۱) سازوکاری از نوع معکوس داشته‌اند که این مورد می‌تواند بر اساس نتایج مطالعات جهانی نشان از تأثیر نوع گسل بر روی رخداد یا عدم رخداد پیش‌لرزه‌ها باشد. لازم به توضیح است که مرجع مربوط به سازوکارهای ارائه شده برای زمین‌لرزه‌های رخ داده از سال ۲۰۱۲ به بعد در جداول ۱ و ۲، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران و قبل از سال یادشده، سازمان زمین‌شناسی آمریکا (USGS) می‌باشد. همچنین تحلیل داده‌های

(۲۰۰۴) و پاپاداپولوس و همکاران (۲۰۱۱) بر این باورند که عمق کانونی فعال شده برای رخداد زمین‌لرزه اصلی، بر روی رخداد و عدم رخداد پیش‌لرزه‌ها تأثیر گذار است. به‌طوری‌که در زمین‌لرزه‌های اصلی با عمق کانونی کم، معمولاً پیش‌لرزه‌ها، فراوانی کمتری نسبت به زمین‌لرزه‌های رخ داده در عمق بیشتر دارند. بررسی این مورد (رابطه بین رخداد پیش‌لرزه‌ها و عمق کانونی) در ایران، بر اساس مطالعات صورت‌گرفته در تحقیق حاضر، نتایج متفاوتی را برای مناطق مختلف نشان داد. بطوریکه، به‌عنوان مثال برای زمین‌لرزه شهریور ماه ۱۳۸۷ در منطقه "موسیان استان ایلام" با بزرگی ۵ و عمق کانونی ۳۵ کیلومتر (که در مقایسه با میانگین عمق زمین‌لرزه‌های معمول ایران، عمق نسبتاً زیادی به حساب می‌آید)، ۱۲ پیش‌لرزه با بزرگی بین ۲/۵ تا ۳/۵ گزارش شد و این پیش‌لرزه‌ها از یک هفته مانده به رخداد زمین‌لرزه اصلی شروع به فعالیت کردند. ضمن این‌که برخی از زمین‌لرزه‌های دیگر در ایران (که دارای عمق کانونی کم بودند) با تعداد کم و یا حتی بدون پیش‌لرزه مشخصی رخ داده‌اند (زمین‌لرزه های ۱۳۸۶ و ۱۳۸۸ خوزستان و زمین‌لرزه ۱۳۸۷ خراسان‌رضوی در جداول ۱ و ۲).

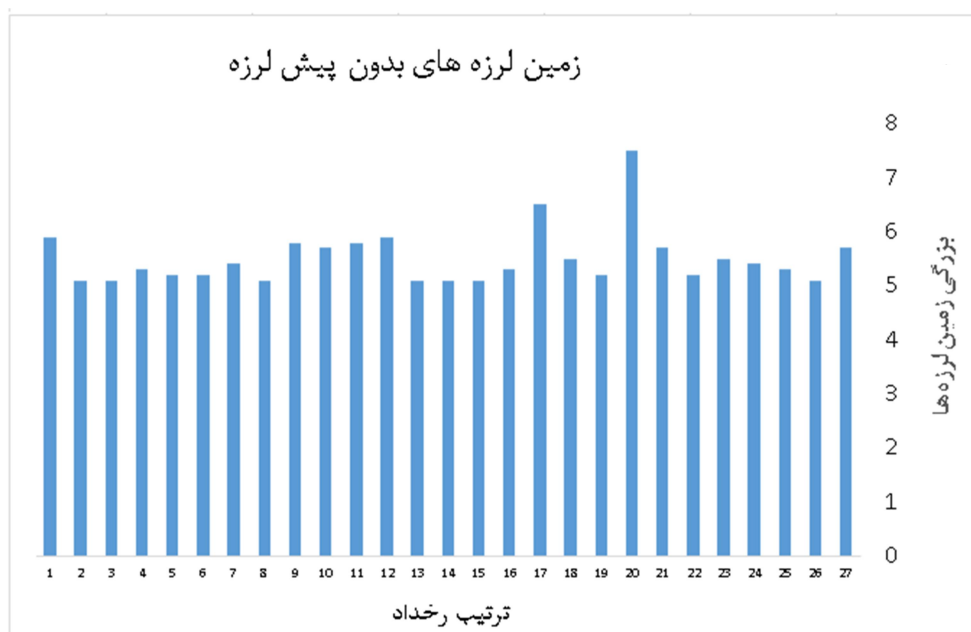
### ۳. مشاهدات

بر اساس پژوهش‌های صورت‌گرفته (گراسیموس و همکاران، ۲۰۲۰) و (روزنبرگ، ۱۹۹۹) یکی از روش‌های به‌کارگرفته شده برای شناسایی تأثیر بزرگی زمین‌لرزه اصلی بر رخداد و عدم‌رخداد پیش‌لرزه‌ها قبل از آن، مقایسه میانگین بزرگی زمین‌لرزه‌های اصلی در دو دسته یاد شده است. درخصوص زمین‌لرزه‌های مورد بررسی در جدول ۱ و ۲ ارائه شده در این پژوهش، بررسی تغییرات بزرگی زمین‌لرزه‌های دارای پیش‌لرزه و بدون پیش‌لرزه و میانگین‌گیری بزرگی آنها در هر دسته (با اختلاف کمتر از ۰/۱ درجه در میانگین بزرگی بین دو دسته) حاکی از این نکته است که همان‌طور که

مربوط به جدول ۱ حاکی از این نکته است که در زمین‌لرزه‌های دارای پیش‌لرزه، مواردی که در مناطق مرزهای زمین‌ساختی رخ داده‌اند، از عمق کانونی بیشتری برخوردارند که این مورد حاکی از تأثیر گسل‌های فعال در مرزهای زمین‌ساختی در فعال کردن بخش‌های زیرین پوسته است.



(الف)



(ب)

شکل ۱. الف) بزرگی زمین‌لرزه‌های دارای پیش‌لرزه و ب) بزرگی زمین‌لرزه‌های بدون پیش‌لرزه.

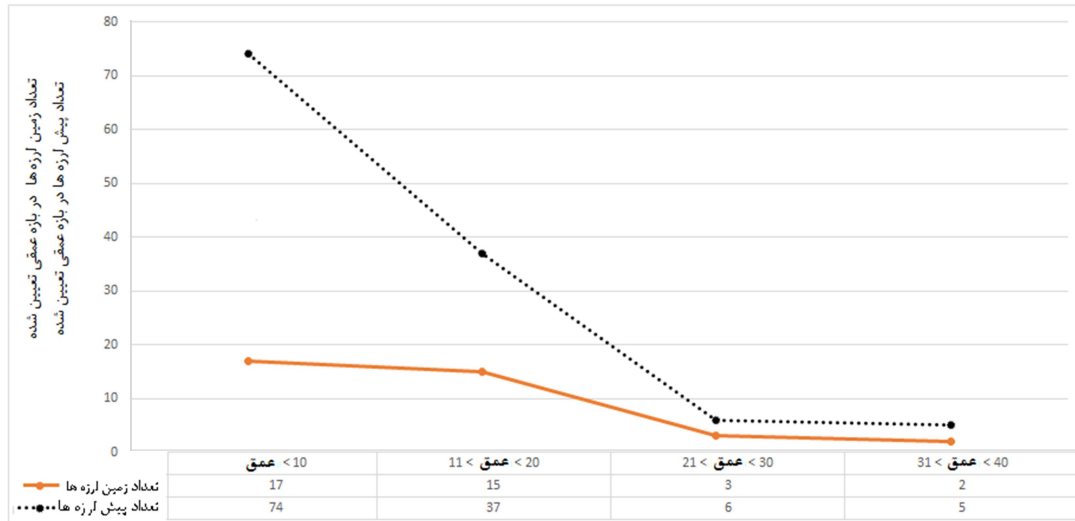
جدول ۱. زمین‌لرزه‌های بزرگ‌تر از ۵ در یک دهه اخیر ایران با رخداد حداقل یک پیش‌لرزه با بزرگی  $M \geq 2.5$  (مرجع داده‌ها و سازوکار ژرفی ارائه شده برای زمین‌لرزه‌ها: مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، IRSC و سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده آمریکا، USGS).

