[Downloaded from jeg.khu.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.1.5]
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.635]

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

علی ساکت، سید محمود فاطمی عقدا*؛
دانشگاه خوارزمی، دانشکدهٔ علوم زمین
احمد فهیمی فر؛
دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکدهٔ مهندسی عمران و محیط‌زیست
حسین صادقی؛
دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکدهٔ علوم، گروه زمین‌شناسی

تاریخ: دریافت ۹٦/۰٦/۲۰ 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 کنار شناسایی شرایط لرزه‌زمین‌ساختی 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 به‌دست آمده از دیگر زمین‌لرزه‌ها و ارائهٔ الگویی کاربردی در زمینهٔ 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

*نویسنده مسئول Fatemi@khu.ac.ir

[Downloaded from jeg.khu.ac.ir on 2024-10-12]

شاهد زمین‌لرزه‌های مخرب و بزرگی بوده است، در بیش از دو دههٔ اخیر، با یک نبود لرزه‌ای مشخص مواجه شده است. چنین شرایطی، بررسی متمرکزتر در بارهٔ تغییرات لرزه‌خیزی در این محدوده، به‌دلیل قریب‌الوقوع بودن یک زمین‌لرزه بزرگ را ضرورت می‌بخشد. نتایج به‌دست 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 به‌عنوان نشان‌گرهایی برای شناسایی زمان پس‌لرزه‌های بزرگ‌تر استفاده شود و تحلیل‌های انجام شده در این پژوهش نشان داد روش‌هایی از جمله مدل‌های ارائه شده در بارهٔ سری زمانی در کنار تحلیل سکون لرزه‌ای به تدقیق زمان پیش‌بینی پس‌لرزه‌های بزرگ می‌انجامد.

واژه‌های کلیدی: زمین لرزه زهان، روندیابی پس‌لرزه، پیش‌لرزه، سکون لرزه‌ای، گسل مسبب، تنش اصلی حداکثر، مدیریت ریسک

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.1.5]

مقدمه

پیش‌لرزه‌ها به زمین‌لرزه‌هایی اطلاق می‌شوند که قبل از رخداد زمین‌لرزه اصلی و به‌دلیل شروع تغییرات تنش در یک منطقه رخ می‌دهند. در مقابل پس‌لرزه‌ها، به‌عنوان زمین‌لرزه‌هایی معرفی می‌شوند که پس از رخداد زمین‌لرزه اصلی و با بزرگی کم‌تری نسبت به آن به‌وقوع می‌پیوندند و معمولاً برای تعادل بخشی و تخلیه انرژی باقی‌مانده در منطقهٔ رومرکز زمین لرزه 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 گسیختی 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 زمینهٔ الگوی رفتاری پیش‌لرزه‌ها و مدل‌های حاکم بر رخداد آنها به‌وسیلهٔ محققان در سراسر دنیا ارائه شده است. از جمله این پژوهش‌ها به‌عنوان نمونه می‌توان به این موارد اشاره کرد: پژوهش‌گران مختلفی از جمله زانزرکیا[1] و همکاران (۲۰۰۳) و دادگ[2] و همکاران (۱۹۹۵) به‌ترتیب توالی پیش‌لرزه‌های زمین‌لرزه هکتورماین[1] و لندرز[2] در

1. Zanzerkia
2. Dodge

[DOI: 10.52547/jeg.14.4.635]

[Downloaded from jeg.khu.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.1.5]

[DOI: 10.52547/jeg.14.4.635]

کالیفرنیا را بررسی کردند [٤]، [٥]. هم‌چنین کاتو[3] و همکاران، به بررسی پیش‌لرزه‌های زمین لرزه ۲۰۱۱ ساحل شرقی ژاپن پرداختند که نتیجه این تحقیق ارائه الگوی رفتاری پیش‌لرزه‌ها برای زمین‌لرزه‌های منطقه مربوط با بزرگی‌های مشابه بود [٦]. پژوهش در بارهٔ گسل سان اندریاس [۷]، بررسی‌های انجام شده در مورد پیش‌لرزه‌های زمین‌لرزه ۲۰۱۰ شیلی در زون فرورانشی محدودهٔ مورد نظر [۸]، پژوهش‌های مشابه برای زمین‌لرزه‌های بزرگ مناطق مختلف جهان به‌وسیلهٔ پاپاداپولوس[4] همکاران [۹]، از جمله دیگر بررسی‌های انجام شده در زمینهٔ پیش‌لرزه‌ها با هدف شناسایی محدوده‌های زمانی و مکانی برای تحلیل این داده‌ها در پیش‌بینی زمین‌لرزه‌های بزرگی است که به‌دنبال آن‌ها رخ داده‌اند. در زمینهٔ رخداد پس‌لرزه‌ها و شناسایی روند آنها، نیز تحقیقات گسترده‌ای انجام شده است که در ادامه به برخی از مهم‌ترین آنها اشاره می‌شود. اولین پژوهش تخصصی در مورد پس‌لرزه‌ها، به‌وسیلهٔ اُمُری[5] (۱۸۹٤)، روی زمین‌لرزه‌های سراسر دنیا انجام شد[۱۰]، نتایج تحقیقات این محقق به ارائهٔ فرمولی در بارهٔ کاهندگی تعداد پس‌لرزه‌ها، با دور شدن از زمان رخداد زمین‌لرزه اصلی منجر شد که با تصحیحاتی که آتسو[6] (۱۹۷۰) روی آن فرمول، اعمال کرد، هم‌چنان از آن به شکلی گسترده برای بررسی پس‌لرزه‌های زمین‌لرزه‌های بزرگ استفاده می‌شود. از اوایل قرن بیستم با رخداد زمین‌لرزه‌های سان‌فرانسیسکو در ایالات متحده (۱۹۰٦)، کانتو در ژاپن (۱۹۲۳) و زمین‌لرزه کرن‌کانتی در اواسط همان قرن (۱۹۵۲)، پژوهش‌ها در زمینهٔ بررسی پس‌لرزه‌های زمین‌لرزه‌های بزرگ، به مرحلهٔ نوینی وارد شد [۱۱]. در ادامه، محققانی از جمله Mendoza (and Hartzell, 1988) در زمینه الگوی پس‌لرزه‌ها و گسلش زمین‌لرزه اصلی مقاله مهمی ارائه دادند، بر اساس این مطالعه مشخص گردید که بیشتر پس‌لرزه‌ها در نزدیک کانون زمین‌لرزه و یا در امتداد گسل مسبب آن رخ می‌دهند[۱]. پژوهشی دیگر در این زمینه به‌وسیلهٔ تاجیما[7] و کاناموری[8] (۱۹۸۵)، دربارهٔ توزیع جهانی پس‌لرزه‌ها و ارائه الگویی مناسب برای آنها انجام شد[۱۲]. هم‌چنین پژوهشی در زمینهٔ ارتباط فضایی بین زمین‌لرزه‌های اصلی و

1. Hector mine
2. Landers
3. Kato
4. Papadapoulous
5. Omori
6. Atsu
7. Tajima
8. Kanamori

[Downloaded from jeg.khu.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.1.5]

[DOI: 10.52547/jeg.14.4.635]

پراکنش پس‌لرزه‌های آنها به‌وسیلهٔ داس[1] و هنری[2] (۲۰۰۳) ارائه شد که تمرکز مشخصی بر تغییرات مکانی و بزرگی پس‌لرزه‌های بزرگ داشت[۱۳].

علاوه بر موارد یاد شده، از جمله تحقیقات یک دههٔ اخیر در زمینهٔ موضوع مورد بحث می‌توان به مقالهٔ ژائو[3] و همکاران (۲۰۱۱) در بارهٔ جانمایی پس‌لرزه‌های مربوط به زمین‌لرزه سال ۲۰۰۸ سیچوان چین [١٤] و پژوهشی که به‌وسیلهٔ نیشیمورا[4] و همکاران (۲۰۱۱) روی پس‌لرزه‌های زمین‌لرزه ۲۰۱۱ توهوکو در ساحل شرقی ژاپن انجام شد، اشاره کرد[۱۵]. هم‌چنین بررسی‌های انجام شده به‌وسیلهٔ وان درالست[5] و شاو[6] (۲۰۱۵) روی پس‌لرزه‌های مربوط به زمین لرزه‌های مهم کالیفرنیا نشان داد که پس‌لرزه‌های بزرگ در مکان‌هایی دورتر نسبت به زمین لرزهٔ اصلی در مقایسه با دیگر پس‌لرزه‌ها رخ می‌دهند و دلیل ارائه شده به‌وسیلهٔ آنها دربارهٔ این مورد، رها شدن بخش زیادی از تنش در زمان رخداد زمین‌لرزه اصلی در حوالی کانون زمین لرزه و انتقال تنش به مناطق مجاور و دورتر از کانون بود[١٦]. در پژوهشی دیگر که تاپا[7] و همکاران (۲۰۱۸) روی پس‌لرزه‌های زمین لرزهٔ نپال در سال ۲۰۱۵ انجام دادند، بررسی ضریب کاهشی روند پس‌لرزه‌های آن زمین لرزه مورد بحث واقع شد و نتایج تحلیل یاد شده نشان از انطباق مناسبی بین روند کاهشی پس‌لرزه‌ها با قانون اُمُری داشت[۱۷].

