

## پهنه‌بندی لرزه‌ای شهر کرج و نواحی مجاور

دکتر الهام بوستان<sup>۱</sup> و دکتر نادیا طاهرینیا<sup>۲</sup>

### چکیده

زمین‌لرزه یکی از پدیده‌های طبیعی کره زمین است که در صورت رویداد در مناطق پرجمعیت خسارات جانی و مالی را به بار خواهد آورد. با توجه به پیشرفت‌های قابل توجه علم، به ویژه علم زلزله‌شناسی، زلزله‌شناسی مهندسی، مهندسی زلزله و زمین‌شناسی، راهکارهای عملی مناسبی برای پیش‌بینی این پدیده و کاهش خسارات ناشی از رویداد آن ارائه نشده است. از آنجائی که در حال حاضر تنها را مقابله با این پدیده مقاوم‌سازی سازه‌ها در مقابل تکان‌های شدید زمین است، برآورد قابل اعتماد و بررسی میزان خطر زمین‌لرزه ضرورتی اجتناب ناپذیر است. در این مطالعه با استفاده از روش احتمالاتی، تحلیل خطر زمین‌لرزه برای شهر کرج و نواحی پیرامون، انجام شده است. ابتدا، چشمه‌های بالقوه زمین‌لرزه تعیین و سپس پارامترهای مورد نیاز در تحلیل احتمالی خطر زمین‌لرزه محاسبه شده‌اند. در نهایت برای شبکه‌ای از نقاط، در منطقه‌ای به مختصات  $52^{\circ}E - 50^{\circ}$  و  $36/8^{\circ}N - 34/8^{\circ}$  شامل کرج و نواحی پیرامون، مقادیر شتاب افقی مورد انتظار از رویداد زمین‌لرزه در چشمه‌های بالقوه زمین‌لرزه محاسبه و نقشه‌های پهنه‌بندی خطر زمین‌لرزه تهیه شده است. این نقشه‌های پهنه‌بندی خطر زمین‌لرزه برای دوره بازگشت‌های ۴۷۵ سال و ۵۰ سال، در گستره کرج ترسیم شده‌اند. با توجه به نقشه‌های ارائه شده، شهر کرج در پهنه‌ای با شتاب جنبش زمین معادل  $0/29g - 0/30g$  برای ۱۰٪ احتمال افزایش در ۵۰ سال، و  $0/12g - 0/11g$  برای ۶۳٪ احتمال افزایش در ۵۰ سال قرار دارد.

**کلیدواژه‌ها:** تحلیل خطر زمین‌لرزه، چشمه‌های بالقوه زمین‌لرزه، شهر کرج

۱- عضو هیئت علمی گروه زمین‌شناسی، واحد کرج دانشگاه آزاد اسلامی، کرج، ایران. [boostan@kiaiu.ac.ir](mailto:boostan@kiaiu.ac.ir)

۲- عضو هیئت علمی گروه فیزیک، واحد پرند دانشگاه آزاد اسلامی، پرند، ایران. [tahernia@piaiu.ac.ir](mailto:tahernia@piaiu.ac.ir)

## Seismic Zonation of Karaj city and Surrounding Areas

Dr. Elham Boostan and Dr. Nadia Tahernia

### Abstract

Earthquake is one of the natural phenomena, which in case of occurring in populated areas will cause great loss of lives and properties damages. Despite developments and progresses in earthquake seismology, earthquake engineering, engineering seismology and geology, there is not still applicable solution recommended for earthquake prediction and reducing its risk. The only applicable solution at the moment is reinforcement of building; this makes seismic hazard assessments unavoidable. In this study, seismic hazard assessment of Karaj and surrounding areas is conducted using the probabilistic approach. Firstly, the potential seismic sources are delineated and then, necessary parameters for probabilistic seismic hazard assessment are evaluated. Finally, the seismic hazard assessment is carried out for a grid of points, in the area where encompassed by the  $50^{\circ}$ – $52^{\circ}$ E longitudes and  $34.8^{\circ}$ – $36.8^{\circ}$ N latitudes including Karaj and surrounding areas. These maps show the probabilistic hazard analysis for the return periods of 50 and 475 years for Karaj region. According to the maps which have been presented in this study, PGA values are estimated to be 0.29g-0.30g for 10% probability of exceedance in 50 years, 0.11g-0.12g for 63% probability of exceedance in 50 for Karaj.

**Keywords:** Seismic hazard assessment, Potential seismic sources, Karaj

### مقدمه

ایران به عنوان قسمتی از کمر بند آلپ- هیمالیا، یکی از سرزمین‌های زلزله‌خیز جهان بوده و شامل کمربندهای فعال بسیاری است. افزایش و تجمع نیروها در فلات ایران در اثر حرکت شبه جزیره عربستان به سمت شمال شرق و حرکت شبه قاره هند به سمت شمال غرب سبب عمده زلزله‌خیزی منطقه شده است. اطلاعات دقیق لرزه‌شناسی، ابزار مهمی برای بررسی زمین‌ساخت فعال منطقه است. تجزیه و تحلیل خطر لرزه‌ای به ارزیابی ماهیت و پتانسیل زمین‌لرزه‌ها نیاز دارد، لذا تخمین بیشینه بزرگی ( $M_{max}$ ) و همچنین رخداد مجدد صفاتی که به ویژه، توسط گسل‌های