تعداد پیش‌لرزه $M \geq 2.5$	نوع گسل مسبب	درصد DC (Ref)	عمق (برحسب کیلومتر)	بزرگی (مقیاس محلی Mn و گشتاوری Mw)	مختصات زمین‌لرزه		نام زمین‌لرزه	تاریخ
					عرض	طول		
۱	معکوس	-	۷	Mn=۵/۱	۳۱/۶۸	۴۹/۹۳	قلعه تل، خوزستان (زاگرس)	۸۶/۰۸/۱۵
۳	معکوس	-	۱۲	Mn=۵/۱	۳۲/۰۸	۵۵/۹۰	بهباد، یزد (ایران مرکزی)	۸۶/۰۴/۱۳
۳	امتداد لغز	۳۸٪(USGS)	۴	Mn=۵/۱	۳۳/۲۶	۵۹/۱۷	آریان شهر، خراسان جنوبی (شرق ایران)	۸۶/۱۲/۱۹
۴	معکوس	۸۲٪(USGS)	۳۵	Mn=۵/۳	۲۸/۲۷	۵۴/۱۰	شهر پیر، فارس (زاگرس)	۸۷/۰۲/۱۷
۱	معکوس (Harv)	۵۵٪(USGS)	۱۸	Mw=۶/۰	۲۷/۱۵	۵۵/۷۵	بندر خمیر، هرمزگان (زاگرس)	۸۷/۰۶/۲۰
۲	معکوس (Harv)	۷۰٪(USGS)	۲۹	Mn=۵/۶	۲۶/۹۵	۵۵/۹۹	درگهان، هرمزگان (زاگرس)	۸۷/۰۹/۱۷
۳	معکوس	-	۴،۵	Mn=۵/۱	۲۹/۴۱	۵۱/۴۷	برازجان، بوشهر (زاگرس)	۸۹/۰۲/۲۴
۱	معکوس	-	۸	Mn=۵/۶	۲۸/۱۲	۵۲/۵۶	دهرم، فارس (زاگرس)	۸۹/۰۵/۰۹
۲	معکوس (Harv)	۷۹٪(USGS)	۲۶	Mw=۶/۱	۲۹/۶۹	۵۱/۶۲	کازرون، فارس (زاگرس)	۸۹/۰۷/۰۵
۱	امتداد لغز (Harv)	۹۵٪(USGS)	۱۳	Mw=۶/۵	۲۸/۴۴	۵۹/۱۵	محمد آباد ریگان، کرمان (شرق ایران)	۸۹/۰۹/۲۹
۵	معکوس	-	۱۶	Mn=۵/۲	۳۰/۱۸	۵۱/۷۰	نورآباد ممسنی، فارس (زاگرس)	۹۰/۰۲/۱۱
۱	امتداد لغز	۸۴٪(USGS)	۳۴	Mn=۵/۳	۲۷/۷۸	۵۷/۷۷	کهنوج، کرمان (مرکز ایران مرکزی با سنندج-سیرجان)	۹۰/۰۳/۲۵
۵	امتداد لغز	۹۷٪(USGS)	۱۳	Mn=۵/۲	۳۰/۲۱	۵۷/۶۳	سیرج، کرمان (ایران مرکزی)	۹۰/۰۴/۰۵
۱	معکوس (Harv)	۵۲٪(USGS)	۱۶	Mn=۵/۳	۲۸/۰۹	۵۴/۳۰	شهر پیر، فارس (زاگرس)	۹۰/۰۷/۲۷
۱	معکوس	-	۱۹،۵	Mn=۵/۱	۲۶/۹۴	۵۵/۶۹	بندر خمیر، هرمزگان (زاگرس)	۹۰/۱۰/۱۹
۲	معکوس	۸۲٪(USGS)	۱۲	Mn=۵/۴	۳۶/۳۲	۵۸/۸۹	نیشابور، خراسان رضوی (مرکز کبهه داغ با ایران مرکزی)	۹۰/۱۰/۲۹
۱	معکوس	-	۱۰	Mn=۵/۴	۳۱/۴۳	۵۶/۷۸	راور، کرمان (ایران مرکزی)	۹۰/۱۲/۰۸
۱۹	معکوس	۷۴٪(USGS)	۱۰	Mn=۶/۳	۳۲/۷۴	۴۷/۶۰	مورموری، ایلام (زاگرس)	۹۱/۰۲/۱۴
۴	امتداد لغز	۷۷٪(USGS)	۱۰	Mn=۵/۵	۳۰/۳۷	۵۷/۴۶	سیرج، کرمان (ایران مرکزی)	۹۱/۱۱/۰۲
۲	معکوس	۶۳٪(USGS)	۱۲	Mw=۶/۱	۲۸/۴۸	۵۱/۵۸	کاکلی، بوشهر (زاگرس)	۹۲/۰۱/۲۰
۱	امتداد لغز	-	۸	Mn=۵/۲	۳۸/۳۲	۴۵/۳۶	تسوج، آذربایجان شرقی (البرز)	۹۲/۰۱/۲۹
۳	امتداد لغز	۸۱٪(IRSC)	۱۵	Mw=۶/۲	۲۶/۵۲	۵۷/۷۶	گوهران، هرمزگان (مکران)	۹۲/۰۲/۲۱
۶	معکوس	۸۷٪(IRSC)	۱۰	Mn=۵/۴	۲۹/۵۸	۵۰/۸۱	بندر ریگ، بوشهر (زاگرس)	۹۳/۰۲/۳۱
۱۰	معکوس	۶۴٪(IRSC)	۱۰	Mw=۶/۲	۳۲/۷۱	۴۷/۶۴	مورموری، ایلام (زاگرس)	۹۳/۰۵/۲۷
۳	معکوس	-	۱۸	Mn=۵/۳	۲۷/۷۶	۵۶/۳۳	فاریاب، کرمان (سنندج-سیرجان)	۹۳/۰۸/۰۲
۱	امتداد لغز	۹۹٪(IRSC)	۱۰	Mn=۵/۲	۳۵/۳۲	۵۸/۴۰	کاشمر، خراسان رضوی (مرکز ایران مرکزی با شرق ایران)	۹۴/۰۲/۱۶
۵	امتداد لغز	۹۰٪(IRSC)	۸	Mn=۵/۵	۳۰/۰۶	۵۷/۶۴	سیرج، کرمان (ایران مرکزی)	۹۴/۰۵/۰۹
۳	معکوس	۸۰٪(IRSC)	۱۶	Mn=۵/۴	۲۸/۲۶	۵۵/۳۵	دوبرجی، فارس (زاگرس)	۹۴/۱۱/۰۳
۱	معکوس	۹۸٪(IRSC)	۶	Mw=۶/۰	۳۵/۸۴	۶۰/۳۴	سفید سنگ، خراسان رضوی (کبهه داغ)	۹۶/۰۱/۱۶
۱	امتداد لغز	۹۳٪(IRSC)	۷	Mn=۵/۴	۳۰/۱۱	۵۷/۶۰	سیرج، کرمان (ایران مرکزی)	۹۶/۰۵/۰۱
۲	معکوس	۷۳٪(IRSC)	۲۲	Mn=۵/۴	۲۷/۸۹	۵۷/۱۲	زیارتعلی، هرمزگان (مرکز زاگرس با سنندج-سیرجان)	۹۶/۰۶/۰۹
۲	معکوس	۶۴٪(IRSC)	۱۸	Mn=۵/۵	۲۷/۹۰	۵۷/۱۱	زیارتعلی، هرمزگان (مرکز زاگرس با سنندج-سیرجان)	۹۶/۰۸/۰۱
۱	معکوس	۹۳٪(IRSC)	۱۱	Mw=۷/۳	۳۴/۸۴	۴۵/۹۰	ازگله، کرمانشاه (زاگرس)	۹۶/۰۸/۲۱
۳	معکوس	-	۱۰	Mn=۵/۳	۳۲/۹۲	۴۶/۳۸	مهران، ایلام (زاگرس)	۹۶/۰۸/۲۹
۷	معکوس	۸۷٪(IRSC)	۱۰	Mw=۶/۱	۳۰/۷۳	۵۷/۳۹	هجدک، کرمان (ایران مرکزی)	۹۶/۰۹/۱۰
۴	امتداد لغز	-	۱۳	Mn=۵/۲	۳۰/۶۵	۵۰/۹۶	ملارد، البرز (مرکز البرز با ایران مرکزی)	۹۶/۰۹/۲۹

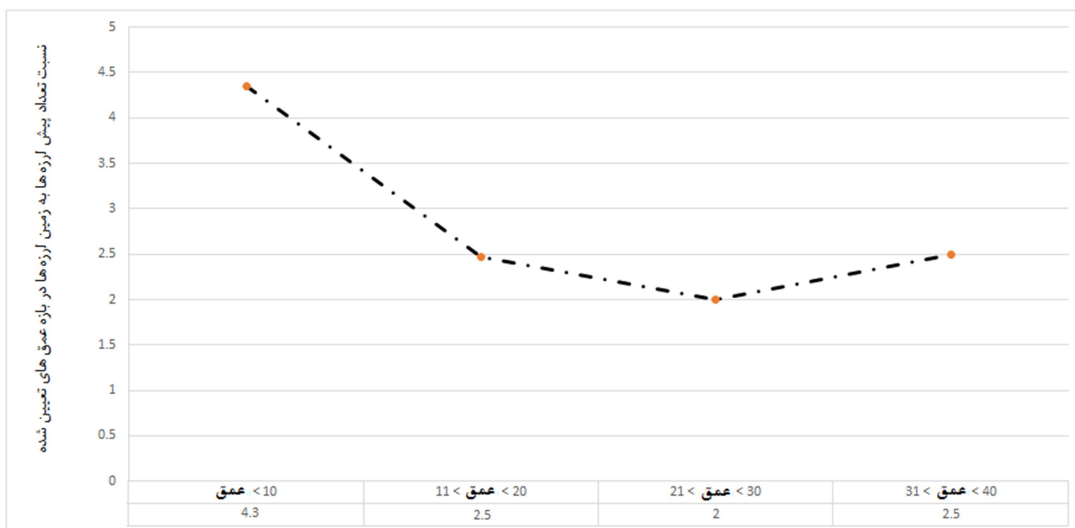
جدول ۲. زمین‌لرزه‌های بزرگ‌تر از ۵ در یک دهه اخیر ایران که بدون رخداد پیش‌لرزه مشخصی به ثبت رسیده‌اند (مراجع جدول ۱).

تاریخ	نام زمین لرزه	مختصات جغرافیایی		بزرگی (مقیاس محلی Mn و گشتاوری Mw)	عمق کانونی (برحسب کیلومتر)	درصد DC (Ref)	نوع گسل مسبب
		عرض	طول				
۸۶/۰۳/۲۸	کهنک، قم (ایران مرکزی)	۵۰/۸۶	۳۴/۴۹	Mn=۵/۹	۵	٪۶۱(USGS)	معکوس (Harv)
۸۶/۰۴/۲۰	انباران، اردبیل (البرز)	۴۸/۵۰	۳۸/۵۶	Mn=۵/۱	۱۸	٪۹۳(USGS)	معکوس
۸۶/۰۹/۰۱	کنگ، هرمزگان (زاگرس)	۵۴/۷۳	۲۶/۸۳	Mn=۵/۱	۲۶	-	معکوس
۸۷/۰۳/۰۷	زنجان (مرز ایران مرکزی و البرز)	۴۸/۶۶	۳۶/۶۵	Mn=۵/۳	۲۳	-	معکوس
۸۷/۰۴/۱۴	کدکنی، خراسان رضوی (مرز ایران مرکزی با شرق ایران)	۵۸/۸۰	۳۵/۵۵	Mn=۵/۲	۱۰	٪۷۶(USGS)	معکوس
۸۷/۰۶/۱۳	هادی شهر، آذربایجان شرقی (البرز)	۴۵/۶۹	۳۸/۷۳	Mn=۵/۲	۱۸	٪۷۲(USGS)	امتدادلغز
۸۸/۰۴/۳۱	بندرخمیر، هرمزگان (زاگرس)	۵۵/۶۱	۲۶/۸۹	Mn=۵/۴	۲۰	٪۸۹(USGS)	معکوس
۸۸/۰۷/۱۳	مسجدسلیمان، خوزستان (زاگرس)	۴۹/۴۹	۳۱/۸۷	Mn=۵/۱	۹	-	معکوس
۸۹/۰۴/۲۹	جناح، هرمزگان (زاگرس)	۵۳/۸۹	۲۷/۰۴	Mn=۵/۸	۹٫۵	٪۷۱(USGS)	معکوس (Harv)
۸۹/۰۵/۰۸	تربت حیدریه، خراسان رضوی (مرز ایران مرکزی با شرق ایران)	۵۹/۲۵	۳۵/۲۲	Mn=۵/۷	۷	٪۵۲(USGS)	امتداد لغز (USGS)
۸۹/۰۵/۰۹	نگار، کرمان (ایران مرکزی)	۵۶/۸۱	۲۹/۷۰	Mn=۵/۸	۴	٪۶۹(USGS)	امتدادلغز
۸۹/۰۶/۰۵	طرود، سمنان (ایران مرکزی)	۵۴/۴۷	۳۵/۴۸	Mn=۵/۹	۷	٪۱۰۰(USGS)	امتدادلغز (Harv)
۸۹/۰۶/۱۶	شهرپیر، فارس (زاگرس)	۵۴/۴۸	۲۷	Mn=۵/۱	۲۸	-	معکوس
۸۹/۱۲/۱۴	فاریاب، کرمان (مرز زاگرس با سنندج-سیرجان)	۵۷/۱۴	۲۸/۲۹	Mn=۵/۱	۱۹	٪۹۲(USGS)	امتدادلغز
۹۱/۰۱/۳۰	رودبار، کرمان (ایران مرکزی)	۵۸/۰۱	۲۷/۸۹	Mn=۵/۱	۶۰	-	نرمال
۹۱/۰۴/۱۱	حاجی آباد، خراسان رضوی (شرق ایران)	۵۹/۹۳	۳۴/۴۸	Mn=۵/۳	۲۸	٪۸۱(USGS)	معکوس
۹۱/۰۵/۲۱	ورزقان، آذربایجان شرقی (البرز)	۴۶/۸۱	۳۸/۳۹	Mw=۶/۵	۹	٪۸۵(USGS)	امتدادلغز
۹۱/۰۹/۱۵	زهان، خراسان جنوبی (شرق ایران)	۵۹/۵۴	۳۳/۵۰	Mn=۵/۵	۹	٪۶۵(USGS)	امتدادلغز
۹۱/۱۰/۲۳	بلداجی، چهارمحال و بختیاری (زاگرس)	۵۱/۰۷	۳۱/۹۳	Mn=۵/۲	۱۰	-	معکوس
۹۲/۰۱/۲۷	سراوان، سیستان و بلوچستان (شرق ایران)	۶۲/۰۳	۲۷/۸۸	Mw=۷/۵	۹۵	٪۹۱(USGS)	نرمال
۹۲/۰۹/۰۷	بیرازجان، بوشهر (زاگرس)	۵۱/۳۷	۲۹/۲۹	Mn=۵/۷	۵	٪۸۱(USGS)	معکوس
۹۳/۰۳/۰۶	سوزا، هرمزگان (زاگرس)	۵۵/۸۷	۲۶/۵۴	Mn=۵/۲	۱۳	-	امتدادلغز
۹۳/۰۵/۰۸	جزیره هندورابی، هرمزگان (زاگرس)	۵۳/۵۱	۲۶/۴۴	Mn=۵/۵	۲۵	۸۰/٪۳(IRSC)	معکوس
۹۳/۰۸/۱۹	فارغان، هرمزگان (زاگرس)	۵۵/۹۹	۲۷/۸۸	Mn=۵/۴	۱۰	۶۳/٪۱(IRSC)	امتدادلغز
۹۴/۰۹/۰۵	مسجدسلیمان، خوزستان (زاگرس)	۴۹/۵۲	۳۱/۸۹	Mn=۵/۳	۱۲	۹۳/٪۱(IRSC)	معکوس
۹۵/۰۱/۱۷	ختنج، فارس (زاگرس)	۵۳/۱۷	۲۸/۱۱	Mn=۵/۱	۴	۷۱/٪۷(IRSC)	معکوس
۹۶/۰۲/۲۳	پیش قلعه، خراسان شمالی (کپه داغ)	۵۷/۲۲	۳۷/۶۵	Mn=۵/۷	۸	۹۶/٪۷(IRSC)	امتدادلغز





