

تحلیل و روندیابی پارامترهای مبنایی پیش‌لرزه‌ها و پس‌لرزه‌های زمین‌لرزه آذرماه ۱۳۹۱ زهان در استان خراسان جنوبی

علی ساکت، سید محمود فاطمی عقدا*
دانشگاه خوارزمی، دانشکده علوم زمین
احمد فهیمی فر:

دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست
حسین صادقی:

دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده علوم، گروه زمین‌شناسی

تاریخ: دریافت ۹۷/۰۶/۲۰ پذیرش ۹۹/۰۳/۱۲

چکیده

تحلیل زمان، مکان و بزرگی پیش‌لرزه‌ها و پس‌لرزه‌ها از جمله مواردی است که در دهه‌های اخیر مورد توجه متخصصان رشته‌های مرتبط از جمله زمین‌لرزه‌شناسان، مهندسان سازه، مدیران بحران و دیگر علوم مرتبط قرار گرفته است. زیرا این تحلیل‌ها در کتاب‌شناسایی شرایط لرزه‌زمین ساختی منطقه و رفتار گسل مسبب زمین‌لرزه، کمک زیادی به روندیابی پیش‌لرزه‌ها و پس‌لرزه‌ها با هدف کاهش تلفات و حتی کاستن تنش‌های روانی جامعه آسیب دیده و بازمانده در منطقه زلزله‌زده و مدیریت کارآمد بحران در آن شرایط می‌کند. در این مقاله به بررسی و ارزیابی داده‌های مربوط به یک زمین‌لرزه واقعی و تجربه مشابه به دست آمده از دیگر زمین‌لرزه‌ها و ارائه الگویی کاربردی در زمینه پیش‌بینی پارامترهای زمین‌لرزه اصلی و هم‌چنین مکان‌یابی و تعیین بزرگی و زمان پس‌لرزه‌ها با هدف کاهش اثرات ناشی از آنها در مناطق زلزله‌زده می‌پردازیم. بر این اساس، در پژوهش حاضر، نتایج بررسی‌های مربوط به تحلیل مبنایی پارامترهای پیش‌لرزه‌ها و پس‌لرزه‌های زمین‌لرزه آذرماه ۱۳۹۱ زهان در استان خراسان جنوبی بررسی شد. اهمیت بررسی و پژوهش‌های کاربردی در این بخش از ایران به دلیل این است که این منطقه با این‌که در دهه‌های گذشته

شاهد زمین‌لرزه‌های مخرب و بزرگی بوده است، در بیش از دو دهه اخیر، با یک نبود لرزه‌ای مشخص مواجه شده است. چنین شرایطی، بررسی متمنکتر در باره تغییرات لرزه‌خیزی در این محدوده، به دلیل قریب الوقوع بودن یک زمین‌لرزه بزرگ را ضرورت می‌بخشد. نتایج به دست آمده از این پژوهش روی تحلیل روند تغییرات پیش‌لرزه‌ها نشان داد که با بررسی تغییرات مکانی، بزرگی و عمق پیش‌لرزه‌ها می‌توان تا حدود زیادی به روند یابی پارامترهای زمین‌لرزه اصلی رسید. ضمن این‌که فراوانی پس‌لرزه‌ها و فواصل زمانی (سکون لرزه‌ای) مشخص بین آنها می‌تواند به عنوان نشان‌گرهایی برای شناسایی زمان پس‌لرزه‌های بزرگ‌تر استفاده شود و تحلیل‌های انجام شده در این پژوهش نشان داد روش‌هایی از جمله مدل‌های ارائه شده در باره سری زمانی در کنار تحلیل سکون لرزه‌ای به تدقیق زمان پیش‌بینی پس‌لرزه‌های بزرگ می‌انجامد.

واژه‌های کلیدی: زمین‌لرزه زهان، روند یابی پس‌لرزه، پیش‌لرزه، سکون لرزه‌ای، گسل مسبب، تنش اصلی حداقل، مدیریت ریسک

مقدمه

پیش‌لرزه‌ها به زمین‌لرزه‌های اطلاق می‌شوند که قبل از رخداد زمین‌لرزه اصلی و به دلیل شروع تغییرات تنش در یک منطقه رخ می‌دهند. در مقابل پس‌لرزه‌ها، به عنوان زمین‌لرزه‌هایی معروفی می‌شوند که پس از رخداد زمین‌لرزه اصلی و با بزرگی کم‌تری نسبت به آن به وقوع می‌پونندند و معمولاً برای تعادل بخشی و تخلیه انرژی باقی‌مانده در منطقه رومرکز زمین‌لرزه اصلی رخ می‌دهند [۱]. در تعریف دیگری از پس‌لرزه‌ها، آنها را حاصل القای تنش و آشفتگی ایجاد شده در اثر رخداد زمین‌لرزه اصلی در مجاورت گسیختنی ناشی از آن می‌دانند [۲]. بررسی پیش‌لرزه‌ها و پس‌لرزه‌ها از چند منظر قابل اهمیت است؛ نخست شناسایی زون گسیختگی با هدف تعیین شرایط گسل مسبب زمین‌لرزه در کنار بررسی احتمال پیش‌بینی زمین‌لرزه اصلی و هم‌چنین تحلیل داده‌های موجود برای پیش‌بینی پس‌لرزه‌های بزرگ [۳]. پژوهش‌های متعددی در زمینه الگوی رفتاری پیش‌لرزه‌ها و مدل‌های حاکم بر رخداد آنها به وسیله محققان در سراسر دنیا ارائه شده است. از جمله این پژوهش‌ها به عنوان نمونه می‌توان به این موارد اشاره کرد: پژوهش‌گران مختلفی از جمله زانرکیا^۱ و همکاران (۲۰۰۳) و دادگ^۲ و همکاران (۱۹۹۵) به ترتیب توالي پیش‌لرزه‌های زمین‌لرزه هکتور‌ماین^۱ و لندرز^۲ در

1. Zanerka

2. Dodge

کالیفرنیا را بررسی کردند [۴، ۵]. همچنین کاتو^۳ و همکاران، به بررسی پیش لرزه‌های زمین لرزه ۲۰۱۱ ساحل شرقی ژاپن پرداختند که نتیجه این تحقیق ارائه الگوی رفتاری پیش لرزه‌ها برای زمین لرزه‌های منطقه مربوط با بزرگی‌های مشابه بود [۶]. پژوهش درباره گسل سان اندریاس [۷]، بررسی‌های انجام شده در مورد پیش لرزه‌های زمین لرزه ۲۰۱۰ شیلی در زون فروزانشی محدوده مورد نظر [۸]، پژوهش‌های مشابه برای زمین لرزه‌های بزرگ مناطق مختلف جهان بهوسیله پاپاداپولوس^۴ همکاران [۹]، از جمله دیگر بررسی‌های انجام شده در زمینه پیش لرزه‌ها با هدف شناسایی محدوده‌های زمانی و مکانی برای تحلیل این داده‌ها در پیش‌بینی زمین لرزه‌های بزرگی است که به دنبال آن‌ها رخ داده‌اند. در زمینه رخداد پس لرزه‌ها و شناسایی روند آنها، نیز تحقیقات گسترشده‌ای انجام شده است که در ادامه به برخی از مهم‌ترین آنها اشاره می‌شود. اولین پژوهش تخصصی در مورد پس لرزه‌ها، بهوسیله اموري^۵ (۱۸۹۴)، روی زمین لرزه‌های سراسر دنیا انجام شد [۱۰]، نتایج تحقیقات این محقق به ارائه فرمولی درباره کاهندگی تعداد پس لرزه‌ها، با دور شدن از زمان رخداد زمین لرزه اصلی منجر شد که با تصحیحاتی که آتسو^۶ (۱۹۷۰) روی آن فرمول، اعمال کرد، همچنان از آن به شکلی گسترشده برای بررسی پس لرزه‌های زمین لرزه‌های بزرگ استفاده می‌شود. از اوایل قرن بیستم با رخداد زمین لرزه‌های سان فرانسیسکو در ایالات متحده (۱۹۰۶)، کاتو در ژاپن (۱۹۲۳) و زمین لرزه کرن کانتی در اواسط همان قرن (۱۹۵۲)، پژوهش‌ها در زمینه بررسی پس لرزه‌های زمین لرزه‌های بزرگ، به مرحله نوینی وارد شد [۱۱]. در ادامه، محققانی از جمله Mendoza (and Hartzell, 1988) در زمینه الگوی پس لرزه‌ها و گسل‌ش زمین لرزه اصلی مقاله مهمی ارائه دادند، بر اساس این مطالعه مشخص گردید که بیشتر پس لرزه‌ها در نزدیک کانون زمین لرزه و یا در امتداد گسل مسبب آن رخ می‌دهند [۱]. پژوهشی دیگر در این زمینه بهوسیله تاجیما^۷ و کاناموری^۸ (۱۹۸۵)، درباره توزیع جهانی پس لرزه‌ها و ارائه الگویی مناسب برای آنها انجام شد [۱۲]. همچنین پژوهشی در زمینه ارتباط فضایی بین زمین لرزه‌های اصلی و

1. Hector mine

2. Landers

3. Kato

4. Papadapoulous

5. Omori

6. Atsu

7. Tajima

8. Kanamori

پراکنش پس‌لرزه‌های آنها به‌وسیله داس^۱ و هنری^۲ (۲۰۰۳) ارائه شد که تمرکز مشخصی بر تغییرات مکانی و بزرگی پس‌لرزه‌های بزرگ داشت.^[۱۳]

علاوه بر موارد یاد شده، از جمله تحقیقات یک دهه اخیر در زمینه موضوع مورد بحث می‌توان به مقاله ژائو^۳ و همکاران (۲۰۱۱) در باره جانمایی پس‌لرزه‌های مربوط به زمین‌لرزه سال ۲۰۰۸ سیچوان چین^[۱۴] و پژوهشی که به‌وسیله نیشیمورا^۴ و همکاران (۲۰۱۱) روی پس‌لرزه‌های زمین‌لرزه ۲۰۱۱ توهوکو در ساحل شرقی ژاپن انجام شد، اشاره کرد.^[۱۵] هم‌چنین بررسی‌های انجام شده به‌وسیله وان درالست^۵ و شاو^۶ (۲۰۱۵) روی پس‌لرزه‌های مربوط به زمین‌لرزه‌های مهم کالیفرنیا نشان داد که پس‌لرزه‌های بزرگ در مکان‌هایی دورتر نسبت به زمین‌لرزه اصلی در مقایسه با دیگر پس‌لرزه‌ها رخ می‌دهند و دلیل ارائه شده به‌وسیله آنها درباره این مورد، رها شدن بخش زیادی از تنش در زمان رخداد زمین‌لرزه اصلی در حوالی کانون زمین‌لرزه و انتقال تنش به مناطق مجاور و دورتر از کانون بود.^[۱۶] در پژوهشی دیگر که تاپا^۷ و همکاران (۲۰۱۸) روی پس‌لرزه‌های زمین‌لرزه نیپال در سال ۲۰۱۵ انجام دادند، بررسی ضریب کاهشی روند پس‌لرزه‌های آن زمین‌لرزه مورد بحث واقع شد و نتایج تحلیل یاد شده نشان از انطباق مناسبی بین روند کاهشی پس‌لرزه‌ها با قانون اُمّری داشت.^[۱۷]

در پژوهش دیگری که او می^۸ و همکاران (۲۰۱۶) انجام دادند، مشخص شد که بررسی وضعیت تغییرات لرزه‌خیزی پس از رخداد زمین‌لرزه اصلی می‌تواند کمک زیادی به روندیابی و شناسایی پس‌لرزه‌های بزرگ در هر منطقه داشته باشد.^[۱۸] با توجه به این‌که روش ارائه شده به‌وسیله این محققان به تحلیل نقطه‌ای مناطق لرزه‌زمین ساختی پرداخته بود، از این‌رو، برای افزایش دقیقی دقت و کاهش عدم قطعیت در نتایج آن باید به داده‌های کاتالوگ لرزه‌ای دقیقی از زمین‌لرزه‌های گذشته در هر منطقه دسترسی داشت که با وجود پیشرفت‌های اخیر در بحث زمین‌لرزه شناسی و مجهز شدن مناطق مختلف به لرزه‌نگارها هنوز مناطق زیادی از زمین،

-
1. Das
 2. Henry
 3. Zhao
 4. Nishimura
 5. Van Der Elst
 6. Shaw
 7. Thapa
 8. Omi

داده‌های کافی برای استفاده از این روش را ندارند. این مورد در مناطق قاره‌ای که زمین‌لرزه‌های بزرگ، دوره بازگشت طولانی‌تری را نسبت به زمین‌لرزه‌های بین صفحه‌ای سپری می‌کنند، کاربرد کم‌تری دارد [۸] و [۱۹].