فعال ایجاد می‌شود، لازم و ضروری است. تعیین چشمه‌های بالقوه زمین‌لرزه یکی از عناصر اساسی در ارزیابی خطر لرزه‌ای است که در شروع ارزیابی خطر، جایگاه منحصر به فردی دارد. تعریف و مشخص کردن چشمه‌های بالقوه زمین‌لرزه قسمت اصلی تحلیل خطر زمین‌لرزه است که نیاز به اطلاعات منطقه‌ای و ناحیه‌ای، زمین‌شناسی، لرزه‌خیزی و زمین‌ساختی دارد. اساس کار برای تخمین خطر زمین‌لرزه آنالیز آماری داده‌های زمین‌لرزه است که منجر به تعیین میزان احتمال وقوع مجدد زمین‌لرزه‌ها با بزرگی‌های مختلف یا به عبارت دیگر فاصله زمانی اعمال شتاب‌های متفاوت می‌شود. با توجه به عمر مفید برای یک سازه

۵۰ سال (دوره بازگشت ۴۷۵ سال)، و ۶۳٪ احتمال افزایش در ۵۰ سال (دوره بازگشت ۵۰ سال)، تهیه و ارائه شده است.

### موقعیت جغرافیایی شهر کرج

شهر کرج با طول جغرافیایی ۵۱ درجه و ۰ دقیقه و ۳۰ ثانیه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۴۸ دقیقه و ۴۵ ثانیه شمالی (پل تاریخی کرج، ورودی جاده کرج-چالوس)، با ارتفاع ۱۲۹۷ متر از سطح دریا، با وسعت ۱۶۲ کیلومتر مربع در ۳۵ کیلومتری غرب تهران و در دامنه جنوبی رشته کوه‌های البرز واقع است این شهر از شمال به استان مازندران و از جنوب به شهرستان شهریار و استان مرکزی، از غرب به شهرستان ساوجبلاغ و قزوین و از شرق به تهران و شمیرانات محدود است. برخورداری از اختلاف ارتفاع قابل توجه بین نقاط مرتفع و نقاط پست، وجود پوشش گیاهی متنوع، وجود ۱۵۵ گونه پرنده از چهل خانواده پرنده، ۲۵ گونه پستاندار حیات وحش، بارندگی سالیانه به میزان ۳۰۰ میلی‌متر، وجود جویبارها و چشمه سارهای زیبا که نهایتاً رودخانه جذاب کرج را تشکیل می‌دهند، سد زیبای امیرکبیر، منطقه حفاظت شده البرز، گونه‌های متنوع و وسیع گیاهی و جانوری که در نوع خود بسیار ارزشمند است، زمینه بسیار مناسبی برای جلب سیاحان و گردشگران داخل و خارج می‌باشد. از جمله جاذبه‌های گردشگری کرج می‌توان جاده کرج-چالوس، باغ سیب مهرشهر کرج،

میزان احتمال اعمال شتاب افقی طی طول عمر مفید سازه قابل محاسبه است.

تحقیقاتی چند در رابطه با تخمین بیشینه شتاب افقی جنبش زمین در گستره مورد مطالعه انجام گرفته است که از جمله آنها می‌توان به تحقیقات بربریان و همکاران (۱۳۶۴)، زارع (۱۳۸۴)، میرزائی (۱۳۸۵)، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن (۱۳۸۴)؛ استاندارد (۲۸۰۰)، توکلی و غفوری آشتیانی (۱۹۹۹)، و قدرتی و همکاران (۲۰۰۳)، بوستان و همکاران (۱۳۹۱) و طاهرنیا و همکاران (۲۰۱۳) که همگی از روش احتمالی استفاده کرده‌اند، اشاره نمود. مطالعات مذکور در مواردی همچون رابطه تضعیف مورد استفاده، مدل و تعداد چشمه‌های تعیین شده و همچنین، شیوه تعیین پارامترهای لرزه‌خیزی برای محاسبه دوره بازگشت زلزله‌ها متفاوت می‌باشند. در این مقاله تحلیل خطر زمین‌لرزه و تهیه نقشه‌های هم‌شتاب برای دوره بازگشت‌های ۵۰ سال و ۴۷۵ سال به صورت جزئی‌تر برای منطقه کرج و نواحی مجاور آن انجام شده است. آنچه در این مقاله در ادامه می‌آید: ابتدا، بررسی ویژگی‌های زمین‌ساخت و لرزه زمین‌ساخت منطقه مورد بررسی، سپس تعیین پارامترهای جنبش شدید زمین در آن و در نهایت برای شبکه‌ای از نقاط، در گستره مورد مطالعه، مقادیر شتاب افقی مورد انتظار از رویداد زمین‌لرزه در چشمه‌های بالقوه زمین‌لرزه محاسبه شده و نقشه‌های پهنه‌بندی خطر زمین‌لرزه برای ۱۰٪ احتمال افزایش در

## گسل‌های جنب‌یاگسل‌های با توان جنبش در گستره تهران

گسل‌هایی که در عهد حاضر جنب‌یا بوده و زمین-لرزه‌های مخرب را بوجود آورده‌اند، این احتمال وجود دارد که در آینده دور یا نزدیک با جنبش مجدد خود زمین‌لرزه(های) دیگری را موجب شوند، هر چند نبایستی از گسل‌های قدیمی هم غافل ماند، زیرا ممکن است بار دیگر جنب‌یا شوند. گسل جنب‌یا، گسلی است که در طی دوره زمانی آینده مورد نظر، امکان جنبش و جابجایی را دارا است. برای اهداف کاربردی، معمولاً گسلی که از ۱۰,۰۰۰ سال پیش تا کنون در آن جابجایی صورت گرفته‌است، گسل جنب‌یا محسوب می‌شود (میرزائی، ۱۳۸۵).