(الف)



(ب)

شکل ۲. الف) نمودار تفکیک زمین‌لرزه‌های اصلی و پیش‌لرزه‌ها در بازه‌های عمق متفاوت بر اساس تعداد و (ب) تغییرات نسبت تعداد پیش‌لرزه‌ها به زمین‌لرزه اصلی در بازه‌های عمقی مختلف.

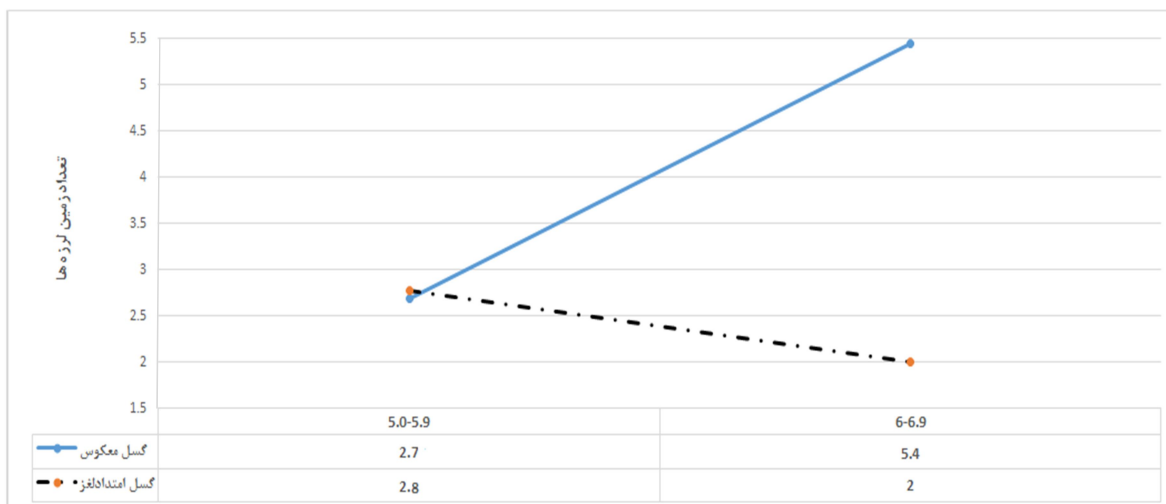
که برای فهم فرایندهای فیزیکی در چشمه زمین‌لرزه، تنسور لحظه‌ای عموماً به زوج دوگانه (DC)، ایزوتروپیک (ISO) و دو قطبی بردار خطی جبران شده (CLVD) تجزیه می‌شود. بر همین اساس درصد بالای DC نشانگر منبع دارای گسل برشی در محیط ایزوتروپیک است. لذا زمانی که درصد DC از میزان بالایی برخوردار باشد حاکی از ایزوتروپ بودن محیط چشمه لرزه‌ای در درون زمین با سطح زمین است. در چنین شرایطی سازوکار ژرفی، انطباق بالایی با سازوکار سطحی ارائه شده خواهد

با توجه به ناهمگنی احتمالی مکانیسم گسل در عمق کانونی و سطح زمین و از آنجا که مبنای بخشی از این پژوهش، ارتباط نوع گسل با رخداد و عدم‌رخداد پیش‌لرزه‌ها قرار گرفته است، لذا باید جهت شناسایی این رابطه انطباق مشخص بین سازوکار ژرفی و سازوکار به‌دست آمده از گسل‌ها در سطح زمین مشخص شود. با توجه به پژوهش‌های صورت گرفته این انطباق بر اساس درصد زوج دوگانه (Double Couple) قابل‌ارائه خواهد بود. برای تأیید این مورد می‌توان به این نکته اشاره کرد

کمتر از ۵ در داده‌های مورد استفاده در این پژوهش (سرایان در استان خراسان جنوبی، برازجان در استان بوشهر، خنج در استان فارس و نگار در استان کرمان) به دلیل قرارگیری این زمین‌لرزه‌ها در مناطقی به دور از فعالیت‌های انسانی مرتبط با عمق از جمله میادین نفتی و گازی و معادن بزرگ، به دلیل تأثیرپذیری کم این زمین‌لرزه‌ها از اثرات انسانی در مناطق یادشده و همچنین محدود بودن داده‌های موجود برای تحلیل و ارائه نتایج قابل قبول این موارد از بانک اطلاعاتی مورد استفاده در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

لازم به ذکر است تنها دو زمین‌لرزه با بزرگی بیش از ۷ در مقیاس بزرگی گشتاوری در این دوره زمانی به ثبت رسیده است که به دلیل اهمیت زمین‌لرزه‌های بزرگ و ارزیابی کارایی مدل برای زمین‌لرزه‌هایی که می‌توانند اثر مخرب زیادی داشته باشند، از داده‌ها حذف نشدند. با توجه به اهمیت موضوع تفکیک زمین‌لرزه‌ها بر اساس نوع گسل به دلیل فراوانی کم زمین‌لرزه‌ها تفکیک زمین‌لرزه‌ها بر اساس نوع گسل بر روی نمودار نتیجه مشخصی را نشان نداد. لذا در این خصوص نمی‌توان نتیجه‌ای کاربردی را ارائه کرد.

داشت و از همان سازوکار سطحی ارائه شده می‌توان به‌عنوان سازوکار واقعی ارائه شده برای گسل استفاده کرد (ووریکاک، ۲۰۱۵). بر اساس تحلیل صورت گرفته درخصوص داده‌های موجود درخصوص درصد DC در زمین‌لرزه‌های مورد مطالعه، تمامی داده‌های موجود از انطباق بالایی در این زمینه برخوردار بوده لذا برای داده‌های مورد مطالعه می‌توان از سازوکار سطحی ارائه شده برای نوع گسل مسبب استفاده کرد. این در حالی است که در جدول ۲ (که مربوط به زمین‌لرزه‌های بدون پیش‌لرزه است)، تعداد زمین‌لرزه‌های معکوس نسبت برابری با زمین‌لرزه‌ها با گسل‌های مسبب از نوع دیگر (امتدادلغز و نرمال) دارند. ضمن این که مقایسه زمین‌لرزه‌های دارای پیش‌لرزه در جدول ۱ و شکل ۳ نشان از این نکته دارد که در گسل‌های معکوس با افزایش بزرگی زمین‌لرزه اصلی، تعداد پیش‌لرزه‌ها نیز به شکل مشخصی افزایش می‌یابد. به طوری که طبق شکل ۳ در زمین‌لرزه‌ها با گسل مسبب معکوس و بزرگی بین ۶ تا ۶/۹ نسبت تعداد پیش‌لرزه‌ها به زمین‌لرزه‌های اصلی به بیش از دو برابر این نسبت در زمین‌لرزه‌ها با بزرگی ۵ تا ۵/۹ می‌رسد. همچنین لازم به توضیح است که با توجه به وجود ۴ زمین‌لرزه با بزرگی



شکل ۳. نمودار نسبت تعداد پیش‌لرزه‌ها به زمین‌لرزه‌ها بر اساس نوع گسل و به تفکیک بزرگی.

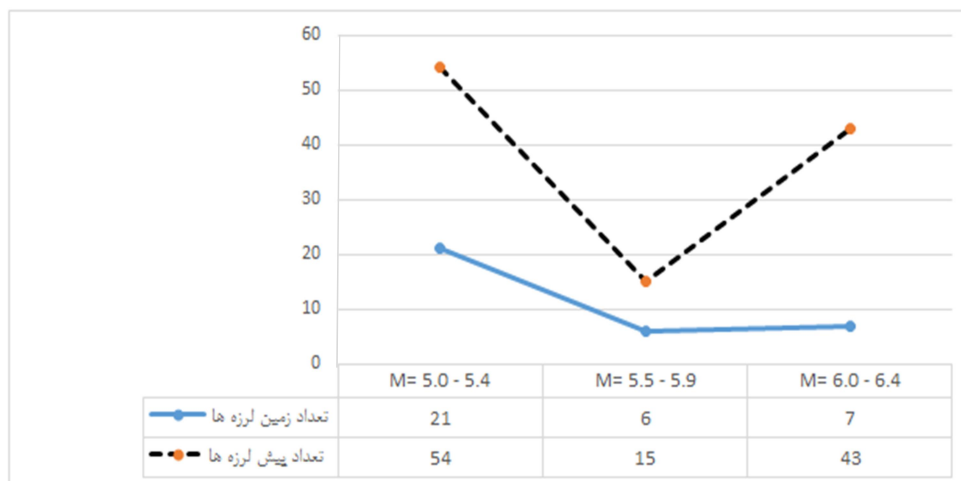
## ۴. بحث

بر اساس رخداد و عدم رخداد پیش‌لرزه‌ها تفکیک شده‌اند روی نقشه آورده شود، نتایج مهمی به دست خواهد آمد که در ادامه به مرور این نتایج پرداخته شده است. در شکل ۵ زمین‌لرزه‌های دارای پیش‌لرزه و بدون آن به تفکیک رنگ ارائه شده‌اند. همچنین در شکل ۶ زمین‌لرزه‌های یادشده به تفکیک عمق کانونی ارائه شده است.