در ایران نیز بررسی‌های گستردگای در زمینه بررسی پس‌لرزه‌های زمین‌لرزه‌های مهم ارائه شده که در ادامه به برخی از آنها اشاره می‌شود. ساكت و همکاران (۱۳۸۴) پژوهشی تحلیلی بر مقایسه پس‌لرزه‌های زمین‌لرزه بم (۱۳۸۲) و زرند (۱۳۸۴) در استان کرمان با توجه به نوع گسل مسبب آنها، ارائه کردند [۲۰]. نتایج این پژوهش نشان داد که یکی از عوامل مهم و تأثیرگذار در پراکنده‌گی و بزرگی پس‌لرزه‌ها نوع گسل مسبب زمین‌لرزه اصلی است و این نتایج، تأییدی بر پژوهش‌های قبلی در این زمینه در مناطق مختلف دنیا از جمله پژوهش انجام شده به‌وسیله داس و هنری (۲۰۰۳) و دیگر پژوهش‌های انجام شده است [۱۳].

تارtar و فرهبد (۱۳۸۶) با بررسی روی پس‌لرزه‌های زمین‌لرزه ۱۳۸۳ کجور در شمال ایران و همچنین حاجتی و آقاتابای (۱۳۹۱) در پژوهش دیگری بر توزیع مکانی-زمانی پس‌لرزه‌های زمین‌لرزه سیلانخور در باره شناسایی گسل مسبب زمین‌لرزه بر اساس پس‌لرزه‌های رخ داده در این زمین‌لرزه‌ها اقدام کردند [۲۱] و [۲۲].

اهمیت موضوع مورد بحث

اهمیت بررسی پیش‌لرزه‌ها و پس‌لرزه‌ها در دهه‌های گذشته و بهویژه در کشورهای توسعه نیافته و در حال توسعه که زیرساخت‌های کافی از لحاظ سازه‌ای، طراحی و بررسی‌های دقیق ساختگاهی وجود نداشته، بیشتر از گذشته نمایان شده است. در باره پیش‌لرزه‌ها در چنین کشورهایی به‌دلیل ناپایداری سازه‌ها هشدار لازم برای تخلیه اضطراری یکی از روى‌کردهای مهمی است که با هدف کاهش اثرات ناشی از زمین‌لرزه، نیازی اساسی به حساب می‌آيد. برای نشان دادن اهمیت تحلیل رفتار پس‌لرزه‌ها نیز می‌توان به مثال‌هایی واقعی در این زمینه اشاره نمود. به عنوان نمونه، رخداد قوی‌ترین پس‌لرزه با بزرگی $7/4$ بعد از زمین‌لرزه توهوکو (با بزرگی ۹ در مقیاس بزرگی گشتاوری) در ساحل شرقی ژاپن در سال ۲۰۱۱، منجر به جابه‌جایی سطحی حدود نیم‌متر و ایجاد خسارات شدیدی در منطقه زلزله زده شد [۶]. مشابه همین شرایط خسارت بار در رخداد پس‌لرزه‌های بزرگ زمین‌لرزه ۲۰۱۵ ایتالیا نیز گزارش شد. همچنین رخداد پس‌لرزه‌های مهم زمین‌لرزه مورموری در استان ایلام در سال ۱۳۹۳ و

وقوع پس‌لرزه‌های متعدد ناشی از زمین‌لرزه کاکی در استان بوشهر در سال ۱۳۹۲ نیز نمونه‌های دیگری از این مورد بود که به تشدید خسارات ناشی از زمین‌لرزه اصلی منجر شد [۲۳]. با توجه به موارد ذکر شده، نتایج بررسی اثرات ناشی از پس‌لرزه‌های بزرگ در مناطق مختلف جهان در دهه‌های اخیر، نشان داد که در مدیریت بحران زمین‌لرزه، نه تنها باید بر آمادگی در برابر زمین‌لرزه اصلی تأکید کرد، بلکه باید برای مواجهه با پس‌لرزه‌های بزرگ یک زمین‌لرزه نیز برنامه‌ریزی کرد.

در این مقاله ضمن بررسی لرزه‌زمین‌ساخت و تاریخچه لرزه‌خیزی منطقه بررسی شده زلزله زهان در استان خراسان جنوبی، به پژوهش در باره شناسایی پارامترهای مؤثر در رخداد پیش‌لرزه‌ها و پس‌لرزه‌های این زمین‌لرزه، با هدف تعیین زمان، مکان و بزرگی احتمالی زمین‌لرزه اصلی و پس‌لرزه‌های بزرگ پرداختیم. پارامترهای مؤثر در رخداد پیش‌لرزه‌ها و پس‌لرزه‌ها که شامل توزیع مکانی، نوع گسل، شرایط لرزه‌زمین‌ساختی منطقه و عمق لرزه‌زایی هستند، تأثیر مشخصی در بزرگی، زمان و مکان رخداد زمین‌لرزه اصلی و پس‌لرزه‌های بزرگ داشته که در این پژوهش به صورتی مشخص بررسی شده‌اند. هدف اصلی از ارائه این مقاله و نوآوری آن در مقایسه با مقالات ارائه شده، استفاده کاربردی از پارامترهای مبنایی پیش‌لرزه‌ها و پس‌لرزه‌ها برای تحلیل رفتار آنها است که در تحقیقات دیگر محققان، بهویژه محققان ایرانی، این موضوع کم‌تر مورد بحث قرار گرفته است. ضمن این‌که در این مقاله سعی بر تلفیق کاربردی پارامترهای پیش‌لرزه‌ها و پس‌لرزه‌ها برای استفاده عملیاتی در بحث مدیریت بحران قبل، حین و پس از زمین‌لرزه شده است.

مواد و روش‌ها

پارامترهای لرزه‌خیزی زمین‌لرزه زهان

بررسی زمین‌لرزه زهان به دلیل رخداد آن در یکی از مهم‌ترین پهنه‌های لرزه‌زمین‌ساختی ایران اهمیت زیادی دارد. این زمین‌لرزه در ۱۵ آذر ماه ۱۳۹۱ در ساعت ۲۰:۳۸ به وقت محلی به‌وقوع پیوست. بزرگی این زمین‌لرزه با توجه به گزارش مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران $M=5/6$ در مقیاس بزرگی گنتاوری ($Mw=5/6$) و $5/4$ در مقیاس بزرگی منطقه‌ای ($MI=5/4$) اعلام شد و عمق کانونی ارائه شده برای آن، در ۹ کیلومتری از سطح زمین به ثبت رسید [۲۴]. این مؤسسه، رومکز این زمین‌لرزه را در $59/54$ درجه طول شرقی و $33/50$ درجه

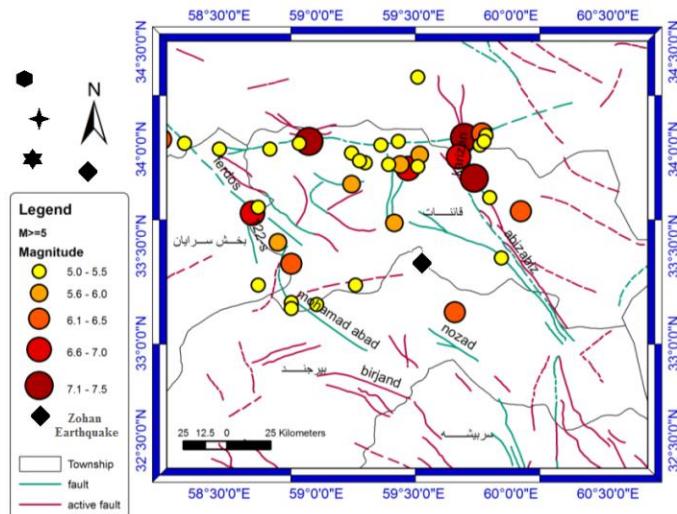
عرض شمالی اعلام کرد. کانون سطحی این زمین لرده در فاصله ۲۵ کیلومتری زهان، ۳۴ کیلومتری آرین شهر و ۴۲ کیلومتری قاین در استان خراسان جنوبی به ثبت رسید. روستای زهان به عنوان نزدیک‌ترین روستا به کانون سطحی زمین لرده اصلی، از توابع شهرستان زیرکوه در استان خراسان جنوبی است. جمعیت این روستا در سال ۱۳۸۵ برابر ۷۰۷ نفر و در سرشماری سال ۱۳۹۵، به میزان ۱۱۱۸ نفر گزارش شده است که این مورد تا حدود زیادی می‌تواند با بازسازی منطقه زلزله‌زده و ایجاد شرایط پایدارتر و مقاوم‌تر برای ادامه حیات در سکونت‌گاه‌های بازسازی شده مرتبط باشد. قدمت تاریخی این روستا به دوران پیش از اسلام بازمی‌گردد و از این‌رو، حفظ آثار باستانی به جای مانده در دوره‌های مختلف تاریخی در این محدوده اهمیت زیادی دارد. با توجه به عمق کانونی کم این زمین لرده و این‌که کانون سطحی آن در نزدیکی مناطق روستایی با سازه‌های نامقاوم واقع شده بود، خسارات شدیدی به مناطق روستایی نزدیک به رومرکر زمین لرده وارد آمد. این زمین لرده ۸ تن کشته و ۲۳ مجروح بر جای گذاشت [۲۵]. زمین لرده بررسی شده، از حوالی زهان تا روستای شیرگ از توابع شهرستان بیرجند و همچنین از طرف نوار مرزی خاور استان خراسان جنوبی تا روستاهای شاهرخت و حاجی‌آباد به شدت احساس شد. ریزش کوه افین و مسدود شدن جاده بمرود پس از زمین لرده از پیامدهای ثانویه ناشی از آن به شمار می‌آید. با توجه به قرارگیری شهرها و روستاهای مختلف در پیرامون رومرکر این زمین لرده، در حدود ۳۰۰۰۰۰ نفر در مناطق اطراف کانون، این زمین لرده را با شدت‌های متفاوتی احساس کردند.

لرده زمین ساخت منطقه بررسی شده

علیرغم لرده‌خیزی زیاد منطقه شرق ایران، هیچ زمین لردهای با بزرگی $5/6$ و بیشتر در شعاع ۵۰ کیلومتری رومرکر آن در ۲۳ سال گذشته رخ نداده و وقوع این زمین لرده می‌تواند نشان از فعالیت مجدد محدوده مورد نظر و مناطق اطراف آن (با توجه به دوره بازگشت کم و بزرگی بالای زمین لردهای گذشته در این منطقه) باشد. لازم به ذکر است منطقه زهان باردیگر در ۳۰ خردادماه ۱۳۹۸ شاهد رخداد زمین لردهای با بزرگی $4/6$ در مقیاس بزرگی منطقه‌ای بود که این زمین لرده نشان از ادامه فعالیت لرده‌خیزی منطقه پس از ۷ سال از رخداد زمین لرده $5/6$ زهان بود.

براساس اعلام مرکز لرده‌نگاری مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، تعداد ۱۸ ایستگاه

لرزه‌نگاری، زمین‌لرزه زهان را ثبت کردند [۲۴]. در شکل ۱، نقشه پراکندگی زمین‌لرزه‌های دستگاهی بزرگ‌تر از ۵ رخ داده در گستره ۱۰۰ کیلومتری رو مرکز زمین‌لرزه به همراه موقعیت رومرکز زمین‌لرزه ۱۵ آذر ۱۳۹۱ زهان (خراسان‌جنوبی) به تصویر کشیده شده است. از نزدیک‌ترین گسل‌های فعال و لرزه‌زا نسبت به رومرکز زمین‌لرزه، می‌توان به گسل دوشاخ اشاره کرد.