در پژوهش دیگری که اومی[8] و همکاران (۲۰۱٦) 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 به‌وسیلهٔ این محققان به تحلیل نقطه‌ای مناطق لرزه‌زمین ساختی پرداخته بود، از این‌رو، برای افزایش 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. Nishimora
5. Van Der Elst
6. Shaw
7. Thapa
8. Omi

[Downloaded from jeg.khu.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.1.5]

[DOI: 10.52547/jeg.14.4.635]

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

در ایران نیز بررسی‌های گسترده‌ای در زمینهٔ بررسی پس‌لرزه‌های زمین‌لرزه‌های مهم ارائه شده که در ادامه به برخی از آنها اشاره می‌شود. ساکت و همکاران (۱۳۸٤) پژوهشی تحلیلی بر مقایسهٔ پس‌لرزه‌های زمین‌لرزه بم (۱۳۸۲) و زرند (۱۳۸٤) در استان کرمان با توجه به نوع گسل مسبب آنها، ارائه کردند[۲۰]. نتایج این پژوهش نشان داد که یکی از عوامل مهم و تأثیر گذار در پراکندگی 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 به‌وسیلهٔ داس و هنری (۲۰۰۳) و دیگر پژوهش‌های انجام شده است[۱۳].

تارتار و فرهبد (۱۳۸٦) 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 سیلاخور در بارهٔ 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 بارهٔ پیش‌لرزه‌ها در چنین کشورهایی به‌دلیل ناپایداری سازه‌ها هشدار لازم برای تخلیه اضطراری یکی از روی‌کردهای مهمی است که با هدف کاهش اثرات ناشی از زمین‌لرزه، نیازی اساسی به‌حساب می‌آید. برای نشان دادن اهمیت تحلیل رفتار پس‌لرزه‌ها نیز می‌توان به مثال‌هایی واقعی در این زمینه اشاره نمود. به‌عنوان نمونه، رخداد قوی‌ترین پس‌لرزه با بزرگی ۷/٤ 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[٦]. مشابه همین شرایط خسارت بار در رخداد پس‌لرزه‌های بزرگ زمین لرزه ۲۰۱۵ ایتالیا نیز گزارش شد. هم‌چنین رخداد پس‌لرزه‌های مهم زمین‌لرزه مورموری در استان ایلام در سال ۱۳۹۳ و

[Downloaded from jeg.khu.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.1.5]

[DOI: 10.52547/jeg.14.4.635]

وقوع پس‌لرزه‌های متعدد ناشی از زمین‌لرزه کاکی در استان بوشهر در سال ١٣٩٢ نیز نمونه‌های دیگری از این مورد بود که به تشدید خسارات ناشی از زمین لرزه اصلی منجر شد [٢٣]. 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 تاریخچهٔ لرزه‌خیزی منطقهٔ بررسی شده زلزله زهان در استان خراسان جنوبی، به پژوهش در بارهٔ 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 به‌صورتی 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 به‌دلیل رخداد آن در یکی از مهم‌ترین پهنه‌های لرزه‌زمین‌ساختی ایران اهمیت زیادی دارد. این زمین لرزه در ١٥ آذر ماه ١٣٩١ در ساعت ٢٠:٣٨ به‌وقت محلی به‌وقوع پیوست. بزرگی این زمین‌لرزه با توجه به گزارش مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران ٥/٦ در مقیاس بزرگی گشتاوری (Mw=٥/٦) و ٥/٤ در مقیاس بزرگی منطقه‌ای (Ml= ٥/٤) اعلام شد و عمق کانونی ارائه شده برای آن، در ٩ کیلومتری از سطح زمین به ثبت رسید [٢٤]. این مؤسسه، رومرکز این زمین‌لرزه را در ٥٩/٥٤ درجهٔ طول شرقی و ٣٣/٥٠ درجهٔ

[Downloaded from jeg.khu.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.1.5]

[DOI: 10.52547/jeg.14.4.635]

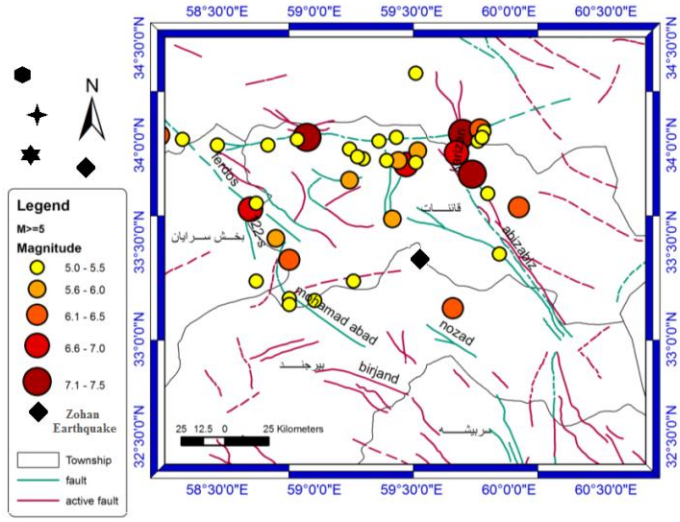
عرض شمالی اعلام کرد. کانون سطحی این زمین‌لرزه در فاصلهٔ ۲۵ کیلومتری زهان، ۳٤ کیلومتری آرین‌شهر و ٤۲ کیلومتری قاین در استان خراسان جنوبی به ثبت رسید. روستای زهان به‌عنوان نزدیک‌ترین روستا به کانون سطحی زمین‌لرزه اصلی، از توابع شهرستان زیرکوه در استان خراسان جنوبی است. جمعیت این روستا در سال ۱۳۸۵ برابر 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 به‌جای مانده در دوره‌های مختلف تاریخی در این محدوده اهمیت زیادی دارد. با توجه به عمق کانونی کم این زمین‌لرزه و این‌که کانون سطحی آن در نزدیکی مناطق روستایی با سازه‌های نامقاوم واقع شده بود، خسارات شدیدی به مناطق روستایی نزدیک به رومرکز زمین‌لرزه وارد آمد. این زمین‌لرزه ۸ تن کشته و ۲۳ مجروح برجای گذاشت [۲۵]. زمین‌لرزه بررسی شده، از حوالی زهان تا روستای شیرگ از توابع شهرستان بیرجند و هم‌چنین از طرف نوار مرزی خاور استان خراسان‌جنوبی تا روستاهای شاهرخت و حاجی‌آباد به‌شدت احساس شد. ریزش کوه افین و مسدود شدن جاده بمرود پس از زمین‌لرزه از پیامدهای ثانویه ناشی از آن به‌شمار می‌آید. با توجه به قرارگیری شهرها و روستاهای مختلف در پیرامون رومرکز این زمین‌لرزه، درحدود ۳۰۰۰۰۰ نفر در مناطق اطراف کانون، این زمین‌لرزه را با شدت‌های متفاوتی احساس کردند.

لرزه زمین ساخت منطقهٔ بررسی شده

علیرغم لرزه‌خیزی زیاد منطقهٔ شرق ایران، هیچ زمین‌لرزه‌ای با بزرگی ٥/٦ و بیش‌تر در شعاع ۵۰ کیلومتری رومرکز آن در ۲۳ سال گذشته رخ نداده و وقوع این زمین‌لرزه می‌تواند نشان از فعالیت مجدد محدودهٔ مورد نظر و مناطق اطراف آن (با توجه به دورهٔ بازگشت کم و بزرگی بالای زمین‌لرزه‌های گذشته در این منطقه) باشد. لازم به ذکر است منطقه زهان باردیگر در ۳۰ خردادماه ۱۳۹۸ شاهد رخداد زمین لرزه‌ای با بزرگی ٤/٦ در مقیاس بزرگی منطقه‌ای بود که این زمین‌لرزه نشان از ادامه فعالیت لرزه‌خیزی منطقه پس از ۷ سال از رخداد زمین لرزه ٥/٦ زهان بود.

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

لرزه‌نگاری، زمین‌لرزه زهان را ثبت کردند[٢٤]. در شکل ١، نقشه پراکندگی زمین‌لرزه‌های دستگاهی بزرگ‌تر از ٥ رخ داده در گستره ١٠٠ کیلومتری رو مرکز زمین‌لرزه به‌همراه موقعیت رومرکز زمین لرزه ١٥ آذر ١٣٩١ زهان (خراسان‌جنوبی) به تصویر کشیده شده است. از نزدیک‌ترین گسل‌های فعال و لرزه زا نسبت به رومرکز زمین لرزه، می‌توان به گسل دوشاخ اشاره کرد.



