

تحلیل خطر احتمالاتی با در نظر گرفتن اثر جهت‌پذیری حوزه نزدیک (مطالعه موردی: منطقه کرمانشاه)

وحید واحدی اصل^۱، احمد سدیدخوی^{۲*}، محمد پورمحمد شاهوار^۳ و نیما دولت‌آبادی^۱

^۱ دانش‌آموخته کارشناسی ارشد زلزله‌شناسی، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، تهران، ایران

^۲ استادیار، گروه زلزله‌شناسی، موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

^۳ استادیار، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، تهران، ایران

(دریافت: ۱۴۰۲/۰۷/۰۱، پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۰۱)

چکیده

شتاب‌نگاشت‌های حوزه نزدیک به علت داشتن پالس بزرگ در تاریخچه زمانی نسبت به شتاب‌نگاشت‌های حوزه دور ماهیت متفاوتی دارند. وجود این پالس باعث وارد شدن خسارات زیاد به سازه می‌شود. به دلیل نزدیک بودن شهرهای کشور به گسل‌های لرزه‌زا، توجه به این موضوع امری حیاتی است. شکست از نقطه‌ای بر صفحه گسل شروع می‌شود و بسته به مکان شروع گسیختگی، به ابتدا یا انتهای گسل یا به هر دو جهت انتشار می‌یابد. به گسترش شکست در امتداد گسل و تأثیر سرعت شکستگی سنگ بر سرعت موج برشی، جهت‌پذیری می‌گویند. زمانی که جهت انتشار گسیختگی به سمت ساختمان باشد، سرعت گسیختگی گسل به سرعت موج برشی زلزله نزدیک است. در این حالت، به دلیل لغزش‌های متوالی گسل، در جلوی مسیر گسیختگی سیلی از امواج آزادشده جمع می‌شود و به صورت یک تکان قوی به ساختمان می‌رسد. دلیل پالس قوی موجود در ابتدای لرزه‌نگاشت واقع در جهت عمود بر امتداد گسل، همین لرزش قوی است که به ساختمان رسیده است؛ در نتیجه یکی از ویژگی‌های جهت‌پذیری پیش‌رونده، پالس‌هایی با دامنه بزرگ و دوره تناوب متوسط تا بلند می‌تواند باشد. اثر جهت‌پذیری که توزیع انرژی را در طول زمان تغییر می‌دهد، در زمین‌لرزه‌های متوسط و کوچک نیز می‌تواند رخ دهد. به عبارت دیگر، علاوه بر فاصله تا گسل، جهت انتشار گسیختگی نیز اهمیت دارد. به منظور بررسی تأثیر جهت‌پذیری در تحلیل خطر لرزه‌ای احتمالاتی، از شتاب‌نگاشت‌های زلزله ۱۲ نوامبر ۲۰۱۷ سرپل ذهاب کرمانشاه استفاده شد و نشان داده شد که با افزایش دوره تناوب سازه و دوره بازگشت، مقدار شتاب جنبش زمین نیز افزایش می‌یابد. بیشترین افزایش شتاب در دوره تناوب ۴ ثانیه و دوره بازگشت ۲۴۷۵ سال رخ داده است. در دوره بازگشت‌های ۲۴۷۵ و ۴۷۵ سال، درصد افزایش شتاب بیشتر است و اثر جهت‌پذیری در دوره بازگشت ۲۴۷۵ سال نسبت به ۴۷۵ سال نمود بیشتری دارد.

کلمه‌های کلیدی: گسیختگی، جهت‌پذیری پیش‌رونده، پالس، رابطه کاهندگی، حوزه نزدیک، تحلیل خطر احتمالاتی

۱ مقدمه

امواج لرزه‌ای حاصل از زلزله‌های ثبت شده در حوزه نزدیک خصوصیات متفاوتی نسبت به امواج لرزه‌ای ثبت شده در حوزه دور دارند. در زلزله‌های حوزه نزدیک، شکست برشی از یک نقطه روی گسل آغاز و با سرعتی نزدیک به سرعت موج برشی به سمت ساختگاه منتشر و باعث می‌شود در اثر گسیختگی، مقدار زیادی از انرژی لرزه‌ای به صورت یک پالس دوره‌بلند با دامنه زیاد در ابتدای نگاهت نمایان شود (آبراهامسون، ۲۰۰۰). یکی از مشخصه‌های اصلی جنبش‌های حوزه نزدیک گسل، وجود پالس‌های دوره‌بلند در نمودار تاریخچه زمانی لرزه‌نگاشت آنها است. این پالس‌ها که مسبب به وجود آمدن تغییر مکان‌ها و سرعت‌های بزرگ هستند، سبب تقویت طیف پاسخ شتاب در دوره تناوب‌های زیاد می‌شوند.

۲ انواع جهت‌پذیری

شکست از نقطه‌ای بر صفحه گسل شروع می‌شود و بسته به مکان شروع گسیختگی، به ابتدا یا انتهای گسل یا به هر دو جهت انتشار می‌یابد. به گسترش شکست در امتداد گسل و تأثیر سرعت شکستگی سنگ بر سرعت موج برشی جهت‌پذیری می‌گویند. اثر جهت‌پذیری که توزیع انرژی را در طول زمان تغییر می‌دهد، در زمین لرزه‌های متوسط و کوچک نیز می‌تواند رخ دهد. به عبارت دیگر، علاوه بر فاصله تا گسل، جهت انتشار گسیختگی نیز مهم است. در ادامه این بخش، انواع جهت‌پذیری تعریف می‌شود.

۱-۲ جهت‌پذیری پیش‌رونده

زمانی که جهت انتشار گسیختگی به سمت ساختگاه باشد، سرعت گسیختگی گسل به سرعت موج برشی زلزله نزدیک است و به دلیل لغزش‌های متوالی گسل، در جلوی مسیر گسیختگی سیلی از امواج آزاد شده جمع می‌شود و به صورت یک تکان قوی به ساختگاه می‌رسد. دلیل پالس

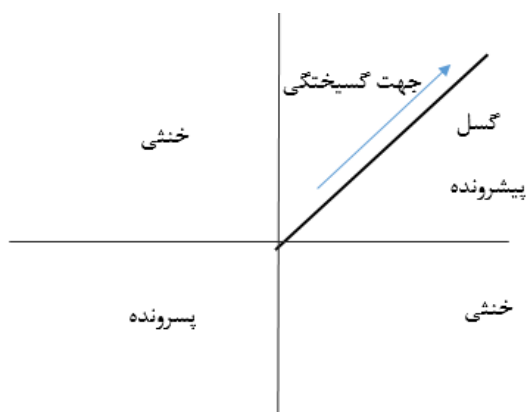
قوی در جهت عمود بر امتداد گسل که در ابتدای نگاهت دیده می‌شود، همین تکان قوی رسیده به ساختگاه است؛ در نتیجه یکی از ویژگی‌های جهت‌پذیری پیش‌رونده، پالس‌هایی با دامنه بزرگ و دوره تناوب‌های متوسط تا بلند می‌تواند باشد.

۲-۲ جهت‌پذیری پس‌رونده

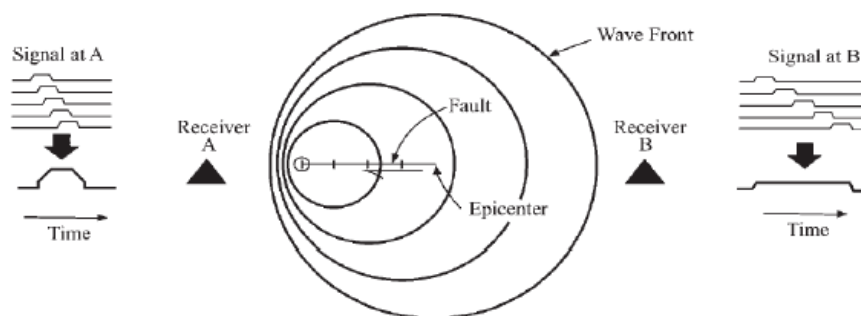
زمانی که گسترش گسیختگی به سمت دور شدن از ساختگاه باشد، زمین لرزه‌های ضربه‌ای مشاهده نمی‌شود و انرژی امواج زلزله به صورت ناگهانی وارد ساختگاه نمی‌شود. این انرژی در طول زمان، توزیع و به ساختگاه وارد می‌شود که این حالت را جهت‌پذیری پس‌رونده می‌نامند. ویژگی این نوع جهت‌پذیری، نگاهت‌هایی با دامنه کم و مدت دوام طولانی است. سرعت و جابه‌جایی در حالت جهت‌پذیری پس‌رونده نسبت به حالت جهت‌پذیری پیش‌رونده کمتر است.

۳-۲ جهت‌پذیری خنثی

هنگامی که فاصله ساختگاه تا منشأ زلزله زیاد باشد و ساختگاه از محدوده جهت‌پذیری شکست بیرون باشد، جهت‌پذیری خنثی است و زلزله را زلزله حوزه دور می‌نامند. در این حالت، گسیختگی نه در حال نزدیک شدن و نه در حال دور شدن است. شکل ۱ انواع جهت‌پذیری را با توجه به تعاریف گفته شده نشان می‌دهد.



شکل ۱. نمایش انواع جهت‌پذیری با توجه به جهت گسیختگی.