شکل ۱. نقشه گسل‌ها و رومرکز زمین‌لرزه‌های با بزرگی ۵ و بیش‌تر در سده اخیر در منطقه بررسی شده به شعاع تقریبی ۱۰۰ کیلومتری از مرکز زمین‌لرزه (منابع داده‌های استفاده شده: پایگاه ملی داده‌های علوم زمین [۱۳۸۴]) [۲۶]

چنان‌که در شکل ۱ مشخص شده است، گسل دوشاخ در قسمت انتهایی (جنوبی) هم روند و به موازات گسل آبیز قابل مشاهده است و شاخه شمالی آن با روند شمال‌غربی از گسل آبیز جدا می‌شود. با توجه به نحوه پراکندگی زمین‌لرزه‌های با بزرگی ۵ و بیش‌تر در شکل ۱ نمی‌توان زمین‌لرزه‌های زیادی را به گسل دوشاخ مرتبط دانست و از این‌رو، اطلاعات کاملی در خصوص رفتار این گسل در دسترس نیست. در عوض طبق شکل و جدول ۱ تعداد زیادی از زمین‌لرزه‌های بزرگ ۵۰ سال اخیر را می‌توان به گسل آبیز که در مجاورت گسل دوشاخ قرار گرفته نسبت داد. گسل آبیز دارای روند شمال باختی-جنوب خاوری است که در بخش کوتاهی از آن روند شمالی-جنوبی است. این ساختار جنباً از شمال به

گسل دشت بیاض و از جنوب به گسل‌های گزیک و آواز می‌پیوندند. گسل آبیز با سازوکار راستالغز راستبر، در خاور رشته کوه‌های سیستان واقع شده است. بیشینه‌جایه‌جایی راستالغز ۲۳۰ سانتی‌متر و بیشینه‌جایه‌جایی عمودی ۹۰ سانتی‌متر در راستای این گسل گزارش شده است. زمین‌لرده ۳۰ ژوئن ۱۹۳۶ آبیز و زمین‌لردهای ۱۴ نوامبر ۱۹۷۹ و ۱۰ می ۱۹۹۷ زیرکوه به‌سبب جنبش این گسل رخ داده‌اند [۲۷]. لازم به ذکر است که زمین‌لرده ۱۰ می ۱۹۹۷ میلادی با بزرگای $Mw=7/2$ ، بزرگ‌ترین زمین‌لرده رخداده در راستای این گسل به‌شمار می‌آید. در زمین‌لرده یاد شده که روی این گسل رخ داد، ۱۲۵ کیلومتر گسیختگی سطحی ایجاد شد که بزرگ‌ترین گسیختگی سطحی حاصل از یک زمین‌لرده در سده‌های اخیر در ایران به‌شمار می‌رود.

تمامی این آمارها نشان از ریسک بالای این محدوده در برابر رخداد زمین‌لردهای بزرگ دارد. گذشته لرده‌خیز این منطقه در استان خراسان جنوبی، نشان از ثبت رویدادهای لردهای تاریخی و دستگاهی مهمی با بزرگای متوسط تا زیاد در این پهنه از خاور ایران زمین است. در جدول ۱ پارامترهای لرده‌خیزی زمین‌لردهای دستگاهی مربوط به سال‌های ۱۳۴۷ تا ۱۳۷۶ این منطقه ارائه شده است. با فرض تعیین دوره بازگشت زمین‌لردهایی با بزرگی ۶ و بیش‌تر برای ۵۰ سال اخیر طبق جدول ۱، بازه زمانی کمتر از ۱۰ سال برای رخداد زمین‌لردها با بزرگی یاد شده برای این منطقه متصور است. با این حال با گذشت بیش از ۲۰ سال از رخداد آخرین زمین‌لرده با بزرگی ۷/۱ در مقیاس بزرگی گشتاوری، این منطقه شاهد وقوع زمین‌لردهای با بزرگی ۶ و بیش‌تر نبوده است. این مورد در کتاب وضعیت کلی منطقه از لحاظ وجود گسل‌های فعال، همچنین قرارگیری آن در پهنه با ریسک بسیار زیاد، بر اساس نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لرده در ایران (مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، ۱۳۹۴) و دیگر اطلاعات ارائه شده در شکل و جدول ۱، نشان از قریب‌الوقوع بودن زمین‌لردهای با بزرگی یاد شده در این منطقه است [۲۸].

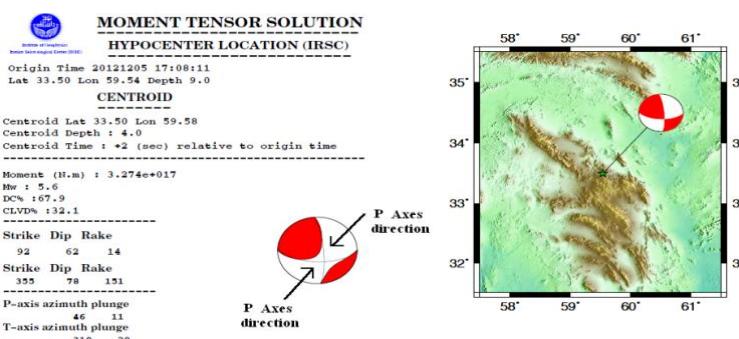
ساز و کار کانونی زمین‌لرده زهان

زمین‌لرده زهان با سازوکار کانونی راستالغز خالص روی گسلی فعال، با روند تقریباً شمال‌غربی-جنوب شرقی و با شیب ۷۸ درجه رخ داد. برای ارائه ساز و کار کانونی این زمین‌لرده از اطلاعات ۱۲ ایستگاه لرده‌نگاری نصب شده به‌وسیله مرکز لرده‌نگاری مؤسسه

جدول ۱. زمین‌لرزه‌های مهم دستگاهی رخداده در خاور ایران (دشت بیاض) از ۱۳۷۶-۱۳۴۷ [۲۹]

نام گسل مسبب زمین‌لرزه	عرض	طول	بزرگی	تاریخ زمین‌لرزه
غرب دشت بیاض	۳۴/۰۵	۵۸/۹۵	۷/۱	۱۳۴۷/۰۷/۰۹
فرودوس	۳۴/۰۷	۵۸/۲۱	۷/۲	۱۳۴۷/۰۷/۱۰
فرودوس	۳۴/۰۳	۵۸/۳۱	۵/۴	۱۳۴۷/۰۷/۱۳
دشت بیاض	۳۳/۹۷	۵۹/۵۳	۵/۶	۱۳۴۷/۰۷/۲۰
قابن	۳۳/۸۳	۵۹/۱۸	۷/۰	۱۳۵۰/۰۸/۱۶
قابن	۳۳/۹۱	۵۹/۴۷	۷/۴	۱۳۵۷/۱۰/۲۶
آبیز	۳۳/۹۶	۵۹/۷۳	۷/۵	۱۳۵۸/۰۸/۲۳
شرق دشت بیاض	۳۴/۰۶	۵۹/۷۶	۷/۱	۱۳۵۸/۰۹/۰۶
آبیز	۳۴/۰۸	۵۹/۸۶	۵/۹	۱۳۵۸/۰۹/۱۶
آبیز	۳۳/۸۱	۵۹/۸۱	۷/۱	۱۳۷۶/۰۲/۲۰
برن آباد	۳۳/۹۱	۵۹/۴۴	۵/۷	۱۳۷۶/۰۴/۰۴

ژئوفیزیک دانشگاه تهران و پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله استفاده شده است. امتداد محور اصلی تنش در این زمین‌لرزه، زاویه‌ای ۴۶ درجه نسبت به شمال داشته و بر این اساس، جهت‌گیری تنش اصلی در این زمین‌لرزه، عمود بر امتداد گسل اصلی نشان داده شده است (شکل ۲). به عبارت دیگر چنان‌که در شکل ۲ قابل مشاهده است، جهت محور تنش اصلی در امتدادی شمال‌شرقی - جنوب‌غربی قرار گرفته است [۲۴].



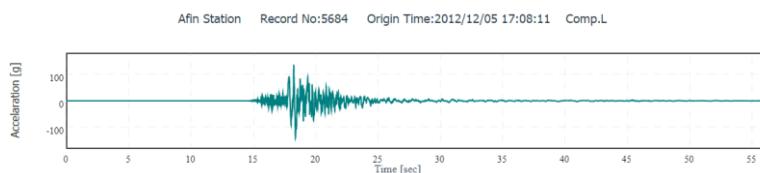
شکل ۲. سازوکار زمین‌لرزه زهان به همراه اطلاعاتی در مورد جهت تنش‌ها در زمین‌لرزه زهان به همراه جهت ارائه شده برای محور اصلی تنش با زاویه ۴۶ درجه براساس تحلیل مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران [۲۴]

با توجه به فعالیت گسل‌های منطقه، راستای گسل فعل شده و انطباق و هم‌خوانی شبی و

امتداد آن با سازوکار کانونی زمین لرزه اصلی و همچنین در نظر گرفتن موقعیت کانون زمین لرزه اصلی با گسل‌های فعال موجود در منطقه، حرکت گسل مسبب این زمین لرزه را می‌توان به گسل دوشاخ نسبت داد که بخش انتهایی آن به موازات بخش بالایی گسل آبیز قرار گرفته است و به عنوان بخش گسلی تحریک شده جدیدی در اثر فعالیت متعدد گسل آبیز در دهه‌های گذشته به حساب می‌آید.

تاریخچه زمانی شتاب‌نگاشت زمین لرزه زهان

اطلاعات برداشت شده از نزدیک‌ترین شتاب‌نگاشت، در منطقه افین با فاصله ۲۰ کیلومتری شمال شرق کانون سطحی زمین لرزه اصلی (شکل ۳)، نشان از این نکته دارد که دوام موج در این زمین لرزه از زمان شروع تا پایان، حدود ۱۰ ثانیه و حداقل شتاب ایجاد شده در این زمین لرزه حداقل $15/0$ سانتی‌متر بر مجدور ثانیه بوده است. ضمن این‌که نگاشت ارائه شده در این شکل حاکی از آن است که این زمین لرزه تنها یک پیک شتابی مشخص و آن هم در یک زمان محدود را شامل شده، اما با این حال بهدلیل عدم استحکام سازه‌های روستایی و نزدیکی سازه‌های خشت و گلی تقویت نشده به کانون سطحی زمین لرزه اصلی، آمار خرابی‌ها در محدوده رومرکز زمین لرزه، قابل توجه بوده است.



شکل ۳. تاریخچه زمانی نزدیک‌ترین شتاب‌نگاشت به کانون زمین لرزه اصلی [۳۰]

پیش‌لرزه‌های زمین لرزه زهان

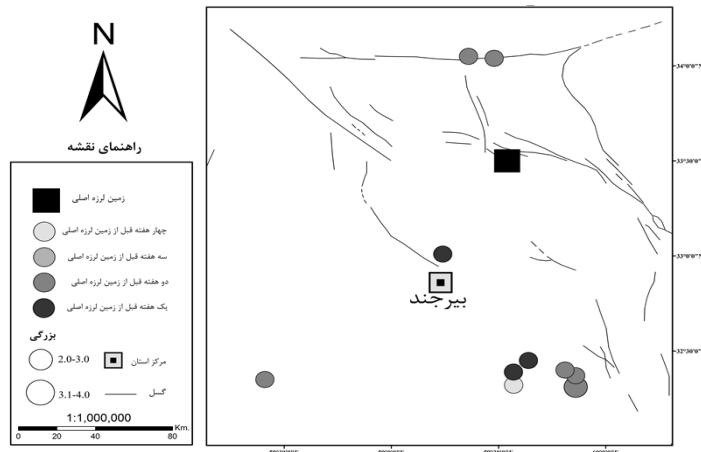
تغییرات لرزه‌خیزی ماهانه قبل از رخداد زمین لرزه اصلی، می‌تواند به عنوان یک پیش‌نشانگر برای بررسی احتمال رخداد زمین لرزه اصلی استفاده شود. چنان‌که در پیشینه پژوهش مطرح شد، بررسی‌های انجامشده در مناطق مختلف جهان از جمله کاتو^۱ و همکاران (۲۰۱۲)، جونز^۲ (۱۹۸۴)، و میناداکیس و پاپادوپولوس (۲۰۱۶)، به ترتیب در ساحل شرقی ژاپن، گسل سان اندریاس و زون فرورانشی شیلی و دیگر پژوهش‌ها در این زمینه حاکی از وجود

1. Kato
2. Jones

الگوهای مشخصی قبل از رخداد زمین‌لرزه اصلی در مناطق زلزله زده است [۷، ۸، ۶]. این الگوها به تغییرات بزرگی، مکان و زمان رخداد پیش‌لرزه‌ها برمی‌گردد. به عنوان نمونه برای بیش‌تر زمین‌لرزه‌ها الگوی تغییرات مکانی پیش‌لرزه‌ها به صورتی است که محدوده بزرگ‌تری را تحت تأثیر تغییرات قبل از زمین‌لرزه اصلی و پهنه درگیر با آن نشان می‌دهد [۳۱]. در زمین‌لرزه زهان در استان خراسان جنوبی که مورد بحث این پژوهش قرار گرفته است، طبق شکل ۴، الگوی ترتیب رخداد، پراکندگی و موقعیت قرارگیری پیش‌لرزه‌ها به صورتی است که بخش بزرگی از پهنه تحت تأثیر زمین‌لرزه اصلی را در برگرفته و با نزدیک شدن به زمان رخداد زمین‌لرزه اصلی تمرکز پیش‌لرزه‌ها در فاصله نسبتاً کم‌تری از رومرکز زمین‌لرزه اصلی قرار گرفته است. چنین شرایطی به دلیل نیاز به سست شدگی پوسته در پهنه‌ای بزرگ‌تر از لحاظ تنفس اعمال شده و ایجاد فضای لازم برای حرکت گسل در پهنه دربرگیرنده گسیختگی ناشی از گسلش اصلی به وجود می‌آید، از این‌رو، در ابتدا پراکنش پیش‌لرزه‌ها در پهنه بزرگ‌تری رخ می‌دهد و با نزدیک شدن به زمان زمین‌لرزه اصلی این پهنه متتمرکزتر و در محدوده گسیختگی گسلش اصلی قرار می‌گیرد [۳].