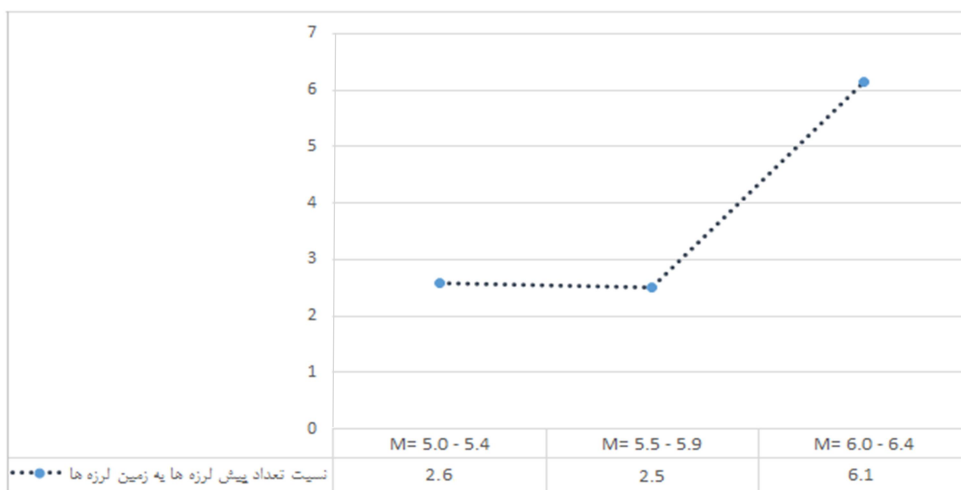
آنچه که در این بخش پژوهش نیاز به تشریح دارد آن است که از آنجا که عمق کانونی زمین‌لرزه‌ها در ایران با دقت بالایی ارائه نمی‌شود و با عدم قطعیت همراه است. با این حال به دلیل ثابت بودن دستگاه‌های لرزه‌نگاری و یکسان بودن برداشت‌های مربوطه برای تمامی زمین‌لرزه‌های رخ داده از آنجا که در بخش مهمی از این پژوهش روند تغییرات عمق زمین‌لرزه‌ها مدنظر قرار گرفته، لذا می‌توان به این نکته اشاره کرد که روند تغییرات عمق به اندازه عمق تک‌تک زمین‌لرزه‌ها با عدم قطعیت همراه نیست چراکه میزان خطا برای بیشتر داده‌ها در حدی مشخص خواهد بود لذا بر روند تغییرات عمق اثر زیادی نخواهد داشت. ضمن این‌که معمولاً پارامترهای مبنایی زمین‌لرزه‌های بزرگ از جمله موقعیت جغرافیایی، بزرگی و عمق کانونی، با عدم قطعیت کمتری در مقایسه با زمین‌لرزه‌های کوچک برخوردارند و علت آن افزایش تعداد نگاشت‌های ثبت‌شده از آنها در لرزه‌نگارهایی با پراکنش بیشتر به دلیل بزرگی بالاتر آنهاست که این افزایش تعداد ثبت داده به کاهش خطا منجر می‌شود. از آنجا که در این پژوهش تحلیل صورت گرفته بر روی زمین‌لرزه‌های بزرگ‌تر از ۵ می‌باشد، لذا تا حدود زیادی بحث بالا بودن عدم قطعیت کم‌رنگ خواهد شد.

البته ذکر این مورد نیز لازم است که با توجه به محدودیت کاتالوگ داده‌های لرزه‌ای (کاتالوگ مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران) و مقایسه یکسان بازه داده‌های موجود، پیش‌لرزه‌های با  $M \geq 2/5$  در این مطالعه مدنظر قرار گرفته‌اند. ضمن این‌که ممکن است در برخی مناطق از جمله شرق و جنوب شرق و برخی مناطق دیگر ایران، علت عدم ثبت پیش‌لرزه‌ها و یا تعداد کم آنها، پراکنندگی کم دستگاه‌های لرزه‌نگاری در آن مناطق باشد. برای انواع گسل‌های مسبب زمین‌لرزه‌ها و چگونگی تغییرات آنها به دلیل فراوانی نه چندان بالای هر دسته از گسل‌ها در داده‌های موجود در این پژوهش، رسم نمودارهای مرتبط با تغییرات ثبت زمین‌لرزه‌ها با و بدون پیش‌لرزه‌ها نتایج خاصی قابل ارائه نیست و لذا به این مورد در مقاله پرداخته نشده است. همچنین برداشت‌های صورت گرفته از اطلاعات جداول ۱ و ۲ نشان از این نکته دارد که اندازه بزرگی زمین‌لرزه که در کل، عامل مهم‌تری در مقایسه با عمق کانونی و نوع گسل در ارتباط با وقوع پیش‌لرزه‌ها به حساب می‌آید نیز تأثیر مشخصی بر تعداد پیش‌لرزه‌ها داشته است که تأیید این مورد در شکل ۴ ارائه شده است. به عبارت دیگر با افزایش بزرگی زمین‌لرزه‌ها، شاهد افزایش تعداد پیش‌لرزه‌ها هستیم. به طوری که طبق شکل ۴-ب نسبت زمین‌لرزه‌ها با بزرگی بیشتر از ۶ به تعداد پیش‌لرزه‌ها، به میزان قابل توجهی بیشتر از زمین‌لرزه‌ها با بزرگی کمتر از ۶ است.

همچنین مقایسه تعداد داده‌های زمین‌لرزه‌های جدول ۱ و ۲ حاکی از آن است که در ۶۵ زمین‌لرزه با  $M \geq 5$  در بازه ۱۰ ساله از ۱۳۸۶ تا ۱۳۹۶ نزدیک به ۶۰ درصد آنها دارای پیش‌لرزه‌های مشخصی بوده‌اند. اگر تمامی زمین‌لرزه‌های مورد مطالعه در جدول ۱ و ۲ که



(الف)



(ب)

شکل ۴. نمودار مقایسه تعداد زمین لرزه‌ها و پیش‌لرزه‌ها برای زمین‌لرزه‌های با بزرگی مشخص (الف) و نسبت تعداد پیش‌لرزه‌ها به زمین‌لرزه‌های اصلی برای بازه‌های بزرگی مختلف (ب).

بقیه مناطق دیگر ایران است (امبرسیز و ملویل، ۱۹۸۲) را تأیید کرد. این مورد را می‌توان به فراوانی بیشتر رخداد پیش‌لرزه‌ها در این پهنه در مقایسه با دیگر پهنه‌های زمین‌ساختی در ایران نیز تعمیم داد.

همچنین نتایج برداشت‌شده از شکل ۵ حاکی از این نکته است که زمین‌لرزه‌های جنوبی‌ترین بخش زاگرس (در محدوده استان هرمزگان و مرز با پهنه زمین‌ساختی مکران) معمولاً بدون رخداد پیش‌لرزه به وقوع می‌پیوندند و این مورد پیش‌بینی زمین‌لرزه‌ها در این بخش از زاگرس را حتی در صورت رصد مداوم زمین‌لرزه‌ها با مشکل مواجه خواهد کرد. ضمن این که مطالعات پیشین صورت گرفته

بررسی نتایج حاصل از اشکال ۵ و ۶ در کنار نتایج ارائه شده در شکل ۸ که نمودار فراوانی زمین‌لرزه‌ها و پیش‌لرزه‌ها را به تفکیک پهنه‌های زمین‌ساختی آنها نشان می‌دهد می‌توان نتایج ذیل را ارائه داد:

- بر اساس اشکال ۵ و ۸ بیشترین تعداد زمین‌لرزه‌ها با پیش‌لرزه مشخص در امتداد پهنه شمالی و مرکزی زاگرس و حاشیه برخورد زون زاگرس و ایران مرکزی (مرز استان‌های هرمزگان و کرمان) رخ داده است. بر این اساس می‌توان مطالعات قبلی صورت گرفته بر روی پهنه زاگرس را به عنوان پهنه‌ای لرزه‌زا که از ویژگی‌های مهم آن، تعداد زمین‌لرزه‌های کوچک و متوسط، با فراوانی بالاتر نسبت به

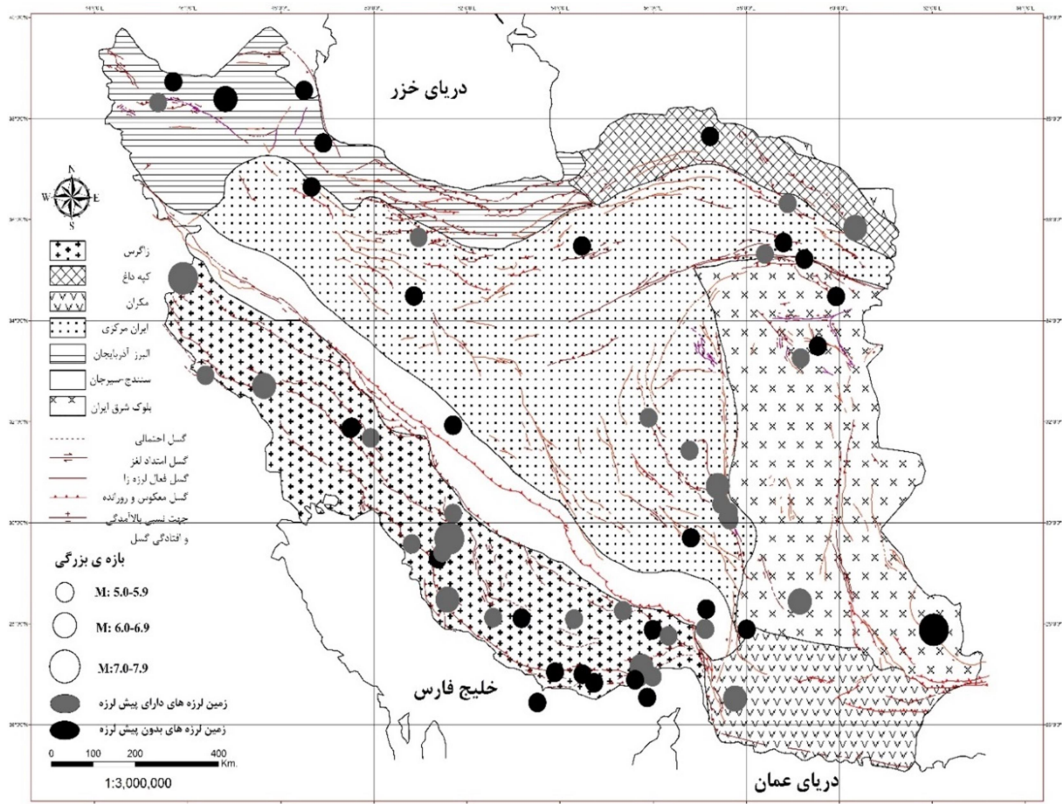
لرزه‌نگاری برای ثبت پیش‌لرزه‌ها دانست. به‌عنوان نمونه شاهد مشخص در این زمینه رخداد زمین‌لرزه فروردین ماه ۱۳۹۲ در منطقه سراوان با بزرگی ۷/۵ در مقیاس بزرگی گشتاوری بدون ثبت هیچ پیش‌لرزه‌ای است.