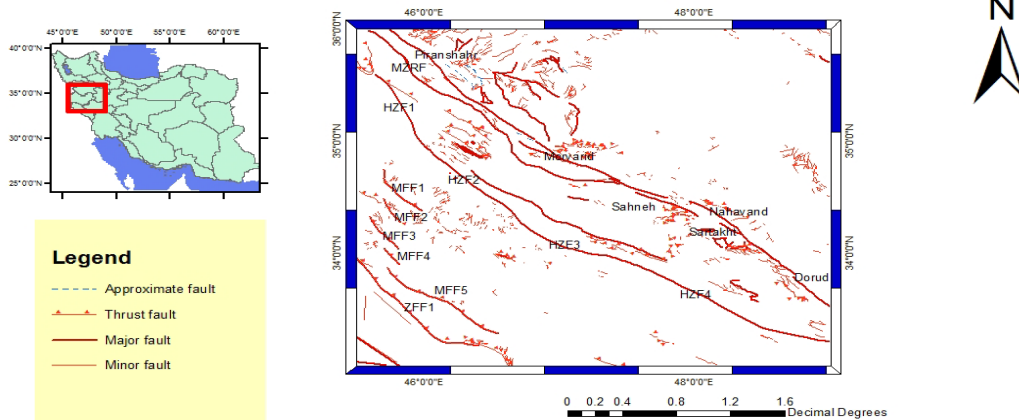


شکل ۲. نمایش اثر جهت پذیری برای دو ساختمان مختلف.

۱۸ تا ۲۵ کیلومتر را برای این زمین لرزه گزارش کردند. مرکز لرزه نگاری کشوری وابسته به مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران (Iranian Seismological Center, IRSC) بزرگای گشتاوری ۷/۳، عمق ۱۸/۱ کیلومتر و رومرکز ۰°E و ۴۵/۷۶°N را برای این رخداد گزارش داد.

بر اساس تقسیم بندی های میرزایی و همکاران (۱۹۹۸)، گستره مورد مطالعه در این پژوهش شامل قسمت هایی از زیربالت های لرزه زمین ساختی زاگرس شمالی و ایران مرکزی- شرق ایران است. در شکل ۳ گسل های مهم محدوده شامل گسل های اصلی جوان زاگرس، پیرانشهر، مروارید، صحنه، نهاوند، درود، معکوس زاگرس و زاگرس مرتفع نمایش داده شده است.

۳ زلزله ۲۱ آبان ۱۳۹۶ سرپل ذهاب کرمانشاه به منظور بررسی تأثیر جهت پذیری در تحلیل خطر لرزه ای احتمالاتی، منطقه کرمانشاه و زلزله ۲۱ آبان ۱۳۹۶ (۱۲ نوامبر ۲۰۱۷) سرپل ذهاب کرمانشاه انتخاب شد. در این تحقیق محدوده ای به مرکزیت شهر کرمانشاه با شعاع حدود ۲۰۰ کیلومتر در نظر گرفته شده است. مختصات جغرافیایی این منطقه ۳۳ تا ۳۶ درجه عرض شمالی و ۴۵ تا ۴۹/۵ درجه طول شرقی است (شکل ۳). در ۲۱ آبان ۱۳۹۶ ساعت ۱۸:۱۸:۱۶ به وقت گرینویچ و ۲۱:۴۸:۱۶ به وقت محلی، زمین لرزه بزرگی در استان کرمانشاه واقع در غرب ایران و در نزدیکی مرز ایران و عراق رخ داد. مراکز مختلف لرزه نگاری در سراسر جهان، بزرگای گشتاوری ۷ و عمق



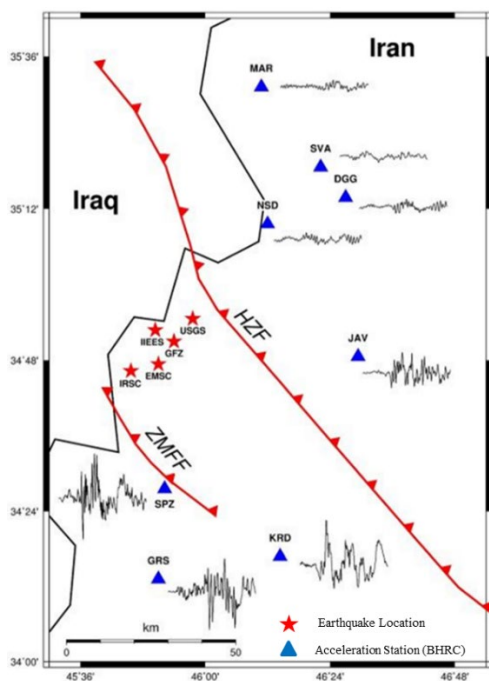
ZFF1: گسل پیشانی زاگرس	MZRF: گسل اصلی معکوس زاگرس	HZF1-4: گسل زاگرس مرتفع	MFF1-5: گسل پیشانی کوهستان
Nahavand: گسل نهاوند	Sahneh: گسل صحنه	Morvarid: گسل مروارید	Piranshahr: گسل پیرانشهر
		Dorud: گسل درود	Sartakht: گسل سرتخت

شکل ۳. محدوده و گسل های مهم منطقه.

داده شده است.

۵ مبانی برآورد خطر زمین لرزه

در این مطالعه تحلیل خطر احتمالاتی با در نظر گرفتن اثر حوزه نزدیک (اثر جهت پذیری) بررسی می شود. تحلیل خطر احتمالاتی از پنج مرحله مهم تشکیل شده است (شکل ۶) که عبارت اند از: (۱) شناسایی چشمه های لرزه ای با توان ایجاد جنبش و خسارت به سازه؛ (۲) محاسبه رابطه فراوانی زمین لرزه ها بر حسب بزرگای آنها برای چشمه های لرزه ای منتخب؛ (۳) محاسبه توزیع احتمال بزرگا و فاصله یک چشمه معین تا ساختگاه مورد مطالعه؛ (۴) انتخاب رابطه کاهندگی مناسب جهت توصیف شدت جنبش زمین؛ (۵) به دست آوردن منحنی یا نقشه خطر احتمالاتی با استفاده از گام های پیشین.

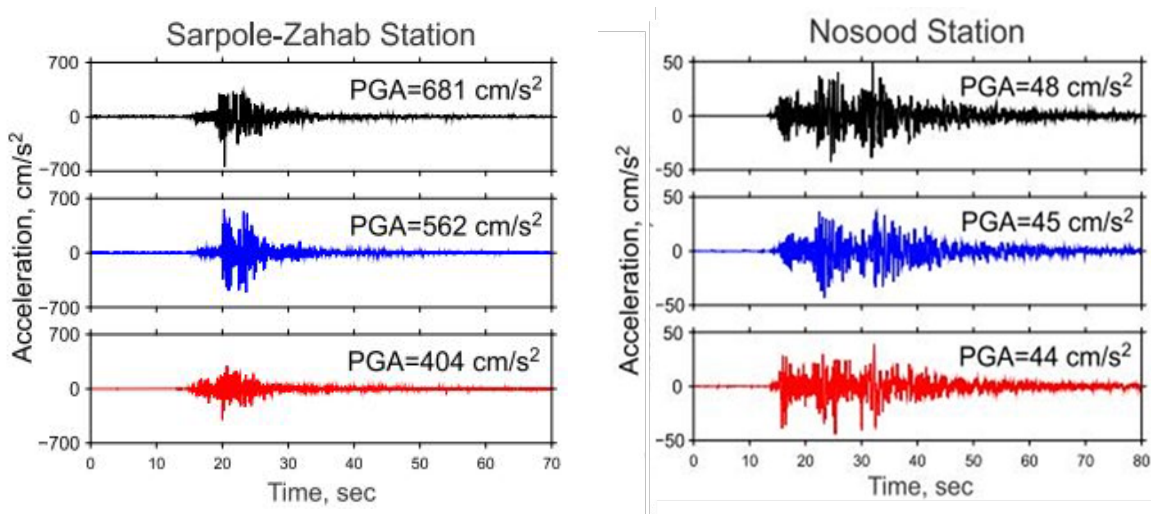


شکل ۴. موقعیت ایستگاه های شتاب نگاری وابسته به مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن (مثلث های آبی رنگ) و رومرکز زمین لرزه ۲۱ آبان ۱۳۹۶ سرپل ذهاب بر اساس گزارش مراکز IIEES, USGS, EMSC, GFZ و IRSC (ستاره های قرمز رنگ). همان گونه که ملاحظه می شود، پدیده جهت پذیری را می توان در ایستگاه های واقع در جنوب (KRD, GRS, SPZ) و شرق (JAV) رومرکز مشاهده کرد، در حالی که این پدیده در ایستگاه های واقع در شمال رومرکز (MAR, SVA, DGG, NSD) رخ نداده است.