چنان‌که ذکر شد، بررسی دوره زمانی رخداد پیش‌لرزه‌ها نیز از جمله مواردی است که در پیش‌بینی زمان رخداد زمین‌لرزه اصلی، نقش مهمی را ایفا می‌کند [۷]. بر این اساس ایده بررسی و تحلیل تغییرات لرزه‌خیزی در دو دوره زمانی چندماهه و هفتگی قبل از رخداد زمین‌لرزه اصلی در این بخش از پژوهش استفاده شده است. تحلیل حاصل برای شناسایی الگوی تغییرات ماهانه و هفتگی پیش‌لرزه‌ها قبل از رخداد زمین‌لرزه اصلی حاکی از افزایش نسبی فراوانی آنها تا چند ماه قبل از رخداد زمین‌لرزه اصلی به دلیل افزایش تنفس در منطقه برای محبی شدن شرایط، جهت رخداد زمین‌لرزه اصلی است. هم‌چنین، به دنبال آن، کاهش تدریجی فراوانی زمین‌لرزه‌ها در ۱ تا ۳ ماه مانده به رخداد زمین‌لرزه اصلی که به دلیل تجمع و ذخیره تنفس برای رخداد آن بوده است، از جمله مواردی است که در محدوده منطقه زلزله‌زده زهان برداشت شد. جدول ۲ تغییرات فراوانی زمین‌لرزه‌ها در ماه‌های متنهی به رخداد زمین‌لرزه زهان را نشان می‌دهد که با موارد یاد شده در بالا منطبق است.

در بحث تغییرات لرزه‌خیزی هفتگی نیز چنین شرایطی قبل از رخداد زمین‌لرزه زهان هم از لحاظ تعداد رخداد پیش‌لرزه‌ها و هم از لحاظ بزرگی پیش‌لرزه‌ها قابل مشاهده است. در جدول ۳ تغییرات فراوانی و بزرگی پیش‌لرزه‌ها نشان داده شده است.



شکل ۴. توزیع پیش لرزه‌های زمین لرزه زهان در شاعع ۱۰۰ کیلومتری از کانون زمین لرزه اصلی، به تفکیک هفتنه‌های مانده به رخداد آن

جدول ۲. تغییرات فراوانی زمین لرزه‌ها به تفکیک بزرگی از ۶ ماه مانده به رخداد زمین لرزه اصلی زهان

تعداد ماه مانده به رخداد زمین لرزه اصلی	تعداد کل زمین لرزه‌ها	زمین لرزه‌ها با بزرگی ۲-۲/۹	زمین لرزه‌ها با بزرگی ۳-۳/۹	زمین لرزه‌ها با بزرگی ۴-۴/۹	زمین لرزه‌ها با بزرگی ۵-۵/۹
۶	۴	۴	۰	۰	۰
۵	۳	۳	۰	۰	۰
۴	۶	۵	۱	۱	۰
۳	۱۳	۸	۴	۰	۱
۲	۱۱	۸	۲	۱	۰
۱	۴	۳	۱	۰	۰

جدول ۳. تغییرات فراوانی و بزرگی پیش لرزه‌ها از ۶ هفته مانده به رخداد زمین لرزه اصلی زهان، میزان رنگ مشخص شده متناسب با فراوانی پیش لرزه‌ها در نظر گرفته شده است

تعداد هفتنه مانده به رخداد زمین لرزه اصلی	تعداد پیش لرزه‌ها با بزرگی (M≥2.5) در شاعع ۱۰۰ کیلومتری از کانون زمین لرزه اصلی	تعداد پیش لرزه‌ها با بزرگی (M≥2.5) در شاعع ۱۰۰ کیلومتری از کانون زمین لرزه اصلی
۶	۰	۰
۵	۱	۱
۴	۱	۰
۳	۲	۰
۲	۵	۳
۱	۲	۰

تحلیل انجام شده در باره بررسی الگوی پیش‌لرزه‌ها در زمین‌لرزه زهان نیز حاکی از افزایش و کاهش هماهنگ تغییرات فراوانی کلی پیش‌لرزه‌ها و تعداد پیش‌لرزه‌ها با بزرگی بیش‌تر به ترتیب در ستون دوم و سوم جدول ۳ است که با رنگ تیره‌تر نشان داده شده‌اند. نتایج این تحلیل برای ارائه الگوهای فراوانی و بزرگی پیش‌لرزه‌ها، قابل توجه بوده است و اهمیت خاصی دارد. همه موارد یاد شده در این بخش حاکی از این نکته است که وضعیت و موقعیت مکانی پیش‌لرزه‌ها و هم‌چنین تغییرات فراوانی زمین‌لرزه‌ها در ماههای متنه‌ی به رخداد زمین‌لرزه اصلی در هفته‌های قبل از وقوع آن از الگویی مشخص و هدفمندی تعیین می‌کند. بر این اساس، با اثبات موارد مشابه در پهنه‌های مختلف ایران و دیگر مناطق جهان می‌توان از این تغییرات به عنوان نشان‌گرهایی قبل از رخداد زمین‌لرزه اصلی بهره گرفت.

پس‌لرزه‌های زمین‌لرزه زهان

در این بخش به بررسی و تحلیل انجام شده روی داده‌های مربوط به این زمین‌لرزه پرداخته شده است. بررسی اولیه پس‌لرزه‌های زمین‌لرزه زهان نشان از آن دارد که بزرگ‌ترین پس‌لرزه قابل توجه برای این زمین‌لرزه با بزرگی $3/9$ به ثبت رسیده است. اختلاف بزرگ‌ترین پس‌لرزه با زمین‌لرزه اصلی از جمله مواردی است که به عنوان عاملی اثرگذار در تشديد خرابی‌ها مورد توجه قرار می‌گیرد. زیرا رخداد پس‌لرزه‌های بزرگ، ساختمان‌های تضعیف شده در اثر رخداد زمین‌لرزه اصلی را با مشکل اساسی و احتمال زیادی از تخریب مواجه می‌کند. به عنوان نمونه پس‌لرزه‌های بزرگ ناشی از زمین‌لرزه‌های متعدد سال‌های گذشته ایران از جمله زمین‌لرزه‌های مورموری در استان ایلام (مردادماه ۱۳۹۳)، کاکی در استان بوشهر (اردیبهشت ماه ۱۳۹۲)، گوهران در استان هرمزگان (اردیبهشت ماه ۱۳۹۲)، سفید سنگ در استان خراسان رضوی (فروردین ۱۳۹۶) و غیره، که به تشديد خرابی‌های ناشی از سازه‌های تضعیف شده در اثر پس‌لرزه‌های بزرگ و حتی جان باختن یا زخمی شدن تعدادی از افراد ساکن در مناطق تحت تاثیر پس‌لرزه‌ها منجر شده، نشان از اهمیت زیاد تحلیل دقیق پس‌لرزه‌ها و احتمال زیاد تأثیرگذاری چنین شرایطی در تمامی پهنه‌های لرزه‌خیز در ایران بهویژه منطقه زلزله‌زده بحث شده دارد [۲۳] و [۳۲]. در بررسی‌هایی که در این زمینه به‌وسیله برخی محققان انجام شد [۱۳] و [۳۳]، مشخص شد که پس‌لرزه‌های بزرگ در زمین‌لرزه‌ها با گسل مسبب معکوس اهمیت و بزرگی نسبی بیش‌تری در مقایسه با

زمین لرزه‌ها با گسل مسبب امتداد لغز و نرمال دارند. داده‌های ارائه شده در این خصوص برای زمین لرزه‌هایی با گسل‌های متعدد (از لحاظ نوع گسل مسبب) مانند: زمین لرزه بهم در استان کرمان (۱۳۸۲) با گسل مسبب امتدادلغز، زمین لرزه سراوان در استان سیستان و بلوچستان (۱۳۹۲) با گسل مسبب نرمال، زمین لرزه مورموری در استان ایلام (۱۳۹۳) با گسل مسبب معکوس و بسیاری از زمین لرزه‌های رخ داده در کشورهای دیگر از جمله زمین لرزه کوبه در ژاپن (۱۹۹۵)، زمین لرزه سیچوان در کشور چین (۲۰۰۸) و غیره، نشان از صحت این ادعا دارد [۲۳].

بر این اساس و با توجه به اهمیت رخداد پس لرزه‌های بزرگ، با ارائه تحلیل‌های کاربردی در این زمینه و بررسی‌های متصرکز می‌توان به نتایج مهمی دست یافت. به عنوان مثال در خصوص تنش آزاد شده در محل گسل، پس از رخداد زمین لرزه اصلی، در این زمینه می‌توان با تلفیق اطلاعات علمی موجود و تحلیل درست آنها به مکان‌یابی دقیق‌تری در زمینه شناسایی مناطق با خطر زیاد برای رخداد پس لرزه‌های بزرگ رسید. در این مبحث نیز پژوهش‌های گسترده‌ای انجام شده است که در ادامه به آن پرداخته شده است.

تنش آزاد شده روی سطح گسل هنگام وقوع زمین لرزه با عنوان "تئوری انتقال تنش" در نواحی اطراف کانون سطحی زمین لرزه شناخته می‌شود [۳۴] و [۳۵]. بر اساس این تئوری، تنش یاد شده در نتیجه وقوع زمین لرزه، موجب افزایش یا کاهش تنش برشی و نرمال در گسل‌های نواحی اطراف محدوده گسیختگی می‌شود. بر این اساس هم‌چنین برخی محققان از جمله دوریس^۱ و همکاران (۲۰۱۸) به بررسی مدل‌های مختلف در شناسایی توزیع مکانی پس لرزه‌ها اقدام کردند [۳۶].

محاسبه این تغییرات تنش، برای تعیین توزیع مکانی پس لرزه‌ها و دیگر زمین لرزه‌های بزرگ در منطقه استفاده می‌شود و مدل‌های مختلفی برای این محاسبات ارائه شده که از مهم‌ترین این مدل‌ها می‌توان به مدل تغییرات تنش کلمب اشاره کرد [۳۷]. این مدل با استفاده از رابطه (۱) بیان می‌شود:

$$\Delta\sigma_f(\Delta CFS) = \Delta T + \mu(\Delta\sigma_n + AP) \quad (1)$$

که در این فرمول $\Delta\sigma_f$ ، تغییر تنش گسیختگی ایجاد شده به وسیله گسل مرتع روی گسل

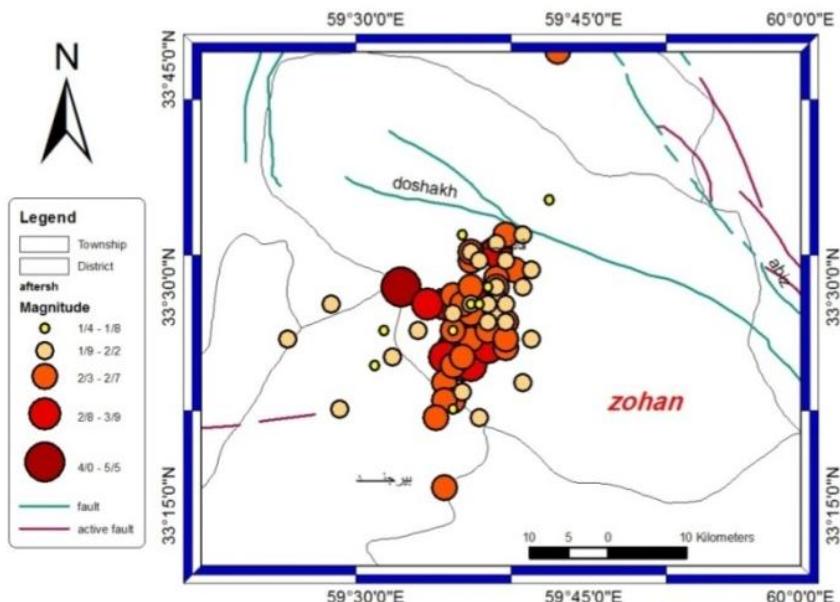
1. Devries

گیرنده، ΔT ، تغییر تنش بر Shi در جهت لغزش، ΔP ، تغییر فشار منفذی در زون گسلی، M ، ضریب اصطکاک داخلی و $\Delta \sigma_n$ ، تغییرات تنش قائم را نشان می‌دهند. بررسی‌های انجام شده در این پژوهش حاکی از الگوی ساده‌تری است که می‌توان بر اساس آن، توزیع احتمالی پس‌لرزه‌ها را از لحاظ مکانی مشخص کرد. نتایج پژوهش حاضر و بررسی زمین‌لرزه‌های دیگر در مناطق مختلف ایران و جهان نشان می‌دهد که معمولاً جهت‌گیری پس‌لرزه‌ها در امتداد محور اعمال تنش اصلی حداقل ایجاد شده در زمین لرزه (σ_1) است که این امتداد در دقایق اولیه پس از زمین‌لرزه و با مشخص شدن سازوکار کانونی آن قابل تعیین است و کمک زیادی به مکان‌یابی رخداد پس‌لرزه‌های بزرگ احتمالی می‌کند که یکی از رویکردهای مهم در استفاده عملیاتی درباره بهره‌گیری از اطلاعات اولیه در هر منطقه برای مدیریت اثرات ثانویه هر زمین‌لرزه بهویژه پس‌لرزه‌های به حساب می‌آید که یکی از اهداف مهم این مقاله بررسی و صحت سنجی این موضوع است.

