

Large Aftershock Routing to Reduce Earthquake Fatalities and Injuries (Case Study, Sefidsang Earthquake on April 5, 2017 in Northeastern of Iran)

Seyed Mahmood Fatemiaghda¹ , Ali Saket^{1*} , Hossein Sadeghi², Ahmad Fahimifar³

1- Engineering Geology Group, Faculty of Geo science, Kharazmi University, Tehran, Iran

2- Geology Group, Faculty of Science, Ferdowsi University of mashhad, mashhad, Iran

3- Faculty of Civil and Environment Engineering, Amirkabir University, Tehran, Iran

*Corresponding author: alisaketgeo@gmail.com

Abstract

Background and Objectives: Examining experiences related to past earthquakes, especially in developing countries suggest that in addition to fatalities and injuries caused by the main earthquake the large aftershocks also have effect to increasing the mentioned consequences. In this Research has presented a practical method in predicting the large aftershocks with the aim of reducing fatalities and injuries caused by their occurrence.

Materials and Methods: The survey method used in this study is based on statistical analysis related to basic parameters of the primary aftershocks such as: time occurrence, magnitude with aim of prediction of time the large aftershock for alarm and evacuation to people from non-resistant buildings. In this research has used seismic quiescence theory (time distance between aftershocks event) and analysis of the normalized data of depth and magnitude of primary aftershocks for the prediction of time and vulnerability level caused of the large aftershocks in Sefidsang earthquake in northeast of Iran.

Result: Data analysis suggests that there is the definite relationship between magnitude and seismic quiescence of primary aftershocks that this relationship can be base of analysis for prediction of the time of the large aftershocks.

Conclusion: The results of this study indicate that predicting the time and the rate of vulnerability of the large aftershocks can be obtained by combining the outputs of the two aforementioned analyzes.

Keywords: Sefidsang earthquake; largest aftershock; Seismic quiescence; prediction; fatalities and injuries

How to cite this article: Fatemiaghda SM, Saket A, Sadeghi H, Fahimifar A. Large Aftershock Routing to Reduce Earthquake Fatalities and Injuries (Case Study, Sefidsang Earthquake on April 5, 2017 in Northeastern of Iran).

Irtiqa imini pishgiri masdumiyat. 2021;9(2):92-101.

<https://doi.org/10.22037/iipm.v9i2.29037>

روند یابی پس لرزه‌های بزرگ با هدف کاهش تلفات و مصدومین ناشی از زمین لرزه (مطالعه موردی، زمین لرزه ۱۶ فروردین ۱۳۹۶ سفیدسنگ در شمال شرق ایران)

سید محمود فاطمی عقدا^۱، علی ساکت^{۱*}، حسین صادقی^۲، احمد فهیمی فر^۳۱- گروه زمین شناسی مهندسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران
۲- گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
۳- دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

چکیده

سابقه و هدف: بررسی تجارب مرتبط با زمین لرزه‌های گذشته بویژه در کشورهای توسعه نیافته و در حال توسعه مانند ایران حاکی از این نکته است که علاوه بر تلفات و مصدومیت‌های ناشی از رخداد زمین لرزه اصلی، پس لرزه‌های بزرگ این زمین لرزه‌ها نیز معمولا در افزایش پیامدهای یاد شده موثرند. در این پژوهش با هدف کاهش تلفات و مصدومیت‌های ناشی از رخداد پس لرزه‌های بزرگ به ارائه روشی کاربردی در زمینه پیش‌بینی این پس لرزه‌ها پرداخته شد.

روش بررسی: روش بررسی بکار گرفته شده در این پژوهش بر مبنای تحلیل آماری داده‌های مربوط به پارامترهای مبنایی پس لرزه‌های اولیه از جمله زمان رخداد، عمق کانونی و بزرگی آن‌ها با هدف شناسایی زمان رخداد پس لرزه‌های بزرگتر برای اطلاع رسانی و تخلیه به موقع افراد بازمانده در سازه‌های نامقاوم است. در این پژوهش از تئوری سکون لرزه‌ای (فاصله زمانی بین رخداد پس لرزه‌ها) و تحلیل داده‌های نرمال شده عمق و بزرگی پس لرزه‌های اولیه برای شناسایی زمان و میزان آسیب‌پذیری ناشی از رخداد پس لرزه‌های بزرگ برای زمین لرزه فروردین ماه ۱۳۹۶ سفیدسنگ در شمال شرق ایران استفاده شد.

نتایج: تحلیل داده‌ها در این پژوهش حاکی از این نکته است که رابطه مشخصی بین فاصله زمان بین بزرگی و سکون لرزه‌ای پس لرزه‌های اولیه وجود دارد که این رابطه می‌تواند مبنای تحلیل مورد نظر در خصوص پیش‌بینی زمان رخداد پس لرزه بزرگ قرار گیرد.

نتیجه‌گیری: نتایج حاصل از این پژوهش حاکی از آن است که با تحلیل همزمان داده‌های نرمال شده عمق و بزرگی بر مبنای سکون لرزه‌ای بین پس لرزه‌ها می‌توان به پیش‌بینی دقیقی از زمان و آسیب‌پذیری ناشی از پس لرزه‌های بزرگ دست یافت.

واژگان کلیدی: زمین لرزه سفیدسنگ؛ بزرگترین پس لرزه؛ سکون لرزه‌ای؛ پیش‌بینی؛ تلفات و مصدومین

مقدمه

بین سال‌های ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۵ رتبه هفتم کشورهای جهان از لحاظ تعداد تلفات ناشی از سوانح طبیعی و همچنین رتبه پنجم جهان از لحاظ تعداد مصدومان ناشی از این سوانح را به خود اختصاص داده است (۲). بر همین اساس بحث پیش‌بینی زمین لرزه در کنار مقاوم‌سازی سازه‌ها به‌عنوان یکی از رویکردهای کاهش تلفات و مصدومیت‌های ناشی از زمین لرزه شناخته شده است و بشر در طول تاریخ تلاش زیادی برای رسیدن به راهکاری در این خصوص ارائه نموده است. مزیت اصلی پیش‌بینی در ارتقای ایمنی و پیشگیری از مصدومیت‌ها، شناخت امکان وقوع بلاهای طبیعی آینده و جلوگیری از غافلگیری در برابر رویدادهای احتمالی آینده است (۳). که رخداد زمین لرزه‌های بزرگ و اثرات ثانویه آن‌ها می‌تواند به‌عنوان بخشی از این رویدادهای مهم به حساب آید. با این حال به دلیل عدم شناسایی

تلفات انسانی به‌عنوان مهم‌ترین اثر ناشی از سوانح طبیعی شناخته شده است. چراکه ساختمان‌ها، زیرساخت‌ها، دارایی‌های شخصی و سازمانی و تمامی مواردی که توسط انسان فراهم گردیده قابل جایگزینی بوده و تنها جان یک انسان است که قابلیت جایگزینی نخواهد داشت. بر همین اساس کاهش تلفات انسانی و مصدومیت ناشی از سوانح طبیعی به‌عنوان یک اولویت برای ایجاد جامعه تاب‌آور در نظر گرفته شده است (۱). برای مشخص نمودن ضرورت این مهم، می‌توان به داده‌های آماری در خصوص تلفات و مصدومین ناشی از بلاهای طبیعی به‌ویژه در کشورهای توسعه نیافته و در حال توسعه از جمله ایران اشاره نمود که براساس مطالعات آماری صورت گرفته