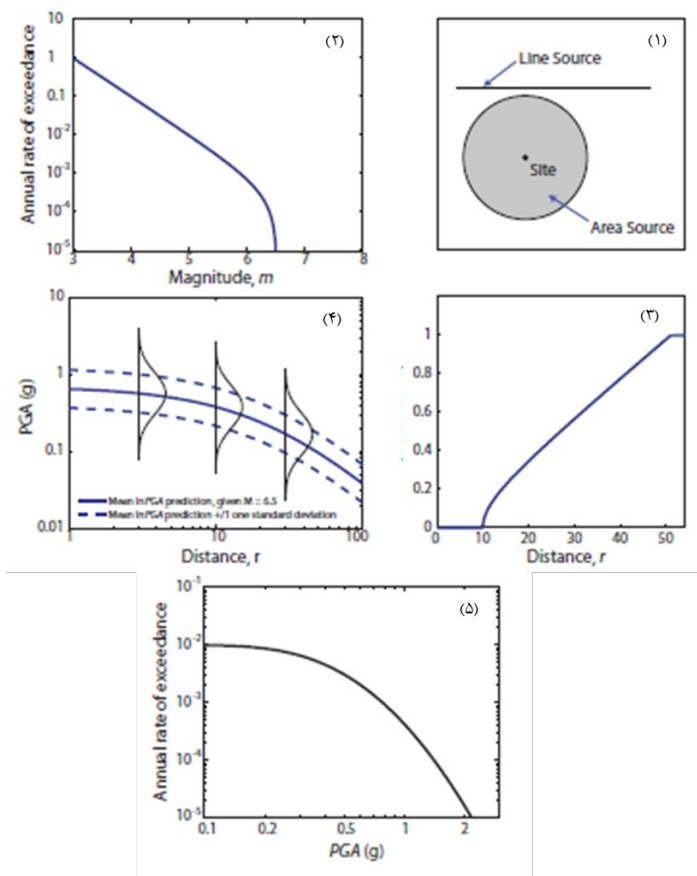
۴ بررسی اثر جهت پذیری در زلزله ۲۱ آبان ۱۳۹۶ سرپل ذهاب کرمانشاه

جهت مشاهده و بررسی جهت پذیری متأثر از زلزله ۱۳۹۶ سرپل ذهاب، شتاب نگاشت های ثبت شده در ایستگاه های شتاب نگاری وابسته به مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن (Building and Housing Research Center, BHRC) در پیرامون رومرکز زلزله (شکل ۴) بررسی شدند. نزدیک ترین ایستگاه شتاب نگاری به رومرکز و گسیختگی گسل، ایستگاه سرپل ذهاب (SPZ) در شهر سرپل ذهاب است که بیشترین خسارات و تلفات ناشی از این زمین لرزه را تحمل کرده است (گزارش فوری و مقدماتی شبکه ملی شتاب نگاری زلزله، ۱۳۹۶). در شکل ۴ تاریخچه زمانی شتاب برای چهار ایستگاه شتاب نگاری SPZ، GRS، JAV و KRD در فاصله کانونی ۴۰ تا ۷۲ کیلومتر نشان داده شده است. در ایستگاه های SPZ، GRS و KRD که در جنوب و جنوب شرق گسیختگی واقع شده اند، در مقایسه با ایستگاه نوسود (NSD) که در شمال شرق رویداد قرار دارد، دامنه های بزرگ جنبش زمین و پالس دوره بلند مشاهده می شود. ایستگاه شتاب نگاری سرپل ذهاب که اثر جهت پذیری در آن رخ داده است، در سمت جنوب و در فاصله ۳۹ کیلومتری از رومرکز واقع شده است. در نگاشت این ایستگاه، بیشترین مقدار انرژی در ۱۱ ثانیه اول آزاد شده است. ایستگاه نوسود در جهت شمال و در فاصله ۴۷ کیلومتری از رومرکز قرار دارد. گسیختگی در جهت دور شدن از ایستگاه نوسود است و اثر جهت پذیری پس رونده در آن مشاهده می شود. در نگاشت این ایستگاه، بیشترین مقدار انرژی در ۳۰ ثانیه اول آزاد شده است.

بیشترین شتاب ثبت شده مربوط به شتاب نگاشت ایستگاه سرپل ذهاب است. در شکل ۵ مؤلفه شتاب ثبت شده در این ایستگاه و ایستگاه شتاب نگاری نوسود (NSD) نشان



شکل ۵. مقایسه مقادیر سه مؤلفه شتاب زلزله ۲۱ آبان ۱۳۹۶ سرپل ذهاب ثبت شده در دو ایستگاه شتاب‌نگاری سرپل ذهاب (SPZ) و نوسود (NSD).



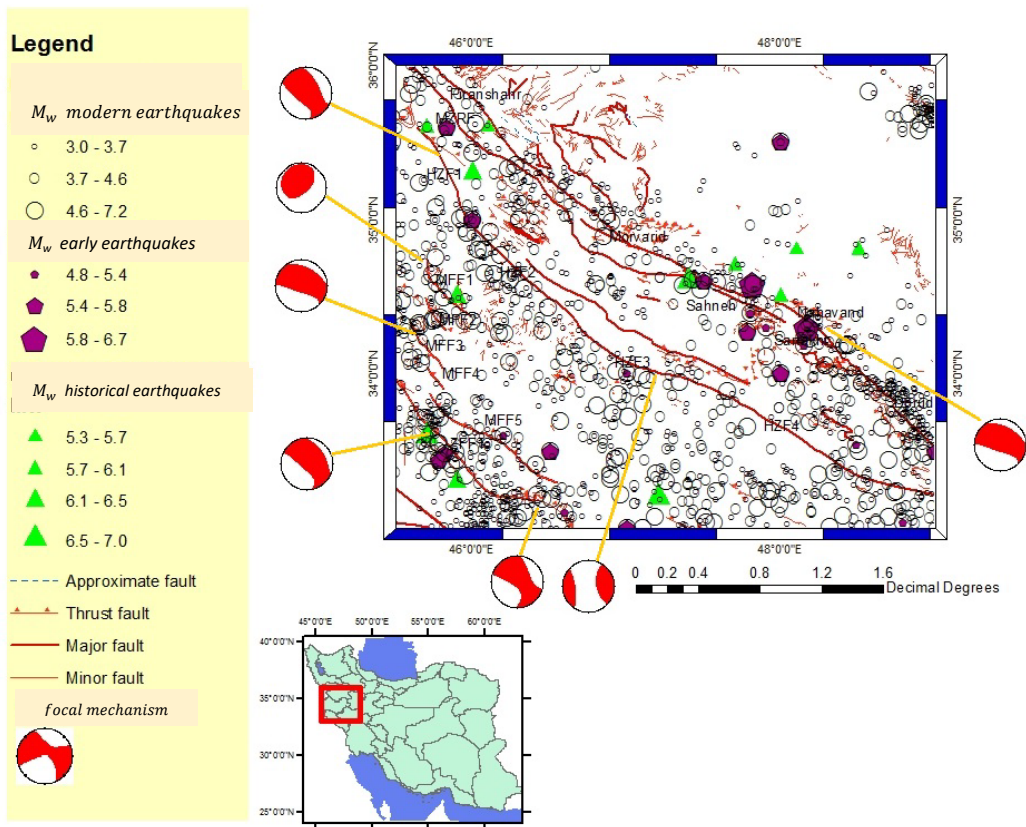
شکل ۶. مراحل مختلف تحلیل خطر احتمالاتی (بیکر، ۲۰۰۸).

چشمه با طول‌های مختلف و چشمه صحنه نیز به دو چشمه تقسیم شد.

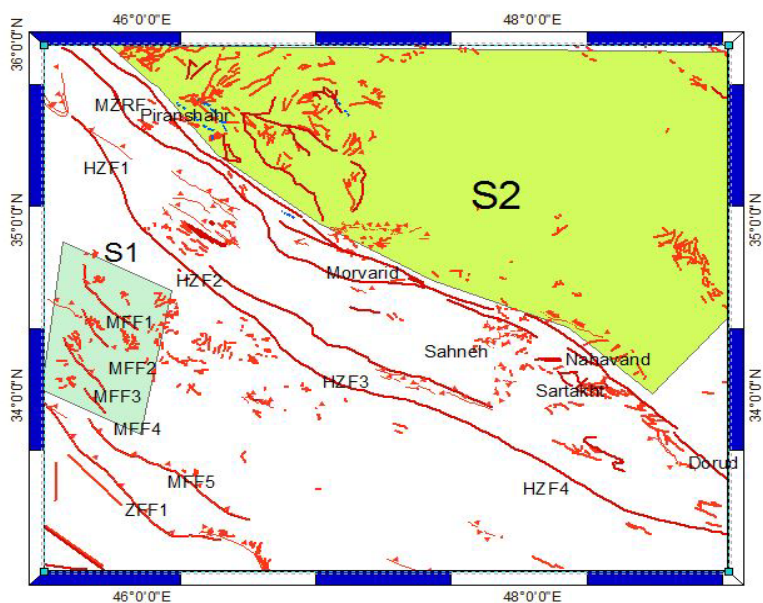
زرگای ناکاملی M_c برای کل منطقه مورد مطالعه با کمک نرم‌افزار Zmap محاسبه شد. زمین‌لرزه‌هایی که بزرگای کمتر از بزرگای ناکاملی داشتند، از کل داده‌ها حذف و داده‌ها جهت تعیین پارامترهای لرزه‌خیزی آماده شدند. مقدار M_c برای کل منطقه مورد مطالعه برابر $4/01$ و مقدار b-value برابر با $0/82$ به دست آمده است. پس از تعیین M_c ، می‌توان معادله خطی لگاریتمی گوتنبرگ-ریشتر (۱۹۵۶) را محاسبه کرد.

برای تحلیل خطر لرزه‌ای احتمالاتی، ابتدا نقشه لرزه‌زمین‌ساخت منطقه‌ای به مختصات جغرافیایی 33 تا 36 درجه عرض شمالی و 45 تا $49/5$ طول شرقی تهیه و برای مشخص کردن چشمه‌های بالقوه زمین‌لرزه از فهرست‌نامه زمین‌لرزه‌های رخ داده در گستره موردنظر، نقشه‌های زمین‌شناسی و سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌ها (شکل ۷) استفاده شد.