در زمین‌لرزه زهان، با توجه به انطباق محور تنش اصلی (شکل ۲) و توزیع مکانی پس‌لرزه‌ها (شکل ۵) می‌توان صحت نتایج ارائه شده در این باره را برای این زمین‌لرزه تأیید کرد. داده‌های استفاده شده در شکل ۵ برگرفته از کاتالوگ زمین‌لرزه‌های ایران است که به‌وسیله مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران ارائه شده است.

بر این اساس، اگر پراکندگی پس‌لرزه‌های اصلی زمین‌لرزه زهان (شکل ۵) با جهت محور تنش اصلی (شکل ۲) مقایسه شود، هم خوانی مشخصی بین پراکندگی آنها و جهت تنش اصلی حداقل (هر دو با جهت‌گیری شمالی شرقی-جنوب غربی) نشان می‌دهد. چنان‌که ذکر شد و بر اساس نتیجه پژوهش یاد شده، علت این انطباق را می‌توان هم خوانی معمول بین حداقل جابه‌جایی‌های ایجاد شده در اثر رخداد زمین‌لرزه با محور تنش اصلی حداقل (σ_1) دانست. از آن‌جاکه این انطباق کمک زیادی به پیش‌بینی مکانی پس‌لرزه‌های بزرگ، کاهش ریسک و اثرات ناشی از پیامدهای آنها در مناطق تحت تأثیر بحران می‌کند، روشی کاربردی و اثربخش برای شناخت بهتر وضعیت منطقه زلزله زده به‌شمار می‌آید. به‌طوری‌که می‌توان با مدیریت صحیح و تعیین فاصله از محور تنش اصلی در منطقه زلزله زده، محل مناسبی برای اسکان اضطراری بازماندگان در آن مناطق در نظر گرفت تا کمتر، تحت تأثیر پیامدهای ناشی از

مخاطرات ثانویه زمین لرزه از جمله ریسک رخداد پس لرزه‌های بزرگ قرار گیرند.



شکل ۵. پراکندگی رومرکز زمین لرزه اصلی و پس لرزه‌ها در زمین لرزه ۱۵ آذر ۱۳۹۱ زهان

از تحلیل پس لرزه‌های این زمین لرزه نتایج مهم دیگری نیز احصاء می‌شود. از جمله این که فاصله مشخصی بین محل رومرکز زمین لرزه اصلی و پس لرزه‌ها وجود دارد، این مورد در بسیاری از زمین لرزه‌ها با گسل مسبب امتداد لغز رخ می‌دهد. به عقیده برخی از محققان (واندرالس^۱ و شاو^۲، ۲۰۱۵ و داس^۳ و شولدز^۴، ۱۹۸۱) [۱۶] و [۳۸]، این فرایند حاصل افزایش تنش برپی به سمت خارج از گسیختگی است. البته بررسی انجام شده در زمینه مربوطه در این پژوهش حاکی از این نکته است که می‌توان دلیل دیگری نیز برای این مورد متصور شد و آن، نوع حرکت، در گسل امتداد لغز بر خلاف گسل‌های شیب لغز است که روندی دورشونده از مرکز مه لرزه‌ای دارد و پس از رخداد زمین لرزه اصلی، تنش باقی‌مانده را

1. Van Der Elst

2. Shaw

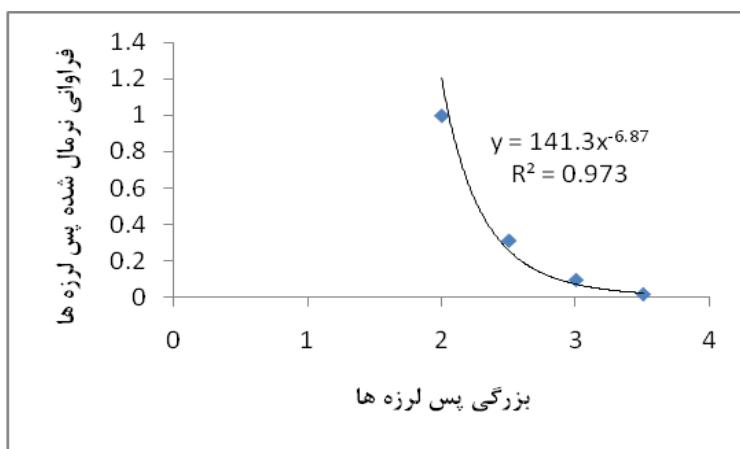
3. Das

4. Scholds

در طول و به قسمت‌های انتهایی گسل منتقل می‌کند.

بر اساس نتایج به دست آمده از پژوهش‌های برخی محققان (تاپا^۱ و همکاران، ۲۰۱۸؛ مندل^۲ و رستوگی^۳؛ ۲۰۰۵؛ شرباکوف^۴ و همکاران، ۲۰۰۵)، در این تحقیق از نمودار گوتنبرگ-ریشر برای تحلیل پس‌لرزه‌ها استفاده شده است [۱۷]، [۳۹] و [۴۰]. این تحلیل با هدف پیش‌بینی ادامه روند پس‌لرزه‌ها در منطقه رومکر زمین لرزه و احتمال شدن گسل‌های مناطق اطراف انجام می‌شود. بر این اساس در شکل ۶، نتیجه تحلیل نمودار گوتنبرگ-ریشر مربوط به پس‌لرزه‌های بزرگ در این منطقه است، ارائه شده است. شبیه زیاد و ضریب منفی در رخداد پس‌لرزه‌های بزرگ در این منطقه است، ارائه شده است. شبیه زیاد و ضریب منفی در نمودار گوتنبرگ ریشر در شکل ۶، نشان از تخلیه حداکثر انرژی به وسیله رخداد زمین‌لرزه اصلی و سطح پایین تنش باقی‌مانده برای رخداد پس‌لرزه‌ها است.

با نگاهی به شکل ۵ و انطباق جهت تنش اصلی حداکثر (در شکل ۲) می‌توان چنین تحلیل کرد که چون هیچ گسل فعالی در راستای آزاد شدن تنش اصلی حداکثر در این زمین لرزه وجود نداشته، تنش یاد شده نتوانسته روی گسل‌های منطقه اثر القاکننده مشخصی داشته باشد.



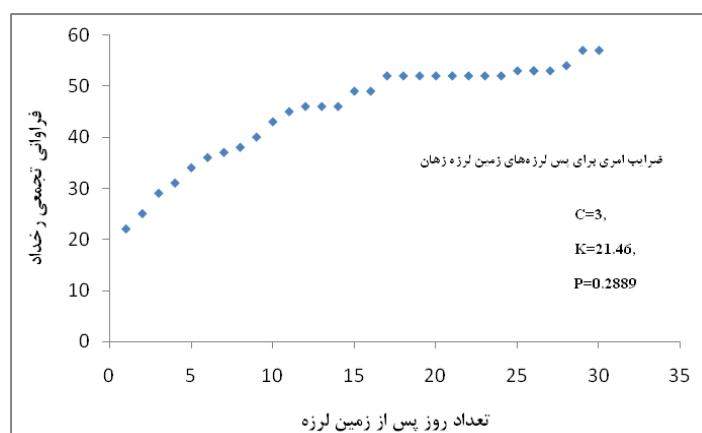
شکل ۶. نمودار گوتنبرگ-ریشر پس‌لرزه‌های زمین‌لرزه ۱۳۹۱ زهان

-
1. Thapa
 2. Mandal
 3. Rastogi
 4. Shcherbakov

در شکل ۷، روند نسبی کاهش شبیب فراوانی تجمعی پس لرزه‌ها نشان داده شده است. این مورد بر طبق قانون اُمری- آتسو^۱ (۱۹۷۰)، برای همه زمین لرزه‌های بزرگ و پس لرزه‌های آنها قابل تأیید است [۴۱]. به طور معمول و برای زمین لرزه‌های مختلف، کاهش شبیب نمودار تا نزدیک به صفر درجه، نشان‌دهنده آرام شدن منطقه از نظر رخداد پس لرزه‌ها و بازگشت منطقه به آرامش از لحاظ لرزه زمین ساختی است. چنین شرایطی را می‌توان تا حدود زیادی در بخش انتهایی نمودار تجمعی پس لرزه‌ها برای زمین لرزه زهان در شکل ۷ نیز مشاهده کرد. فرمول به دست آمده در قانون اُمری که به وسیله آتسو تصحیح شد بدین شرح قابل ارائه است

$$N(t)=K/(t+n)^p \quad (2)$$

در این رابطه $N(t)$ نرخ کاهندگی پس لرزه‌ها در یک توالی، K ، پارامتر متناسب با تعداد پس لرزه‌ها در توالی مربوطه، n ، زمان سپری شده از زمین لرزه اصلی، t ، مشخصه زمانی توالی پس لرزه‌ها و p ، نرخ کاهندگی آنها را نشان می‌دهد. در شکل ۷ ضرایب مهم این فرمول برای زمین لرزه زهان در نمودار ارائه شده است.



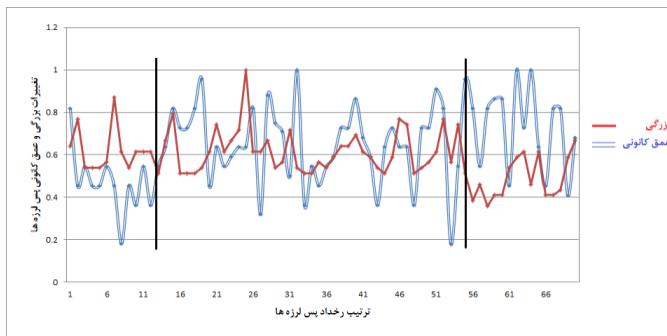
شکل ۷. نمودار تجمعی اُمری برای پس لرزه‌های زمین لرزه زهان

هم‌چنین تأکید بر این نکته لازم است که قسمت زیادی از انرژی، در روز ابتدایی بعد از رخداد زمین لرزه اصلی تخلیه شده است و این ادعا بر اساس اختلاف سطح تعداد پس لرزه‌ها

1. Utsu

در مقایسه روز اول و روزهای بعدی پس از رخداد زمین‌لرزه کاملاً مشخص است. به طور معمول در مناطقی با گسل مسبب امتداد لغز که پیچیدگی زمین‌ساختی مشخصی وجود نداشته باشد، این افت در فراوانی و بزرگی پس‌لرزه‌ها در روزهای اول پس از رخداد زمین‌لرزه اصلی گزارش شده است. این مورد به ویژه برای زمین‌لرزه‌های اصلی با بزرگی کمتر از ۶ در گسل‌های مسبب امتدادلغز عمومیت نسبی بیشتری دارد [۲۰].