شکل ١. نقشهٔ گسل‌ها و رومرکز زمین لرزه های با بزرگی ٥ و بیش‌تر در سده اخیر در منطقهٔ بررسی شده به شعاع تقریبی ١٠٠ کیلومتری از مرکز زمین لرزه (منابع داده‌های استفاده شده: پایگاه ملی داده‌های علوم زمین ١٣٨٤) [٢٦]

چنان‌که در شکل ١ مشخص شده است، گسل دوشاخ در قسمت انتهایی(جنوبی) هم روند و به‌موازات گسل آبیز قابل مشاهده است و شاخه شمالی آن با روند شمال‌غربی از گسل آبیز جدا می‌شود. با توجه به‌نحوهٔ پراکندگی زمین‌لرزه‌های با بزرگی ٥ و بیش‌تر در شکل ١ 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 ١ تعداد زیادی از زمین‌لرزه‌های بزرگ ٥٠ سال اخیر را می‌توان به گسل آبیز که در مجاورت گسل دوشاخ قرار گرفته نسبت داد. گسل آبیز دارای روند شمال باختری-جنوب خاوری است که در بخش کوتاهی از آن روند شمالی- جنوبی است. این ساختار جنبا از شمال به

[Downloaded from jeg.khu.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.1.5]
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.635]

[Downloaded from jeg.khu.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.1.5]

[DOI: 10.52547/jeg.14.4.635]

گسل دشت بیاض و از جنوب به گسل‌های گزیک و آواز می‌پیوندد.

گسل آبیز با سازوکار راستالغز راست‌بر، در خاور رشته کوه‌های سیستان واقع شده است. بیشینۀجابه‌جایی راستالغز ۲۳۰ سانتی‌متر و بیشینۀ جابه‌جایی عمودی ۹۰ سانتی‌متر در راستای این گسل گزارش شده است. زمین‌لرزه ۳۰ ژوئن ۱۹۳٦ آبیز و زمین‌لرزه‌های ١٤ نوامبر ۱۹۷۹ و ۱۰ می ۱۹۹۷ زیرکوه به‌سبب جنبش این گسل رخ داده‌اند [۲۷]. لازم به ذکر است که زمین‌لرزه ۱۰ می ۱۹۹۷ میلادی با بزرگای۷/۲=Mw، بزرگ‌ترین زمین‌لرزه رخداده در راستای این گسل به‌شمار می‌آید. در زمین‌لرزه یاد شده که روی این گسل رخ داد، ۱۲۵ کیلومتر گسیختگی سطحی ایجاد شد که بزرگ‌ترین گسیختگی سطحی حاصل از یک زمین-لرزه در سده‌های اخیر در ایران به‌شمار می‌رود.

تمامی این آمارها نشان از ریسک بالای این محدوده در برابر رخداد زمین‌لرزه‌های بزرگ دارد. گذشته لرزه‌خیز این منطقه در استان خراسان جنوبی، نشان از ثبت رویدادهای لرزه‌ای تاریخی و دستگاهی مهمی با بزرگای متوسط تا زیاد در این پهنه از خاور ایران زمین است. در جدول ۱ پارامترهای لرزه‌خیزی زمین‌لرزه‌های دستگاهی مربوط به سال‌های ۱۳٤۷ تا ۱۳۷٦ این منطقه ارائه شده است. با فرض تعیین دورۀ بازگشت زمین‌لرزه‌هایی با بزرگی ٦ و بیش‌تر برای ۵۰ سال اخیر طبق جدول۱، بازه زمانی کم‌تر از ۱۰ سال برای رخداد زمین‌لرزه‌ها با بزرگی یاد شده برای این منطقه متصور است. با این حال با گذشت بیش از ۲۰ سال از رخداد آخرین زمین لرزه با بزرگی ۷/۱ در مقیاس بزرگی گشتاوری، این منطقه شاهد وقوع زمین‌لرزه‌ای با بزرگی ٦ و بیش‌تر نبوده است. این مورد در کنار وضعیت کلی منطقه از لحاظ وجود گسل‌های فعال، هم‌چنین قرارگیری آن در پهنه با ریسک بسیار زیاد، بر اساس نقشۀ پهنه‌بندی خطر زمین‌لرزه در ایران (مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، ۱۳۹٤) و دیگر اطلاعات ارائه شده در شکل و جدول ۱، نشان از قریب‌الوقوع بودن زمین‌لرزه‌ای با بزرگی یاد شده در این منطقه است [۲۸].

ساز و کار کانونی زمین لرزه زهان

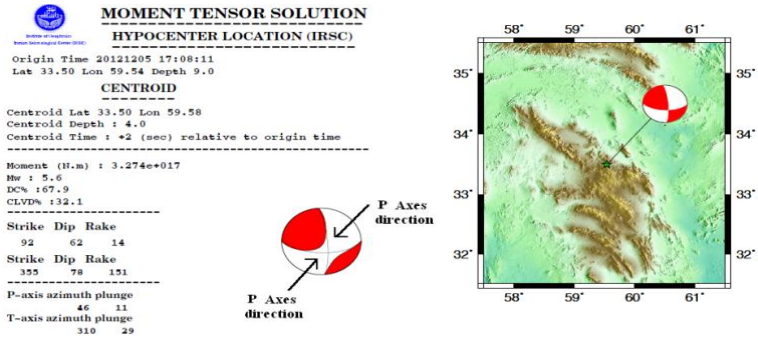
زمین‌لرزه زهان با سازوکار کانونی راستالغز خالص روی گسلی فعال، با روند تقریباً شمال‌غربی-جنوب شرقی و با شیب ۷۸ درجه رخ داد. برای ارائه ساز و کار کانونی این زمین‌لرزه از اطلاعات ۱۲ ایستگاه لرزه‌نگاری نصب شده به‌وسیلۀ مرکز لرزه‌نگاری مؤسسۀ

[Downloaded from jeg.khu.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.1.5]
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.635]

جدول ١. زمین‌لرزه‌های مهم دستگاهی رخداده در خاور ایران (دشت بیاض) از ١٣٤٧-١٣٧٦ [٢٩]

نام گسل مسبب زمین لرزه	عرض	طول	بزرگی	تاریخ زمین لرزه
غرب دشت بیاض	٣٤/٠٥	٥٨/٩٥	٧/١	١٣٤٧/٠٦/٠٩
فردوس	٣٤/٠٧	٥٨/٢١	٦/٢	١٣٤٧/٠٦/١٠
فردوس	٣٤/٠٣	٥٨/٣١	٥/٤	١٣٤٧/٠٦/١٣
دشت بیاض	٣٣/٩٧	٥٩/٥٣	٥/٦	١٣٤٧/٠٦/٢٠
قاین	٣٣/٨٣	٥٩/١٨	٦/٠	١٣٥٥/٠٨/١٦
قاین	٣٣/٩١	٥٩/٤٧	٦/٤	١٣٥٧/١٠/٢٦
آبیز	٣٣/٩٦	٥٩/٧٣	٦/٥	١٣٥٨/٠٨/٢٣
شرق دشت بیاض	٣٤/٠٦	٥٩/٧٦	٧/١	١٣٥٨/٠٩/٠٦
آبیز	٣٤/٠٨	٥٩/٨٦	٥/٩	١٣٥٨/٠٩/١٦
آبیز	٣٣/٨١	٥٩/٨١	٧/١	١٣٧٦/٠٢/٢٠
بزن آباد	٣٣/٩١	٥٩/٤٤	٥/٧	١٣٧٦/٠٤/٠٤

ژئوفیزیک دانشگاه تهران و پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله استفاده شده است. امتداد محور اصلی تنش در این زمین لرزه، زاویه‌ای ٤٦ درجه نسبت به شمال داشته و بر این اساس، جهت‌گیری تنش اصلی در این زمین لرزه، عمود بر امتداد گسل اصلی نشان داده شده است (شکل ٢). به‌عبارت دیگر چنان‌که در شکل ٢ قابل مشاهده است، جهت محور تنش اصلی در امتدادی شمال‌شرقی- جنوب‌غربی قرار گرفته است [٢٤].