در گستره 200 کیلومتری اطراف کرمانشاه، تعداد بیست و یک چشمه بالقوه زمین‌لرزه شامل دو چشمه ناحیه‌ای و نوزده چشمه خطی در نرم‌افزار ARC GIS مشخص شد (شکل ۸). گفتنی است به دلیل طول زیاد، چشمه خطی پیرانشهر به چهار چشمه تقسیم شد. چشمه نه‌اوند به سه

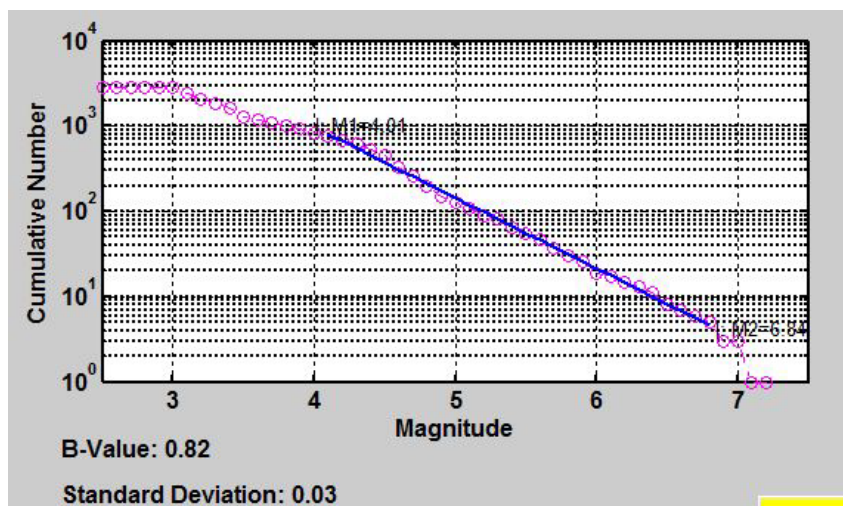


شکل ۷. نقشه لرزه‌زمین‌ساخت، گسل‌ها و سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌ها در گستره مورد بررسی.



MFF1-5: گسل پیشانی کوهستان HZF1-4: گسل زاگرس مرتفع MZRF: گسل اصلی معکوس زاگرس ZFF1: گسل پیشانی زاگرس
 Piranshahr: گسل پیرانشهر Morvarid: گسل مروارید Sahnéh: گسل صحنه Nahavand: گسل نهاوند
 Sartakht: گسل سرتخت Dorud: گسل درود S1: گسل ناحیه‌ای شماره یک S2: گسل ناحیه‌ای شماره دو

شکل ۸. چشمه‌های خطی و ناحیه‌ای تعیین شده در محدوده مورد مطالعه.



شکل ۹. محاسبه بزرگای ناکاملی و تعیین پارامترهای لرزه‌خیزی بر اساس روش گوتنبرگ-ریشتر برای کل منطقه.

گستره مورد مطالعه در دو ایالت ایران مرکزی- شرق ذکر شده در گستره ۲۰۰ کیلومتری کرمانشاه به روش کیکو
 ایران و زاگرس قرار دارد. پارامترهای لرزه‌خیزی دو ایالت و سلوول (۱۹۹۲) به دست آمد (جدول ۱).

جدول ۱. پارامترهای لرزه‌خیزی برآورد شده در این پژوهش برای دو ایالت لرزه‌زمین‌ساختی ایران مرکزی- شرق ایران و زاگرس

ایالت لرزه‌زمین‌ساختی ایران مرکزی- شرق ایران	ایالت لرزه‌زمین‌ساختی زاگرس
$\beta = 2.22 \pm 0.17$ ($b = 0.96 \pm 0.07$)	$\beta = 1.64 \pm 0.12$ ($b = 0.71 \pm 0.05$)
$\lambda = 3.219 \pm 0.712$ ($for M_{min} = 4.0$)	$\lambda = 2.905 \pm 0.572$ ($for M_{min} = 4.0$)
$M_{max} = 7.2 \pm 0.39$ ($for M_{max}^{obs.} = 6.7 \pm 0.2$)	$M_{max} = 7.7 \pm 0.31$ ($for M_{max}^{obs.} = 7.2 \pm 0.2$)

مساوی ۴ به روش تقریبی مبتنی بر طول گسل بین چشمه‌های لرزه‌زا تقسیم می‌شود (جدول‌های ۲ و ۳). بزرگای بیشینه مربوط به چشمه‌های خطی با استفاده از روابط تجربی (نوروزی، ۱۹۸۵؛ ولز و کوپراسمیت، ۱۹۹۴ و آمبرسیز و جکسون، ۱۹۹۸) محاسبه و در جدول ۴ نمایش داده شده است.

ویژگی‌های لرزه‌خیزی چشمه‌های درون هر ایالت، تقریباً با ویژگی‌های لرزه‌خیزی ایالت لرزه‌زمین‌ساخت در برگیرنده آن یکسان است؛ در نتیجه می‌توان پارامتر لرزه‌خیزی β هر چشمه را با پارامتر لرزه‌خیزی ایالت لرزه‌زمین‌ساخت در برگیرنده آن یکسان دانست. همچنین مقدار میانگین متوسط سالانه زمین‌لرزه‌های بزرگ‌تر یا

جدول ۲. پارامترهای لرزه‌خیزی چشمه‌های انتخاب شده در ایالت لرزه‌زمین‌ساختی زاگرس.

شماره	نوع چشمه	نام ناحیه گسلی	β	λ
۱	چشمه خطی	Dorud	۱/۶۴	۰/۱۶۸
۲		Morvarid	۱/۶۴	۰/۱۲۵۲
۳		Sartakht	۱/۶۴	۰/۰۴۳
۴		MZRF	۱/۶۴	۰/۳۵۸
۵		Piranshahr1	۱/۶۴	۰/۰۸۵
۶		Piranshahr2	۱/۶۴	۰/۰۷۸
۷		Piranshahr3	۱/۶۴	۰/۱۷۶
۸		Piranshahr4	۱/۶۴	۰/۰۲۸
۹		HZF1-1	۱/۶۴	۰/۱۰۴۳
۱۰		HZF1-2	۱/۶۴	۰/۱۸۶۲
۱۱		HZF1-3	۱/۶۴	۰/۱۰۵
۱۲		HZF1-4	۱/۶۴	۰/۲۷۴
۱۳		MFF1-5	۱/۶۴	۰/۲۰۵
۱۴		Nahavand1	۱/۶۴	۰/۰۲۸
۱۵		Nahavand2	۱/۶۴	۰/۱۰۵
۱۶		Nahavand3	۱/۶۴	۰/۱۶۳
۱۷		Sahneh1	۱/۶۴	۰/۰۷۸
۱۸		Sahneh2	۱/۶۴	۰/۰۷۰۶
۱۹		ZFF1	۱/۶۴	۰/۱۶۳
۲۰	چشمه ناحیه‌ای	S1(MFF1-MFF2-MFF3-MFF4)	۱/۶۴	۰/۲۱۳۵

جدول ۳. پارامترهای لرزه‌خیزی چشمه انتخاب شده در ایالت لرزه‌زمین‌ساخت ایران مرکزی - شرق ایران.

۲۱	چشمه ناحیه‌ای	S2	۲/۲۲	۰/۹۳۶
----	---------------	----	------	-------

جدول ۴. توان لرزه‌زایی چشمه‌های خطی.

NO.	Fault Zone Name	Fault Length	Observed Mmax	Rupture (Km)	Nowroozi (1985)	Wells and CopperSmith (1994)	Ambraseys and Jackson (1998)	Mean Empirical (Mmax)	Final Mw
1	Dorud	105	7.4	52.5	7.1	7	7	7.0	7.4
2	Morvarid	78	5.5	39	7	6.9	6.9	6.9	6.9
3	Sartakht	26.8	5.5	13.4	6.4	6.3	6.4	6.4	6.4
4	MZRF	232	6.7	116	7.2	7.2	7.3	7.2	7.2
5	Piranshahr1	52.7	5.5	26.35	6.8	6.7	6.7	6.7	6.7
6	Piranshahr2	48.8	5.5	24.4	6.6	6.6	6.7	6.6	6.6
7	Piranshahr3	46.4	5.5	23.2	6.7	6.6	6.6	6.6	6.6
8	Piranshahr4	110	5.5	55	7.1	7	7.1	7.1	7.1
9	HZF1-1	64.9	6.4	32.45	6.7	6.8	6.8	6.8	6.8
10	HZF1-2	116	6.4	58	7.2	7.1	7.1	7.1	7.1
11	HZF1-3	66	6.4	33	6.8	6.8	6.8	6.8	6.8
12	HZF1-4	171	6.4	85.5	7.2	7.3	7.3	7.3	7.3
13	MFF1-5	102	6.8	51	7.1	7	7	7.0	6.8
14	Nahavand1	18	6.1	9	6.2	6.1	6.1	6.1	6.1
15	Nahavand2	6.6	6.6	3.3	5.7	5.6	5.6	5.6	6.6
16	Nahavand3	102	6.9	51	7	7	7	7.0	6.9
17	Sahneh1	49.22	6.9	24.61	6.7	6.6	6.6	6.6	6.9
18	Sahneh2	44.7	6.9	22.35	6.8	6.7	6.7	6.7	RL
19	ZFF1	128	6.4	64	7.2	7.1	7.2	7.2	6.4
20	MFF1-1	50.7	6.8	25.35	6.8	6.7	6.7	6.7	6.8
21	MFF1-2	26	6.8	13	6.4	6.3	6.3	6.3	6.8
22	MFF1-3	38	6.8	19	6.6	6.5	6.5	6.5	6.8
23	Mff1-4	19	6.8	9.5	6.2	6.2	6.1	6.2	6.8