مشخصات کلی گسل‌های جنب‌یا یا گسل‌های با توان جنبش در شعاع حدود ۱۵۰ کیلومتری شهر کرج و مهمترین ویژگی‌های آنها در جدول ۱ ارائه شده است. زمین‌لرزه‌های مرتبط تا سال ۲۰۰۲ ارائه شده توسط میرزائی (۱۳۸۵)

و از ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۱ برگرفته از مرکز بین‌المللی زلزله‌شناسی (ISC) است. لازم به ذکر است گسل‌های زیر دارای سازوکار غالب معکوس با مؤلفه امتدادلغز چپگرد هستند. نقشه لرزه‌زمین‌ساخت منطقه مورد مطالعه در شکل ۱ نشان داده شده‌است.

کاخ مروارید (شمس)، پارک خانواده جهانشهر و روستای تاریخی آتشگاه را نام برد. کاروانسرای شاه‌عباسی، پل تاریخی کرج و امامزاده طاهر کرج که مدفن بسیاری از ناموران شعر و هنر معاصر ایران است از دیگر جاذبه‌های تاریخی - فرهنگی گردشگری کرج به شمار می‌روند.

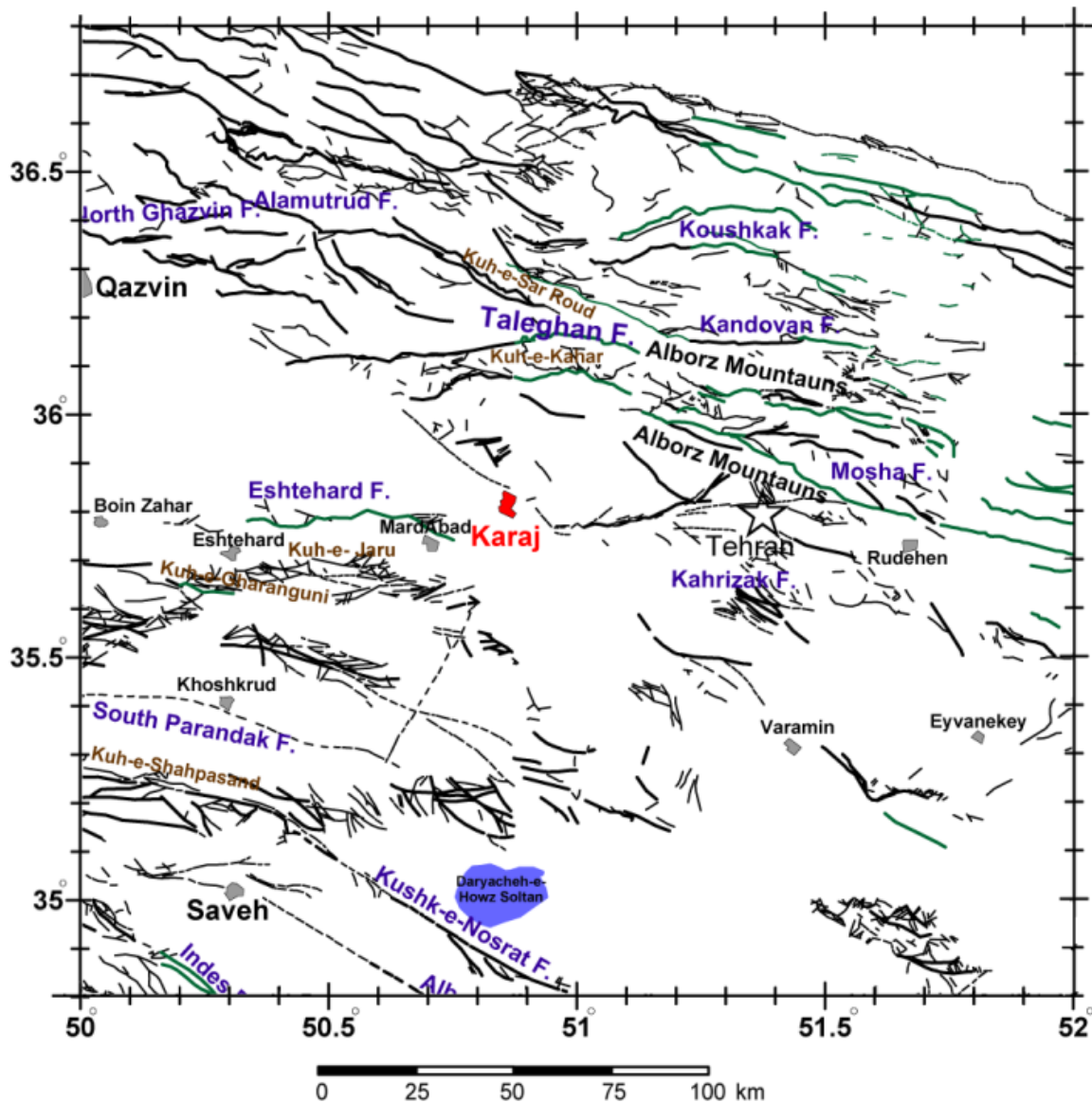
آثار باقیمانده در عهد باستان و دوران حکومت هخامنشیان، اشکانیان و ساسانیان در منطقه کرج گواه این اهمیت است که این ناحیه در روزگاران گذشته از تمدن پیشرفته‌ای برخوردار بوده و همچنین، پس از ظهور و رواج اسلام وجود مقابر، امامزاده‌ها و اماکن متبرکه متعدد در این ناحیه نشان دیگری از اهمیت آبادی آن می‌باشد.