در شکل ۸، ارتباط تغییرات بزرگی به عمق پس‌لرزه‌ها، میزان ریسک ناشی از رخداد آنها را نشان می‌دهد. به عنوان مثال پس‌لرزه‌های با بزرگی بیشتر و عمق کمتر می‌توانند ریسک ناشی از اثرات ثانویه مربوط به زمین‌لرزه را تشدید کنند. قسمت تفکیک شده میانی شکل ۸ نشان از هماهنگی و رابطه مستقیم تغییرات بزرگی و عمق دارد که با توجه به این هم‌خوانی، پس‌لرزه‌های رخداده در این محدوده با خطر کمتری منطقه زلزله‌زده را تحت تأثیر قرار می‌دهند. برای مقایسه دقیق‌تر و ملموس‌تر دو پارامتر عمق کانونی و بزرگی پس‌لرزه‌ها، مقدار هر دسته، به بزرگترین عدد موجود در داده‌های هر پارامتر تقسیم شده تا مقایسه مربوط در شرایط یکسان و اصطلاحاً با داده‌های نرمال شده انجام شود. نرمال‌سازی داده‌ها به طور معمول در موقعی استفاده می‌شود که هدف از بررسی آماری، مقایسه دو پارامتر در شرایط یک‌نواخت باشد. با نرمال‌سازی داده‌ها، خروجی مربوط به هر پارامتر به صورت بی‌بعد در آمده و در یک بازه مشخصی (به طور مثال و در این مقاله ۰ تا ۱) مقایسه می‌شوند. با توجه به شکل ۸، پس‌لرزه‌های با بزرگی زیاد و عمق کانونی کم که بتوانند اثر مشخصی روی مناطق زلزله‌زده بگذارند، مشاهده نمی‌شود.



شکل ۸. تغییرات بزرگی و عمق پس‌لرزه‌ها به صورت نرمالیزه شده برای بررسی میزان خطر ناشی از رخداد پس‌لرزه‌ها

همچنین چنان‌که در بخش‌های قبل ذکر شد یکی از اثرات مهم پس لرزه‌ها که باعث تشدید خرابی‌های ناشی از زمین‌لرزه و اثرات ثانویه آن شده، رخداد پس لرزه‌های بزرگ است. بر این اساس پیش‌بینی زمان رخداد پس لرزه‌های بزرگ اهمیت بسیاری پیدا می‌کند. یکی از نظریه‌های مهمی که کمک زیادی به پیش‌بینی پس لرزه‌های بزرگ کرده است، استفاده از نظریه سکون لرزه‌ای است. این نظریه مبتنی بر افزایش زمان برای رخداد پس لرزه‌های بزرگ نسبت به پس لرزه‌های کوچک است.

بر اساس نظریه مذکور، چنان‌که برای رخداد زمین‌لرزه‌های بزرگ در یک منطقه نیاز به تجمع انرژی بیش‌تری در مقایسه با رخداد زمین‌لرزه‌های کوچک‌تر است، برای رخداد پس لرزه‌های بزرگ نیز نسبت به پس لرزه‌های کوچک همین شرایط برقرار است، از این‌رو، می‌توان از این مورد برای پیش‌بینی زمان رخداد پس لرزه‌های بزرگ استفاده کرد [۴۲، [۴۳، [۴۴]. چنین شرایطی برای بزرگ‌ترین پس لرزه زمین‌لرزه زهان ($M=3/9$) براساس جدول ۲ نشان داده شده است. این مورد تأییدی دیگر بر نظریه ارائه شده در این باره، برای پیش‌بینی زمان رخداد پس لرزه‌های بزرگ است. چنان‌که در ردیف ۴ جدول نشان داده شده، انطباق مشخصی بین فاصله زمانی (سکون لرزه‌ای) بین پس لرزه‌های بزرگ‌تر ($M \geq 3$) و اندازه بزرگی آنها وجود دارد که می‌تواند در پیش‌بینی زمان رخداد پس لرزه‌های بزرگ یک زمین لرزه، به شکلی بسیار کاربردی استفاده شود.

جدول ۴. انطباق فاصله زمانی و بزرگی بین پس لرزه‌های با $M \geq 3$ در زمین‌لرزه زهان به‌ویژه در باره بزرگ‌ترین پس لرزه

ردیف	تاریخ و زمان رخداد پس لرزه	پس لرزه	هزارگی (بر حسب دقیقه)	زمان سکون لرزه‌ای برای هر پس لرزه
۱	۱۳۹۱/۰۹/۱۵ ۲۰:۵۱:۰۳	۳/۰		۱۳
۲	۱۳۹۱/۰۹/۱۵ ۲۱:۲۷:۰۳	۲/۴		۳۶
۳	۱۳۹۱/۰۹/۱۶ ۰۰:۰۸:۰۹	۳/۱		۱۶۱
۴	۱۳۹۱/۰۹/۱۸ ۱۷:۱۴:۱۹	۳/۹		۳۹۰۶

برای تعیین میزان انطباق تغییرات داده‌های بزرگی مربوط به پس لرزه‌های متوسط و بزرگ

و فاصله زمانی (سکون لرזה‌ای) بین رخداد هریک از آنها، از روش آماری همبستگی پیرسون^۱ استفاده شده است. دلیل استفاده از این روش آماری، دقت زیاد آن در تعیین میزان همبستگی داده‌های دو پارامتر و شناسایی میزان قطعیت استفاده از این روش برای پیش‌بینی پس‌لرזה‌های بزرگ در زمین‌لرזה‌های رخ داده در مناطق و شرایطی مشابه با این زمین‌لرזה و تعمیم کلیت روش ارزیابی شده برای مناطق دیگر با شرایط لرזה زمین‌ساختی متفاوت است. ضمن این‌که در این روش تمامی تغییرات دو پارامتر نسبت بهم برآورده شده و در خروجی بهدست آمده با عددی کاملاً واقعی از نسبت تغییرات دو پارامتر مواجه هستیم. به طور خلاصه با این روش می‌توان به میزان انطباق دو دسته از پارامترهایی که تغییرات آنها با هم مقایسه می‌شوند و میزان نزدیکی این تغییرات پی برد [۴۵]. لازم به ذکر است پژوهش‌های مشابهی در حوزه بررسی پارامترهای لرזה‌ای از این روش استفاده کرده‌اند [۳۵]. برای چنین فرایندی داده‌های هر دو پارامتر به صورت متقابل چنان‌که در جدول ۴ ارائه شده است، دو بهدو (در هر ردیف) با هم مقایسه شده‌اند و نسبت تغییرات تمامی ردیف‌ها در شرایط یکسان محاسبه شده و در نهایت مجموع میزان تغییرات دو پارامتر (در این‌جا تغییرات بزرگی و فاصله زمانی بین رخداد دو پس لرזה بزرگ و متوسط) نسبت به تعداد پارامترها و انحراف معیار کل محاسبه می‌شود و میزان همبستگی این دو پارامتر به‌دست می‌آید. در این بخش از تحقیق برای محاسبه همبستگی پیرسون از بخش آمار کاربردی نرم‌افزار اکسل استفاده شده است و روش برآورده این فرایند به‌وسیله معادله (۳) قابل محاسبه است:

$$R = \sum_i (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y}) / (n - 1)S_x S_y \quad (3)$$

جایی که X ، Y و S_x ، S_y به ترتیب میانگین نمونه‌ها و انحراف معیار مربوط به دو پارامتر هستند و R عددی است بین صفر تا یک و نشان‌گر میزان انطباق دو پارامتر با هم. براساس فرمول ارائه شده و محاسبه انجام شده همبستگی پیرسون برای دو پارامتر بزرگی و فاصله زمانی پس‌لرזה‌های متوسط و بزرگ عددی معادل 0.9048 که به یک نزدیک بوده و نشان از انطباق زیاد و نزدیکی تغییرات دو پارامتر بررسی شده نسبت بهم دارد. بر اساس این روش و در صورت بررسی نتایج حاصل در مناطق مختلف ایران و جهان می‌توان به بررسی انطباق بین دو پارامتر یاد شده براساس ویژگی‌های زمین‌شناسی از جمله تنوع

1. Pearson Correlation

پنهنه‌های زمین‌ساختی، نوع گسل‌ها و عوامل دیگر و ارتباط احتمالی آنها با پارامترهای یاد شده پی برد تا از این طریق بتوان برای مناطق با شرایط لرزه زمین‌ساختی متنوع، الگوی متناسبی براساس میزان انطباق مربوط ارائه کرد.

لازم به توضیح است تا ابتدای این فاز روش تحلیل بر مبنای همبستگی سکون لرزه‌ای و بزرگی پس‌لرزه‌ها بود و براین اساس مشخص شد با افزایش سکون لرزه‌ای، بزرگی پس‌لرزه افزایش می‌یابد. با این حال زمان دقیقی برای رخداد پس‌لرزه‌های بزرگ‌تر مشخص نشد. به عنوان مثال برای پس‌لرزه‌های زمین‌لرزه زهان چنان‌که در ردیف ۴ از جدول ۲ مشخص شده پس از رخداد پس‌لرزه با بزرگی ۳/۱ در ساعت ۰۰:۰۸ بامداد روز ۱۶ آذرماه، بیش از ۷۲ ساعت، شاهد رخداد هیچ پس‌لرزه‌ای با بزرگی ۳ و بیش‌تر نبودیم. این در حالی است که فاصله زمانی پس‌لرزه یاد شده با پس‌لرزه قبلی آن، حدود ۲/۵ ساعت بوده است. از این‌رو، برای پیش‌بینی زمان نزدیک‌تر و کوتاه‌تر از ۷۲ ساعت به رخداد پس‌لرزه بزرگ در چنین شرایطی، نیاز به روشی تکمیلی در تحلیل داده‌ها است، ضمن این‌که با تعیین زمان دقیق‌تر برای بزرگ‌ترین پس‌لرزه، جامعه آسیب دیده با تنش روانی کم‌تری که ناشی از احتمال رخداد پس‌لرزه‌های بزرگ است مواجه می‌شود. براساس پژوهش‌های انجام شده در این زمینه، چند مدل آماری از جمله مدل مارکوف و مدل سری زمانی بررسی شدند. مدل مارکوف با وجود مناسب بودن برای استفاده درباره توصیف یک توالی برای رویدادهای احتمالی به‌دلیل این‌که فرایندی تصادفی بدون حافظه است بدين معنی که توزیع احتمال شرطی حالت بعد تنها به حالت فعلی بستگی دارد و مستقل از گذشته است؛ به عبارت دیگر برای بررسی پس‌لرزه‌ها تمرکز روی ویژگی‌های آخرین پس‌لرزه رخ داده است و از آن‌جاکه در تحلیل پس‌لرزه‌ها برخلاف مورد یاد شده یک فرایند دنباله‌ای از پس‌لرزه‌ها مدنظر قرار می‌گیرد و وابسته به آخرین رخداد نیست، براین اساس مدل مارکوف را نمی‌توان مدل مناسبی برای پیش‌بینی پس‌لرزه‌های بزرگ به‌حساب آورد. با این حال تحلیل‌های انجام شده با هدف انتخاب روش آماری مناسب، در این پژوهش به انتخاب مدل‌های دیگری از جمله مدل سری زمانی منجر شد. با توجه به‌ویژگی‌های سری زمانی که در ادامه توضیح داده شده، این مدل به عنوان مدلی مناسب برای این تحلیل انتخاب شد.

در کل سری زمانی به یک توالی یا دنباله‌ای از متغیرهای تصادفی اطلاق می‌شود که در فاصله‌های زمانی ثابت، نمونه‌برداری شده‌اند. تعریف یاد شده با عنوان پیشامد تصادفی در مقطع زمان نیز شناخته می‌شود که تطابق زیادی با ماهیت پس‌لرزه‌ها به عنوان رخدادی تصادفی دارد و تا حدود زیادی می‌تواند به اعتبار مدل سکون‌لرزه‌ای نیز بیفزاید. به عبارت دیگر، سری زمانی، دنباله‌ای از مشاهدات است که بر اساس زمان یا هر کمیت دیگر با فواصل یکسان (معادله ۴) مرتب می‌شود.

$$i=1,2,\dots,n \quad t_i-t_{i-1}=\Delta t=Const \quad (4)$$

t متغیر کنترل شده برای سری زمانی و Δt میزانی ثابت برای هر دوره در سری زمانی است و i تعداد دوره‌های در نظر گرفته شده برای سری زمانی را نشان می‌دهد.

زمان سپری شده در هر دوره در سری زمانی را نیز می‌توان از طریق معادله (۵) به دست آورد:

$$t_j=t_{i+j} \Delta t \quad (5)$$

t_j زمان سپری شده از سری زمانی را نشان می‌دهد و j نشان از دوره سپری شده در سری زمانی است [۴۶].