بزرگای نگاشت‌های منتخب، محدوده فاصله انتخاب شده و مقدار بیشینه طول گسیختگی گسل به سمت ساختگاه (x)، مدل سامرویل را اصلاح کرد. مدل نهایی اصلاح شده به صورت رابطه (۱) است (آبراهامسون، ۲۰۰۰):

$$\ln S a_{dir}(M, r, x, \theta, T) = \ln S a(M, r) + Y_{dir}(x, \theta, T) T_d(r) T_m(m) \quad (1)$$

که θ زاویه بین راستای گسل و رومرکز زمین لرزه، $T_m(m)$ تیپر (taper) بزرگای $T_d(r)$ تیپر فاصله است. $S a(M, r)$ رابطه تجربی کاهندگی بدون اعمال اثر جهت‌پذیری و $Y_{dir}(x, \theta, T)$ رابطه اصلاح شده کاهندگی آبراهامسون (۲۰۰۰) با اعمال اثر جهت‌پذیری است. آبراهامسون (۲۰۰۰) برای اینکه اثر جهت‌پذیری را در مدل برآورد خطر

در این مطالعه برای بررسی اثر حوزه نزدیک (جهت‌پذیری) از رابطه کاهندگی سامرویل و همکاران (۱۹۹۷) و آبراهامسون (۲۰۰۰) استفاده شده است. طبق نتیجه مطالعه سامرویل و همکاران (۱۹۹۷)، دو عامل بر جهت‌پذیری تأثیرگذار هستند. یکی از این عوامل، زاویه بین جهت شکست و جهت حرکت امواج زلزله از گسل به ساختگاه است و دومین عامل تأثیرگذار، بخشی از سطح شکست گسل است که بین کانون زلزله و ساختگاه قرار دارد؛ بنابراین هرچه زاویه بین راستای گسلش و ساختگاه کوچک‌تر باشد و سطح شکست بین کانون زلزله و ساختگاه بزرگ‌تر باشد، اثر جهت‌پذیری شدت بیشتری دارد. در ادامه، آبراهامسون (۲۰۰۰) با اصلاحاتی مانند

چگالی احتمال را برای محل قرارگیری کانون گسلش روی گسیختگی تعریف کرد.

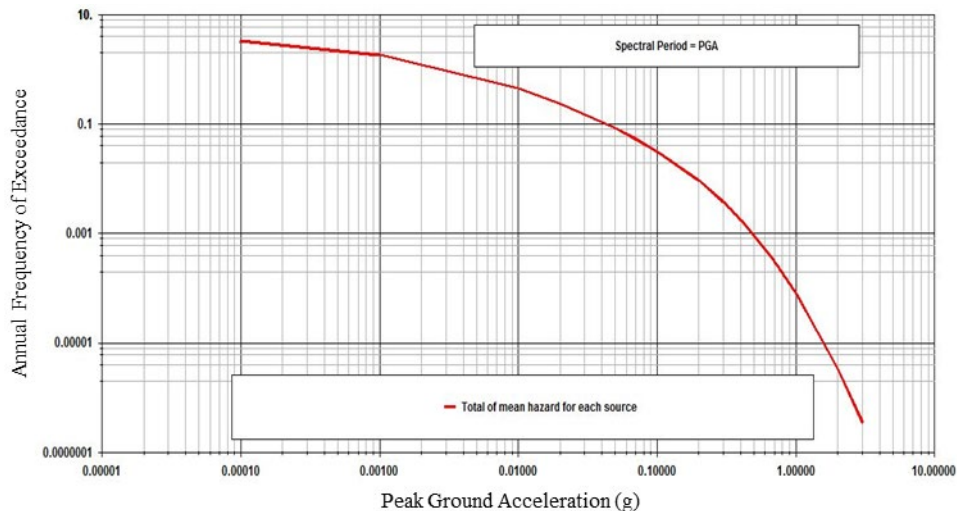
۶ تحلیل خطر احتمالاتی با در نظر گرفتن اثر جهت پذیری در گستره کرمانشاه

در این مطالعه به منظور پهنه بندی خطر لرزه ای، بیشینه شتاب (PGA) با در نظر گرفتن اثر جهت پذیری برای چشمه های لرزه ای گستره مورد مطالعه در دوره بازگشت های ۵۰ سال (۶۳٪ در ۵۰ سال)، ۴۷۵ سال (۱۰٪ در ۵۰ سال) و ۲۴۷۵ سال (۲٪ در ۵۰ سال) و شتاب طیفی حاصل از جنبش زمین (Sa) با لحاظ کردن اثر جهت پذیری برای چشمه های لرزه ای گستره مورد مطالعه در دوره بازگشت های مختلف و در محدوده دوره تناوب های صفر تا چهار ثانیه و اعمال ۵٪ میرایی برای مؤلفه افقی شتاب در مرکز کرمانشاه به مختصات عرض جغرافیایی ۳۴/۶ درجه و طول جغرافیایی ۴۷/۲ درجه با استفاده از نرم افزار (EZ-Frisk Software for Earthquake Ground Motion Estimation) محاسبه شد. در شکل ۱۰ منحنی خطر احتمالاتی کرمانشاه با در نظر گرفتن اثر حوزه نزدیک رسم شده است.

وارد کند، توزیع مکانی کانون عمقی ناحیه گسیختگی را نیز به عنوان یک چشمه تغییر پذیر و تصادفی اعمال کرد:

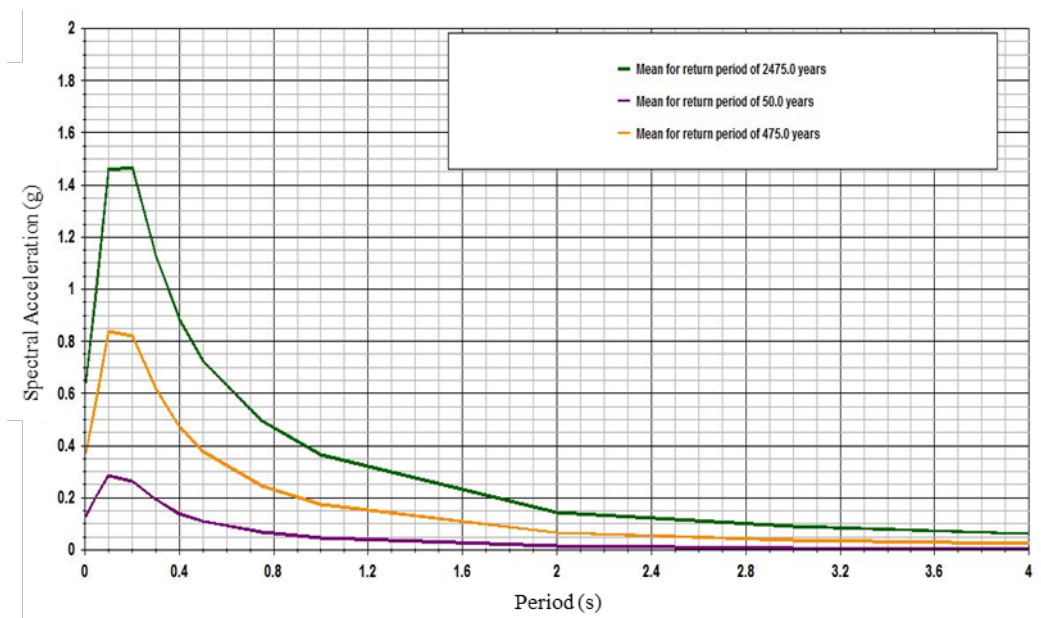
$$v_i(A > z) = N_i(M_{\min}) \int_{w=0}^{\infty} \int_{RA=0}^{\infty} \int_{Ex=0}^1 \int_{Ey=0}^1 \int_{hx=0}^1 \int_{m=M_{\min}}^{M_{\max}} f_{m_i}(m) f_{w_i}(m, W) f_{RA_i}(m, RA) f_{Ex_i}(x) f_{Ey_i}(m, x) f_{h_x}(h_x) P(A > z | m, r, X, \theta) dw dRA dx dy dh_x dm \quad (2)$$

که $N_i(M_{\min})$ فراوانی زمین لرزه هایی با بزرگای بیشتر از M_{\min} برای i -امین چشمه، m بزرگا و M_{\max} بزرگای بیشینه برای i -امین چشمه است. $f_{w_i}(m, W)$ ، $f_{m_i}(m)$ ، $f_{RA_i}(m, RA)$ ، $f_{Ex_i}(x)$ ، $f_{Ey_i}(m, x)$ ، $f_{h_x}(h_x)$ به ترتیب تابع چگالی احتمال برای بزرگای زمین لرزه، عرض گسیختگی، مساحت گسیختگی، مکان مرکز گسیختگی در راستای گسل، مکان مرکز گسیختگی در امتداد عرض گسلش و در نهایت، تابع چگالی احتمال کانون عمقی گسلش است. همچنین مقدار $P(A > z | m, r, X, \theta)$ احتمال فزونی جنبش زمین نسبت به پارامتر z است که برای پارامترهای بزرگا (m) ، فاصله (r) و مکان گسیختگی (X, θ) محاسبه می شود. θ ، r و x با استفاده از مکان گسیختگی و کانون گسیختگی محاسبه می شوند؛ به همین دلیل آبراهامسون (۲۰۰۰) تابع