ارائه راهکارهایی برای ارزیابی میزان مقاومت سازه‌های بلند مرتبه در برابر رخداد پس‌لرزه‌های بزرگ پرداخت و پاسخ این سازه‌ها در برابر رخداد زمین لرزه اصلی و پس‌لرزه‌های بزرگ را محاسبه نمود. در این پژوهش از "چارچوب مهندسی زمین لرزه بر مبنای عملکرد"^۱ استفاده گردید (۷). مبنای پژوهش یاد شده، ارزیابی عملکرد سازه تخریب یا تضعیف شده در اثر زمین لرزه به عنوان تابعی از وضعیت زلزله شناسی مهندسی قبل از رخداد زمین‌لرزه است. به عبارت دیگر، در این پژوهش رابطه بین مولفه‌های مربوط به مقاومت سازه و عملکرد سازه و رفتار آن در برابر رخداد زمین‌لرزه مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتیجه این پژوهش به ارائه چارچوب تصمیم‌سازی برای ساختمان‌های بلند در برابر رخداد پس‌لرزه‌های بزرگ منجر گردید. اهمیت بحث آسیب‌پذیری سازه‌های تضعیف‌شده که تحت تأثیر پس‌لرزه‌های بزرگ تخریب می‌شوند را می‌توان به‌ویژه در مناطق روستایی و به دلایل زیر اولویت بخشید:

- فراوانی بیشتر سازه‌های ضعیف‌تر در مناطق روستایی نسبت به مناطق شهری
- فراوانی بیشتر رخداد زمین‌لرزه‌ها در روستاهای ایران در مقایسه با مناطق شهری براساس آمار زمین‌لرزه‌های به ثبت رسیده در دهه‌های اخیر
- سطح پایین‌تر فرهنگ ایمنی در مناطق روستایی نسبت به مناطق شهری به‌ویژه در خصوص تخلیه سازه‌های نایمن

بر این اساس اثرات مشخص‌تر ناشی از پس‌لرزه‌های بزرگ در زمین‌لرزه‌هایی که کانون سطحی آن‌ها در مناطق نزدیک به سازه‌های مقاوم و به‌ویژه در مناطق روستایی بوده به شکل مشخص‌تری بروز یافته است. با توجه به اهمیت این موضوع و علیرغم ارائه پژوهش‌های متعدد در این زمینه، پژوهشگران هنوز به روشی کاربردی و عملی در خصوص پیش‌بینی نسبتاً دقیقی از لحاظ زمان رخداد بزرگ‌ترین پس‌لرزه ناشی از یک زمین‌لرزه باهدف تخلیه به‌موقع مناطق تحت تأثیر و کاهش تلفات و صدمات جسمی و روانی ناشی از این پس‌لرزه‌ها دست نیافته‌اند. نتیجه چنین شرایطی ناامنی و افزایش ترس و دلهره ناشی از رخداد پس‌لرزه‌های بزرگ است که گاه با افزایش تلفات نیز همراه می‌شود.

براین‌اساس در مطالعه حاضر به ارائه رویکردهایی در خصوص پیش‌بینی و کاهش اثرات ناشی از پس‌لرزه‌های بزرگ و تخلیه به‌موقع مناطق زلزله‌زده با سازه‌های تضعیف‌شده پرداخته شده است. برای دستیابی به این هدف و بررسی روش‌های موردنظر در یک نمونه زمین‌لرزه واقعی، تحلیل و روند یابی پس‌لرزه‌های بزرگ زمین‌لرزه فروردین‌ماه ۱۳۹۶ سفید سنگ در استان خراسان رضوی مورد بررسی قرار گرفته است.

دقیق مکان، بزرگی و زمان زمین‌لرزه‌های اصلی باوجود پیشرفت‌های صورت گرفته در این حوزه، پیش‌بینی دقیق آن هنوز به دست بشر تحقق نیافته است. این در حالی است که پس از وقوع زمین‌لرزه اصلی رخداد پس‌لرزه‌های بزرگ و اثرات ناشی از آن‌ها نیز در دهه‌های گذشته به‌عنوان معضلی مهم که منجر به افزایش تلفات و مصدومین می‌شود، مطرح گردیده است. این افزایش تلفات و مصدومین در اثر رخداد پس‌لرزه‌های بزرگ به این دلیل است که پس از رخداد زمین‌لرزه اصلی به دلیل تعلق خاطر بازماندگان به محل سکونت خود، ساکنین این مناطق به حضور خود در سازه‌های نامقاوم یادشده (سکونتگاه‌های غیر قابل اطمینان خود) ادامه می‌دهند. در چنین شرایطی سازه‌های تضعیف‌شده در برابر رخداد زمین‌لرزه اصلی، در اثر وقوع پس‌لرزه‌های بزرگ به شدت آسیب‌پذیر خواهند بود. نمونه‌های متعددی از افزایش آمار تلفات و مصدومین در شرایط یاد شده برای مناطق مختلف ایران و جهان گزارش گردیده است. از جمله نمونه‌های مهم پس‌لرزه‌های مخرب در این زمینه می‌توان به موارد ارائه شده در جدول ۱ اشاره نمود. در این جدول اطلاعات مربوط به اثرات ناشی از پس‌لرزه‌های بزرگ در زمین‌لرزه‌های ۱۰ سال اخیر ایران ارائه گردیده است.

در پژوهش‌های اولیه صورت گرفته در این زمینه که توسط بٹ انجام شد اختلاف بزرگی زمین‌لرزه اصلی با قویترین پس‌لرزه معادل ۱/۲ بزرگی در نظر گرفته شد (۴)، درحالی‌که مطالعات تکمیلی صورت گرفته در این زمینه حاکی از این نکته بود که بزرگی قویترین پس‌لرزه به عوامل دیگری از جمله نوع گسل مسبب زمین‌لرزه و شرایط لرزه‌زمین‌ساختی وابسته است (۵).

براساس پژوهش صورت گرفته توسط وان درالس و همکاران و مدل ارائه شده درخصوص رفتار پس‌لرزه‌های زمین‌لرزه ۷ ژانویه سال ۲۰۲۰ پورتوریکو این نتیجه حاصل شد که عدم قطعیت مهمی از لحاظ دوره زمانی و فراوانی پس‌لرزه‌ها با رخداد پس‌لرزه‌های بزرگ جدید می‌تواند ایجاد شود و با رخداد پس‌لرزه‌های بزرگ، روند معمول کاهش تعداد و بزرگی پس‌لرزه‌ها با دور شدن از زمان رخداد زمین‌لرزه اصلی به شکل معمول خود ادامه نخواهد یافت و منطقه زلزله زده را با یک بهم ریختگی لرزه‌ای مواجه خواهد نمود که چنین شرایطی به طولانی شدن زمان لازم برای بازگشت منطقه به شرایط عادی منجر خواهد شد. همچنین دیگر نتایج این پژوهش نشان از این نکته داشت که پس‌لرزه‌ای با بزرگی ۵ می‌تواند به خسارت پایین - متوسط به سازه، بسته به موقعیت آن منجر شود. همچنین پس‌لرزه‌ای با بزرگی ۶ خسارتی قابل ملاحظه به سازه وارد خواهد نمود و در نهایت پس‌لرزه‌ای با بزرگی ۷ مانند آنچه پس از رخداد زمین‌لرزه ساحل شرقی ژاپن در سال ۲۰۱۱ رخ داد به خسارت عمده و لرزش بسیار شدید منجر خواهد شد (۶). براین اساس ژانگ به

۱. Performance-Based Earthquake Engineering (PBE)

جدول ۱. اطلاعات مربوط به زمین لرزه‌ها با پس لرزه‌های مخرب در ایران در یک دهه گذشته (۸)