سری‌های زمانی با دو کاربرد اصلی استفاده می‌شوند: یکی شناسایی ماهیت پدیده که به وسیله دنباله‌ای از مشاهدات نشان داده می‌شود و دیگری پیش‌بینی پدیده بررسی شده که در زمان‌های آینده احتمال وقوع دارد که کاربرد مورد دوم در این مقاله به عنوان هدف اصلی، یعنی پیش‌بینی زمان رخداد پس‌لرزه‌های بزرگ شناخته شده است. بحث سری زمانی درباره پس‌لرزه‌ها چون وابسته به تعداد در بزرگی‌های مختلف است، به عنوان سری زمانی یک متغیره معرفی می‌شود و چون زمان پیوسته در نظر گرفته شده مدل یک متغیره پیوسته را تشکیل می‌دهد. هم‌چنین از آنجاکه رخداد پیش‌لرزه‌ها در چنین مدل‌هایی به صورت تصادفی ارائه می‌شوند، در این تحلیل سری زمانی از نوع یک متغیره پیوسته تصادفی است. با این حال اگر قرار باشد سری زمانی به پیش‌بینی درباره رخداد پس‌لرزه‌های بزرگ بپردازد، باید به دنبال رابطه مشخصی بین مقادیر هر سری باشیم که این مورد در بحث سری زمانی بررسی می‌شود. هنگامی امکان پیش‌بینی برای سری زمانی وجود دارد که به صورت ایستا درآمده باشد. منظور از یک سری زمانی ایستا، دنباله‌ای از مقادیر وابسته به زمان است که میانگین و واریانس آن به زمان وابسته نباشد. در حقیقت در یک سری زمانی ایستا، قوانین حاکم بر

تغییرات مقدارها وابسته به زمان نیست. برای ایستا کردن سری زمانی از آنجاکه امکان پیش‌بینی برای سری‌های زمانی نایستا به راحتی امکان‌پذیر نیست، بهتر است عواملی که باعث خارج شدن سری زمانی از حالت ایستایی هستند، حذف شوند. به این ترتیب باید مؤلفه‌های مؤثر در نایستایی سری زمانی شناسایی و حذف شود. این مورد با فرایندی تحت عنوان هموارسازی^۱ و یا صافی^۲ قابل انجام است. هموارسازی به‌طور معمول با روش‌های عملگرها میانگین متحرک و روش‌های تفاضل‌گیری انجام می‌شود [۴۷]. در سری‌های زمانی مربوط به پس لرزه‌ها با توجه به این‌که میانگین و واریانس داده‌ها به زمان وابسته نیست از این‌رو، یک سری زمانی از نوع ایستا بوده و نیاز به استفاده از صافی و عمل هموارسازی در این مورد نیست.

در این بخش و برای تست روش پیشنهادی با توجه به داده‌های واقعی یک زمین‌لرزه، به تحلیل سری زمانی داده‌های پس لرزه‌های با بزرگی ۲ و بیش‌تر ($M \geq 2$) زمین‌لرزه موردي این تحقیق یعنی زمین‌لرزه زهان می‌پردازیم. برای تحلیل سری زمانی داده‌ها، در مرحله آغازین، نیاز به تعیین دوره‌های زمانی ثابتی است که بررسی داده‌ها در این دوره، بررسی شده و روندیابی واقع شوند. با توجه به تجربه تغییرات لرزه‌خیزی پس لرزه‌ها در پژوهش‌های مختلف و انجام آزمون Test-Retest برای داده‌های مربوط به پس لرزه‌های این زمین‌لرزه، دوره زمانی ثابت در نظر گرفته شده برای این تحلیل در بازه‌های ۴ ساعته و به تعداد ۱۸ دوره یعنی زمان کلی ۷۲ ساعت پس از رخداد زمین‌لرزه اصلی انتخاب شده است. براساس پیش‌شرط‌های مطرح شده در بالا برای پس لرزه‌های زمین‌لرزه زهان در شرق ایران، داده‌های حاصل از این تحلیل در جدول ۵ ارائه شده است. در این جدول برای شناسایی هدفمند زمان رخداد پس لرزه‌های بزرگ‌تر از تفکیک پس لرزه‌ها در بازه‌های بزرگی مشخص استفاده می‌شود.

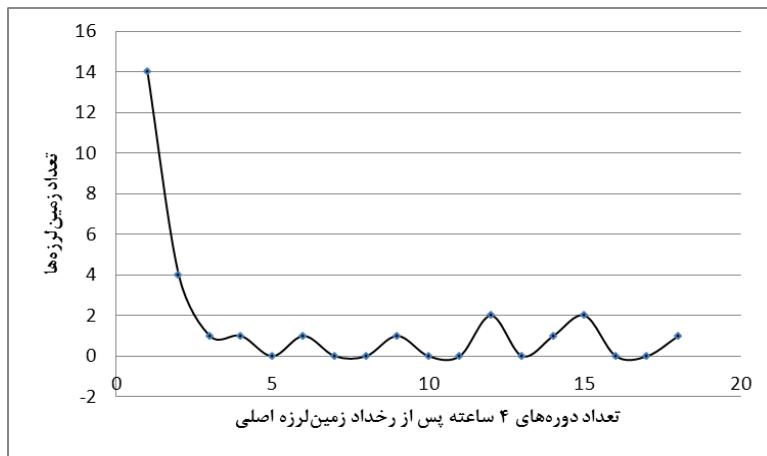
براساس تحلیل سری زمانی پس لرزه‌های زمین‌لرزه زهان به این نتیجه می‌رسیم که بر اساس قانون حاکم بر رخداد پس لرزه‌ها و قانون امری، کاهش مشخص تعداد و بزرگی پس لرزه‌ها تا حدود ۴۴ ساعت (انتهای دوره ۴ ساعته یازدهم در ردیف اول سمت چپ جدول ۵ و شکل ۹) مشاهده می‌شود. با این حال از دوره ۱۲، افزایش بزرگی و تعداد

1. Smoothing
2. Filtering

پس‌لرزه‌ها در دوره زمانی ۴ ساعته نشان می‌دهد تنش ناشی از رخداد زمین‌لرزه هنوز به سطح حداقل پس از رخداد زمین‌لرزه اصلی نرسیده و قبل از رخداد بزرگ‌ترین پس‌لرزه با بزرگی ۳/۹ در ۴ ساعت آخر (ردیف ۱۸ جدول ۵) بزرگی پس‌لرزه‌ها مجدد پس از یک افزایش نسبی در دوره ۱۲ در دوره ۱۵ نیز افزایش یافته که نشان از رها شدن تدریجی تنش ذخیره شده قبل از رخداد پس‌لرزه بزرگ است. این مورد حاکی از این نکته است که گاهاً کاهش تدریجی و منظم رخداد پس‌لرزه‌ها براساس قانون امری به شکلی نظاممند رخ نداده و به دلیل شرایط حاکم بر شرایط لرزه‌زمین‌ساختی کانون زمین‌لرزه اصلی و مناطق تحت تأثیر آن ممکن است به دلیل فعال شدن گسل‌ها در اثر القای تنش و یا باقی‌ماندن تنش روی گسل مسبب زمین‌لرزه اصلی رخداد پس‌لرزه‌های بزرگ و غیرمنتظره به‌وقوع پیووندد. از این مورد می‌توان در شناسایی زمان رخداد بزرگ‌ترین پس‌لرزه قبل از رخداد آن استفاده کرد.

جدول ۵. سری زمانی رخداد پس‌لرزه‌های زمین‌لرزه زهان بر مبنای بزرگی آنها

تعداد دوره‌های زمانی ثابت پس از رخداد زمین‌لرزه اصلی	تعداد پس‌لرزه‌ها با $M \geq 2$	تعداد پس‌لرزه‌ها با $M \geq 2/5$	تعداد پس‌لرزه‌ها با $M \geq 3$
۱	۱۴	۴	۲
۲	۴	۱	۱
۳	۱	۰	۰
۴	۱	۰	۰
۵	۰	۰	۰
۶	۱	۱	۰
۷	۰	۰	۰
۸	۰	۰	۰
۹	۱	۰	۰
۱۰	۰	۰	۰
۱۱	۰	۰	۰
۱۲	۲	۱	۰
۱۳	۰	۰	۰
۱۴	۱	۰	۰
۱۵	۲	۲	۰
۱۶	۰	۰	۰
۱۷	۰	۰	۰
۱۸	۱	۱	۱



شکل ۹. نمودار تغییرات تعداد پس لرزه‌ها با بزرگی ۲ و بیشتر براساس تحلیل سری زمانی

این افزایش تعداد در شکل ۹ نیز به صورت نمودار افزاینده نسبی مشخص شده است. با روند یابی این تغییرات براساس مدل سری زمانی، چنان‌که در جدول ۵ مشخص شده است (افزایش تعداد پس لرزه‌ها در ردیف ۱۵ که نشان از حضور باقی‌مانده تنفس ناشی از رخداد زمین لرزه اصلی در پهنه تحت تأثیر است و کاهش تعداد آنها از ردیف ۱۶ تا ۱۸ که حاکی از تجمع انرژی برای رخداد پس لرزه بزرگ‌تر است) زمان انتظار برای رخداد پس لرزه بزرگ از ۷۲ ساعت به زمانی کمتر از ۱۲ ساعت قابل کاهش بوده است که کاربرد فراوانی در تدقیق زمان پیش‌بینی پس لرزه بزرگ دارد.

نتیجه‌گیری

۱. با توجه به نزدیکی گسل فعال دوشاخ به رومرکر زمین لرزه زهان، هم‌خوانی شیب و امتداد و نوع گسل مسبب با سازوکار کانونی ارائه شده برای این زمین لرزه، انتساب این گسل به عنوان گسل مسبب این زمین لرزه قابل تأیید است.
۲. تحلیل تغییرات الگوی بزرگی، مکانی، زمانی و فراوانی پیش لرزه‌ها در زمین لرزه زهان منطبق بر الگوهای مشخصی بوده است که در ادامه به آنها اشاره می‌شود:
 - الف) الگوی مکانی پیش لرزه‌ها:

الگوی مکانی پیش‌لرزه‌ها حاکی از کاهش فاصله مکانی آنها به کانون زمین‌لرزه اصلی با
ب) الگوی فراوانی لرزه‌خیزی در ماههای متنهی به رخداد زمین‌لرزه (الگوی فراوانی بر
حسب زمان):

فراوانی رخداد زمین‌لرزه‌ها تا دو ماه مانده به رخداد زمین‌لرزه اصلی افزایشی است که دلیل آن افزایش تنش در منطقه نسبت به زمان‌های معمول بوده است و در دو ماه متنهی به رخداد زمین‌لرزه روند کاهشی نشان داده است که دلیل اصلی آن تمرکز بیش‌تر انرژی برای رخداد زمین‌لرزه اصلی بوده است.

همین شرایط برای هفتنهای متنهی به رخداد زمین‌لرزه اصلی و برای پیش‌لرزه‌ها در شعاع ۱۰۰ کیلومتری از زمین‌لرزه اصلی وجود داشته است.

پ) الگوی تغییرات بزرگی پیش‌لرزه‌ها:

نتایج حاصل از تحلیل‌های انجام شده در این پژوهش حاکی از این نکته است که بزرگی پیش‌لرزه‌ها با نزدیک شدن به زمان رخداد زمین‌لرزه اصلی به‌دلیل تجمع بیش‌تری انرژی برای رخداد آن روندی کاهشی را نشان می‌دهد.

۳. هم‌چنین، تحلیل تغییرات مکان، بزرگی و زمان پس لرزه‌های زمین‌لرزه با هدف کاهش اثرات ناشی از آنها این نتایج را دارد:

الف) پیش‌بینی مکانی پس‌لرزه‌ها:

نتایج پژوهش حاضر و بررسی زمین‌لرزه‌های دیگر در مناطق مختلف ایران و جهان نشان می‌دهد که معمولاً جهت‌گیری پس‌لرزه‌ها در امتداد محور اعمال تنش اصلی حداقل ایجاده شده در زمین‌لرزه (۵۱) است که این امتداد در دقایق اولیه پس از زمین‌لرزه و با مشخص شدن سازوکار کانونی آن قابل تعیین است و کمک زیادی به مکان‌یابی رخداد پس‌لرزه‌های بزرگ احتمالی می‌کند. با تدقیق این یافته می‌توان به پیش‌بینی مکانی پس‌لرزه‌ها و شناسایی مناطق پر خطر بعد از رخداد زمین‌لرزه با هدف مدیریت ریسک پس‌لرزه‌های بزرگ و استقرار مکانی امن‌تر برای اسکان اضطراری مبادرت کرد.