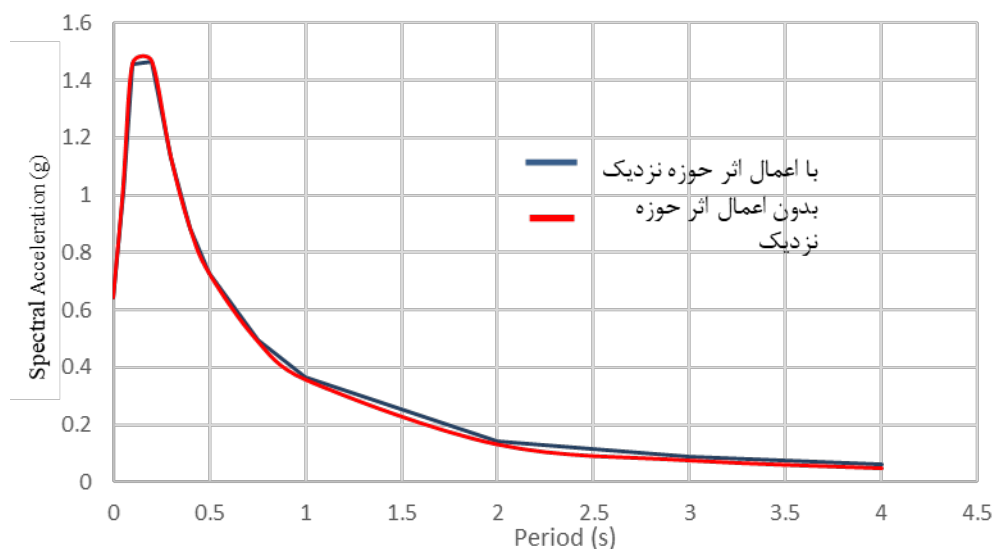
شکل ۱۰. منحنی خطر لرزه ای احتمالاتی کرمانشاه (PGA) با در نظر گرفتن اثر جهت پذیری و ۵ درصد میرایی برای شتاب افقی.

در شکل ۱۱ طیف‌های خطر یکسان (شتاب طیفی) برای تناوب‌های صفر تا چهار ثانیه برای مؤلفه‌های افقی تهیه شده سه دوره بازگشت ۲۴۷۵، ۴۷۵ و ۵۰ سال در محدوده دوره است.



شکل ۱۱. منحنی طیفی خطر لرزه‌ای (شتاب طیفی) برای ساختمان بررسی شده روی سنگ بستر با ۵ درصد میرایی برای سه دوره بازگشت متفاوت.

در ادامه، تحلیل خطر لرزه‌ای احتمالاتی متأثر از جهت‌پذیری در دوره تناوب‌های مختلف برای دو ساختمان بررسی می‌شود.



شکل ۱۲. طیف خطر یکنواخت برای دوره بازگشت ۲۴۷۵ سال با لحاظ کردن اثر جهت‌پذیری (منحنی آبی‌رنگ) و بدون لحاظ کردن اثر جهت‌پذیری (منحنی قرمز رنگ).

جدول ۵. درصد افزایش شتاب (برحسب g) با لحاظ کردن اثر جهت‌پذیری برای ساختمان با مختصات عرض جغرافیایی ۳۴/۶ درجه و طول جغرافیایی ۴۷/۲ درجه.

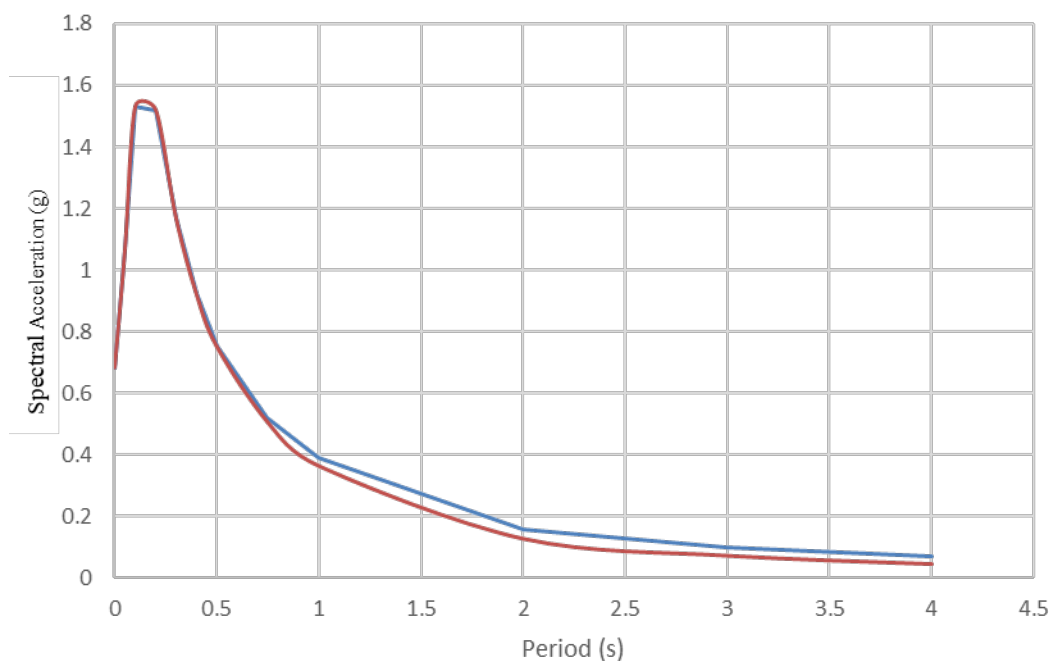
دوره بازگشت زلزله (سال)			دوره تناوب (ثانیه)
۲۴۷۵	۴۷۵	۵۰	
۰/۶	۰/۶	۰/۳	۰/۷۵
۱/۷	۲	۰/۶	۱
۸	۵	۱	۲
۱۴	۹	۱/۸	۳
۱۹/۵	۱۰	۳	۴

جدول ۶. درصد افزایش شتاب (برحسب g) با لحاظ کردن اثر جهت‌پذیری برای ساختمان با مختصات عرض جغرافیایی ۳۳/۲۵ و طول جغرافیایی ۴۹/۳۵ درجه.

دوره بازگشت زلزله (سال)			دوره تناوب (ثانیه)
۲۴۷۵	۴۷۵	۵۰	
۲/۹	۱/۷	۰/۱	۰/۷۵
۷	۴	۰/۲	۱
۱۷/۲	۹	۰/۴	۲
۲۶/۲	۱۴	۲	۳
۳۳/۷	۱۷/۳	۳	۴

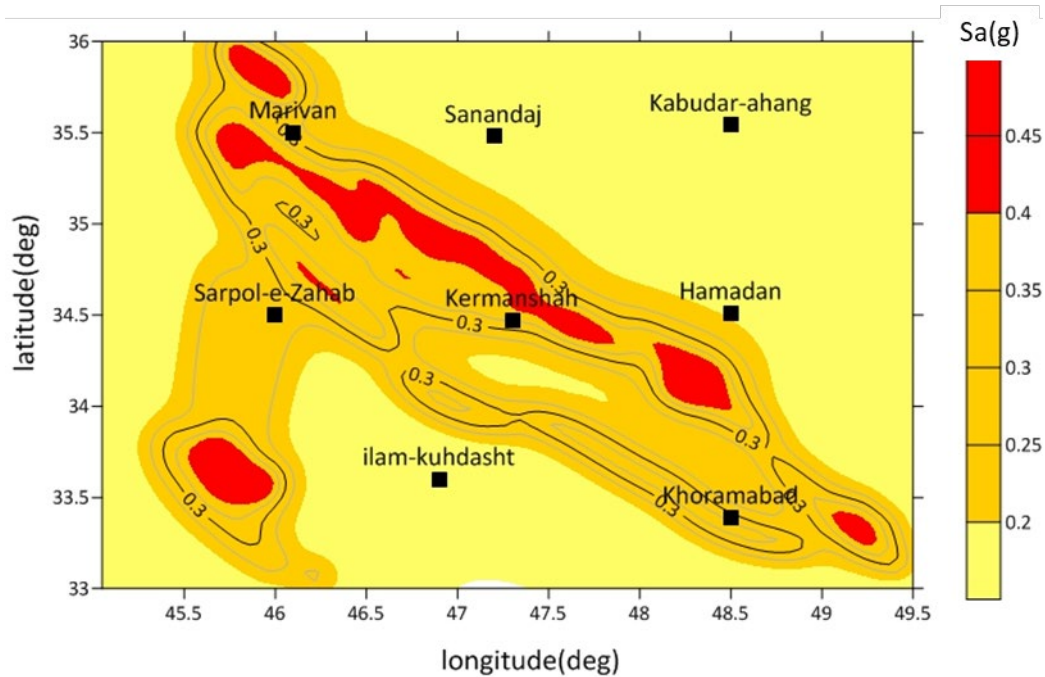
در شکل ۱۲ طیف خطر یکنواخت در حوزه نزدیک برای ساختمان با مختصات ۳۴/۶ درجه عرض جغرافیایی و ۴۷/۲ درجه طول جغرافیایی رسم شده است. با توجه به جدول ۵ مشاهده می‌شود شتاب از دوره تناوب ۰/۷۵ ثانیه به بعد افزایش می‌یابد که این تقویت تا دوره تناوب ۴ ثانیه اثر فزاینده دارد. در حوزه نزدیک، تقویت طیف در دوره تناوب ۳ ثانیه برابر با ۱۴ درصد و حداکثر تقویت طیف در دوره تناوب ۴ ثانیه برابر با ۲۰ درصد است.