در سال ۱۳۸۹ خورشیدی پس از تصویب مجلس شورای اسلامی، شهر کرج به همراه ۳ شهرستان دیگر در قالب استان البرز جای گرفت. شهر کرج در حال حاضر به غیر از تهران سومین شهر پرجمعیت کشور بوده که روند گذشته نشان می‌دهد این شهر از سال ۱۳۳۵ تاکنون با توجه به موقعیت همجوار بودن آن با تهران، رشد سریع پیدا کرده و از ردیف هفتادم جمعیت شهر در سال مذکور به ردیف چهارم در سال ۱۳۸۰ رسیده است.

جدول ۱- گسل‌های جنبی یا گسل‌های با توان جنبش در شعاع ۱۵۰ کیلومتری تهران (میرزائی، ۱۳۸۵). اطلاعات زمین‌لرزه‌ها بر اساس گزارش مرکز لرزه‌نگاری کشوری مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران به روز شده است.

نام	طول (km)	راستا	سمت شیب	زمین‌لرزه مرتبط	بزرگی	شدت
شمال البرز	۳۰۰	E-W	S	۱۱۲۷	M <sub>s</sub> ۶/۸	VIII+
				۲۰۰۴/۵/۲۸	M <sub>s</sub> ۶/۳	
شمال تهران	>۷۵	E-W تا ENE-WSW	N			
مشا	۲۱۰	ESE-WNW	N	۹۵۸/۲/۲۳	M <sub>s</sub> ۷/۷	X
				۱۰۸۲		
				۱۶۶۵	M <sub>s</sub> ۶/۵	VIII+
				۱۸۱۵/۶ و ۱۸۱۱/۶/۲۰		
				۱۸۳۰/۳/۲۷	M <sub>s</sub> ۷/۱	VIII+
				۱۹۳۰/۱۰/۲	M <sub>s</sub> ۵/۲	VI+
				۱۹۵۵/۱۱/۲۴	m <sub>b</sub> ۴/۰	VI+
				۱۹۷۰/۱۰/۳	m <sub>b</sub> ۴/۱	
				۲۰۰۶/۱۲/۲۰	M <sub>L</sub> ۴/۱	
طالقان	۷۲	E-W	S	۱۹۶۶/۱۱/۸	m <sub>b</sub> ۴/۸	
اشتهارد	۶۳	E-W		۸۶۴/۱	M <sub>s</sub> ۵/۳	VII
				۱۱۷۷/۵	M <sub>s</sub> ۷/۲	VIII+
				۱۸۷۶/۱۰/۲۰	M <sub>s</sub> ۵/۷	
کهریزک	۴۰	E-W	N	سده چهارم قبل میلاد	M <sub>s</sub> ۷/۶	X
				۸۵۵	M <sub>s</sub> ۷/۱	VIII+
				۹۸۶۴/۱	M <sub>s</sub> ۵/۳	VII+
				۲۰۰۹/۱۰/۱۷	M <sub>L</sub> ۳/۹	VIII
گرمسار	۱۱۰	E-W	N	۷۴۳	M <sub>s</sub> ۷/۲	VIII+
				۱۹۷۹/۲/۲۲	m <sub>b</sub> ۴/۶	
				۱۹۸۰/۱۲/۱۹	m <sub>b</sub> ۴/۵	
				۱۹۸۲/۱۰/۲۵	M <sub>s</sub> ۵/۴	
				۱۹۸۳/۵/۲۹	m <sub>b</sub> ۴/۴	
				۱۹۸۸/۸/۲۲	M <sub>s</sub> ۵/۰	
				۱۹۹۳/۸/۱۹	m <sub>b</sub> ۴/۶	
نیاوران	۱۷	NE-SW	N			
محمودیه	۱۶	E-W	S			
باغ فیض	۵	NW-SE	SW			