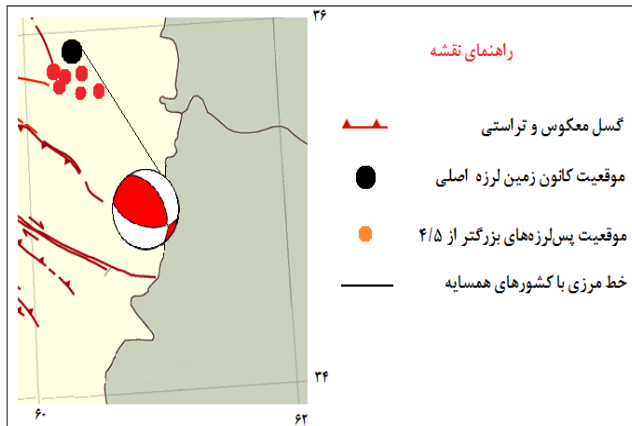
اطلاعات مربوط به زمین لرزه اصلی		اطلاعات مربوط به پس لرزه‌های بزرگ و اثرات ناشی از آن‌ها	
نام زمین لرزه	تاریخ رخداد زمین لرزه	بزرگی	اثرات ناشی از بزرگ‌ترین پس لرزه
زمین لرزه کاکي، استان بوشهر	فروردین ماه ۱۳۹۲	۶/۱	تشدید قابل ملاحظه در خصوص تخریب سازه‌ها، کشته شدن یک نفر و مصدومیت برای ۴ نفر
زمین لرزه گوهران، استان هرمزگان	اردیبهشت ماه ۱۳۹۲	۶/۲	تشدید قابل ملاحظه در خصوص تخریب سازه‌ها و مصدومیت برای ۴ تا ۶ نفر
زمین لرزه مورموری، استان ایلام	مرداد ماه ۱۳۹۳	۶/۲	تخریب ۵۰٪ ساختمان‌های آسیب دیده و مصدومیت برای ۴۹ نفر
زمین لرزه ازگله، استان کرمانشاه	آبان ماه ۱۳۹۶	۷/۳	تخریب ۶۰٪ ساختمان‌های آسیب دیده، کشته شدن یک نفر و مصدومیت برای ۱۰۰ نفر
زمین لرزه خانه زنیان، استان فارس	بهمن ماه ۱۳۹۸	۵/۴	مصدومیت ۶ نفر

مطالعه پس لرزه‌ها به‌ویژه از نوع مخرب آن‌ها به دلیل اهمیت بالایی که در تشدید اثرات ناشی از رخداد زمین لرزه دارند، همواره مورد توجه متخصصین علم زمین لرزه‌شناسی و علوم مرتبط با مدیریت بحران قرار داشته است. از این رو در دهه‌های اخیر پیش‌بینی پس لرزه‌های بزرگ به‌عنوان یکی از اولویت‌های مربوطه باهدف کاهش اثرات جانی ناشی از زمین لرزه دنبال گردیده است (۹، ۱۰). بحث پس لرزه‌های بزرگ از زمانی که زمین لرزه‌های خسارت‌بار زندگی بشر را تهدید نمودند، وجود داشته است. به همین دلیل با گسترش علم زمین لرزه‌شناسی در جهان به شکل امروزی در اواخر قرن ۱۹، مطالعات تخصصی در خصوص رخداد پس لرزه‌ها نیز توسط برخی از محققین از همان زمان آغاز شد. نمونه مشخص این مطالعات به بررسی‌های صورت گرفته توسط اُتری برمی‌گردد که اولین مطالعه تخصصی در خصوص پس لرزه‌های زمین لرزه‌های مهم را آغاز نمود و نتایج مطالعه او به ارائه فرمولی در خصوص کاهش تدریجی رخداد پس لرزه‌ها باگذشت زمان از رخداد زمین لرزه اصلی منجر شد (۱۰).

با توجه به اینکه تمرکز این پژوهش بر محور پس لرزه‌های بزرگ قرار گرفته است، در ادامه به پژوهش‌هایی اشاره گردیده که با اولویت شناسایی پس لرزه‌های بزرگ مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. از جمله مهم‌ترین مطالعات انجام‌شده در این زمینه می‌توان به پژوهش انجام‌شده توسط روزنبرگ و جونز در خصوص پس لرزه‌های بزرگ منطقه کالیفرنیا در ایالات متحده آمریکا اشاره نمود (۱۱). این پژوهشگران در مطالعه مربوطه به دنبال شناسایی زمان رخداد پس لرزه‌های بزرگ، براساس فاصله زمانی بین رخداد آن‌ها بودند و نتایج مهمی در این زمینه از تحقیقات آن‌ها به دست آمد. نتایج تحقیقات صورت گرفته در پژوهش این محققین نشان داد، همان‌طور که برای رخداد زمین لرزه‌های بزرگ در یک منطقه نیاز به تجمع انرژی بیشتری در مقایسه با زمین لرزه‌های کوچک‌تر هست، برای رخداد پس لرزه‌های بزرگ نیز نسبت به پس لرزه‌های کوچک همین شرایط برقرار است و لذا می‌توان از این مورد در جهت پیش‌بینی

زمان رخداد پس لرزه‌های بزرگ استفاده نمود. پژوهش صورت گرفته توسط هوانگ نیز این مورد را تایید نمود. این محققین فاصله زمانی بین پس لرزه‌ها را با عنوان سکون لرزه‌ای^۲ معرفی نمودند (۱۲). از آن زمان به بعد پژوهشگران متعددی مطالعات مختلفی را در دیگر مناطق جهان در این زمینه دنبال نمودند (۱۶-۱۳). نتایج حاصل از این مطالعات نیز نشان داد که سکون لرزه‌ای به‌عنوان یکی از روش‌های معتبر برای شناسایی زمان رخداد پس لرزه‌ها می‌تواند به شکل مؤثر و کاربردی مورد استفاده قرار گیرد. با این حال از آنجاکه پس لرزه‌های کوچک به‌طور معمول مبنای تحلیل برای پیش‌بینی پس لرزه‌های بزرگ به حساب می‌آیند و در روز اول به دلیل تجمع تنش باقیمانده، شاهد تعدد رخداد پس لرزه‌ها با اندازه‌های مختلف و در نتیجه حذف بخشی از آن‌ها به دلیل نزدیکی زمان رخداد آن‌ها باهم هستیم، روش‌های فعلی به تحلیل دقیقی بر روی پس لرزه‌های رخ داده در روز اول پس از رخداد زمین لرزه اصلی منجر نگردیده است. لذا عدم امکان پیش‌بینی پس لرزه‌های بزرگ در روز نخست پس از رخداد زمین لرزه اصلی یکی از بزرگ‌ترین کاستی‌های موجود در روش‌های ارائه‌شده در پژوهش‌های گذشته بوده است و براین اساس استفاده از نشانگر سکون لرزه‌ای تا زمان حاضر برای روز اول پس از رخداد زمین لرزه اصلی، نتیجه‌بخش نبوده است. این در حالی است که بیش از ۵۰ درصد پس لرزه‌های بزرگ در روز اول پس از رخداد زمین لرزه اصلی اتفاق می‌افتند (۱۴). لذا نیاز اساسی در خصوص ارائه راهکاری برای پیش‌بینی پس لرزه‌های بزرگ زمین لرزه در این دوره زمانی وجود دارد که در این تحقیق هدف اصلی معطوف به آن یعنی افزایش دقت پیش‌بینی‌ها برای روز اول پس از رخداد زمین لرزه اصلی براساس روش سکون لرزه‌ای و میزان ریسک پس لرزه‌های رخ داده بود.