در شکل ۱۳ نیز طیف خطر یکنواخت برای ساختمان با مختصات عرض جغرافیایی ۳۳/۲۵ درجه و طول جغرافیایی ۴۹/۳۵ درجه در حوزه نزدیک بررسی شده است. با توجه به جدول ۶ مشاهده می‌شود در طیف خطر یکنواخت برای حوزه نزدیک، اثر تقویت طیف حدود ۲۷ درصد در دوره تناوب ۳ ثانیه و حدود ۳۴ درصد در دوره تناوب ۴ ثانیه رخ داده است.

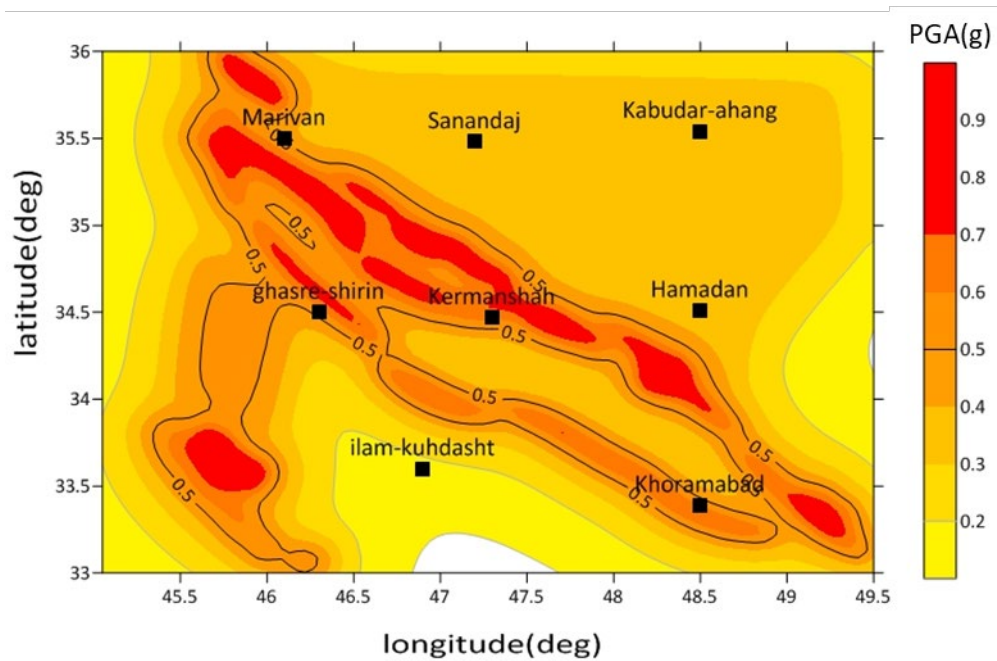


شکل ۱۳. طیف خطر یکنواخت برای دوره بازگشت ۲۴۷۵ سال با لحاظ کردن اثر حوزه نزدیک (منحنی آبی‌رنگ) و بدون لحاظ کردن اثر حوزه نزدیک (منحنی قرمز رنگ).

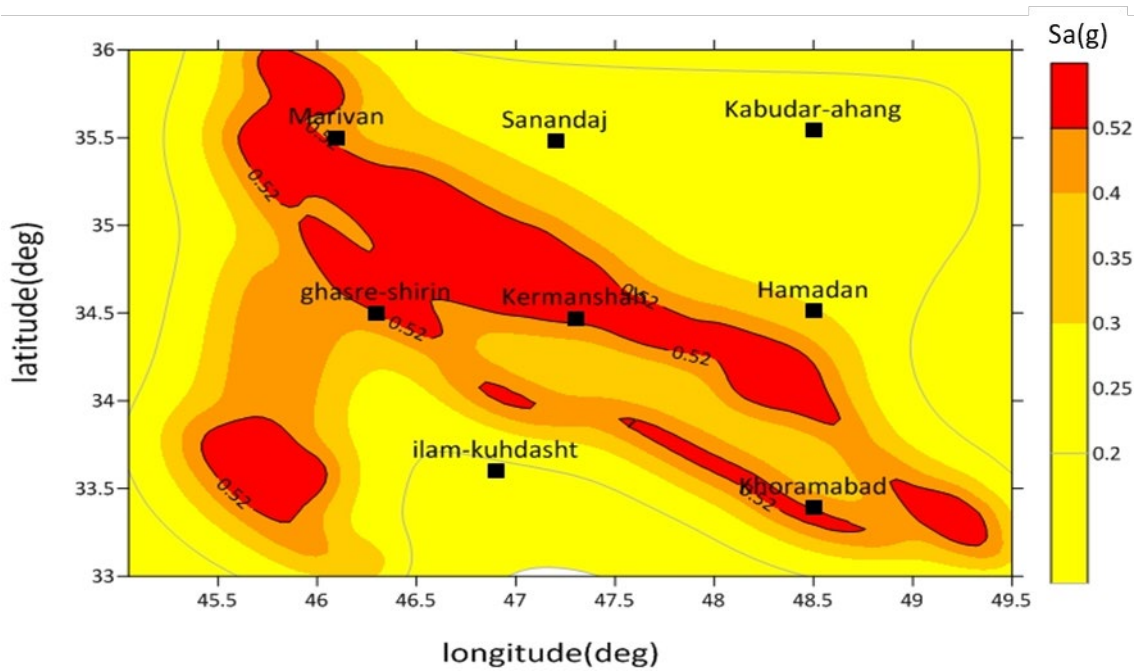
۷ پهنه بندی خطر زمین لرزه در گستره مورد مطالعه با در نظر گرفتن اثر جهت پذیری شکل های ۱۴ تا ۱۸ نقشه های پهنه بندی خطر زمین لرزه را در گستره کرمانشاه نمایش می دهند. شایان ذکر است شرایط سنگی برای ساختگاه لحاظ شده است.



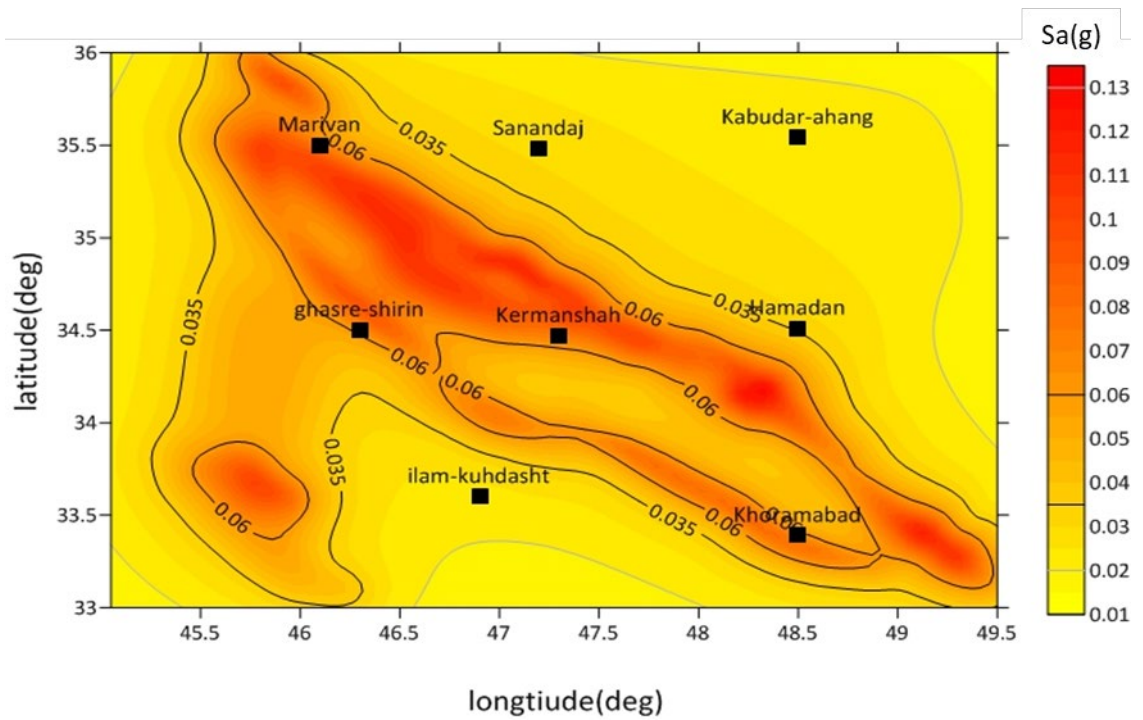
شکل ۱۴. نقشه پهنه بندی شتاب طیفی Sa (برحسب g) در گستره کرمانشاه برای دوره بازگشت ۴۷۵ سال و دوره تناوب ۰/۲ ثانیه.