نام	طول (km)	راستا	سمت شیب	زمین لرزه مرتبط		بزرگی	شدت
گرمسار	۱۱۰	E- W	N	۷۴۳	M <sub>s</sub>	۷/۲	VIII+
				۱۹۷۹/۲/۲۲	m <sub>b</sub>	۴/۶	
				۱۹۸۰/۱۲/۱۹	m <sub>b</sub>	۴/۵	
				۱۹۸۲/۱۰/۲۵	M <sub>s</sub>	۵/۴	
				۱۹۸۳/۵/۲۹	m <sub>b</sub>	۴/۴	
				۱۹۸۸/۸/۲۲	M <sub>s</sub>	۵/۰	
				۱۹۹۳/۸/۱۹	m <sub>b</sub>	۴/۶	
کندوان	۷۶	NW-SE و E-W	N				
ایپک	۹۵	WNW-ESE		هزاره سوم قبل میلاد	M <sub>s</sub>	>۶/۵	
				۱۹۶۲/۹/۱	M <sub>s</sub>	۷/۲	IX
				۱۹۶۲/۱۲/۲	m <sub>b</sub>	۵/۰	
شمال قزوین	۶۳	E-W	N	۱۱۱۹/۱۲/۱۰	M <sub>s</sub>	۶/۵	VIII+
الموت رود	۵۵	NW-SE	S	۱۶۰۸/۴/۲۰	M <sub>s</sub>	۷/۶	X
				۱۸۰۸/۱۲/۱۶	M <sub>s</sub>	۵/۹	
				۱۹۰۱/۵/۲۰	M <sub>s</sub>	۵/۲	
				۱۹۹۷/۶/۷	m <sub>b</sub>	۴/۴	
شاهرود	۶۰	E-W	S	۱۶۰۸/۴/۲۰	M <sub>s</sub>	۷/۶	
				۱۹۹۱/۱۲/۱۸	m <sub>b</sub>	۴/۶	
				۱۹۲۲/۶/۱۲	m <sub>b</sub>	۴/۰	
				۱۹۹۷/۶/۷	m <sub>b</sub>	۴/۴	
پیشوا	۳۷	NW-SE	N				
حصارچال	۳۴	NW-SE	NE				
پارچین	۷۰	NW-SE	NE	سده چهارم قبل میلاد	M <sub>s</sub>	۷/۶	
				۷۴۳	M <sub>s</sub>	۷/۲	
				۸۵۵	M <sub>s</sub>	۷/۱	
				۱۹۶۷/۲/۱۶	m <sub>b</sub>	۴/۵	
شمال ری و	۲۰	E-W	N	سده چهارم قبل میلاد	M <sub>s</sub>	۷/۶	X
جنوب ری				۸۵۵	M <sub>s</sub>	۷/۱	VIII+
				۸۶۴/۱	M <sub>s</sub>	۵/۳	VII
				۱۳۸۳-۴			VIII
تلوپایین	۱۵	NW-SE	SW				
قصر فیروزه	۱۶	NW-SE					



شکل ۱- نقشه لرزه‌زمین‌ساخت منطقه مورد مطالعه و نواحی اطراف

### تحلیل خطر زمین‌لرزه به روش احتمالی

دسته تقسیم کرد (Cornell, 1968):

- روش تجربی - آماری
- روش قطعی
- روش احتمالی

روش احتمالی رایج‌ترین و برترین راهکار برای برآورد خطر زمین‌لرزه است (میرزائی، ۱۳۸۵) که در این مطالعه مورد استفاده قرار می‌گیرد.

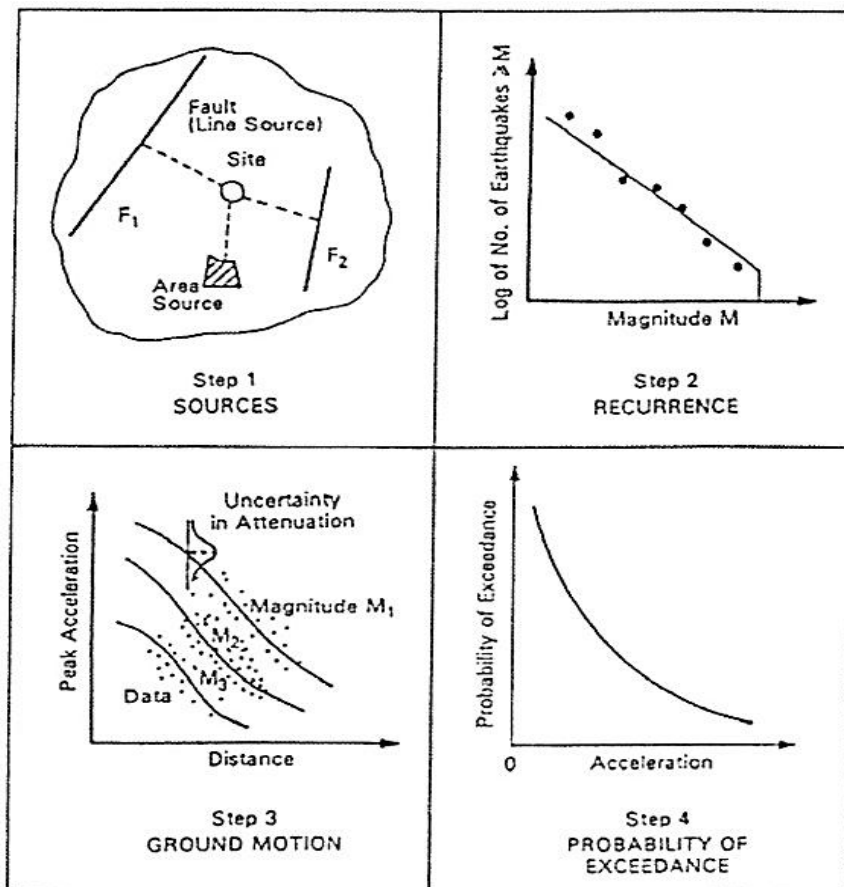
هدف از برآورد خطر زمین‌لرزه، ارزیابی منطقی پارامترهای جنبش زمین (بیشینه شتاب، بیشینه سرعت، شدت و غیره) در ساختگاه مورد نظر، بر اثر رویداد زمین‌لرزه در چشمه‌های بالقوه زمین‌لرزه و در مدت زمانی معین (معمولاً عمر مفید سازه) است. روش‌های برآورد خطر زمین‌لرزه را می‌توان به سه