- زمین‌لرزه‌های محدوده ایران مرکزی همان‌طور که در شکل ۶ مشخص است، بیشتر از نوع کم عمق بوده که این مورد خسارت سازه‌ای بالاتری را در اثر رخداد زمین‌لرزه‌های این پهنه نسبت به دیگر پهنه‌های زمین‌ساختی موجود در ایران، با توجه به فاصله کمتر عمق کانونی زمین‌لرزه تا سطح زمین نشان خواهد داد.

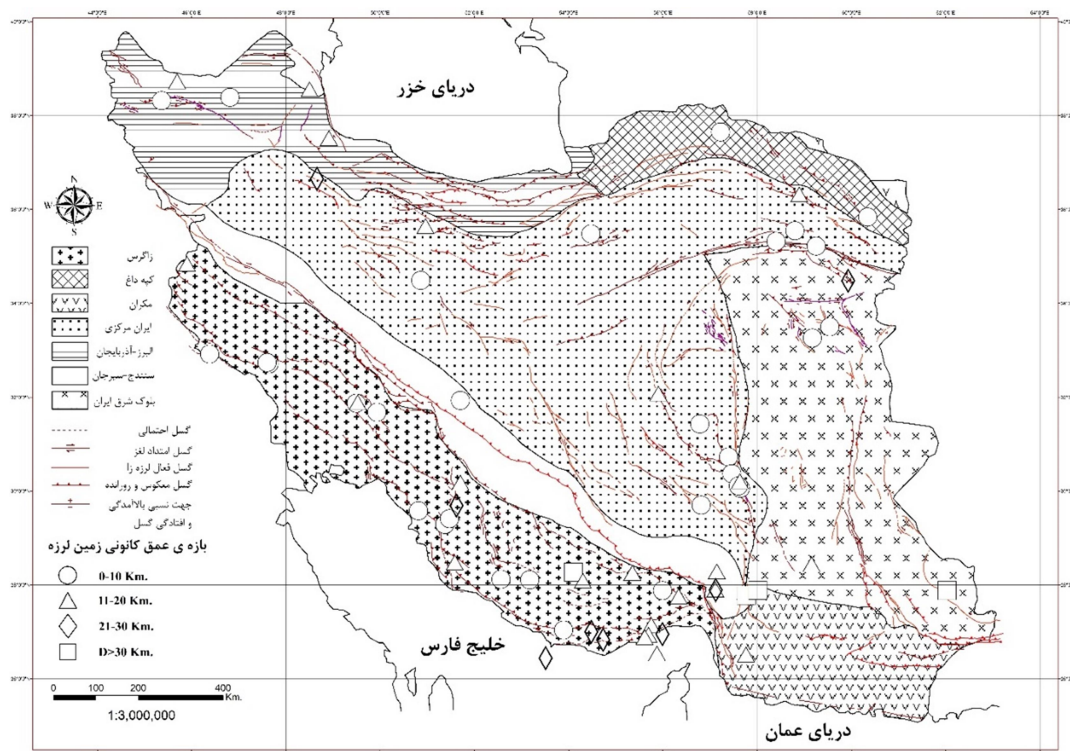
نکته بسیار مهم و کلیدی در خصوص جدول ۲ اشاره به این نکته است که در نزدیک به نیمی از زمین‌لرزه‌های بدون پیش‌لرزه، کانون سطحی زمین‌لرزه در مناطق نزدیک به گنبد‌های نمکی به ثبت رسیده است. در این مناطق به‌دلیل جایگزینی مکانیسم خزش به‌جای لغزش در محل گسل‌ها، تنش رها شده ناشی از جابه‌جایی گسل در این مناطق در زمین‌لرزه‌های کوچک (پیش‌لرزه‌ها) در این مناطق به‌صورت حرکات خزشی به جای لغزشی، به‌صورت حرکات تدریجی و خزشی رها شده و این شرایط به عدم ثبت پیش‌لرزه در این مناطق منجر می‌شود (شکل ۷). همان‌طور که در شکل ۷ به‌صورت شماتیک نشان داده شده لایه نمک به‌دلیل خاصیت تراکم‌پذیری بالا و همچنین فشار طبقات بالایی در اثر افزایش رسوبگذاری (شکل ۷-ب) از حالت اولیه خود (شکل ۷-الف) خارج شده و در محل گسل به سمت بالا حرکت کرده (شکل ۷-پ) و در واقع مکانیسم گسل را از حالت لغزش به حالت خزش در دیاپیرسم تبدیل می‌کند. بدین ترتیب و با ایجاد جایگزینی حرکت لغزش به‌جای خزش در محل گسل، رخداد زمین‌لرزه‌های بزرگ و پیش‌لرزه‌ها در حوالی گنبد‌های نمکی به‌طور مشخصی کاهش می‌یابد. این درحالی است که امکان انطباق مکانی تعداد بیشتری از زمین‌لرزه‌های بدون پیش‌لرزه با گنبد‌های نمکی که در سطح زمین رخمون پیدا نکرده‌اند نیز وجود دارد.

درخصوص شناسایی الگوی پیش‌لرزه‌ها در استان هرمزگان نیز تأییدی بر همین مورد (یعنی عدم‌وقوع پیش‌لرزه برای اکثر زمین‌لرزه‌های رخ داده در این استان) می‌باشد (ساکت، ۱۳۸۶). شاید بتوان یکی از دلایل عدم‌رخداد پیش‌لرزه‌ها در این محدوده را وجود تعدد بالای گنبد‌های نمکی و شکل‌پذیر بودن پوسته زمین در این بخش از ایران در مقایسه با دیگر مناطق آن دانست؛ چراکه در چنین شرایطی با توجه به ویژگی‌های مهندسی نمک (تراکم‌پذیری و خواص خزشی آن در تقابل با افزایش تنش) به‌جای رخداد زمین‌لرزه‌های کوچک (پیش‌لرزه‌ها) در شرایط تنش محدود، با حرکت تدریجی و خزشی لایه‌های نمکی در محدوده گسل‌های فعال مواجه خواهیم بود و لذا رکوردی از این حرکات به صورت یک زمین‌لرزه ثبت نخواهد شد.

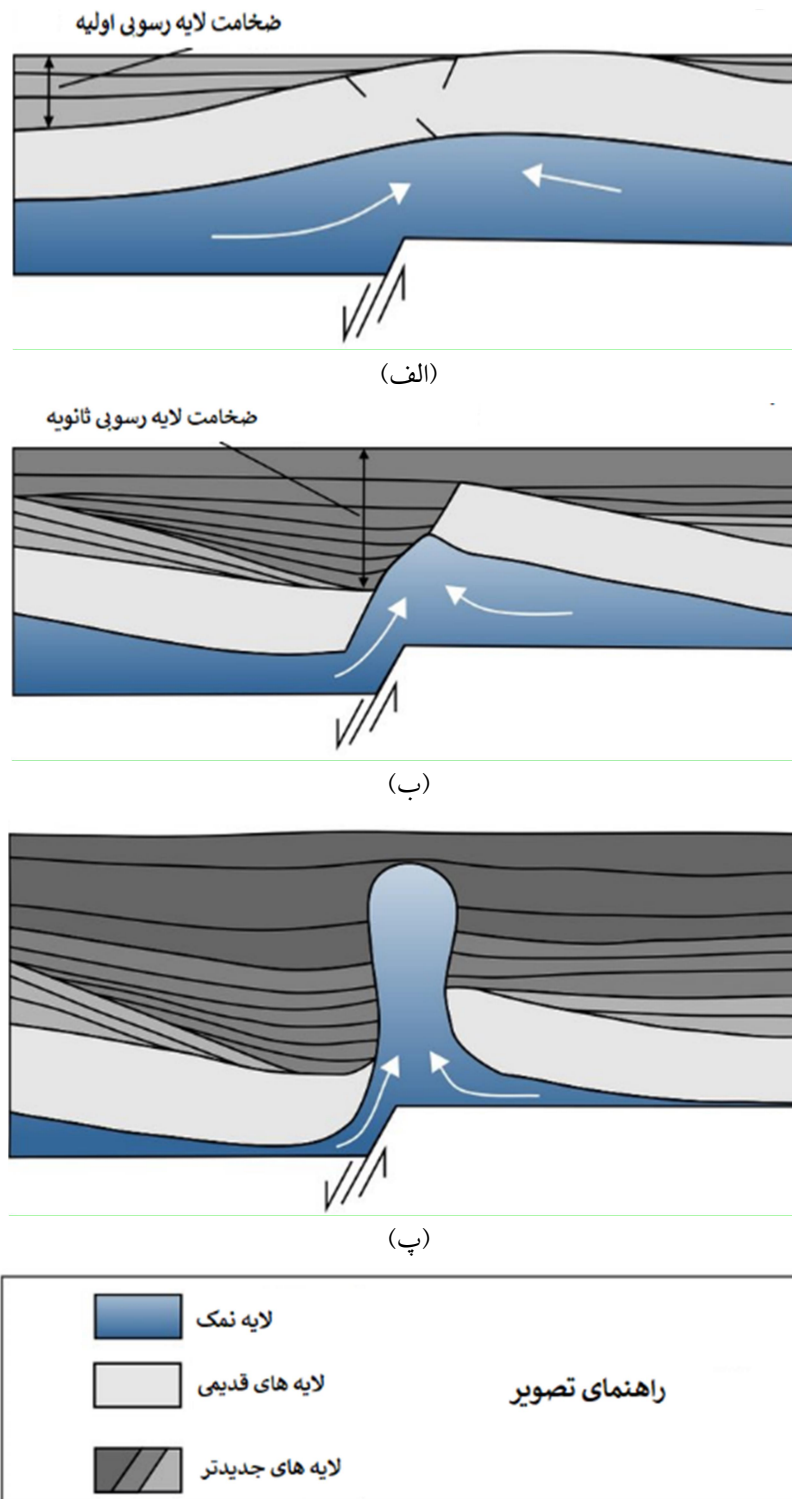
- بر اساس اشکال ۴ و ۶ زمین‌لرزه‌های بزرگ در محدوده البرز معمولاً بدون وقوع پیش‌لرزه مشخص رخ می‌دهند. البته ذکر این نکته نیز لازم است که به‌استثنای بقیه مناطق ایران، در پهنه البرز معمولاً پیش‌لرزه‌ها در دوره‌های زمانی طولانی‌تری از زمان در نظر گرفته‌شده برای این تحقیق (دو هفته) رخ می‌دهند، لذا در بیشتر زمین‌لرزه‌های البرز، فراوانی کم و به‌ویژه فقدان رخداد پیش‌لرزه در دوره زمانی دو هفته مانده به رخداد زمین‌لرزه اصلی نشان داده می‌شود که مطالعه زمین‌لرزه‌های البرز با هدف پیش‌بینی زمین‌لرزه‌های بزرگ را در دوره‌های بلندتری نسبت به تحقیق حاضر ضرورت می‌بخشد. شاید علت رخداد زمین‌لرزه‌های بدون پیش‌لرزه در البرز بی‌ارتباط با ضخامت کم رسوبات در مقایسه با پهنه زاگرس و بخشی از ایران مرکزی (شمال و جنوب استان کرمان و مرز زاگرس با سهندج سیرجان) نباشد (تکنیک و قدس، ۱۳۹۳). چراکه معمولاً در مناطقی که پی سنگ عمق کمتری دارد، پیش‌لرزه‌ها کمتر و یا در فاصله بیشتر از زمان رخداد زمین‌لرزه اصلی رخ می‌دهند (جونز و مونلار، ۱۹۷۹). همچنین دلیل فراوانی کم زمین‌لرزه‌های پهنه شرق ایران را می‌توان، تعداد کم و پوشش محدود دستگاه‌های



شکل ۵. جانمایی زمین‌لرزه‌های بزرگ‌تر از ۵ در دوره مورد مطالعه به تفکیک زمین‌لرزه‌های دارای پیش‌لرزه (رنگ خاکستری) و بدون پیش‌لرزه (رنگ مشکی) در ایالت‌های زمین‌ساختی ایران (منبع نقشه پایه: پایگاه ملی داده‌های علوم زمین ایران).