۲. Seismic Quiescence



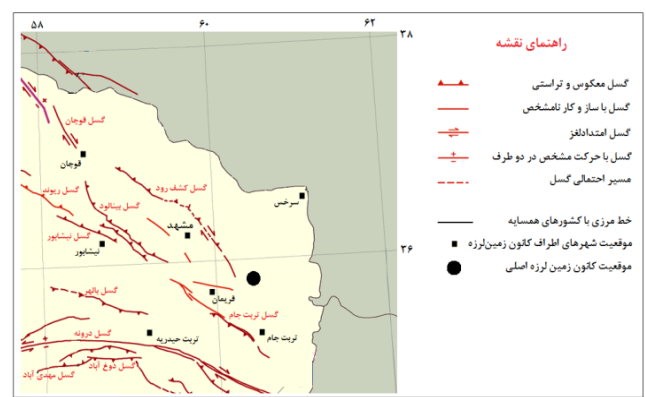
شکل ۲. موقعیت کانون سطحی زمین‌لرزه اصلی و پس‌لرزه‌های بزرگ زمین‌لرزه سفیدسنگ به همراه مکانیسم گسل مسبب زمین‌لرزه اصلی در فاصله ۲۴ ساعت پس از رخداد زمین‌لرزه اصلی

یکی از دلایل انتخاب این زمین‌لرزه برای تحقیق حاضر، تخریب سازه‌ها به دلیل رخداد پس‌لرزه‌های بزرگ این زمین‌لرزه بود که از جمله مهم‌ترین این موارد می‌توان به فروریزش کامل حداقل ۲ ساختمان بهداری در دو روستای نزدیک به کانون سطحی زمین‌لرزه اصلی اشاره نمود. سازه‌هایی که قبل از رخداد پس‌لرزه بزرگ و در ساعات اول پس از رخداد زمین‌لرزه اصلی به محل رسیدگی به مصدومین ناشی از اثرات زمین‌لرزه اصلی تبدیل شده بود و تخلیه به‌موقع آن دو ساختمان باعث گردید افراد آسیب‌دیده و امداد رسانی مستقر در این ساختمان‌ها تحت تأثیر تخریب سازه‌ها به دلیل رخداد پس‌لرزه بزرگ قرار نگیرند. لازم به ذکر است این پس‌لرزه با استفاده از روش ارائه‌شده در این پژوهش پیش‌بینی و با اطلاع رسانی و تخلیه به‌موقع، تلفات و صدمات ناشی از این زمین‌لرزه به حداقل میزان ممکن رسید. براین اساس در پژوهش حاضر به ارائه روش بکار گرفته‌شده در پیش‌بینی نتیجه‌بخش صورت گرفته پرداخته‌شده تا بتوان با ارائه آن در یک چارچوب علمی، تجربه موفق در این زمینه را برای دیگر زمین‌لرزه‌ها در مناطق مختلف جهان تا حد امکان تکرار نمود. در این پژوهش از کاتالوگ زمین‌لرزه‌های موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران استفاده شد.

براساس قانون ارائه‌شده توسط بث، اندازه معمول برای بزرگی قوی‌ترین پس‌لرزه به ثبت رسیده، اختلاف عددی در حدود ۱/۲ درجه کمتر از زمین‌لرزه اصلی را نشان می‌دهد. طبق بررسی‌های صورت گرفته، اختلاف زمین‌لرزه اصلی و بزرگ‌ترین پس‌لرزه به عواملی از جمله: شرایط زمین‌ساختی و زمین‌شناسی، بزرگی و نوع گسل مسبب زمین‌لرزه اصلی وابستگی داشته و براین اساس اختلاف یاد شده می‌تواند کمتر و یا گاهی بیشتر از مقدار ارائه‌شده در قانون بث باشد. به‌عنوان نمونه مطالعات صورت گرفته در این زمینه حاکی از این نکته است که به‌شرط ثابت بودن تمام شرایط (از جمله عمق

مواد و روش‌ها

در این پژوهش برای آزمون روش مورد مطالعه در یک زمین‌لرزه واقعی، پس‌لرزه‌های زمین‌لرزه سفیدسنگ که در فروردین‌ماه ۱۳۹۶ رخ داد مورد بررسی قرار گرفت. این زمین‌لرزه در شمال شرق ایران و شرق استان خراسان رضوی به وقوع پیوست. موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران بزرگی این زمین‌لرزه را ۶ در مقیاس بزرگی گشتاوری اعلام نمود. همچنین طبق گزارش این موسسه، کانون سطحی این زمین‌لرزه در طول جغرافیایی ۶۰/۳۴ و عرض جغرافیایی ۳۵/۸۵ واقع گردید و عمق کانونی در نظر گرفته‌شده برای آن در ۶ کیلومتری از سطح زمین گزارش گردید.



شکل ۱. موقعیت کانون سطحی زمین‌لرزه سفیدسنگ در شمال شرق ایران

همچنین، گسل مسبب این زمین‌لرزه از نوع معکوس معرفی شده است (شکل ۲). رخداد این زمین‌لرزه باعث تخریب مناطق روستایی نزدیک به کانون زمین‌لرزه اصلی گردید. خرابی قابل توجه گزارش شده ناشی از رخداد این زمین‌لرزه در مناطق نزدیک به کانون زمین‌لرزه اصلی را می‌توان تحت تأثیر عوامل زیر دانست:

- قرارگیری کانون سطحی زمین‌لرزه در نزدیکی مناطق روستایی که بیشتر سازه‌ها در این نواحی از جنس خشتی، گلی و بنایی بوده و مقاومت بسیار پایینی را در برابر حرکات ناشی از زمین‌لرزه، از خود نشان دادند.

- عمق کم زمین‌لرزه اصلی که به تمرکز بیشتر خرابی در اطراف کانون سطحی زمین‌لرزه منجر شد.

- تعدد پس‌لرزه‌های با بزرگی بالا (۶ پس‌لرزه با بزرگی بیش از ۴/۵) و تمرکز و فاصله بسیار نزدیک همه آنها به رومرکز زمین‌لرزه اصلی و در نتیجه تمرکز خرابی در نزدیک کانون زمین‌لرزه اصلی به دلیل تمرکز پس‌لرزه‌های بزرگ در یک موقعیت مکانی محدود (شکل ۳) و در شعاعی کمتر از ۲۰ کیلومتر از کانون زمین‌لرزه اصلی.

بررسی دقیق، به شناسایی روشی عملی برای پیش بینی بزرگ ترین پس لرزه های مخرب محتمل ناشی از زمین لرزه اصلی دست یافت. بر همین مبنا داده های مربوط به پس لرزه های بزرگ تر از ۴/۵ در این زمین لرزه برای تحلیل آماری ارائه شده در این پژوهش مورداستفاده قرار گرفتند. در جدول ۲ پارامترهای مبنایی زمین لرزه اصلی سفید سنگ و پس لرزه های آن با بزرگی ۴/۵ و بیشتر ارائه گردیده است. همان طور که ذکر شد، داده های موجود در این جدول نشان از این نکته دارد که این زمین لرزه را پس لرزه های متعددی با بزرگی متوسط تا بالا دنبال نموده اند. در این تحقیق یکی از مهم ترین دلایل انتخاب پس لرزه های با بزرگی ۴/۵ و بیشتر برای بررسی مربوطه، به این مورد باز میگشت که با توجه به بزرگی زمین لرزه اصلی و ناپایداری ساختمان های تضعیف شده ناشی از آن، اثرات ناشی از پس لرزه هایی با حداقل بزرگی یاد شده در منطقه زلزله زده به تشدید خسارات منجر می گردید.