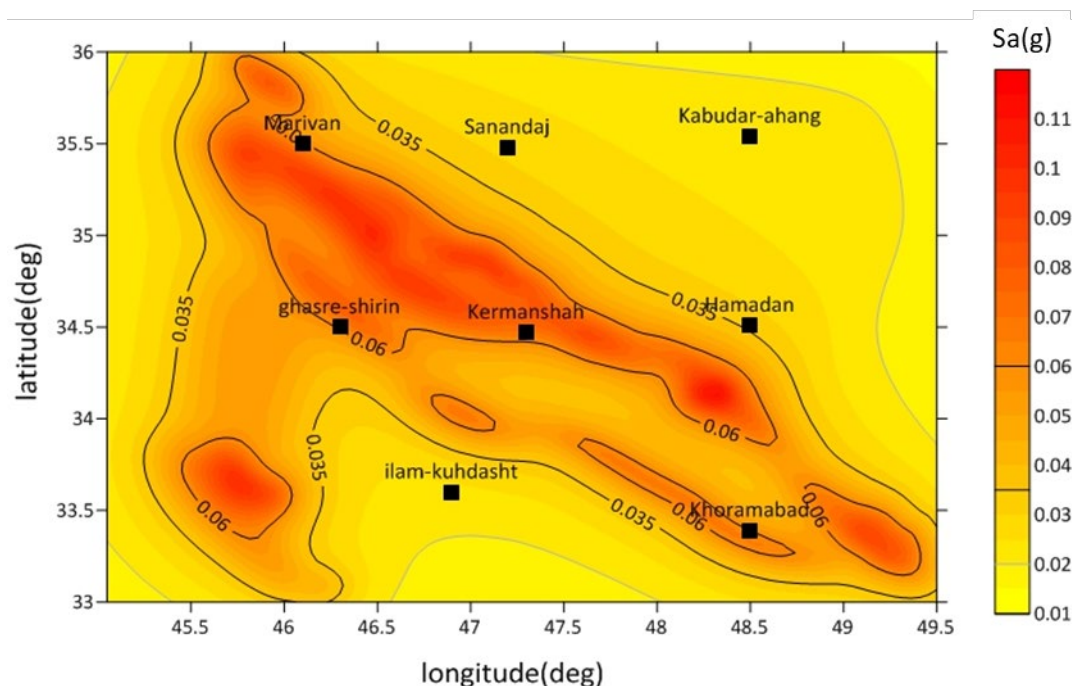
شکل ۱۵. نقشه پهنه بندی بیشینه شتاب PGA (برحسب g) در گستره کرمانشاه برای احتمال ۲ درصد در دوره بازگشت ۲۴۷۵ سال



شکل ۱۶. نقشه پهنه‌بندی شتاب طیفی Sa در دوره تناوب ۰/۳ ثانیه (برحسب g) در گستره کرمانشاه برای دوره بازگشت ۴۷۵ سال.



شکل ۱۷. پهنه‌بندی شتاب طیفی Sa در دوره تناوب ۳ ثانیه (برحسب g) برای دوره بازگشت ۲۴۷۵ سال با تأثیر دادن اثر جهت‌پذیری



شکل ۱۸. پهنه بندی شتاب طیفی Sa در دوره تناوب ۳ ثانیه (برحسب g) برای دوره بازگشت ۲۴۷۵ سال بدون تأثیر دادن اثر جهت پذیری.

۸ بحث و نتیجه گیری

شتاب نگاشت های حوزه نزدیک به علت داشتن پالس بزرگ در تاریخچه زمانی نسبت به شتاب نگاشت های حوزه دور ماهیت متفاوتی دارند. وجود این پالس بزرگ باعث خسارات زیادی در سازه می شود. یکی از مشخصه های اصلی جنبش حوزه نزدیک گسل که مسبب به وجود آمدن تغییر مکان ها و سرعت های بزرگ است، همین پالس های دوره بلند در نمودار تاریخچه زمانی سرعت و جابه جایی است.

طیف بازتاب شتاب زلزله های ثبت شده در ایستگاه های واقع در حوزه نزدیک گسل از شکل معمول خارج می شود و در دوره تناوب های تقریباً بزرگ تر از ۰.۷ ثانیه، دامنه طیف بازتاب به شکل محسوسی افزایش می یابد. با توجه به تغییر دامنه طیف بازتاب، جهت گیری سازه در محدوده نزدیک گسل مهم است.

محدوده مورد مطالعه در پهنه با خطر نسبی زیاد قرار دارد؛ بنابراین توجه به اثر جهت پذیری اهمیت دارد. اثر

جهت پذیری فقط می تواند توزیع انرژی در طول زمان را در ساختگاه تغییر دهد و نمی تواند انرژی کلی رسیده به ساختگاه را تغییر دهد. در این پژوهش طیف خطر یکنواخت برای دو ساختگاه مختلف به دست آمد. با توجه به نتایج مشاهده شد که اثر جهت پذیری در دوره تناوب های زیاد، نمود بیشتری پیدا می کند. اثر جهت پذیری می تواند در سازه های دوره بلند مانند پل ها و ساختمان های مرتفع تأثیر بسزایی داشته باشد. نتایج نشان می دهد با افزایش دوره تناوب و دوره بازگشت، مقدار شتاب طیفی جنبش زمین نیز افزایش می یابد. بیشترین افزایش شتاب در دوره تناوب ۴ ثانیه و دوره بازگشت ۲۴۷۵ سال رخ داده است؛ بنابراین در دوره بازگشت های ۲۴۷۵ و ۴۷۵ سال میزان درصد افزایش شتاب طیفی بیشتر بوده و اثر جهت پذیری در دوره بازگشت ۲۴۷۵ سال نسبت به ۴۷۵ سال بیشتر نمایان شده است. اثر جهت پذیری علاوه بر زمین لرزه های بزرگ، در زمین لرزه های کوچک و متوسط نیز می تواند رخ دهد.

منابع

- شبکه ملی شتاب‌نگاری زلزله، ۱۳۹۶، گزارش فوری
مقدماتی زمین لرزه ۲۱ آبان ماه ۱۳۹۶ سرپل ذهاب:
مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی.
- Abrahamson, N. A., 2000, Effects of rupture directivity on probabilistic seismic hazard analysis: Proceeding of sixth international conference on seismic zonation, Palm Springs, CA, 12-15 November 2000, Earthquake Engineering Research Institute.
- Ambraseys, N. N., and Jackson, J. A., 1998, Faulting associated with historical and recent earthquakes in the eastern Mediterranean region: *Geophysical Journal International*, **133**, 390-406.
- Baker, J. W., 2008, An Introduction to Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA): Excerpt from a report originally written for the USNR.
- Gutenberg, B., and Richter, C. F., 1956, Earthquake magnitude, intensity, energy and acceleration: *Bulletin of the Seismological Society of America*, **46**, 105-145.
- Kijko, A., and Selevoll, M. A., 1992, Estimation of earthquake hazard parameters from in complete data files, Part II, Incorporation of magnitude heterogeneity: *Bulletin of the Seismological Society of America*, **82**, 120-134.
- Mirzaei, N., Gao, M., and Chen, Y. T., 1998, Seismic source regionalization for seismic zoning of Iran: Major seismotectonic provinces: *Journal of Earthquake Prediction Research*, **7**, 465-495.
- Nowroozi, A. A., 1985, Empirical relations between magnitudes and fault parameters for earthquakes in Iran: *Bulletin of the Seismological Society of America*, **75**(5), 1327-1338.
- Somerville, P. G., Smith, N. F., Graves, R. W., and Abrahamson, N. A., 1997, Modification of empirical strong motion attenuation relations to include the amplitude and duration effect of rupture directivity: *Seismological Research Letters*, **68**, 199-222.
- Wells, D. L., and Coppersmith, K. J., 1994, New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement: *Bulletin of the Seismological Society of America*, **84**, 974-1002.

Probabilistic seismic hazard assessment by considering the effects of near-field directivity (A case study of Kermanshah region, Iran)

Vahid Vahediasl¹, Ahmad Sadidkhouy^{2*}, Mohammad Pourmohammad Shahvar³ and Nima DoolatAbadi¹

¹ Graduated Student, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

² Assistant Professor, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

³ Assistant Professor, Building and Housing Research Center, Tehran, Iran

(Received: 23 September 2023, Accepted: 22 December 2023)

Summary

The rupture starts from a point along the fault and propagates unilaterally to the beginning or end of the fault or propagates bilaterally to both directions. The propagation of rupture along the fault and the effect of rock fracturing velocity on shear wave velocity is called the directivity effect. When the direction of rupture propagation is towards the site, the directivity effect can cause pulses with large amplitudes and medium to long periods. The directivity effect has changed the distribution of energy against time and can occur in medium and small earthquakes. In other words, in addition to the distance to the fault, the direction of rupture propagation is also important. The near-fault zone motions exhibit long-period pulses in the velocity and displacement time history diagrams. These large pulses can cause severe damage to structures; therefore, near-field records have a different nature compared to far-field records. The acceleration spectrum of the earthquakes recorded in the stations located near the fault is out of the usual shape, and in the period of intervals greater than 7 seconds, the amplitudes of the acceleration spectrum increase significantly. The location of the structure near the fault is crucial, and the directivity effect should be considered due to the high relative risk in the studied area.

To observe and investigate the effects of directivity affected by the November 12, 2017 earthquake, the accelerometers recorded in the accelerometer stations affiliated with the Building and Housing Research Center (BHRC) around the epicenter of the earthquake were examined. The closest accelerometer station to the epicenter and rupture of the fault is Sarpol Zahab station (SPZ) in Sarpol Zahab City, which suffered the most damage and casualties from this earthquake.

In this study, to estimate the seismic hazard in the Kermanshah region, the maximum acceleration (PGA) considering the directivity effect for the return period of 50 years (63% in 50 years), 475 years (10% in 50 years) and 2475 years (2% in 50 years) was estimated. Also, the spectral acceleration (S_a) considering the effect of directivity for different return periods in the range of zero to four seconds and 5% damping for the horizontal component of acceleration in the Kermanshah region was calculated using EZ-Frisk software.

A study on the probabilistic seismic hazard analysis in Kermanshah province (Iran) showed that increasing the structural period and return period increases the ground motion acceleration. The greatest acceleration increase occurs in the 4-second period and 2475-year return period. In return periods of 2475 and 475 years, the percentage increase in acceleration experiences a higher value, and the directivity effect is more pronounced in a return period of 2475 year compared to 475 year.

Keywords: near-fault, pulse, directivity, rupture, probabilistic seismic hazard