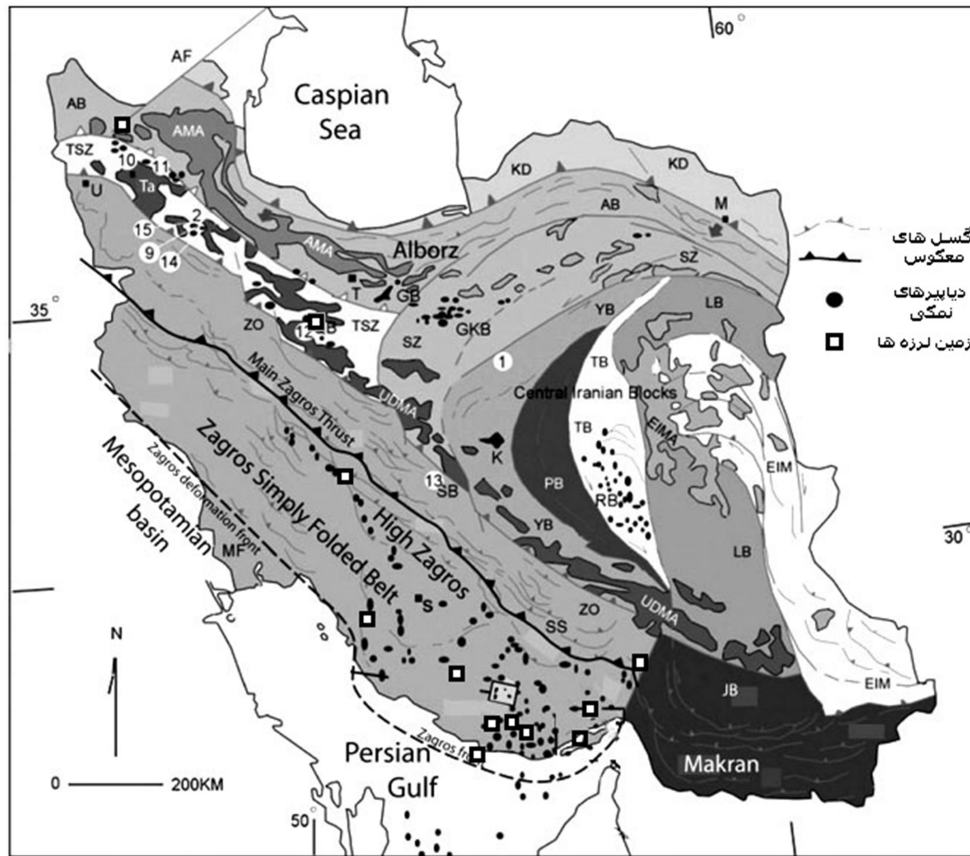
شکل ۶. جانمایی زمین‌لرزه‌های بزرگ‌تر از ۵ در ده سال اخیر به تفکیک عمق کانونی در ایالت‌های زمین‌ساختی ایران.



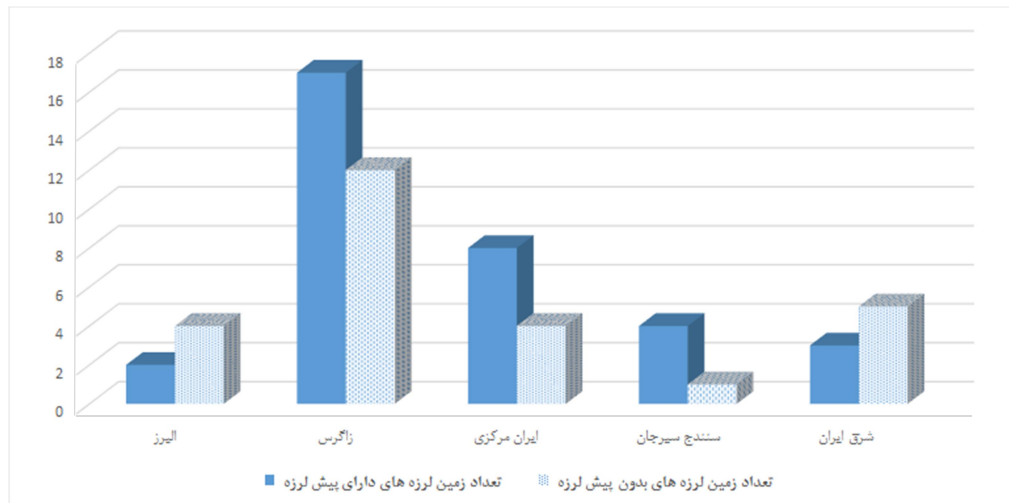
شکل ۷. مدل مفهومی تکامل دیابریسم در محل گسل (وارزیتکا و همکاران، ۲۰۱۵)، (الف) مرحله شروع گسل خوردگی، (ب) مرحله جابجایی لایه نمکی با حرکت گسل، (پ) مرحله نفوذ گنبد نمکی در لایه‌های بالایی از محل گسلش ایجاد شده.

۸. موقعیت زمین‌لرزه‌های بدون پیش‌لرزه بر روی نقشه پراکنده‌گی گنبد‌های نمکی ارائه شده که تأیید مشخصی بر موارد یاد شده است.

براین اساس بخش وسیعی از استان هرمزگان و جنوب استان فارس به دلیل پراکنش بالای گنبد‌های نمکی زمین‌لرزه‌های بدون پیش‌لرزه را تجربه می‌کنند. در شکل



شکل ۸. پراکنندگی زمین‌لرزه‌های بدون پیش‌لرزه که در مجاورت گنبد‌های نمکی رخ داده‌اند.



شکل ۹. نمودار تعداد زمین‌لرزه‌های دارای پیش‌لرزه و بدون پیش‌لرزه برای ایالت‌های زمین‌ساختی اصلی ایران.

دیگر پهنه‌های زمین‌ساختی از جمله البرز و شرق ایران بتانسیل بالاتری برای پیش‌بینی زمین‌لرزه با استفاده از این پیش‌نشانگر را دارا می‌باشند. لازم به ذکر است با توجه به اهمیت استفاده از مقیاس یکسان برای پیش‌لرزه‌ها، برای

همچنین همان‌طور که در شکل ۹ مشخص شده است، زمین‌لرزه‌های رخ داده در پهنه‌های زمین‌ساختی ایران مرکزی، زاگرس و سندج-سیرجان به دلیل وجود رخداد پیش‌لرزه در بیشتر زمین‌لرزه‌های این پهنه‌ها در مقایسه با



مشابه زمین‌ساختی برای زمین‌لرزه‌های آینده بسیار موثر واقع شود. مصداق‌های عملی اهمیت این موضوع با موارد ارائه شده در ادامه بیشتر مشخص خواهد شد.

به‌عنوان مثال، بررسی پهنه‌های زمین‌ساختی در تحلیل صورت گرفته در جدول ۳ نشان می‌دهد که در تمامی زمین‌لرزه‌های رخ داده در زاگرس، تغییرات اندازه عمق و بزرگی پیش‌لرزه‌ها، رابطه معکوس با هم دارد (نمونه موردی، شکل ۱۰، زمین‌لرزه نورآباد فارس). یعنی با افزایش میزان بزرگی، در هر پیش‌لرزه، عمق کانونی کاهش یافته است و یا با کاهش بزرگی، عمق افزایش یافته است. برعکس پهنه زاگرس، این بررسی در پهنه ایران مرکزی، به‌ویژه در جنوب استان کرمان (منطقه مرز زاگرس و ایران مرکزی) و شمال این استان، نشان از این نکته دارد که تغییرات اندازه عمق و بزرگی پیش‌لرزه‌ها به‌طور مشخصی منطبق و هم‌جهت با هم می‌باشند (نمونه موردی، شکل ۱۰، زمین‌لرزه بهمن ماه ۱۳۹۱ در منطقه سیرچ در شمال استان کرمان). در این بخش ذکر این نکته لازم است که رابطه مستقیم و معکوس تغییرات اندازه بزرگی و عمق پیش‌لرزه‌های مربوط به زمین‌لرزه‌های بزرگ در ایران بیشتر از همه پهنه‌ها در ایران مرکزی و بخش شمالی و میانی زاگرس نتیجه بخش بوده است. لذا این نتایج نشان می‌دهد پیش‌بینی زمین‌لرزه در این دو پهنه زمین‌ساختی با درصد بالاتری از موفقیت همراه خواهد بود. بر اساس مطالعات جهانی صورت گرفته در این زمینه که در بخش پیشینه مطالعاتی ذکر شد و نتایج به‌دست آمده در این مطالعه از مقایسه این دو پارامتر (عمق و بزرگی پیش‌لرزه‌ها) می‌توان به‌عنوان الگویی برای پیش‌بینی زمین‌لرزه‌های بزرگ استفاده کرد و آن را به‌شکلی مشخص برای تمامی پهنه‌های زمین‌ساختی ایران با شرایط متنوع تعمیم داد که البته با تکمیل کاتالوگ زمین‌لرزه‌ها در پهنه‌های یادشده از ایران، این الگو، کامل‌تر و نتیجه‌بخش‌تر نیز خواهد شد. ضمن این‌که با توجه به الگوی یکسان تغییرات اندازه عمق و بزرگی پیش‌لرزه‌ها در هر پهنه، تأثیرگذاری عدم قطعیت

تمامی آنها از یک مقیاس بزرگی (Mn) یا مقیاس بزرگی محلی ناتلی) استفاده شده است. همچنین با توجه به مطالعه صورت گرفته درخصوص خطای عمق کانونی در البرز (ملکی و همکاران، ۱۳۹۱) که به یک میزان محدود (حداکثر و در بدترین شرایط گپ آزیموتی) در حدود ۳ کیلومتر تخمین زده شده است، با توجه به همپوشانی دستگاهی در البرز، میزان خطای عمق در این پهنه به حداقل می‌رسد. ضمن این‌که به‌دلیل کم‌عمق بودن زمین‌لرزه‌ها در زاگرس و ایران مرکزی، خطای عمقی در این پهنه‌ها نیز پایین خواهد بود. لذا تا حدود زیادی می‌توان صحت اطلاعات مورد استفاده از کاتالوگ لرزه‌ای مؤسسه ژئوفیزیک را برای این مطالعه تأیید کرد.