جدول ۲. پس لرزه های بزرگ تر از ۴/۵ زمین لرزه سفید سنگ

بزرگی (Mn)	عمق کانونی (Km)	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	زمان رخداد (UTC)
۴/۶	۶	۶۰/۳۳	۳۵/۷۶	۰۶:۱۹:۳۱ ۰۵/۰۴/۲۰۱۷
۴/۶	۵/۹	۶۰/۴۵	۳۵/۷۵	۰۶:۳۸:۰۳ ۰۵/۰۴/۲۰۱۷
۴/۹	۶/۵	۶۰/۳۵	۳۵/۷۹	۰۷:۴۷:۲۳ ۰۵/۰۴/۲۰۱۷
۴/۸	۷	۶۰/۳۸	۳۵/۷۹	۱۷:۰۸:۱۱ ۰۵/۰۴/۲۰۱۷
۵/۲	۶/۸	۶۰/۳۵	۳۵/۷۹	۲۰:۰۷:۲۳ ۰۵/۰۴/۲۰۱۷
۵/۳	۶	۶۰/۴۸	۳۵/۷۵	۲۱:۱۲:۰۷ ۰۲/۰۵/۲۰۱۷

در بخش اول این مطالعه برای پیش بینی زمان رخداد پس لرزه های بزرگ از نظریه سکون لرزه ای استفاده شد. در این روش ارتباط بین بزرگی پس لرزه ها و سکون لرزه ای قبل از رخداد آن ها مورد بررسی قرار خواهد گرفت تا از رابطه این دو پارامتر به روشی برای پیش بینی زمان رخداد پس لرزه های بزرگ منجر گردد. برای این فرایند نیاز به استفاده از روش های آماری جهت مقایسه تغییرات بین دو پارامتر در شرایطی یکسان است. یکی از روش های مقایسه یکنواخت بین دو داده متفاوت، روش نرمال سازی داده هاست. از بین روش های نرمال سازی داده ها یکی از روش ها، تقسیم تمامی داده ها (در یک پارامتر) به بزرگ ترین داده مربوط به آن پارامتر است. بدین ترتیب، با اعمال این فرایند، تمامی داده ها در بازه ۰ تا ۱ قرار می گیرند. در مرحله اول این روش، داده های دو پارامتر یاد شده برای این پس لرزه ها به صورت نرمال شده درمی آیند. نحوه نرمال نمودن داده های مربوط به دو پارامتر مورد نظر در این پژوهش، در جدول ۳ ارائه گردیده است.

کانونی و بزرگی زمین لرزه اصلی و شرایط زمین ساختی و زمین شناختی محدوده تحت تاثیر زمین لرزه، در زمین لرزه ها با گسل مسبب شیب لغز از نوع معکوس، اختلاف بزرگی زمین لرزه اصلی با بزرگ ترین پس لرزه کمتر از زمین لرزه ها با گسل های امتداد لغز و نرمال است. به عبارت دیگر بزرگی قوی ترین پس لرزه در زمین لرزه ها با گسل معکوس به بزرگی زمین لرزه اصلی نزدیک تر است (۱۵). براساس تحلیل این پژوهشگران، این مورد به امتداد تنش اصلی حداکثر نسبت به صفحه گسیختگی و درگیر شدن بخش های مختلف سطح گسل (در اعماق مختلف) در مواجهه با تنش رها شده ناشی از زمین لرزه اصلی در گسل های معکوس برمی گردد. چراکه تنش حاکم بر سطح گسل، به ویژه در گسل معکوس (با امتداد عمود بر سطح گسل) با توزیع در عمق های مختلف و آزاد شدن تنش ذخیره شده در این اعماق و در نتیجه رسیدن مجدد سطح تنش به میزان آستانه تحمل بخش هایی از گسل فعال شده در عمق های مختلف، شرایط را برای رخداد پس لرزه های بزرگ آماده می نماید. در اینجا اشاره به این نکته نیز لازم است که هرچه بزرگی قوی ترین پس لرزه به زمین لرزه اصلی نزدیک تر باشد، نشان از این مورد دارد که تنش به طور کامل در اثر زمین لرزه اصلی تخلیه نشده و سطح تنش باقیمانده در منطقه بالاست. از آنجاکه نوع گسل مسبب زمین لرزه سفید سنگ از نوع معکوس بوده و پس لرزه های بزرگ و غیر معمولی را به دنبال داشته، نتایج این تحقیق می تواند به عنوان تأییدی بر مطالعات قبلی صورت گرفته در این زمینه به حساب آید. در این خصوص، لازم به ذکر است که بزرگ ترین پس لرزه زمین لرزه سفید سنگ با بزرگی ۵/۳ به ثبت رسید. همان طور که در ابتدای بحث ذکر شد، پیش بینی پس لرزه های بزرگ توسط روش های معمول ارائه شده تا این زمان که بر مبنای تحلیل داده های انواع کوچک تر آن ها شکل گرفته، به دلیل حذف نامنظم بخش بزرگی از داده ها در روز اول پس از رخداد زمین لرزه اصلی بسیار سخت خواهد شد و در اکثر مواقع نتیجه بخش نخواهد بود. اما روشی که در این پژوهش برای استفاده عملی و کاربردی از داده های پس لرزه ها مدنظر بوده با روش های بکار گرفته شده در تحلیل های صورت گرفته در مقالات موجود در این زمینه، تفاوت هایی را نشان می دهد.

یافته ها

در این پژوهش از بازه مشخصی از بزرگی پس لرزه ها استفاده شد تا حذف بخشی از بانک اطلاعات و به ویژه در روز اول پس از رخداد زمین لرزه، خللی در تحلیل داده های مورد نظر در این پژوهش ایجاد ننماید. نوآوری بکار گرفته شده در این پژوهش براساس مورد یاد شده باعث گردید، تحلیل مربوطه براساس داده های کاملی از پس لرزه ها در یک بازه مشخص مورداستفاده قرار بگیرد تا بتوان با

جدول ۳. داده‌های نرمال شده بزرگی و سکون لرزه‌ای قبل از رخداد پس‌لرزه‌های بزرگ (۸)

سکون‌لرزه‌ای نرمال شده	بزرگی نرمال شده	سکون‌لرزه‌ای بین پس‌لرزه‌ها (دقیقه)	بزرگی پس‌لرزه	زمان رخداد
$10/12960 = 0/0007$	$4/6 / 5/3 = 0/8679$	۱۰	۴/۶	۰۶:۱۹:۳۱ ۰۵/۰۴/۲۰۱۷
$10/12960 = 0/0015$	$4/6 / 5/3 = 0/8679$	۱۹	۴/۶	۰۶:۳۸:۰۳ ۰۵/۰۴/۲۰۱۷
$69/12960 = 0/0053$	$4/9 / 5/3 = 0/9245$	۶۹	۴/۹	۰۷:۴۷:۲۳ ۰۵/۰۴/۲۰۱۷
$561/12960 = 0/0433$	$4/8 / 5/3 = 0/9056$	۵۶۱	۴/۸	۱۷:۰۸:۱۱ ۰۵/۰۴/۲۰۱۷
$179/12960 = 0/0138$	$5/2 / 5/3 = 0/9811$	۱۷۹	۵/۲	۲۰:۰۷:۲۳ ۰۵/۰۴/۲۰۱۷
$12960/12960 = 1$	$5/3 / 5/3 = 1$	۱۲۹۶۰	۵/۳	۲۱:۱۲:۰۷ ۰۲/۰۵/۲۰۱۷