شکل ٢. سازوکار زمین لرزه زهان به‌همراه اطلاعاتی در مورد جهت تنش‌ها در زمین‌لرزه زهان به‌همراه جهت ارائه شده برای محور اصلی تنش با زاویهٔ ٤٦ درجه براساس تحلیل مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران [٢٤]

با توجه به فعالیت گسل‌های منطقه، راستای گسل فعال شده و انطباق و هم‌خوانی شیب و

[Downloaded from jeg.khu.ac.ir on 2024-10-12]

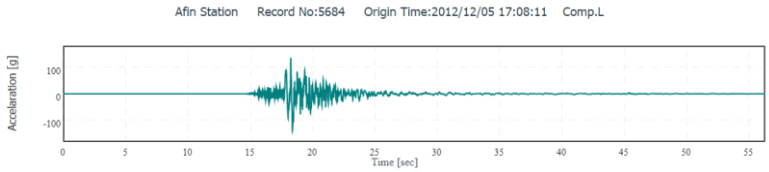
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.1.5]

[DOI: 10.52547/jeg.14.4.635]

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

تاریخچه زمانی شتاب‌نگاشت زمین‌لرزهٔ زهان

اطلاعات برداشت شده از نزدیک‌ترین شتاب‌نگاشت، در منطقهٔ افین با فاصلهٔ ۲۰ کیلومتری شمال شرق کانون سطحی زمین لرزه اصلی(شکل ۳)، نشان از این نکته دارد که دوام موج در این زمین‌لرزه از زمان شروع تا پایان، حدود ۱۰ ثانیه و حداکثر شتاب ایجاد شده در این زمین لرزه حداکثر ۰/۱۵ سانتی‌متر بر مجذور ثانیه بوده است. ضمن این‌که نگاشت ارائه شده در این شکل حاکی از آن است که این زمین‌لرزه 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. تاریخچهٔ زمانی نزدیک‌ترین شتاب‌نگاشت به کانون زمین لرزه اصلی [۳۰]

پیش‌لرزه‌های زمین‌لرزه زهان

تغییرات لرزه‌خیزی ماهانه قبل از رخداد زمین‌لرزه اصلی، می‌تواند به‌عنوان یک پیش‌نشانگر برای بررسی احتمال رخداد زمین‌لرزه اصلی استفاده شود. چنان‌که در پیشینهٔ پژوهش مطرح شد، بررسی‌های انجامشده در مناطق مختلف جهان از جمله کاتو[1] و همکاران (۲۰۱۲)، جونز[2] (۱۹۸٤)، و میناداکیس و پاپادوپولوس (۲۰۱٦)، به‌ترتیب در ساحل شرقی ژاپن، گسل سان اندریاس و زون فرورانشی شیلی و دیگر پژوهش‌ها در این زمینه حاکی از وجود

1. Kato
2. Jones

[Downloaded from jeg.khu.ac.ir on 2024-10-12]

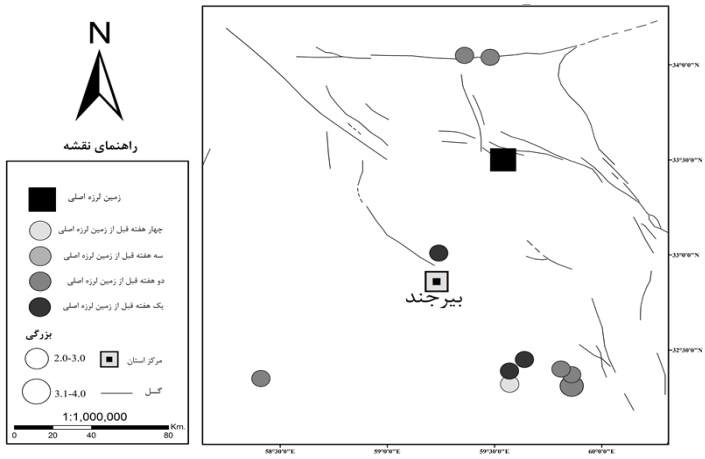
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.1.5]

[DOI: 10.52547/jeg.14.4.635]

الگوهای مشخصی قبل از رخداد زمین‌لرزه اصلی در مناطق زلزله زده است [٦]، [٧]، [٨]. این الگوها به تغییرات بزرگی، مکان و زمان رخداد پیش‌لرزه‌ها برمی‌گردد. به‌عنوان نمونه برای بیش‌تر زمین‌لرزه‌ها الگوی تغییرات مکانی پیش‌لرزه‌ها به‌صورتی است که محدودهٔ بزرگ‌تری را تحت تأثیر تغییرات قبل از زمین‌لرزه اصلی و پهنه درگیر با آن نشان می‌دهد[۳۱]. در زمین‌لرزهٔ زهان در استان خراسان جنوبی که مورد بحث این پژوهش قرار گرفته است، طبق شکل ٤، الگوی ترتیب رخداد، پراکندگی و موقعیت قرارگیری پیش‌لرزه‌ها به‌صورتی 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 فاصلهٔ نسبتا کم‌تری از رومرکز زمین‌لرزه اصلی قرار گرفته است. چنین شرایطی به‌دلیل نیاز به سست شدگی پوسته در پهنه‌ای بزرگ‌تر از لحاظ تنش اعمال شده و ایجاد فضای لازم برای حرکت گسل در پهنه دربرگیرندهٔ گسیختگی ناشی از گسلش اصلی به‌وجود می‌آید، از این‌رو، در ابتدا پراکنش پیش‌لرزه‌ها در پهنه بزرگ‌تری رخ می‌دهد و با نزدیک شدن به زمان زمین‌لرزه اصلی این پهنه متمرکزتر و در محدودهٔ گسیختگی گسلش اصلی قرار می‌گیرد [۳].

چنان‌که ذکر شد، بررسی دورهٔ زمانی رخداد پیش‌لرزه‌ها نیز از جمله مواردی است که در پیش‌بینی زمان رخداد زمین لرزه اصلی، نقش مهمی را ایفا می‌کند [٧]. بر این اساس ایده بررسی و تحلیل تغییرات لرزه‌خیزی در دو دورهٔ 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 به‌دلیل افزایش تنش در منطقه برای محیا شدن شرایط، جهت رخداد زمین‌لرزه اصلی است. هم‌چنین، به‌دنبال آن، کاهش تدریجی فراوانی زمین‌لرزه‌ها در ۱ تا ۳ ماه مانده به رخداد زمین‌لرزه اصلی که به‌دلیل تجمع و ذخیره تنش برای رخداد آن بوده است، از جمله مواردی است که در محدودهٔ منطقه زلزله‌زده زهان برداشت شد. جدول ۲ تغییرات فراوانی زمین‌لرزه‌ها در ماه‌های منتهی 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 ٤. توزیع پیش‌لرزه‌های زمین‌لرزه زهان در شعاع ۱۰۰ کیلومتری از کانون زمین لرزه اصلی، به تفکیک هفته‌های مانده به رخداد آن

جدول ۲. تغییرات فراوانی زمین‌لرزه‌ها به تفکیک بزرگی از ٦ ماه مانده به رخداد زمین‌لرزه اصلی زهان

زمین‌لرزه‌ها با بزرگی ٥-٥/٩	زمین‌لرزه‌ها با بزرگی ٤-٤/٩	زمین‌لرزه‌ها با بزرگی ٣-٣/٩	زمین‌لرزه‌ها با بزرگی ٢-٢/٩	تعداد کل زمین‌لرزه‌ها	تعداد ماه مانده به رخداد زمین‌لرزه اصلی
٠	٠	٠	٤	٤	٦
٠	٠	٠	٣	٣	٥
٠	١	١	٥	٦	٤
١	٠	٤	٨	١٣	٣
٠	١	٢	٨	١١	٢
٠	٠	١	٣	٤	١

جدول۳. تغییرات فراوانی و بزرگی پیش‌لرزه‌ها از ٦ هفته مانده به رخداد زمین‌لرزه اصلی زهان، میزان رنگ مشخص شده متناسب با فراوانی پیش‌لرزه‌ها در نظر گرفته شده است

تعداد پیش‌لرزه‌ها با بزرگی (M≥2.5) در شعاع ۱۰۰ کیلومتری از کانون زمین‌لرزه اصلی	تعداد پیش‌لرزه‌ها در شعاع ۱۰۰ کیلومتری از کانون زمین‌لرزه اصلی	تعدادهفته مانده به رخداد زمین لرزه اصلی
٠	٠	٦
١	١	٥
٠	١	٤
٠	٢	٣
٣	٥	٢
٠	٢	١

[Downloaded from jeg.khu.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.1.5]
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.635]

[Downloaded from jeg.khu.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.1.5]

[DOI: 10.52547/jeg.14.4.635]

تحلیل انجام شده در بارهٔ بررسی الگوی پیش‌لرزه‌ها در زمین‌لرزه زهان نیز حاکی از افزایش و کاهش هماهنگ تغییرات فراوانی کلی پیش‌لرزه‌ها و تعداد پیش‌لرزه‌ها با بزرگی بیش‌تر به‌ترتیب 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. همهٔ موارد یاد شده در این بخش حاکی از این نکته است که وضعیت و موقعیت مکانی پیش‌لرزه‌ها و هم‌چنین تغییرات فراوانی زمین‌لرزه‌ها در ماه‌های منتهی به رخداد زمین‌لرزه اصلی در هفته‌های قبل از وقوع آن از الگویی مشخص و هدف‌مندی تبعیت می‌کند. بر این اساس، با اثبات موارد مشابه در پهنه‌های مختلف ایران و دیگر مناطق جهان می‌توان از این تغییرات به‌عنوان نشان‌گرهایی قبل از رخداد زمین‌لرزه اصلی بهره گرفت.