در جدول ۳ زمین‌لرزه‌ها با بیش از یک پیش‌لرزه که تعداد ۲۴ زمین‌لرزه از ۳۷ زمین‌لرزه جدول ۲ را به خود اختصاص داده‌اند، انتخاب شدند و تغییرات بزرگی و عمق کانونی برای این زمین‌لرزه‌ها به صورت نرمال شده مورد بررسی قرار گرفت که نمونه‌هایی از داده‌های نرمال شده عمق و بزرگی در شکل ۱۰ به تصویر کشیده شده است. منظور از نرمال کردن داده‌ها، قراردادن آنها در یک بازه مشخص و یکسان است. یکی از روش‌های نرمال‌سازی داده‌ها تقسیم تمامی داده‌ها (در یک پارامتر) به بزرگ‌ترین داده مربوط به آن پارامتر است. بدین ترتیب تمامی داده‌ها در بازه ۰ تا ۱ قرار می‌گیرند.

همان‌طور که ذکر شد هدف از نرمال کردن داده‌ها مقایسه داده‌های پارامترهای مختلف در یک محدوده مشخص و یکسان است تا بتوان بین داده‌ها با ماهیت‌های متفاوت مقایسه یکنواختی از تغییرات اندازه آنها را ارائه کرد و بدین ترتیب بتوان روابط قابل‌فهم‌تری بین داده‌های مربوط به پارامترهای مختلف پیدا کرد. نتایج بررسی در این زمینه نشان داد که در بیش از ۶۰ درصد این زمین‌لرزه‌ها یعنی تعداد ۱۵ زمین‌لرزه از ۲۴ مورد یاد شده، ارتباط مشخصی بین بزرگی و عمق کانونی پیش‌لرزه‌ها وجود دارد. این ارتباط می‌تواند برای تحلیل شرایط حاکم بر رخداد زمین‌لرزه‌های بزرگ و پیش‌بینی احتمالی آنها در پهنه‌های

بزرگ‌تر از ۶ در پهنه‌های زمین‌ساختی مختلف در ایران (علی‌رغم تعداد اندک آنها) است که بررسی این مورد در زمین‌لرزه‌های دیگر ایران با بزرگی ۶ و بیشتر و به شرط تأیید این مورد، می‌تواند به‌عنوان یک پارامتر مهم در خصوص استفاده از پیش‌نشانگر لرزه‌خیزی، برای پیش‌بینی رخداد زمین‌لرزه‌های مخرب (با بزرگی ۶ و بیشتر) در سرتاسر ایران قابل کاربرد باشد.

بحث عمق کانونی، تا حدود زیادی در این خصوص مرتفع می‌شود چراکه تأثیر عدم قطعیت برای همگی داده‌های هر پهنه به شکلی تقریباً یکنواخت قابل برداشت است. همان‌طور که در جدول ۳ مشخص شده است، زمین‌لرزه‌های با گسل مسبب معکوس دارای تعدد بالاتری می‌باشند. همچنین مورد دیگر در این زمینه تغییرات معکوس در اندازه بزرگی و عمق پیش‌لرزه‌ها قبل از رخداد تمامی زمین‌لرزه‌های

جدول ۳. پارامترهای مبنایی زمین‌لرزه‌های با بزرگی ۵ و بیشتر دارای پیش‌لرزه مشخص و مقایسه تغییرات عمق و بزرگی آنها.

تاریخ رخداد	نام زمین‌لرزه	بزرگی زمین‌لرزه	نوع گسل مسبب	تعداد پیش‌لرزه-های مورد مقایسه	تغییرات عمق و بزرگی	پهنه زمین ساختی
۸۶/۰۴/۱۳	بهباد، جنوب استان یزد	Mn=۵/۱	معکوس	۳	تغییرات عمق و بزرگی پیش‌لرزه‌ها منطبق بر هم	ایران مرکزی
۸۶/۱۲/۱۹	آریان شهر، خراسان جنوبی	Mn=۵/۱	امتدادلغز	۳	تغییرات عمق و بزرگی پیش‌لرزه‌ها کاملاً عکس هم	شرق ایران
۸۷/۰۹/۱۷	درگهان، جنوب استان هرمزگان	Mn=۵/۶	معکوس	۲	تغییرات عمق و بزرگی پیش‌لرزه‌ها منطبق بر هم	جنوبی ترین بخش زاگرس
۹۰/۰۲/۱۱	نورآباد ممسنی، استان فارس	Mn=۵/۲	معکوس	۵	تغییرات عمق و بزرگی پیش‌لرزه‌ها عکس هم	زاگرس
۹۰/۰۴/۰۵	سیرج، شمال استان کرمان	Mn=۵/۲	امتدادلغز	۵	تغییرات عمق و بزرگی پیش‌لرزه‌ها منطبق بر هم	ایران مرکزی
۹۲/۰۱/۲۰	کاکي، استان بوشهر	Mw=۶/۱	معکوس	۲	تغییرات عمق و بزرگی پیش‌لرزه‌ها عکس هم	زاگرس
۹۳/۰۵/۲۷	مورموری، استان ایلام	Mw=۶/۲	معکوس	۶	تغییرات عمق و بزرگی پیش‌لرزه‌ها عکس هم	زاگرس
۹۳/۰۸/۰۲	فاریاب، جنوب استان کرمان	Mn=۵/۳	معکوس	۳	تغییرات عمق و بزرگی پیش‌لرزه‌ها منطبق بر هم	سندج-سیرجان
۹۴/۰۵/۰۹	سیرج، شمال استان کرمان	Mn=۵/۵	امتدادلغز خالص	۴	تغییرات عمق و بزرگی پیش‌لرزه‌ها کاملاً منطبق بر هم	ایران مرکزی
۹۴/۰۹/۰۵	ایذه، استان خوزستان	Mn=۵/۳	امتدادلغز	۳	تغییرات عمق و بزرگی پیش‌لرزه‌ها عکس هم	زاگرس
۹۶/۰۶/۰۹	زیارتعلی، شمال استان هرمزگان	Mn=۵/۴	معکوس	۲	تغییرات عمق و بزرگی پیش‌لرزه‌ها منطبق بر هم	مرز زاگرس با سندج-سیرجان
۹۶/۰۸/۰۱	زیارتعلی، استان هرمزگان	Mn=۵/۵	معکوس	۲	تغییرات عمق و بزرگی پیش‌لرزه‌ها منطبق بر هم	مرز زاگرس با سندج-سیرجان
۹۶/۰۸/۲۱	سرپل زهاب، کرمانشاه	Mw=۷/۳	معکوس	۴	تغییرات عمق و بزرگی پیش‌لرزه‌ها عکس هم	زاگرس
۹۶/۰۹/۱۰	هیجدک، شمال استان کرمان	Mw=۶/۱	معکوس	۴	تغییرات عمق و بزرگی پیش‌لرزه‌ها کاملاً عکس هم	ایران مرکزی
۹۶/۰۹/۲۹	ملارد، البرز	Mn=۵/۳	امتدادلغز	۴	تغییرات عمق و بزرگی پیش‌لرزه‌ها منطبق بر هم	مرز البرز با ایران مرکزی



شکل ۱۰. تغییرات بزرگی در برابر عمق کانونی پیش‌لرزه‌ها به‌عنوان یک نشانگر برای رخداد زمین‌لرزه‌های بزرگ. همان‌طور که در شکل مشخص است تغییرات بزرگی و عمق کانونی در زمین‌لرزه (الف)، منطبق بر هم و در شکل (ب) عکس‌همدیگر نشان داده شده‌اند.

## ۵. نتیجه‌گیری

گنبد‌های نمکی داشته که این عامل به دلیل تبدیل حرکات کوچک از حالت لغزشی به خزشی به عدم برداشت پیش‌لرزه‌ها منجر خواهد شد.

بر اساس مطالعه حاضر بر روی زمین‌لرزه‌های رخ داده، برای پهنه‌های زاگرس (به‌ویژه در بخش شمالی و مرکزی آن) و ایران مرکزی و تا حدودی سندج-سیرجان، به دلیل تعداد زمین‌لرزه‌های بیشتر دارای پیش‌لرزه در مقایسه با دیگر پهنه‌ها، می‌توان با اطمینان بیشتری از پیش‌لرزه‌ها به‌عنوان یک پیش‌نشانگر برای پیش‌بینی زمین‌لرزه استفاده کرد. ضمن این‌که در همین پهنه‌ها به‌ویژه زاگرس و ایران مرکزی رابطه تغییرات عمق و بزرگی پیش‌لرزه‌ها نیز می‌تواند در تکمیل بررسی این پیش‌نشانگر و رسیدن به نتایج عملی در خصوص پیش‌بینی زمین‌لرزه با استفاده از آن، ثمربخش واقع شود.

## مراجع

پورکرمانی، م. و آراین، م.، ۱۳۷۶، لرزه زمین ساخت ایران. انتشارات دانشگاه شهید بهشتی.  
تکنیک، و. و قدس، ع. ر.، ۱۳۹۳، برآورد ضخامت رسوبات در ایران با استفاده از تحلیل طیفی داده‌های مغناطیسی، شانزدهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران.  
۷۶-۸۰.  
زارع، م. و کامران‌زاده، ف.، ۱۳۹۳، پراکندگی لرزه‌خیزی

بررسی داده‌های مربوط به پارامترهای لرزه‌خیزی پیش‌لرزه‌ها در خصوص ارتباط عمق کانونی زمین‌لرزه اصلی با تعداد پیش‌لرزه‌ها که در برخی از نقاط دنیا به‌عنوان نشانگر مشخصی برای پیش‌بینی زمین‌لرزه مورد استفاده قرار گرفته است، برای پیش‌لرزه‌های زمین‌لرزه‌های بزرگ‌تر از ۵ طبق نمودار ارائه شده در شکل ۲، در محدوده ایران نشان از این مورد دارد که زمین‌لرزه‌های با عمق کانونی کمتر، پیش‌لرزه‌های بیشتری را دارا می‌باشند.  
با توجه به ارتباط نوع گسل با رخداد و عدم رخداد پیش‌لرزه‌ها در مناطق مختلف دنیا، در مورد زمین‌لرزه‌های بزرگ‌تر از ۵ در ایران در زمین‌لرزه‌ها با گسل مسبب معکوس به‌طور نسبی تعداد پیش‌لرزه‌های بیشتری در مقایسه با گسل‌های امتداد لغز به ثبت رسیده است.