برابری را نشان می‌دهد. براین اساس، روند یابی زمان سکون‌لرزه‌ای، خود به‌عنوان پارامتری مؤثر برای پیش‌بینی زمان رخداد پس‌لرزه بزرگ‌تر مؤثر واقع خواهد شد. یعنی نشانه رسیدن به زمان رخداد پس‌لرزه بزرگ، گذر از مرحله افزایش تدریجی زمان سکون لرزه‌ای بین پس‌لرزه‌ها و افزایش ناگهانی زمان سکون‌لرزه‌ای بعد از رخداد پس‌لرزه قبل از آن است. این افزایش ناگهانی مهم‌ترین نشانه نزدیک شدن به زمان پس‌لرزه بزرگ است. لازم به ذکر است، بزرگ‌ترین پس‌لرزه به ثبت رسیده در این زمین‌لرزه، در حدود یک ماه پس از رخداد زمین‌لرزه اصلی با بزرگی ۵/۳، به افزایش بیش از ۲۰ برابری زمان سکون لرزه‌ای (از ۵۶۱ دقیقه به ۱۲۹۶۰ دقیقه) در مقایسه با بزرگ‌ترین پس‌لرزه روز اول (با بزرگی ۵/۲) منجر شد. دو مورد اخیر و ارتباط مشخص بزرگی پس‌لرزه‌ها با سکون‌لرزه‌ای آن‌ها نشان از کاربرد عملی استفاده از نظریه سکون‌لرزه‌ای برای پیش‌بینی زمان رخداد پس‌لرزه‌های بزرگ‌تر دارد. بدین ترتیب، نتایج حاصل از تحلیل صورت گرفته نشان می‌دهد، رابطه مشخصی بین سکون‌لرزه‌ای و بزرگی پس‌لرزه‌ها در زمین‌لرزه سفید سنگ وجود دارد. تعمیم این مورد با توجه به تئوری سکون‌لرزه‌ای به‌عنوان یک اصل قابل‌قبول به دلیل شباهت شرایط پس‌لرزه‌های بزرگ با زمین‌لرزه‌های بزرگ، می‌تواند برای تمامی زمین‌لرزه‌ها به‌عنوان یک پیش‌نشانگر کاربردی جهت پیش‌بینی پس‌لرزه‌های بزرگ آن‌ها مورد استفاده قرار گیرد. پیش‌شرط تحلیل یادشده برای پیش‌بینی پس‌لرزه‌های بزرگ، میزان همبستگی داده‌های مربوط به دو پارامتر مورد مطالعه یعنی بزرگی پس‌لرزه‌ها و سکون لرزه‌ای (فاصله زمانی بین دو پس‌لرزه) آن‌هاست. به شکلی مشخص‌تر می‌توان این‌گونه بیان نمود که اگر بین نتایج حاصل از داده‌های نرمال شده دو پارامتر یادشده، همبستگی مشخصی ایجاد شود (در اینجا ستون ۴ و ۵ جدول ۳)، به این نتیجه خواهیم

بررسی و تحلیل پس‌لرزه‌های زمین‌لرزه‌های مختلف به‌عنوان مبنای علمی این پژوهش، حاکی از آن است که یکی از نشانه‌های اصلی هدایت‌کننده برای پیش‌بینی زمان رخداد بزرگ‌ترین پس‌لرزه، افزایش تدریجی میزان سکون‌لرزه‌ای برای رخداد پس‌لرزه‌های قبل از آن است. این دقیقاً همان اتفاقی است که قبل از وقوع زمین‌لرزه‌های بزرگ رخ می‌دهد و در اینجا برای رخداد پس‌لرزه‌های بزرگ (در مقیاس کوچک‌تر) وجود خواهد داشت. همان‌طور که در ستون سوم جدول ۳ قابل‌مشاهده است، از لحاظ سکون لرزه‌ای تا زمان وقوع یک پس‌لرزه قبل از رخداد بزرگ‌ترین پس‌لرزه‌ی روز اول، شاهد افزایش تدریجی زمان سکون لرزه‌ای پس‌لرزه‌ها هستیم. این مورد حاکی از این نکته است که زمان لازم برای ذخیره انرژی حداکثری جهت رخداد بزرگ‌ترین پس‌لرزه در حال شکل‌گیری است. در ادامه، افزایش ناگهانی میزان سکون لرزه‌ای بعد از گذر از مرحله افزایش تدریجی، برای چند پس‌لرزه اولیه، نشان از نزدیک شدن به زمان رخداد پس‌لرزه بزرگ‌تر است که این مورد به‌طور مشخص در ردیف چهارم از ستون سوم جدول ۳ با افزایش بیش از ۸ برابری زمان سکون لرزه‌ای (یعنی از ۶۹ به ۵۶۱ دقیقه) کاملاً مشخص گردیده است.

اگر به میزان افزایش زمان سکون‌لرزه‌ای برای پس‌لرزه‌های ردیف‌های اول تا سوم دقت شود به ترتیب زمان ۱۰ دقیقه، ۱۹ دقیقه و ۶۹ دقیقه یعنی افزایش حدود ۲ برابری زمان سکون‌لرزه‌ای پس‌لرزه دوم نسبت به اول و افزایش حدود ۳/۵ برابری سکون لرزه‌ای برای سومین پس‌لرزه نسبت به دومین مورد آن نشان داده خواهد شد که نشان از افزایش تدریجی ذکرشده از لحاظ سکون‌لرزه‌ای قبل رخداد بزرگ‌ترین پس‌لرزه خواهد بود. در حالی که، سکون لرزه‌ای چهارمین پس‌لرزه نسبت به پس‌لرزه سوم در جدول ۳، افزایش بیش از ۸

پیش‌بینی اثرات ناشی از پس‌لرزه‌های بزرگ بر سازه‌های موجود در نزدیک کانون سطحی زمین‌لرزه اصلی اشاره نمود. اساس روش تکمیلی مربوطه بر پایه مقایسه تغییرات بزرگی پس‌لرزه‌های بزرگ و متوسط در برابر تغییرات عمق کانونی آنهاست. آنچه مشخص است، پس‌لرزه‌های بزرگ و متوسط ناشی از زمین‌لرزه‌ها، اگر در عمق کانونی نزدیک‌تری به سطح قرار بگیرند قادر به تخریب بیشتری خواهند بود. با توجه به تجربه زمین‌لرزه‌ها معمولاً تغییرات بزرگی و عمق کانونی پس‌لرزه‌های یک زمین‌لرزه در توالی زمانی رخداد، از روند مشخصی تبعیت می‌کنند؛ بدین معنی که در توالی رخداد، پس‌لرزه‌ها گاه جهت تغییرات بزرگی و عمق با یکدیگر همسو و در برخی مواقع برخلاف یکدیگر نشان داده می‌شوند. با شناسایی این روند در پس‌لرزه‌های اولیه و در ابتدای هر مرحله می‌توان در مورد ارزیابی ریسک پس‌لرزه‌های بزرگ‌تر آینده، تحلیل‌هایی کاربردی را ارائه نمود. برای بررسی این فرایند در یک نمونه واقعی در این بخش از پژوهش به ارزیابی بزرگی و عمق کانونی پس‌لرزه‌های بزرگ و متوسط زمین‌لرزه سفیدسنگ پرداخته شده است.

در شکل ۳ مقایسه تغییرات بزرگی و عمق کانونی پس‌لرزه‌های با بزرگی ۴ و بیشتر هفته ابتدایی پس از رخداد زمین‌لرزه اصلی که احتمال تأثیرگذاری مشخص بر روی سازه‌های تضعیف‌شده در اثر رخداد زمین‌لرزه اصلی را در پهنه مه‌لرزه‌ای داشته‌اند، به تصویر کشیده شده‌اند. علیرغم تحلیل ساده قابل‌ارائه برای این نمودار، نتایج مربوط به آن از اهمیت بالایی در خصوص ارزیابی ریسک پس‌لرزه‌های بزرگ برخوردار است. چراکه براساس این نمودار که تغییرات بزرگی و عمق کانونی پس‌لرزه‌ها برای مقایسه یکسان و هم‌بعد، نرمال شده‌اند، می‌توان در شرایط مناسب‌تری تغییرات این دو پارامتر را باهم مقایسه نمود.