پس لرزه‌های زمین لرزه 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 زمین لرزه با بزرگی ۳/۹ به ثبت رسیده است. اختلاف بزرگ‌ترین پس‌لرزه با زمین‌لرزه اصلی از جمله مواردی است که به‌عنوان عاملی اثرگذار در تشدید خرابی‌ها مورد توجه قرار می‌گیرد. زیرا رخداد پس‌لرزه‌های بزرگ، ساختمان‌های تضعیف شده در اثر رخداد زمین لرزه اصلی را با مشکل اساسی و احتمال زیادی از تخریب مواجه می‌کند. به‌عنوان 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 ۱۳۹٦) و غیره، که به تشدید 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 به‌وسیلهٔ 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

[Downloaded from jeg.khu.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.1.5]

[DOI: 10.52547/jeg.14.4.635]

زمین‌لرزه‌ها با گسل مسبب امتداد لغز و نرمال دارند. داده‌های ارائه شده در این خصوص برای زمین‌لرزه‌هایی با گسل‌های متنوع (از لحاظ نوع گسل مسبب) مانند: زمین‌لرزه بم در استان کرمان (۱۳۸۲) با گسل مسبب امتدادلغز، زمین‌لرزه سراوان در استان سیستان و بلوچستان(۱۳۹۲) با گسل مسبب نرمال، زمین‌لرزه مورموری در استان ایلام(۱۳۹۳) با گسل مسبب معکوس و بسیاری از زمین‌لرزه‌های رخ داده در کشورهای دیگر از جمله زمین‌لرزه 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 پس‌لرزه‌های بزرگ، با ارائه تحلیل‌های کاربردی در این زمینه و بررسی‌های متمرکز می‌توان به نتایج مهمی دست یافت. به‌عنوان مثال در خصوص تنش آزاد شده در محل گسل، پس از رخداد زمین‌لرزه اصلی، در این زمینه می‌توان با تلفیق اطلاعات علمی موجود و تحلیل درست آنها به مکان‌یابی دقیق‌تری در زمینهٔ شناسایی مناطق با خطر زیاد برای رخداد پس‌لرزه‌های 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 زمین‌لرزه با عنوان"تئوری انتقال تنش" در نواحی اطراف کانون سطحی زمین‌لرزه شناخته می‌شود [۳٤] و [۳۵]. بر اساس این تئوری، تنش یاد شده در نتیجهٔ وقوع زمین‌لرزه، موجب افزایش یا کاهش تنش برشی و نرمال در گسل‌های نواحی اطراف محدودهٔ گسیختگی می‌شود. بر این اساس هم‌چنین برخی محققان از جمله دوریس[1] و همکاران (۲۰۱۸) به بررسی مدل‌های مختلف در شناسایی توزیع مکانی پس‌لرزه‌ها اقدام کردند [۳٦].

محاسبهٔ این تغییرات تنش، برای تعیین توزیع مکانی پس‌لرزه‌ها و دیگر زمین‌لرزه‌های 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 رابطهٔ (۱) بیان می‌شود:

$$\Delta\sigma_f(\Delta CFS)=\Delta T+\mu(\Delta\sigma_n+AP) \qquad (۱)$$

که در این فرمول $\Delta\sigma_f$، تغییر تنش گسیختگی ایجاد شده به‌وسیلهٔ گسل مرجع روی گسل

1. Devries

[Downloaded from jeg.khu.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.1.5]

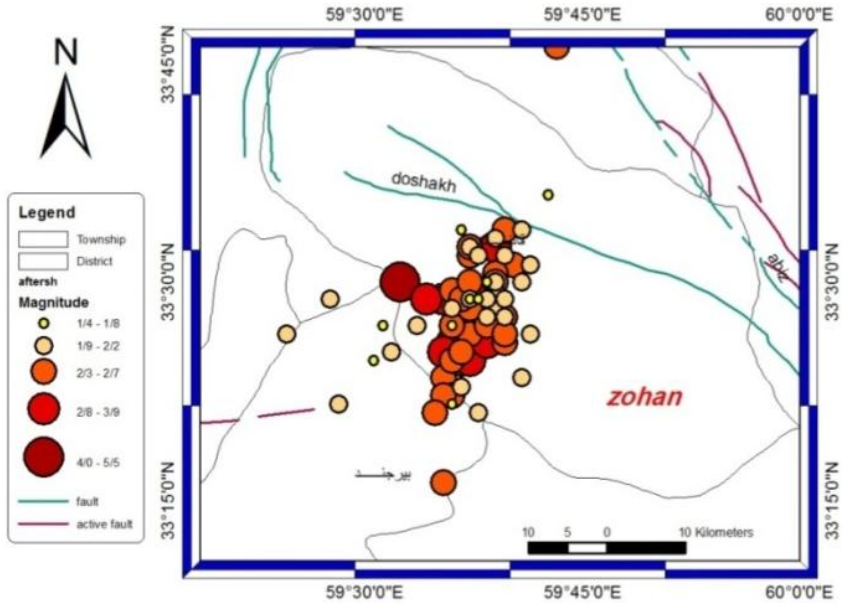
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.635]

گیرنده، ΔT، تغییر تنش برشی در جهت لغزش، ΔP، تغییر فشار منفذی در زون گسلی، μ، 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 حداکثر 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 دربارهٔ 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 (شکل۲) 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 به‌وسیلهٔ مؤسسهٔ ژئوفیزیک دانشگاه تهران ارائه شده است.

بر این اساس، اگر پراکندگی پس‌لرزه‌های اصلی زمین‌لرزه زهان (شکل۵) با جهت محور تنش اصلی(شکل۲) مقایسه شود، هم‌خوانی مشخصی بین پراکندگی آنها و جهت تنش اصلی حداکثر (هر دو با جهت‌گیری شمالی شرقی- جنوب غربی) نشان می‌دهد. چنان‌که ذکر شد و بر اساس نتیجهٔ پژوهش یاد شده، علت این انطباق را می‌توان هم‌خوانی معمول بین حداکثر جابه‌جایی‌های ایجاد شده در اثر رخداد زمین‌لرزه با محور تنش اصلی حداکثر(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 زمین‌لرزه از جمله ریسک رخداد پس‌لرزه‌های بزرگ قرار گیرند.



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

از تحلیل پس‌لرزه‌های این زمین‌لرزه نتایج مهم دیگری نیز احصاء می‌شود. از جمله این‌که فاصله مشخصی بین محل رومرکز زمین‌لرزه اصلی و پس‌لرزه‌ها وجود دارد، این مورد در بسیاری از زمین‌لرزه‌ها با گسل مسبب امتداد لغز رخ می‌دهد. به عقیدهٔ برخی از محققان (وان‌درالس[1] و شاو[2]، ۲۰۱۵ و داس[3] و شولدز[4]، ۱۹۸۱) [۱۶] و [۳۸]، این فرایند حاصل افزایش تنش برشی به‌سمت خارج از گسیختگی است. البته بررسی انجام شده در زمینهٔ 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 مه‌لرزه‌ای دارد و پس از رخداد زمین لرزه اصلی، تنش باقی‌مانده را

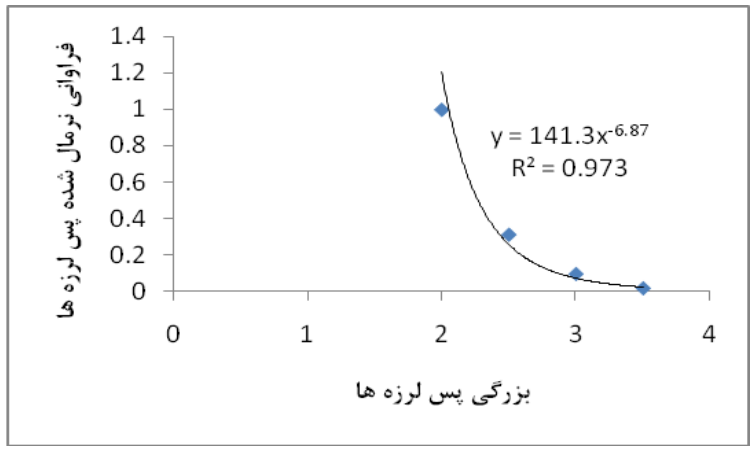
1. Van Der Elst
2. Shaw
3. Das
4. Scholds

[Downloaded from jeg.khu.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.1.5]
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.635]

در طول و به قسمت‌های انتهایی گسل منتقل می‌کند.