ب) پیش‌بینی اثرات بزرگی در برابر عمق پس‌لرزه‌ها:

از آنجاکه یکی از اهداف مهم این پژوهش، پیش‌بینی احتمالی پس‌لرزه‌های مخرب

است، ارائه و تحلیل دقیق نمودار تغییرات بزرگی و عمق پس‌لرزه‌ها می‌تواند اطلاعات مناسبی در زمینه ریسک ناشی از پس‌لرزه‌ها در منطقه‌زلزله زده را ارائه کند که در این زمین‌لرزه با توجه به بررسی تحلیلی انجام شده در شکل ۸، پس‌لرزه مخرب و تأثیرگذار (با بزرگی زیاد و عمق کم به صورت توانمند) گزارش نشده است.

پ) پیش‌بینی زمان پس‌لرزه‌های بزرگ:

استفاده از نظریه سکون لرزه‌ای با تحلیل روی پس‌لرزه‌های این زمین‌لرزه نشان داد که زمان بیش‌تری برای رخداد پس‌لرزه‌های بزرگ به‌ویژه بزرگ‌ترین پس‌لرزه این زمین‌لرزه (طبق جدول ۲) به ثبت رسیده است. بنابراین از این مورد به عنوان یک نظریه اثبات شده در پژوهش‌های زمین‌لرزه‌شناسی، در پیش‌بینی زمانی پس‌لرزه‌های بزرگ در زمین‌لرزه‌های مختلف استفاده کابردی مشخصی می‌شود. انطباق زیاد دو پارامتر بررسی شده (بزرگی پس‌لرزه‌های متوسط و بزرگ و سکون لرزه‌ای بین رخداد آنها) براساس روش همبستگی پیرسون که بیان 0.9048 ارائه شد، حاکی از این نکته است که می‌توان براساس میزان انطباق مربوطه با توجه به شرایط لرزه‌زمین‌ساختی در هر پنهان به نتایجی برای الگوسازی منطقه‌ای در این زمینه دست یافت که نیاز به بررسی دقیق در این حوزه دارد.

۴. شیب زیاد نمودار گوتنبرگ-ریشر در پس‌لرزه‌های این زمین‌لرزه نشان از کاهش مشخص و قاعده‌مند رخداد پس‌لرزه‌ها از لحاظ فراوانی و بزرگی است. این نمودار که بر اساس پس‌لرزه‌های زمین‌لرزه زهان در مدت یک ماه پس از رخداد آن تهیه شده، نشان می‌دهد در اثر فعالیت گسل مسبب زمین‌لرزه، هیچ گسل دیگری در مناطق اطراف کانون، دچار القای لرزه‌ای نشده که یکی از دلایل اصلی این ادعا به قرارنگرفتن گسل‌های فعال منطقه در جهت رها شدن تنفس اصلی خداکثرا ناشی از زمین‌لرزه باز می‌شود.

۵. نتایج این پژوهش حاکی از این است که با استفاده از تحلیل سری زمانی در تکمیل نتایج تحلیل سکون لرزه‌ای می‌توان به تحلیل دقیق‌تری درباره پیش‌بینی زمان رخداد پس‌لرزه بزرگ دست یافت.

قدردانی

از سرکار خانم دکتر مریم صدقی دکتری ژئوفیزیک گرایش زلزله‌شناسی که در باره گردآوری داده‌های مبنایی این مقاله از کمک ایشان بهره‌مند شدیم، تقدیر و می‌کنیم.

منابع

1. Mendoza C., Hartzel S. H., "Aftershock patterns and mainshock faulting", Bull. Seism.Soc.Am, Volume 78 (1988) 1438-1449.
2. Hainzl S., "Apparent triggering function of aftershocks resulting from rate-dependent incompleteness of earthquake catalogs", Journal of Geophysical Research: Solid Earth., 121, 6499–6509, (2016). doi: 10.1002/2016JB013319.
3. Kanamori H., Brodsky E., "The physics of earthquakes. Report on progress in Physics", Institute of Physics Publishing, No. 67 (2004) 1429-1496.
4. Dodge D. A., Beroza G. C., Ellsworth W. L., "Foreshock sequence of the 1992 Landers, California, earthquake and its implications for earthquake nucleation", J. Geophys. Res. 100 (1995) 9865-9880.
5. Zanzerkia E. E., Beroza G. C., Vidale J. E., "Waveform analysis of the 1999 Hector Mine foreshock sequence", Geophys. Res. Lett. 30, 1429 (2003)
6. Kato A., Obara K., Igarashi T., Tsuruoka H., Nakagawa S., Hirata N., "Propagation of slow slip leading up to the 2011 Mw 9.0 Tohoku-Oki earthquake", Science 335 (2012) 705-708.
7. Jones L. M., "Foreshocks (1966-1980) in the San Andrias system, California", Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.74, No.4 (1984) 1361-1380.
8. Minadakis G., Papadopoulos G. A., "Foreshock patterns preceding large earthquakes in the subduction zone of Chile", Geophysical Research Abstracts Vol. 18 (2016).

9. Papadopoulos, Gerassimos, Fiore, Boris Di, Minadakis, George, "Short-Term foreshocks and the prediction of mainshock in the aftermath of L'Aquila earthquake: A Global Review", Geophysical Research Abstracts., Vol. 13 (2011) EGU2011-4540.
10. Omori F., "Aftershocks of earthquake", J College Sci. Imp. Tokyo university. No. 7 (1894) 111-200.
11. Richter C. F, "Foreshocks and aftershocks, in earthquakes in Kern county, California during 1952. California division of Mines", Bulletin 171, San Francisco (1955) 177-198.
12. Tajima F., Kanamori H., "Global survey of aftershock area expansion patterns", Physics of the Earth and Planetary Interiors, No, 40 (1985) 77-134.
13. Das S., Henry C., "Spatial relation between main earthquake slip and its aftershock distribution", Reviews of Geophysics, Volume 41.3/1013, (2003).
14. Zhao B., Shi Y., Gao Y., "Relation of aftershocks of the Wenchuan Ms 8.0 earthquake its implication to seismotectonics", Earth Science, Vol. 24 (2011) 107-113.
15. Nishimura T., Munekane H., Yarai H., "The 2011 off the pacific coast of Tohoku earthquake and its aftershocks observed by GEONET", Earth Planet Space. Volume 63 (2011) 631-636.
- 16- Van der Elst, N. J., and B. E. Shaw. "Larger aftershocks happen farther away: Nonseparability of magnitude and spatial distributions of aftershocks", Geophys. Res. Lett., 42 (2015) 5771–5778, doi:10.1002/2015GL064734
17. Thapa D. R, Tao X., Fan F., Tao Z., "Aftershock analysis of the 2015 Gorkha - Dolakha (Central Nepal) earthquake doublet", Heliyon, 4. e 00678 (2018).
18. Omi T., Ogata Y., Hirata Y., Aihara K., "Intermediate-term forecasting of aftershocks from an early aftershock sequence: Bayesian and

- ensemble forecasting approaches", Journal of Geophysical Research, 120 (4) (2016) 2578.
19. Nasir A., Hintersberger E., Decker K., "The 1906 Dobro Voda Earthquake ($M=5.7$) at the Vienna Basin Transfer Fault, its aftershocks and the consequences on potential seismic hazard", Geophysical Research Abstracts, Vol. 21, (2019) EGU2019-18972.
۲۰. ساکت ع.، فاطمی عقدا م.، خدیبوی ش.، "مقایسه پارامترهای لرزه‌ای زمین لرزه‌های بم و زرند با تأکید بر پس لرزه‌های آنها"، نهمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران، دانشگاه خوارزمی (۱۳۸۴).
۲۱. تارتار م.، فرهبد ا. م.، "مطالعه زمین‌لرزه ۸ خرداد ۱۳۸۳ فیروزآباد-کجور و پس لرزه‌های آن بر اساس تحلیل داده‌های ثبت شده در ایستگاه‌های لرزه‌نگاری محلی"، فصلنامه علوم زمین، سال شانزدهم. شماره ۶۴ (۱۳۸۶).
۲۲. حاجتی، ف.، آق آتابای م.، شناسایی مناطق مستعد خطر مرتبط با پس لرزه‌های زمین‌لرزه‌های بزرگ مطالعه موردنی: زمینلرزه سیلانخور، لرستان، مجله آمایش جغرافیایی فضا فصلنامه علمی - پژوهشی دانشگاه گلستان سال دوم / شماره مسلسل چهارم (۱۳۹۱).
۲۳. ساکت ع.، "مطالعه و تحلیل آماری پس لرزه‌های زمین لرزه‌های بزرگ‌تر از ۶ در ایران، (۱۳۹۳)"، پژوهشکده سوانح طبیعی ایران (۱۳۸۰).
24. IRSC (Iranian Seismological Center Institute of Geophysics), University of Tehran.(2012), <http://irsc.ut.ac.ir>.
۲۵. اسلامی آ.، "گزارش زمین‌لرزه ۱۵ آذرماه ۱۳۹۱، زهان- شمال استان خراسان جنوبی"، انجمن زلزله‌شناسی مهندسی ایران (۱۳۹۱).
۲۶. پایگاه ملی داده‌های علوم زمین ایران، "نقشه گسل‌های ایران" (۱۳۸۴).
27. Berberian M., "Active faulting and tectonics of Iran. In Zagros-Hindu Kush-Himalaya geodynamic Evolution", Geodynamics Series, AGU, 3 (1981) 33-69.
۲۸. "آین نامه ۲۸۰ ویرایش چهارم"، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی (۱۳۹۴).
29. Walker, R., J. Jackson, and C. Baker., "Active faulting and seismicity of the Dasht-e-Bayaz region, eastern Iran", Geophys. J. Int., 157, (2004) 265 – 282.
۳۰. "شتاب‌نگاشتهای زمین‌لرزه زهان"، شبکه شتاب‌نگاری کشوری، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی.

31. McGuire, J. J., Boettcher, M. S. & Jordan, T. H., Foreshock sequences and short-term earthquake predictability on East Pacific rise transform faults. *Nature* 434, (2005) 457–461. Doi:10.1038/nature03377
۳۲. گروه لرزه زمین ساخت و زلزله‌شناسی، "گزارش مقدماتی رخداد زمین لرزه ۲۱ اردیبهشت ماه ۱۳۹۲ (بزرگا ۶,۲) شمال جاسک: گوهران، هرمگان"، سازمان زمین‌شناسی کشور (۱۳۹۲).
33. Saket A., Fatemi Aghda S. M., "Investigation of destructive and non-destructive aftershocks in major earthquakes", Vol 1: 10th Congress of the International Association for Engineering Geology and the Environment, Natingham, Sep.6–10 (2006) 763-768.
34. Reasenberg P. A., Simpson R. W., "Response of regional seismicity to the static stress change produced by the Loma Prieta earthquake".*Science*, 255 (1992) 1687-1690.
35. King G. C. P., Stein R., Lin J., "Static stress change and the triggering of earthquake", *Bull. Seism.Soc.Am.*, No 2. (1994).
36. Devries P. M. R., Viégas F., Wattenberg M., Meade B. L., "Deep learning of aftershock patterns following large earthquakes", *Nature*, Vol 560, doi.org/10.1038/s41586-018-0438-y (2018).
37. Harris R., "Introduction to special section: stress triggers, stress shadows, and implication for seismic hazard", *J. Geophys. Res.* 103 (1998) 24347-24358.
38. Das S., Scholts C., "Off-Fault aftershock clusters caused by shear stress increased?", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 71, No. 5 (1981) 1669-1675.
39. Mandal P., Rastogi B.K., "Self-organized fractal seismicity and b value of aftershocks of the 2001 Bhuj earthquake in Kutch (India)", *Pure appl. geophys.* 162 (2005) 53-72.
40. Shcherbakov R, Torcotte D.L, Rundle. J.B., "Aftershock statistics", *Pure appl. Geophys.* 162 (2005) 1051-1076.
41. Utsu T., "Aftershocks and earthquake statistics", *Journal of Faculty Science, Hokkaido University*, No 3 (1970) 197-266.

42. Iwata T., "Low detection capability of global earthquakes after the occurrence of large earthquakes", *Investigation of the Harvard CMT catalogue*. *Geophysics Journal International*, 174 (2008) 849-856.
43. Omi T., Ogata Y., Hirata Y., Aihara K., "Forecasting Large aftershocks within one day after the mainshock", *Nature, Scientific Report* 3, Article number: 2218 (2013).
44. Reasenberg P. A, Jones L. M., "Earthquake aftershocks", *Update. Science* 265 (1994) 1251-1252.
45. Little T. D., "The Oxford Handbook of Quantitative Methods", Volume 1: Foundations, OxfordUniversity Press: England, UK. (2013).
46. Brandt S., "Statistical and computational methods for scientists and engineering", Springer, Fourth Edition (2014).
47. Cryer J.D and Chan K. S., "Time series analysis with applications in R", Springer, Second Edition (2008).