لازم به ذکر است که رخداد یک یا چند پس‌لرزه و تغییر رابطه بین بزرگی و عمق کانونی می‌تواند ما را در شناسایی مرحله جدید در فرایند مربوطه و تفکیک بخش‌های مختلف نمودار هدایت نماید. براین اساس، درجایی که تغییرات دو پارامتر عکس هم عمل می‌کند و همچنین شاهد افزایش در نمودار بزرگی و کاهش در نمودار عمق کانونی هستیم در این شرایط ریسک رخداد پس‌لرزه‌ها از میزان بالایی برخوردار است. چراکه پس‌لرزه‌های بزرگ‌تری که در عمق کانونی کمتری رخ می‌دهند قاعداً از ریسک بالاتری برای تخریب سازه‌های تضعیف‌شده ناشی از زمین‌لرزه اصلی و افزایش تلفات و مصدومیت‌های ناشی از پس‌لرزه‌های بزرگ برخوردارند. براساس تحلیل یادشده به‌صورت کلی دو بخش ۲ و ۴ از نمودار ارائه‌شده در شکل ۳ براساس شرایط تشریح شده، تغییرات بزرگی و عمق، روند عکس هم را نشان می‌دهند. در بخش ۲ نمودار از آنجا که تغییرات مربوطه با کاهش بزرگی و افزایش عمق کانونی نشان داده‌شده، لذا

رسید که بین آنها علیرغم ماهیت متفاوتشان، انطباق مشخصی، وجود دارد که این دستاورد می‌تواند دقت پیش‌بینی پس‌لرزه‌های بزرگ را تا حدود زیادی به واقعیت نزدیک نماید.

برای شناسایی میزان همبستگی دقیق دو پارامتر، از روش‌های آماری شناخته‌شده‌ای در این زمینه می‌توان استفاده نمود. یکی از روش‌های معمول برای شناسایی میزان همبستگی بین دو داده نرمال شده، روش همبستگی پیرسون است.

براساس این نوع از همبستگی، میزان تغییرات مربوط به هر پارامتر (در اینجا دو پارامتر نرمال شده بزرگی و سکون لرزه‌ای پس‌لرزه‌ها)، قبل از رخداد پس‌لرزه‌های بزرگ نسبت به میانگین تغییرات، محاسبه و تقسیم‌بر میزان انحراف معیار به‌دست‌آمده برای تمامی داده‌ها می‌شود (۱۶) و (۱۷). ضریب همبستگی در این روش با عدد R نشان داده می‌شود که میزان دقیق همبستگی بین دو پارامتر را مشخص می‌نماید. نماد R ارائه‌شده، در بازه‌ای بین -۱ تا +۱ متغیر خواهد بود. هر چه عدد یادشده برای دو پارامتر، به اعداد +۱ و -۱ نزدیک‌تر باشد، به ترتیب نشان از همبستگی مستقیم و معکوس بالاتری برای دو پارامتر مورد مقایسه خواهد بود. فرمول کلی محاسبه میزان همبستگی به روش پیرسون در معادله ۱ ارائه‌شده است.

$$R = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 \sum (y_i - \bar{y})^2}} \quad \text{معادله (۱)}$$

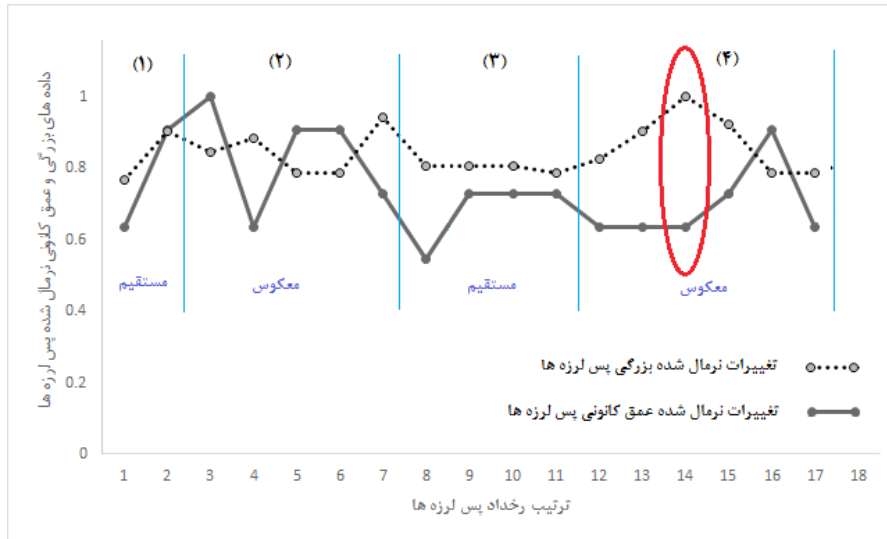
جایی که X ، Y ، S_x و S_y به ترتیب میانگین نمونه‌ها و انحراف معیار برای هر پارامتر به‌حساب می‌آیند. نتایج حاصل از محاسبه صورت گرفته در این زمینه حاکی از این نکته است که میزان R به‌دست‌آمده از این معادله برای پارامتر بزرگی و سکون لرزه‌ای پس‌لرزه‌های زمین‌لرزه سفیدسنگ همبستگی حدود ۰/۶۷ را نشان می‌دهد که با توجه به ماهیت متفاوت دو پارامتر مورد مقایسه، عدد بسیار بالایی بوده و نشان از این نکته دارد که می‌توان از پارامتر سکون لرزه‌ای به‌عنوان یک پیش‌نشانگر برای رخداد پس‌لرزه‌های بزرگ این زمین‌لرزه استفاده نمود.

با توجه به‌پیش فرض مطرح‌شده در بالا در خصوص استفاده از همبستگی بین دو پارامتر بزرگی و سکون لرزه‌ای پس‌لرزه‌ها به‌عنوان روش مورد تأیید در مطالعه حاضر و نتایج حاصل از مطالعات ارائه‌شده توسط دیگر پژوهشگران و البته با نوآوری بکار گرفته‌شده در این پژوهش، می‌توان به شکلی مناسب از این روش برای پیش‌بینی زمان رخداد پس‌لرزه‌های بزرگ استفاده نمود.

علاوه بر مورد یادشده در خصوص شناسایی زمان رخداد پس‌لرزه بزرگ در روز اول پس از رخداد زمین‌لرزه اصلی که بخش مهمی از ارزیابی ریسک پس‌لرزه‌ها را شامل می‌شود، می‌توان برای تکمیل فرایند شناسایی ریسک پس‌لرزه‌های بزرگ به ارائه روشی برای

می‌شود، ریسک بالای پس‌لرزه‌ها را نشان خواهد داد و لذا ما در بخش ۴ نمودار ارائه‌شده در شکل ۳ شرایطی با ریسک بالا را برای پس‌لرزه‌ها، به‌ویژه بزرگ‌ترین پس‌لرزه روز اول با بزرگی ۵٫۲ و عمق ۷ کیلومتری که در شکل مشخص شده شاهد هستیم.