بر اساس نتایج به‌دست آمده از پژوهش‌های برخی محققان (تاپا[1] و همکاران، ۲۰۱۸؛ مندل[2] و رستوگی[3]، ۲۰۰۵؛ شرباکوف[4] و همکاران، ۲۰۰۵)، در این تحقیق از نمودار گوتنبرگ – ریشتر برای تحلیل پس‌لرزه‌ها استفاده شده است[۱۷]، [۳۹] و [٤۰]. این تحلیل با هدف پیش‌بینی ادامه روند پس‌لرزه‌ها در منطقه رومرکز زمین لرزه و احتمال فعال شدن گسل‌های مناطق اطراف انجام می‌شود. بر این اساس در شکل ٦، نتیجهٔ تحلیل نمودار گوتنبرگ- ریشتر مربوط به پس‌لرزه‌ها که حاکی از کاهش روند رخداد آنها و هم‌چنین کاهش ریسک ناشی از رخداد پس‌لرزه‌های بزرگ در این منطقه است، ارائه شده است. شیب زیاد و ضریب منفی در نمودار گوتنبرگ ریشتر در شکل ٦، نشان از تخلیهٔ حداکثر انرژی به‌وسیلهٔ 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.



شکل٦. نمودار گوتنبرگ- ریشتر پس‌لرزه های زمین لرزه ۱۳۹۱ زهان

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

[Downloaded from jeg.khu.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.1.5]
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.635]

[Downloaded from jeg.khu.ac.ir on 2024-10-12]

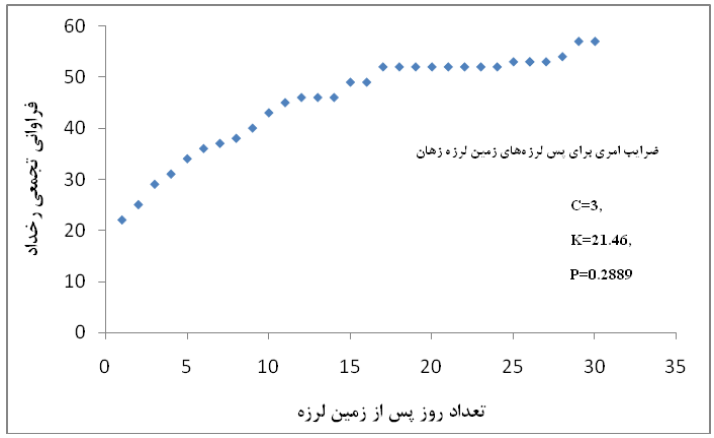
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.1.5]

[DOI: 10.52547/jeg.14.4.635]

در شکل ۷، روند نسبی کاهش شیب فراوانی تجمعی پس‌لرزه‌ها نشان داده شده است. این مورد بر طبق قانون اُمُری- آتسو[1] (۱۹۷۰)، برای همهٔ زمین‌لرزه‌های بزرگ و پس‌لرزه‌های آنها قابل تأیید است[٤١]. به‌طور معمول و برای زمین‌لرزه‌های مختلف، کاهش شیب نمودار تا نزدیک به صفر درجه، نشان‌دهندهٔ آرام شدن منطقه از نظر رخداد پس‌لرزه‌ها و بازگشت منطقه به آرامش از لحاظ لرزه زمین‌ساختی است. چنین شرایطی را می‌توان تا حدود زیادی در بخش انتهایی نمودار تجمعی پس‌لرزه‌ها برای زمین‌لرزه زهان در شکل ۷ نیز مشاهده کرد. فرمول به‌دست آمده در قانون اُمُری که به‌وسیلهٔ آتسو تصحیح شد بدین‌شرح قابل ارائه است

$$N(t)=K/(t+n)^{p} \qquad (۲)$$

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



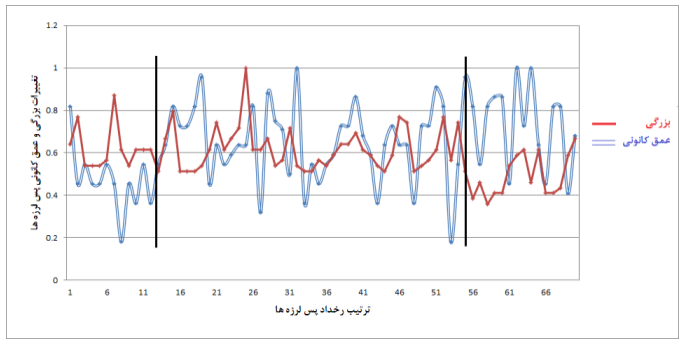
شکل۷. نمودار تجمعی اُمُری برای پس لرزه های زمین لرزه زهان

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

1. Utsu

در مقایسه روز اول و روزهای بعدی پس از رخداد زمین‌لرزه کاملاً مشخص است. به‌طور 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 به‌ویژه برای زمین‌لرزه‌های اصلی با بزرگی کم‌تر از ٦ در گسل‌های مسبب امتدادلغز عمومیت نسبی بیش‌تری دارد [٢٠].

در شکل ٨، ارتباط تغییرات بزرگی به عمق پس‌لرزه‌ها، میزان ریسک ناشی از رخداد آنها را نشان می‌دهد. به‌عنوان 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 ٨ نشان از هماهنگی و رابطهٔ 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 مقایسهٔ دقیق‌تر و ملموس‌تر دو پارامتر عمق کانونی و بزرگی پس‌لرزه‌ها، مقدار هر دسته، به بزرگ‌ترین عدد موجود در داده‌های هر پارامتر تقسیم شده تا مقایسهٔ مربوط در شرایط یک‌سان و اصطلاحاً با داده‌های نرمال شده انجام شود. نرمال‌سازی داده‌ها به‌طور معمول در مواقعی استفاده می‌شود که هدف از بررسی آماری، مقایسهٔ دو پارامتر در شرایط یک‌نواخت باشد. با نرمال‌سازی داده‌ها، خروجی مربوط به هر پارامتر به‌صورت بی‌بعد در آمده و در یک بازهٔ مشخصی (به‌طور مثال و در این مقاله ٠ تا ١) مقایسه می‌شوند. با توجه به شکل ٨، پس‌لرزه‌های با بزرگی زیاد و عمق کانونی کم که بتوانند اثر مشخصی روی مناطق زلزله‌زده بگذارند، مشاهده نمی‌شود.



شکل ٨. تغییرات بزرگی و عمق پس لرزه‌ها به‌صورت نرمالیزه شده برای بررسی میزان خطر ناشی از رخداد پس‌لرزه‌ها

[Downloaded from jeg.khu.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.1.5]
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.635]

[Downloaded from jeg.khu.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.1.5]

[DOI: 10.52547/jeg.14.4.635]

هم‌چنین چنان‌که در بخش‌های قبل ذکر شد یکی از اثرات مهم پس‌لرزه‌ها که باعث تشدید خرابی‌های ناشی از زمین‌لرزه و اثرات ثانویه آن شده، رخداد پس‌لرزه‌های بزرگ است. بر این اساس پیش‌بینی زمان رخداد پس‌لرزه‌های بزرگ اهمیت بسیاری پیدا می‌کند. یکی از نظریه‌های مهمی که کمک زیادی به پیش‌بینی پس‌لرزه‌های بزرگ کرده است، استفاده از نظریهٔ سکون لرزه‌ای است. این نظریه مبتنی بر افزایش زمان برای رخداد پس‌لرزه‌های بزرگ نسبت به پس‌لرزه‌های 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 پس‌لرزه‌های بزرگ نیز نسبت به پس‌لرزه‌های کوچک همین شرایط برقرار است، از این‌رو، می‌توان از این مورد برای پیش‌بینی زمان رخداد پس‌لرزه‌های بزرگ استفاده کرد [۴۲]، [۴۳]، [۴۴]. چنین شرایطی برای بزرگ‌ترین پس‌لرزه زمین‌لرزه زهان (M=۳/۹) براساس جدول ۲ نشان داده شده است. این مورد تأییدی دیگر بر نظریه ارائه شده در این باره، برای پیش‌بینی زمان رخداد پس‌لرزه‌های بزرگ است. چنان‌که در ردیف ٤ جدول نشان داده شده، انطباق مشخصی بین فاصلهٔ زمانی(سکون لرزه‌ای) بین پس‌لرزه‌های بزرگ‌تر(M≥ ۳) و اندازهٔ بزرگی آنها وجود دارد که می‌تواند در پیش‌بینی زمان رخداد پس‌لرزه‌های بزرگ یک زمین لرزه، به شکلی بسیار کاربردی استفاده شود.