اصلی برآورد خطر زمین‌لرزه به روش مرسوم در شکل ۲ نشان داده شده است (Reiter, 1990)، که عبارتند از:

۱. تعیین چشمه‌های بالقوه زمین‌لرزه
۲. تعیین پارامترهای زلزله‌خیزی برای هر چشمه
۳. تخمین اثر زمین‌لرزه در ساختگاه بر حسب یک یا چند نوع جنبش زمین با استفاده از رابطه تضعیف جنبش
۴. تعیین میزان خطر در ساختگاه

روش احتمالی برآورد خطر زمین‌لرزه، خصوصیات تمام چشمه‌هایی که ممکن است بر یک ساختگاه اثر گذار باشند را در نظر می‌گیرد و احتمال وقوع زمین‌لرزه در هر چشمه، محاسبه می‌شود. به عبارت دیگر، در این روش اثر توأم چشمه‌های لرزه‌ای متعدد بر ساختگاه مطالعه می‌گردد و به علاوه عدم قطعیت در پارامترهای مختلف را می‌توان در محاسبات دخالت داد (Mirzaei, 1997).

تحلیل خطر زمین‌لرزه به روش احتمالی اولین بار توسط کرنل (Cornell, 1968) معرفی شد. مراحل



شکل ۲- مراحل اساسی برآورد خطر زمین‌لرزه به روش احتمالی مرسوم (Reiter, 1990; Cornell, 1968)



### داده‌های پایه زمین لرزه

اولین قدم برای انجام تحلیل خطر زمین لرزه به روش احتمالی، تهیه کاتالوگ زمین لرزه‌ها در گستره‌ای به شعاع مناسب از ساختگاه مورد نظر است. کاتالوگ مورد استفاده بایستی کامل، همگن و قابل اعتماد باشد تا بتوان بر اساس آن به نتایج مورد قبول و قابل اعتماد رسید (میرزائی، ۱۳۸۵).

در این مطالعه، در ابتدا، کاتالوگ یکنواختی از زمین لرزه‌ها در منطقه مورد مطالعه ( $34/8-36/8^{\circ}N$  و  $52^{\circ}E-50^{\circ}E$ ) شامل شهر کرج و نواحی پیرامون، شامل داده‌های تاریخی (قبل از ۱۹۰۰ میلادی) و داده‌های دستگاهی از سال ۱۹۰۰ تا ۲۰۰۲، ارائه شده توسط میرزائی و همکاران (۱۳۸۱) و از سال ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۲ برگرفته از ISC، تهیه شده است.

### رابطه بین $m_b$ و $M_s$

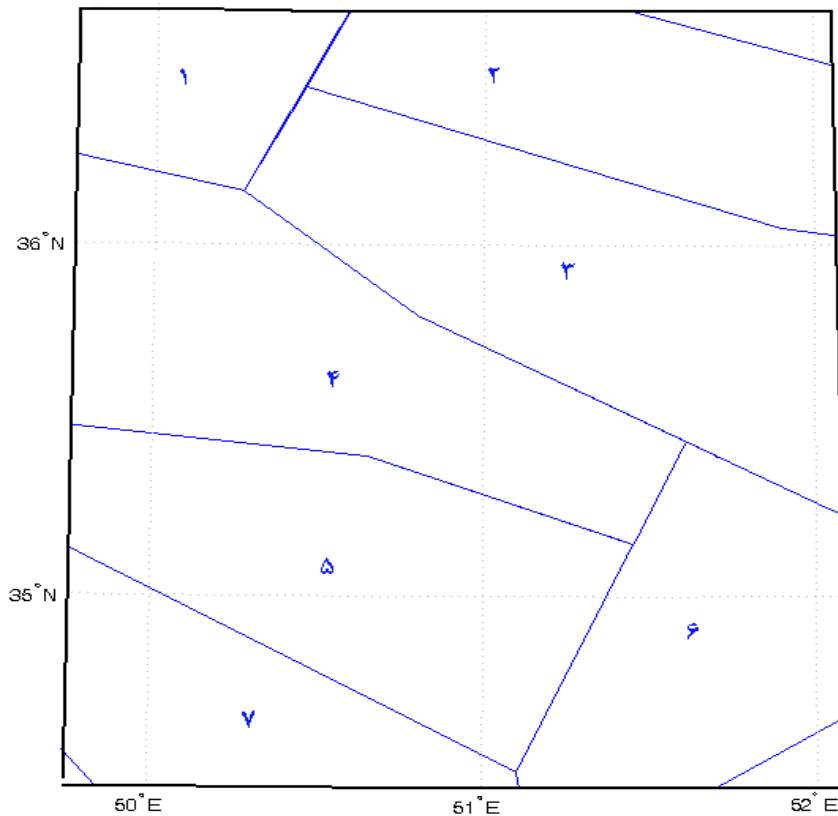
بزرگی برحسب امواج درونی ( $m_b$ ) برای زمین لرزه‌های بزرگتر از حدود  $6/2$  اشباع می‌شود (Singh et al., 1983) و نمی‌تواند قدرت زمین لرزه‌های بزرگ را به طور کامل نشان دهد؛ اما، بزرگی برحسب امواج سطحی ( $M_s$ ) تا بزرگی حدود ۸ اشباع نمی‌شود، و لذا، برای زمین لرزه‌های تا این حد از بزرگی، معتبر و قابل اعتماد است. برای حدود ۸۰ درصد از زمین لرزه‌های ایران که پس از استقرار شبکه جهانی زلزله‌نگاری در سال ۱۹۶۳ به ثبت رسیده‌اند، تنها  $m_b$  گزارش شده است. همانگونه که