نمی‌تواند پس‌لرزه‌های مخربی را با توجه به بزرگی نسبی پس‌لرزه‌ها داشته باشد. اما در بخش ۴ فاصله دو نمودار عمق و بزرگی، بیشترین میزان را در مقایسه با بخش‌های ۱، ۲ و ۳ از خود نشان می‌دهد که این افزایش اختلاف‌زمانی که با بالا بودن نمودار بزرگی همراه



شکل ۳. نمودار تغییرات داده‌های نرمال شده بزرگی و عمق کانونی پس‌لرزه‌ها با بزرگی ۴ و بیشتر

تعیین زمان مشخصی برای رخداد بزرگ‌ترین پس‌لرزه محقق خواهد گردید و با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، به تخلیه به‌موقع منطقه تحت تأثیر، باهدف کاهش تلفات و مصدومیت‌های ناشی از رخداد پس‌لرزه‌های بزرگ به‌ویژه در سازه‌های تضعیف‌شده پرداخت. در این پژوهش همچنین برای تکمیل بحث ارزیابی ریسک پس‌لرزه‌ها، روشی کاربردی بر مبنای تغییرات بزرگی و عمق کانونی انواع متوسط و بزرگ آن‌ها نسبت به هم مورد ارزیابی قرار گرفت تا بتوان با پیش‌بینی دوره‌ها و توالی‌های قابل تفکیک، از لحاظ تغییرات دو پارامتر یادشده، به شناسایی پس‌لرزه‌های بزرگ و مخرب مبادرت نمود. براساس این روش شناسایی پس‌لرزه‌های بزرگی که در عمق کمتری رخ داده‌اند و آسیب‌پذیری بیشتری را ایجاد نمودند، محقق گردید. به طور کلی، با توجه به اینکه تحلیل ارائه‌شده در این مقاله علاوه بر مطالعه موردی یادشده برای بسیاری از زمین‌لرزه‌های مهم دیگری از ایران و جهان مورد بررسی و راستی‌آزمایی قرار گرفته است، نتایج حاصل از این مطالعه با توجه به کلیت حاکم بر شرایط رخداد زمین‌لرزه‌ها و پس‌لرزه‌های بزرگ آن‌ها و نوع پارامترهای انتخاب‌شده می‌تواند در پیش‌بینی پس‌لرزه‌های بزرگ بیشتر مناطق جهان و کاهش تلفات و مصدومیت‌های ناشی از رخداد آن‌ها مورد استفاده قرار گیرد.

ترکیب نتایج حاصل از دو تحلیل یادشده در خصوص سکون‌لرزه‌ای قبل از پس‌لرزه‌های بزرگ و استفاده از تغییرات نمودار عمق و بزرگی پس‌لرزه‌های متوسط و بزرگ می‌تواند شرایط را برای شناسایی زمان و میزان ریسک ناشی از پس‌لرزه‌های بزرگ فراهم نموده تا بتوان از نتایج به‌دست‌آمده در این خصوص استفاده کاربردی مربوطه را به عمل آورد.

بحث

بررسی‌های صورت گرفته در این پژوهش نشان داد که پیش‌بینی پس‌لرزه‌های بزرگ در ۲۴ ساعت اول بعد از رخداد زمین‌لرزه اصلی که در پژوهش‌های ارائه‌شده قبلی به‌عنوان یکی از مشکلات مربوط به پیش‌بینی پس‌لرزه‌های بزرگ و یک خلأ پژوهشی همواره مطرح بوده، با روش ارائه شده در این پژوهش قابلیت دستیابی را خواهد داشت. مهم‌ترین نشانه مورد استفاده در خصوص شناسایی زمان رخداد پس‌لرزه‌های بزرگ در روز اول پس از رخداد زمین‌لرزه اصلی، بررسی روند تغییرات سکون‌لرزه‌ای بین رخداد پس‌لرزه‌هاست به طوری که در این فرایند در صورتی که پس از روند افزایش تدریجی در پس‌لرزه‌های اولیه، شاهد افزایش ناگهانی زمان سکون‌لرزه‌ای باشیم، بلافاصله پس از افزایش ناگهانی سکون‌لرزه‌ای پس‌لرزه، زمان رخداد پس‌لرزه بزرگ و مخرب فرا خواهد رسید. بر این اساس، با شناسایی فرایند مربوطه،

تشکر و قدردانی

در این پژوهش از داده‌های کاتالوگ مرکز لرزه نگاری موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران استفاده شد؛ براین اساس نویسندگان

این مقاله برخود لازم می‌دانند که درخصوص ارائه اطلاعات مربوطه توسط این مرکز تشکر لازم را داشته باشند. لازم به ذکر است این مقاله برگرفته از پایان نامه دکتری نویسنده مسوول این مقاله است.

References

- Schawb, Ak., Eshelbakh, K., Brower DJ., Hazard mitigation and preparedness: building resilient communities John Wiley publisher, (2007)
- Centre for Research on the Epidemiology of Disaster Database. Available online: <http://www.emdat.be/database> (accessed on 9 March 2018).
- Das S, Henry C. Spatial relation between main earthquake slip and its aftershock distribution. *Reviews of Geophysics*. 2003;41(3).
- Báth M. Lateral inhomogeneities of the upper mantle. *Tectonophysics*. 1965;2(6):483-514.
- Zakharova O, Hainzl S, Bach C. Seismic moment ratio of aftershocks with respect to main shocks. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2013;118(11):5856-64.
- Van Der Elst N, Hardebeck JL, Michael AJ. Potential duration of aftershocks of the 2020 southwestern Puerto Rico earthquake. *US Geological Survey*; 2020.
- Zhang Y. Post-Earthquake Performance Assessment and Decision-Making for Tall Buildings: Integrating Statistical Modeling, Machine Learning, Stochastic Simulation and Optimization (Doctoral dissertation, UCLA).
- Iranian Seismological Center (IRSC). Data bank of earthquakes in Iran and adjacent areas. Available Online: <http://irsc.ut.ac.ir/index.php?lang=ea?lang=fa> (accessed on 12 March 2018).
- Habermann RE, Wyss M. Background seismicity rates and precursory seismic quiescence: Imperial Valley, California. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 1984;74(5):1743-55.
- Tabatabai Sh. The importance of future studies in promoting safety in the conflict of natural disasters. *Journal of Safety Promotion and Injury Prevention*. 2018;6(1):1-2.
- Omori, F., Aftershocks of earthquake, *J College Sci. Imp, Tokyo University*, (1894); 7: P.111-200
- Reasenberg PA, Jones LM. Earthquake aftershocks: update. *Science*. 1994;265(5176):1251-3.
- Huang Q. Seismicity Pattern Changes Prior to the 2008 Ms7. 3 Yutian Earthquake. *Entropy*. 2019;21(2):118.
- Drakatos GE. Relative seismic quiescence before large aftershocks. *pure and applied geophysics*. 2000; 157(9):1407-21.
- Ogata Y, Tsuruoka H. Statistical monitoring of aftershock sequences: a case study of the 2015 Mw7. 8 Gorkha, Nepal, earthquake. *Earth, Planets and Space*. 2016;68(44):1-13.
- Omi T, Ogata Y, Hirata Y, Aihara K. Forecasting large aftershocks within one day after the main shock. *Scientific reports*. 2013;3(1):1-7.
- Kanamori H, Brodsky EE. The physics of earthquakes. *Reports on Progress in Physics*. 2004 Jul 12;67(8):1429-96.
- Saket A, Aghda MF. Investigation of destructive and non-destructive aftershocks in

important earthquakes. Engineering geology for tomorrow's cities. Geological Society, London, Engineering Geology Special Publication**, (on CD-ROM insert, Paper 763). 2009.

19. Esri., Geostatistical Analyst Tutorial (ArcGIS10.3), Redlands, CA, USA, (2014);

20. Little TD, editor. The Oxford handbook of quantitative methods, volume 1: Foundations. Oxford University Press; 2013.