جدول ٤. انطباق فاصلهٔ زمانی و بزرگی بین پس‌لرزه‌های با M≥ ۳ در زمین‌لرزه زهان به‌ویژه در بارهٔ بزرگ‌ترین پس‌لرزه

ردیف	تاریخ و زمان رخداد پس لرزه	بزرگی پس لرزه	زمان سکون لرزه ای برای هر پس لرزه (برحسب دقیقه)
۱	۱۳۹۱/۰۹/۱۵ ۲۰:۵۱:۰۳	۳/۰	۱۳ (پس از زمان رخداد زمین لرزه اصلی)
۲	۱۳۹۱/۰۹/۱۵ ۲۱:۲۷:۰۳	۳/۴	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 پس‌لرزه‌های متوسط و بزرگ

[Downloaded from jeg.khu.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.1.5]

[DOI: 10.52547/jeg.14.4.635]

و فاصلهٔ زمانی(سکون لرزه‌ای) بین رخداد هریک از آنها، از روش آماری هم‌بستگی پیرسون[1] 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 پس‌لرزه‌های بزرگ در زمین‌لرزه‌های رخ داده در مناطق و شرایطی مشابه با این زمین‌لرزه و تعمیم کلیت روش ارزیابی شده برای مناطق دیگر با شرایط لرزه زمین‌ساختی متفاوت است. ضمن این‌که در این روش تمامی تغییرات دو پارامتر نسبت به‌هم برآورد شده و در خروجی به‌دست آمده با عددی کاملاً واقعی از نسبت تغییرات دو پارامتر مواجه هستیم. به‌طور خلاصه با این روش می‌توان به‌میزان انطباق دو دسته از پارامترهایی که تغییرات آنها با هم مقایسه می‌شوند و میزان نزدیکی این تغییرات پی برد [٤٥]. لازم به‌ذکر است پژوهش‌های مشابهی در حوزهٔ بررسی پارامترهای لرزه‌ای از این روش استفاده کرده‌اند [۳۵]. برای چنین فرایندی داده‌های هر دو پارامتر به‌صورت متقابل چنان‌که در جدول ٤ 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 فاصلهٔ زمانی بین رخداد دو پس لرزه 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 محاسبهٔ هم‌بستگی پیرسون از بخش آمار کاربردی نرم‌افزار اکسل استفاده شده است و روش برآورد این فرایند به‌وسیلهٔ معادلهٔ (۳) قابل محاسبه است:

$$R = \sum_i (X_i - \overline{X})(Y_i - \overline{Y}) / (n-1) S_X S_Y \qquad (۳)$$

جایی که X ، Y، S_X و S_Y به‌ترتیب 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 فاصلهٔ زمانی پس لرزه‌های متوسط و بزرگ عددی معادل ۰/۹۰٤۸ که به یک نزدیک بوده و نشان از انطباق زیاد و نزدیکی تغییرات دو پارامتر بررسی شده نسبت به‌هم دارد. بر اساس این روش و درصورت 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. Preason Correlation

[Downloaded from jeg.khu.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.1.5]

[DOI: 10.52547/jeg.14.4.635]

پهنه‌های 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. به‌عنوان مثال برای پس‌لرزه‌های زمین‌لرزه زهان چنان‌که در ردیف ٤ از جدول ۲ مشخص شده پس از رخداد پس‌لرزه با بزرگی ۳/۱ در ساعت ۰۰:۰۸ بامداد روز ١٦ آذرماه، بیش از ۷۲ ساعت، شاهد رخداد هیچ پس‌لرزه‌ای با بزرگی ۳ و بیش‌تر نبودیم. این در حالی است که فاصلهٔ 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 دربارهٔ توصیف یک توالی برای رویدادهای احتمالی به‌دلیل این‌که فرایندی تصادفی بدون حافظه است بدین‌معنی که توزیع احتمال شرطی حالت بعد تنها به حالت فعلی بستگی دارد و مستقل از گذشته است؛ به‌عبارت 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 به‌عنوان مدلی مناسب برای این تحلیل انتخاب شد.

[Downloaded from jeg.khu.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.1.5]

[DOI: 10.52547/jeg.14.4.635]

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 به‌عنوان رخدادی تصادفی دارد و تا حدود زیادی می‌تواند به اعتبار مدل سکون‌لرزه‌ای نیز بیفزاید. به‌عبارت دیگر، سری زمانی، دنباله‌ای از مشاهدات است که بر اساس زمان یا هر کمیت دیگر با فواصل یک‌سان (معادلهٔ ٤) مرتب می‌شود.

$$i=1,2,\ldots.n \qquad t_i-t_{i-1}=\Delta t= Const \qquad (٤)$$

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

زمان سپری شده در هر دوره در سری زمانی را نیز می‌توان از طریق معادلهٔ (۵) به‌دست آورد:

$$t_j=t_{i+j}\ \Delta t \qquad (۵)$$

t_j زمان سپری شده از سری زمانی را نشان می‌دهد و j نشان از دورهٔ سپری شده در سری زمانی است [٤٦].

سری‌های زمانی با دو کاربرد اصلی استفاده می‌شوند: یکی شناسایی ماهیت پدیده که به وسیله دنباله‌ای از مشاهدات نشان داده می‌شود و دیگری پیش‌بینی پدیدهٔ بررسی شده که در زمان‌های آینده احتمال وقوع دارد که کاربرد مورد دوم در این مقاله به‌عنوان هدف اصلی، یعنی پیش‌بینی زمان رخداد پس‌لرزه‌های بزرگ شناخته شده است. بحث سری زمانی دربارهٔ پس‌لرزه‌ها چون وابسته به تعداد در بزرگی‌های مختلف است، به‌عنوان سری زمانی یک متغیره معرفی می‌شود و چون زمان پیوسته در نظر گرفته شده مدل یک‌متغیره پیوسته را تشکیل می‌دهد. هم‌چنین از آن‌جاکه رخداد پیش‌لرزه‌ها در چنین مدل‌هایی به‌صورت 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 دربارهٔ رخداد پس‌لرزه‌های بزرگ بپردازد، باید به دنبال رابطهٔ مشخصی بین مقادیر هر سری باشیم که این مورد در بحث سری زمانی بررسی می‌شود. هنگامی امکان پیش‌بینی برای سری زمانی وجود دارد که به‌صورت 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

[Downloaded from jeg.khu.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.1.5]

[DOI: 10.52547/jeg.14.4.635]

تغییرات مقدارها وابسته به زمان نیست. برای ایستا کردن سری زمانی از آن‌جاکه امکان پیش‌بینی برای سری‌های زمانی ناایستا به راحتی امکان‌پذیر نیست، بهتر است عواملی که باعث خارج شدن سری زمانی از حالت ایستایی هستند، حذف شوند. به این‌ترتیب باید مؤلفه‌های مؤثر در ناایستایی سری زمانی شناسایی و حذف شود. این مورد با فرایندی تحت عنوان هموارسازی[1] و یا صافی[2] قابل انجام است. هموارسازی به‌طور معمول با روش‌های عملگرهای میانگین متحرک و روش‌های تفاضل‌گیری انجام می‌شود [٤٧]. در سری‌های زمانی مربوط به پس‌لرزه‌ها 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 پس‌لرزه‌های با بزرگی ۲ و بیش‌تر ($M\geq2$) زمین‌لرزه موردی این تحقیق یعنی زمین‌لرزه زهان می‌پردازیم. برای تحلیل سری زمانی داده‌ها، در مرحلهٔ 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 پس‌لرزه‌ها در پژوهش‌های مختلف و انجام آزمون Test-Retest برای داده‌های مربوط به پس‌لرزه‌های این زمین‌لرزه، دورهٔ زمانی ثابت در نظر گرفته شده برای این تحلیل در بازه‌های ٤ ساعته و به تعداد ۱۸ دوره یعنی زمان کلی ۷۲ ساعت پس از رخداد زمین‌لرزه اصلی انتخاب شده است. براساس پیش شرط‌های مطرح شده در بالا برای پس‌لرزه‌های زمین‌لرزه زهان در شرق ایران، داده‌های حاصل از این تحلیل در جدول ۵ ارائه شده است. در این جدول برای شناسایی هدف‌مند زمان رخداد پس‌لرزه‌های بزرگ‌تر از تفکیک پس‌لرزه‌ها در بازه‌های بزرگی مشخص استفاده می‌شود.