ذکر شد،  $m_b$  برای مطالعات زلزله‌خیزی و برآورد خطر زمین لرزه مناسب نیست، بنابراین، لازم است که با یافتن رابطه بین این دو نوع بزرگی در گسترده مورد مطالعه، برای کلیه زمین لرزه‌ها بزرگی یکسان  $M_s$  تعیین شود (میرزائی، ۱۳۸۵). به منظور ایجاد کاتالوگی یکنواخت، با استفاده از روابط ارائه شده برای ایالت‌های لرزه زمین ساختی مختلف ایران توسط میرزائی و همکاران (۱۹۹۸) برای تمام زمین لرزه‌هایی که تنها  $m_b$  برای آنها تعیین شده بود، محاسبه شد.

### چشمه‌های بالقوه زمین لرزه

تعیین چشمه‌های بالقوه زمین لرزه، مهمترین مرحله تحلیل خطر زمین لرزه است. در روش‌های متداول، چشمه‌های زمین لرزه به صورت گسل‌های جنب و زمین لرزه‌ای که به خوبی شناخته شده است، و یا ساختارهای زمین‌شناسی کمتر شناخته شده، تا حتی ایالت‌های لرزه‌زمین ساختی که گستره‌ای وسیع را دربرگرفته و در آن رابطه بین فرایندهای ایجاد زمین لرزه به خوبی شناخته شده نیست، در نظر گرفته می‌شود (Reiter, 1990).

در این مطالعه، بر پایه اطلاعات زلزله‌شناسی، زمین‌شناسی و ژئوفیزیکی موجود، چشمه‌های بالقوه زمین لرزه به صورت پهنه‌ای تعیین شد که در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳- چشمه‌های بالقوه زمین‌لرزه در گستره مورد مطالعه

جدول ۲- پارامترهای زلزله‌خیزی بر اساس زمین‌لرزه‌های ثبت شده به روش Kijko and Sellevoll (1992).

شماره چشمه	$M_{max}$	$\beta$	$\lambda_{4.0}$
1	$5.4 \pm 0.22$	$1.55 \pm 0.45$	$0.18 \pm 0.05$
2	$6.4 \pm 0.40$	$1.33 \pm 0.52$	$0.16 \pm 0.03$
3	$6.2 \pm 0.72$	$0.74 \pm 0.05$	$0.15 \pm 0.02$
4	$7.6 \pm 0.55$	$0.72 \pm 0.09$	$0.14 \pm 0.01$
5	$5.4 \pm 0.41$	$1.24 \pm 0.35$	$0.17 \pm 0.02$
6	$6.5 \pm 0.57$	$1.11 \pm 0.52$	$0.16 \pm 0.02$
7	$6.7 \pm 0.21$	$0.59 \pm 0.03$	$0.12 \pm 0.02$

### پارامترهای زلزله‌خیزی ایالت لرزه‌زمین‌ساختی

توصیف فعالیت لرزه‌ای، بر اساس نرخ فعالیت لرزه‌ای،  $\lambda$ ، که عبارت است از تعداد زمین‌لرزه‌های با بزرگی مساوی یا بزرگتر از حداقل بزرگی تعیین شده،  $M_0$  طی دوره زمانی معین،  $T$ ؛ پارامتر  $b$  یا

$[\beta = b \ln 10]$ ، که نسبت زمین‌لرزه‌های بزرگ‌تر و کوچک‌تر را نشان می‌دهد؛ و گاهی هم بیشینه زمین‌لرزه،  $M_{max}$ ، صورت می‌گیرد (میرزائی، ۱۳۸۵). پارامترهای زلزله‌خیزی برای چشمه‌های بالقوه زمین‌لرزه در منطقه مورد مطالعه به روش Kijko and

### برآورد خطر زمین‌لرزه

در مدل برآورد خطر آنچه مورد بررسی قرار می‌گیرد، در واقع افزایش از سطح خاصی از جنبش زمین در ساختگاه مورد نظر است. به طور کلی، مدل پواسون می‌تواند با توزیع احتمال پواسون ارائه شود:

$$P(X_t = x) = \frac{(vt)^x}{x!} e^{-vt} \quad (1)$$

برای  $x = 0, 1, 2, \dots$

که در آن،  $P(X_t=x)$  احتمال  $x$  زمین‌لرزه در زمان  $t$  و  $v$  میانگین نرخ رخداد زمین‌لرزه است. با فرض اینکه افزایش جنبش زمین،  $G$ ، از مقدار  $acc$ ، از مدل پواسون تبعیت کند، خواهیم داشت:

$$P(G_i > acc) = 1 - e^{-vgt} \quad (2)$$

که در آن،  $P(G > acc)$  احتمال افزایش جنبش زمین از مقدار  $acc$  و  $v_g$  نرخ افزایش جنبش زمین از مقدار  $acc$  است. نرخ  $v_g$  در محاسبات خطر، با عبارت زیر برآورد می‌شود:

$$v_g = \sum_{i=1}^{N_S} \sum_{j=1}^{N_M} \sum_{k=1}^{N_R} \lambda_{ji} P(G > g | EQ: m_j, r_k)$$

$f_M(m)$  چگالی احتمال بزرگی زمین‌لرزه،  $m$ ، است.  $P(G > g | EQ: m, r)$  احتمال شرطی افزایش جنبش زمین،  $G$ ، از مقدار  $acc$  است که رویداد زمین‌لرزه‌ای با بزرگی  $m$  در فاصله  $r$  را نشان می‌دهد. احتمال شرطی  $P(G > acc | EQ: m, r)$  با فرض اینکه مقادیر

(Sellevoll (1992) محاسبه شد (جدول ۲). بیشینه زمین‌لرزه تخمین زده شده برای چشمه‌های بالقوه زمین‌لرزه، واقع در گستره مورد مطالعه نیز در این جدول نشان داده شده است.