نتایج بررسی آماری صورت گرفته در این پژوهش نشان می‌دهد، برای زمین‌لرزه‌ها با گسل معکوس با افزایش بزرگی نسبت تعداد پیش‌لرزه‌ها به زمین‌لرزه‌های اصلی به‌شکل مشخصی افزایش می‌یابد، در حالی که در زمین‌لرزه‌ها با گسل مسبب امتداد لغز شاهد این افزایش نیستیم.

نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد بیشتر زمین‌لرزه‌هایی که به‌ویژه در منطقه زاگرس بدون رخداد پیش‌لرزه اتفاق افتاده‌اند کانون سطحی نزدیکی به

- لرزه‌های زمین‌لرزه آذرماه ۱۳۹۱ زهان در استان خراسان جنوبی. نشریه زمین‌شناسی مهندسی دانشگاه خوارزمی، ۱۴(۴)، ۶۳۵-۶۶۸
- ملکی، و.، شمالی، ظ. ح. و حاتمی، م. ر.، ۱۳۹۱، بررسی مکان‌یابی زمین‌لرزه‌های محلی به روش غیرخطی و کاربرد آن در تعیین محل زمین‌لرزه‌های با بزرگی  $Mn \geq 4$  در ناحیه البرز مرکزی (۲۰۰۶-۲۰۱۰)، مجله فیزیک زمین و فضا، ۳۸(۴)، ۲۳-۳۷.
- Ambraseys, N. N. and Melville, C. P., 1982, A history of Persian Earthquakes, Cambridge Earth Science Series, Cambridge University Press. London. ISBN-13 978-0-521-24112-0-Hardback.
- Bolt, B. A., 1999, Earthquakes., W.H Freeman and Company., 4<sup>th</sup> edition. doi:10.1017/S0016756800253661.
- Dodge, D. A., Beroza, G. C. and Ellsworth, W. L., 1995, Foreshock sequence of the 1992 Landers, California, earthquake and its implications for earthquake nucleation. J. Geophys. Res. 100, 9865-9880. Doi: 0148-0227/95/95 IB-• 871 05.00
- Bouchon, M., Durand, V., Marsan, D., Karabulut, H. and Schmittbuhl, J., 2013, The long precursory phase of largest interplate earthquakes, Nat. Geosci., 6, 299-302, doi:10.1038/ngeo1770.
- Dodge, D. A., Beroza, G. C. and Ellsworth, W. L., 1996, Detailed observations of California foreshock sequences: Implications for the earthquake initiation process. J. Geophys. Res. 101, 22371-22392. Doi: 0148-0227/96/96JB-02269509.00.
- Hamada, K., 1988, Earthquake Prediction Technology. The Present State and Future development, Visiting Research Officer, National Research Center for Disaster Preventio., 134-158.
- Hauksson, E., Stock, J., Hutton, K., Yang, W., Vidal-Villegas, J.A and Kanamori, H., 2011, The 2010 Mw 7.2 El Mayor-Cucapah earthquake sequence, Baja California, Mexico and southernmost California, USA: Active seismotectonics along the Mexican Pacific margin. Pure Appl. Geophys. 168, 1255-1277. Doi: 10.1007/s00024-010-0209-7.
- Huang, Q., 2019, Seismicity Pattern Changes Prior to the 2008 Ms7.3 Yutian Earthquake., Entropy., 21, 118; doi:10.3390/e21020118
- Gerassimos A., Papadopoulos, A.A., Minadakis, G., Triantafyllou, I. and Krassakis, P., 2020, Short-Term Foreshocks as Key Information for Mainshock Timing and Rupture: The
- در ایران، نشریه تحلیل فضایی مخاطرات محیطی. ۳۹-۵۱(۴)
- ساکت، ع.، ۱۳۸۶، بررسی سرشت لرزه‌خیزی استان کرمان و هرمزگان با هدف ارائه الگویی کاربردی برای پیش‌بینی زمین‌لرزه در این مناطق. پایان نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه خوارزمی.
- ساکت، ع.، فاطمی عقدا، س. م.، فهیمی فر، ا. و صادقی، ح.، ۱۳۹۹، تحلیل و روندیابی پارامترهای مبنایی پس Mw6.8 25 October 2018 Zakynthos Earthquake, Hellenic Subduction Zone. Sensors, 20, 5681; doi:10.3390/s20195681.
- Gulia, L. and Wiemer, S., 2019, Real-time discrimination of earthquake foreshocks and aftershocks, Nature, 574(7777), 193-199.
- Jones, L. M., 1984, Foreshocks (1966-1980) in the San Andrias system, California. Bulletin of the Seismological Society of America, 74(4), 1361-1380.
- Jones, L. M. and Molnar, P., 1979, Some characteristics of foreshocks and their possible relationship to earthquake prediction and premonitory slip on faults. J. Geophys. Res. 84, 3596-3608. Doi: 10.1029/JB084iB07p03596.
- Kato, A., Obara, K., Igarashi, T., Tsuruoka, H., Nakagawa, S. and Hirata, N., 2012, Propagation of slow slip leading up to the 2011 Mw 9.0 Tohoku-Oki earthquake. Science 335, pp 705-708. doi: 10.1126/science.1215141.
- Lin, C. H., 2004, Repeated foreshock sequences in the thrust faulting environment of eastern Taiwan., Geophysical Research Letters, VOL. 31, L13601. DOI: 10.1029/2004GL019833.
- McGuire, J. J., Boettcher, M. S. and Jordan, T. H., 2005, Foreshock sequences and short-term earthquake predictability on East Pacific rise transform faults. Nature 434, 457-461. Doi:10.1038/nature03377.
- Minadakis, G. and Papadopoulos, G.A., 2016, Foreshock patterns preceding large earthquakes in the subduction zone of Chile., Geophysical Research Abstracts Vol. 18. Doi: 10.1007/s00024-016-1337-5.
- Papadopoulos, G.A, Fiore, B.D. and Minadakis, G., 2011, Short-Term foreshocks and the prediction of mainshock in the aftermath of L' Aquila earthquake: A Global Review., Geophysical Research Abstracts., Vol. 13, EGU2011-4540.
- Rikitake, T, 1976, Earthquake prediction. Amsterdam: Elsevier.
- Reasenber, P. A., 1999, Foreshock occurrence

- before large earthquakes, *Journal of Geophysical Research*, 104(B3), 4755-4768.
- Saket, A., Fatemi Aghda, S.M, Sadeghi, H. and Fahimifar, A., 2021, Analysis and routing of basic parameters of tasuj earthquake (April 2013, northwest of Iran) with an emphasis on foedetic data, foreshocks and large aftershocks, *Journal of Applied Engineering Sciences*. 11 (24), Issue 2/2021, 151-158.
- Syafriani, S., Yulkifli, Z., Sabarani, A. and Raharjo, F.D., 2018, Correlation of seismotectonic parameter and seismic quiescence z-value in West Sumatra Indonesia, *Journal of Physics Conference Series* 1040(1):012050, DOI: 10.1088/1742-6596/1040/1/012050
- Vavryčuk, V., 2015, Moment tensor decompositions revisited. *J Seismol* 19, 231–252. DOI:10.1007/s10950-014-9463-y.
- Vorobieva Inessa, A. and Panza Giuliano, F., 1993, Prediction of the occurrence of related strong earthquakes in Italy., *International Centre for Theoretical Physics*. IC/93/127.
- Warsitzka. M., Kukowski, N. and Kley, J., 2015, Analogue experiments of salt flow and pillow growth due to basement faulting and differential loading. *Solid Earth*, 6, 9–31, DOI:10.5194/se-6-9-2015.
- Zanzerkia, E. E., Beroza, G. C. and Vidale, J. E., 2003, Waveform analysis of the 1999 Hector Mine foreshock sequence. *Geophys. Res. Lett.* 30, 1429. DOI: 10.1029/2002GL016383.

## Analysis of behavioral pattern the basic parameters in foreshocks with target for the prediction of big earthquakes in Iran

Saket, A.<sup>1\*</sup>, Fatemi Aghda, S. M.<sup>2</sup>, Sadeghi, H.<sup>3</sup> and Fahimifar, A.<sup>4</sup>

1. Ph.D. Graduated, Faculty of Geoscience, Kharazmi University, Tehran, Iran

2. Professor, Faculty of Geoscience, Kharazmi University, Tehran, Iran

3. Associate Professor, Department of Geology, Faculty of Science, Ferdowsi University Mashhad, Mashhad, Iran

4. Professor, Faculty of civil engineering and environment, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

(Received: 19 Dec 2021, Accepted: 19 April 2022)

### Summary

The analysis of the basic parameters of the foreshocks is one of the most applied researches for risk reduction of earthquakes. Because identification of behavioral pattern of foreshocks can help researchers in detection of the active fault conditions in different areas. Also accurate analysis of these parameters help to study of earthquake prediction as more effective. In this study, we study about behavioral pattern of foreshocks in different tectonic zones in Iran. This research was conducted for prediction of probability the earthquakes with  $M > 5$  in Iran. According to this research, accurate analysis of the basic seismic parameters of foreshocks (including: relationship between depth and magnitude of foreshocks) is studied with target for the prediction of big earthquake in various zones for a ten-year period (from 2007 until 2017). The results of this research suggest that there are certain similarities in the magnitude-depth models for the one zone and also different for various zones. Therefore, this can be used as a precursor in earthquake prediction with  $Magnitude > 5$  for different zones in Iran.

The important results presented in this article can be presented in the following cases:

- Investigation of the information of seismicity parameters of foreshocks regarding the relationship between the focal depth of the main earthquake and the frequency of the foreshocks that used in some parts of the world as a precursor of earthquake suggested that main shocks with  $M > 5$  and shallow depth have more foreshocks abundances (Fig 2).
- Due to the relationship between the type of fault with the occurrence and non-occurrence of aftershocks in different parts of the world, in the case of earthquakes greater than 5 in Iran, in earthquakes with reverse faults have relatively more aftershocks recorded compared to strike-slip faults.
- The results of the statistical study conducted in this study show that for earthquakes with reverse fault, the frequency of foreshocks increases with magnitude. However, we do not see such conditions for earthquakes with faults of strike-slip.
- The result of this study shows that more earthquake especially in Zagros zone and near salt domes happened without foreshocks. The reason for this is related to effect of salt dome on movement fault from slide to creep. The creep is a gradual movement and it is not usually accompanied by rapid movement such as slides that lead to large and recordable earthquakes.
- Based on the present study on earthquakes, for the Zagros (especially in the northern and central part) and Central Iran and Sanandaj-Sirjan, can be used more confidently as a precursor of earthquake because in this zones earthquakes happened with more foreshocks.
- In Zagros and Iran Markazi zone the relationship between variations of the depth and magnitude of foreshocks is fruitful for predicting of the main shocks.
- For other zones we need to have more complete data bank that has earthquakes with higher frequency of foreshocks. Based on this data bank we can present suitable relations and models for the study of foreshock with the aim of predicting the big earthquakes.

**Keywords:** Earthquake prediction, Treatment pattern, foreshock, Basic parameters, Iran,  $Magnitude > 5$ .

---

\* Corresponding author:

alisaketgeo@gmail.com