براساس تحلیل سری زمانی پس‌لرزه‌های زمین‌لرزه زهان به این نتیجه می‌رسیم که بر اساس قانون حاکم بر رخداد پس‌لرزه‌ها و قانون امری، کاهش مشخص تعداد و بزرگی پس‌لرزه‌ها تا حدود ٤٤ ساعت (انتهای دورهٔ ٤ 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

[Downloaded from jeg.khu.ac.ir on 2024-10-12]

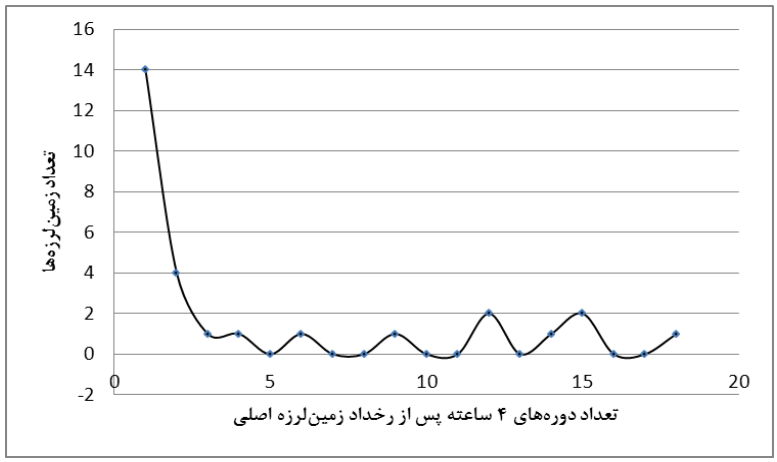
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.1.5]

[DOI: 10.52547/jeg.14.4.635]

پس‌لرزه‌ها در دوره زمانی ٤ 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 ٣/٩ در ٤ ساعت آخر (ردیف ١٨ جدول ٥) بزرگی پس‌لرزه‌ها مجدد پس از یک افزایش نسبی در دورهٔ ١٢ در دورهٔ ١٥ 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 به‌دلیل شرایط حاکم بر شرایط لرزه‌زمین‌ساختی کانون زمین‌لرزه اصلی و مناطق تحت تأثیر آن ممکن است به‌دلیل فعال شدن گسل‌ها در اثر القای تنش و یا باقی‌ماندن تنش روی گسل مسبب زمین‌لرزه اصلی رخداد پس‌لرزه‌های بزرگ و غیرمنتظره به‌وقوع بپیوندد. از این مورد می‌توان در شناسایی زمان رخداد بزرگ‌ترین پس‌لرزه قبل از رخداد آن استفاده کرد.

جدول ٥. سری زمانی رخداد پس لرزه‌های زمین لرزه زهان بر مبنای بزرگی آنها

تعداد دوره‌های زمانی ثابت پس از رخداد زمین لرزه اصلی	تعداد پس لرزه‌ها با M≥2	تعداد پس لرزه‌ها با M≥2/5	تعداد پس لرزه‌ها با M≥3
١	١٤	٤	٢
٢	٤	١	١
٣	١	٠	٠
٤	١	٠	٠
٥	٠	٠	٠
٦	١	١	٠
٧	٠	٠	٠
٨	٠	٠	٠
٩	١	٠	٠
١٠	٠	٠	٠
١١	٠	٠	٠
١٢	٢	١	٠
١٣	٠	٠	٠
١٤	١	٠	٠
١٥	٢	٢	٠
١٦	٠	٠	٠
١٧	٠	٠	٠
١٨	١	١	١



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

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

نتیجه‌گیری

۱. با توجه به نزدیکی گسل فعال دوشاخ به رومرکز زمین لرزه زهان، هم‌خوانی شیب و امتداد و نوع گسل مسبب با سازوکار کانونی ارائه شده برای این زمین‌لرزه، انتساب این گسل به‌عنوان گسل مسبب این زمین‌لرزه قابل تأیید است.

۲. تحلیل تغییرات الگوی بزرگی، مکانی، زمانی و فراوانی پیش‌لرزه‌ها در زمین‌لرزه زهان منطبق بر الگوهای مشخصی بوده است که در ادامه به آنها اشاره می‌شود:

الف) الگوی مکانی پیش لرزه‌ها:

[Downloaded from jeg.khu.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.1.5]
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.635]

[Downloaded from jeg.khu.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.1.5]

[DOI: 10.52547/jeg.14.4.635]

الگوی مکانی پیش‌لرزه‌ها حاکی از کاهش فاصله مکانی آنها به کانون زمین‌لرزه اصلی با

ب) الگوی فراوانی لرزه‌خیزی در ماه‌های منتهی 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 منتهی به رخداد زمین‌لرزه روند کاهشی نشان داده است که دلیل اصلی آن تمرکز بیش‌تر انرژی برای رخداد زمین‌لرزه اصلی بوده است.

همین شرایط برای هفته‌های منتهی 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 حداکثر ایجاده 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. 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

[Downloaded from jeg.khu.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.1.5]

[DOI: 10.52547/jeg.14.4.635]

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 عمق‌کم به‌صورت توأمان) 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 به‌عنوان 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 یزان ۰/۹۰۴۸ ارائه شد، حاکی از این نکته است که می‌توان براساس میزان انطباق مربوطه با توجه به شرایط لرزه‌زمین‌ساختی در هر پهنه به نتایجی برای الگوسازی منطقه‌ای در این زمینه دست یافت که نیاز به بررسی دقیق در این حوزه دارد.

۴. شیب زیاد نمودار گوتنبرگ-ریشتر در پس لرزه‌های 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 تنش اصلی حداکثر 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 دربارهٔ پیش‌بینی زمان رخداد پس‌لرزه بزرگ دست یافت.

[Downloaded from jeg.khu.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.1.5]

[DOI: 10.52547/jeg.14.4.635]

قدردانی

از سرکار خانم دکتر مریم صدقی دکتری ژئوفیزیک گرایش زلزله‌شناسی که در بارهٔ 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).

[Downloaded from jeg.khu.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.1.5]

[DOI: 10.52547/jeg.14.4.635]

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. Nishimora 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 Dobra 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.

٢٠. ساکت ع.، فاطمی‌عقدا م.، خدیوی ش.، "مقایسهٔ پارامترهای لرزه‌ای زمین لرزه‌های بم و زرند با تأکید بر پس لرزه‌های آنها"، نهمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران، دانشگاه خوارزمی (١٣٨٤).

٢١. تارتار م.، فرهبد ا. م.، "مطالعهٔ زمین‌لرزه ٨ خرداد ١٣٨٣ فیروزآباد-کجور و پس لرزه‌های آن بر اساس تحلیل داده‌های ثبت شده در ایستگاه‌های لرزه‌نگاری محلی"، فصلنامهٔ علوم زمین، سال شانزدهم. شمارهٔ ٦٤ (١٣٨٦).

٢٢. حاجتی، ف.، آق آتابای م.، شناسایی مناطق مستعدخطر مرتبط با پس‌لرزههای زمین‌لرزه‌های بزرگ مطالعه موردی: زمینلرزه سیلاخور، لرستان.، مجله آمایش جغرافیایی فضا فصلنامه علمی- پژوهشی دانشگاه گلستان سال دوم/ شماره مسلسل چهارم (١٣٩١).

٢٣. ساکت ع.، "مطالعه و تحلیل آماری پس لرزه‌های زمین لرزه‌های بزرگ‌تر از ٦ در ایران، (١٣٩٣-١٣٨٠)"، پژوهشکده سوانح طبیعی ایران(١٣٩٣).

24. IRSC (Iranian Seismological Center Institute of Geophysics), University of Tehran.(2012), http://irsc.ut.ac.ir.

٢٥. اسلامی آ.، "گزارش زمین‌لرزه ١٥ آذرماه ١٣٩١، زهان- شمال استان خراسان جنوبی"، انجمن زلزله شناسی مهندسی ایران (١٣٩١).

٢٦. پایگاه ملی داده‌های علوم زمین ایران.، "نقشه گسل‌های ایران" (١٣٨٤).

27. Berberian M., "Active faulting and tectonics of Iran. In Zagros-Hindu Kush-Himalaya geodynamic Evolution", Geodynamics Series, AGU, 3 (1981) 33-69.

٢٨. "آیین نامه ٢٨٠٠ ویرایش چهارم"، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی (١٣٩٤).

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.

٣٠. "شتاب‌نگاشت‌های زمین لرزه زهان"، شبکه شتاب‌نگاری کشوری، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی.

[Downloaded from jeg.khu.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.1.5]
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.635]

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 زمین‌ساخت و زلزله‌شناسی، "گزارش مقدماتی رخداد زمین لرزه ۲۱ اردیبهشت ماه ۱۳۹۲ (بزرگا ۶,۲) شمال جاسک: گوهران، هرمزگان"، 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., Scholds 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.

[Downloaded from jeg.khu.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.1.5]
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.635]

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).

[Downloaded from jeg.khu.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.1.5]
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.635]