### رابطه تضعیف

ارزیابی کمی خطر زمین‌لرزه مستلزم تخمین میزان جنبش زمین در فاصله‌ای مشخص از محل وقوع زمین‌لرزه با بزرگی معین است. پارامترهای فاصله چشمه از ساختگاه، بزرگی زمین‌لرزه، عمق کانونی و سازوکار زمین‌لرزه‌ها در برآورد جنبش زمین نقش دارند. بر اساس اطلاعات موجود، روابط تجربی متعددی توسط پژوهشگران برای مناطق خاص و نیز روابط میانگین برای گستره‌های وسیع و جهانی ارائه شده است. در این مطالعه از رابطه تضعیف Campbell and Bozorgnia (2008) استفاده شده است.

$$f_{M_i}(m_j) \Delta M f_{R_i}(r_k) \Delta R \quad (3)$$

که در آن،  $\lambda$ ، نرخ رخداد زمین‌لرزه،  $N_S$ ، تعداد چشمه‌های بالقوه زمین‌لرزه منطقه،  $N_M$  و  $N_R$ ، تعداد محدوده‌های احتمال بزرگی و فاصله هستند.  $f_R(r)$  چگالی احتمال فاصله ساختگاه تا چشمه،  $r$ ، و

نتیجه اصلی تحلیل خطر است. در صورتی که هدف از مطالعه تعیین خطر برحسب طیف پاسخ مهندسی باشد، چندین منحنی خطر به ازاء هر فرکانس نوسانگر به دست می‌آید.

### نقشه‌های پهنه‌بندی

نقشه پهنه‌بندی، منطقه را به پهنه‌های مختلف با درجه‌های متفاوتی از خطر بالقوه زمین‌لرزه تقسیم می‌کند. برای این کار منطقه را شبکه‌بندی کرده و سپس، برای نقاطی از این شبکه، که اصطلاحاً گره نامیده می‌شوند، مقادیر بیشینه شتاب افقی مورد انتظار از چشمه‌های بالقوه زمین‌لرزه محاسبه می‌شود. شرط دقت این کار این است که گره‌ها تقریباً به فاصله‌های مساوی و یا تعریف شده از همدیگر قرار گرفته باشند. غالباً، برآورد خطر و پهنه‌بندی برای ۱۰٪ احتمال افزایش در ۵۰ سال (دوره بازگشت ۴۷۵ سال) و ۶۳٪ احتمال افزایش در ۵۰ سال (دوره بازگشت ۵۰ سال) که در طراحی سازه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد، محاسبه می‌شود.

### برآورد احتمالی خطر زمین‌لرزه کرج

در این مطالعه با استفاده از روش احتمالی، که مراحل آن در بخش‌های قبل مورد بحث قرار گرفت، و به کمک یک برنامه کامپیوتری، که به منظور تحلیل احتمالی خطر زمین‌لرزه نوشته شده است، برای شبکه‌ای از نقاط با فاصله ۰/۱ درجه طول و عرض جغرافیایی مقادیر شتاب افقی مورد انتظار از رویداد زمین‌لرزه در چشمه‌های بالقوه زمین‌لرزه برای ۱۰٪

بیشینه جنبش زمین و پاسخ نوسانگر دارای توزیع لگاریتمی و مقدار متوسط صفر و انحراف معیار  $\sigma$  باشد، به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$P(G > acc|EQ: m, r) = 1 - \Phi \left[ \frac{\log(acc) - \Psi(m, r)}{\sigma} \right] \quad (4)$$

به طوری که،  $\Psi(m, r)$  لگاریتم میانگین جنبش زمین در فاصله  $r$  از یک زمین‌لرزه با بزرگی  $m$  است که از مدل تخمین جنبش زمین بدست می‌آید و  $\Phi$  احتمال برای PGAهای کوچک‌تر یا مساوی یک مقدار خاص است.

به طور کلی در چشمه‌های لرزه‌ای چندگانه، با فرض مستقل بودن چشمه‌ها از نظر آماری می‌توان خطر کل را به آسانی محاسبه کرد. در این حالت خطر کل را می‌توان از رابطه زیر به دست آورد:

$$P_{total}(G > acc) = 1 - \prod_{i=1}^n P_i(G \leq acc) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_i(G > acc)) \quad (5)$$

که در آن، زیرنویس  $i$  اشاره به  $i$ امین چشمه در مدل برآورد خطر دارد. با فرض پواسونی بودن رابطه فوق به صورت زیر در می‌آید:

$$P_{total}(G > acc) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - (1 - e^{-v_{gi}t})) = 1 - \prod_{i=1}^n e^{-v_{gi}t} = 1 - e^{-\sum_{i=1}^n v_{gi}t} \quad (6)$$

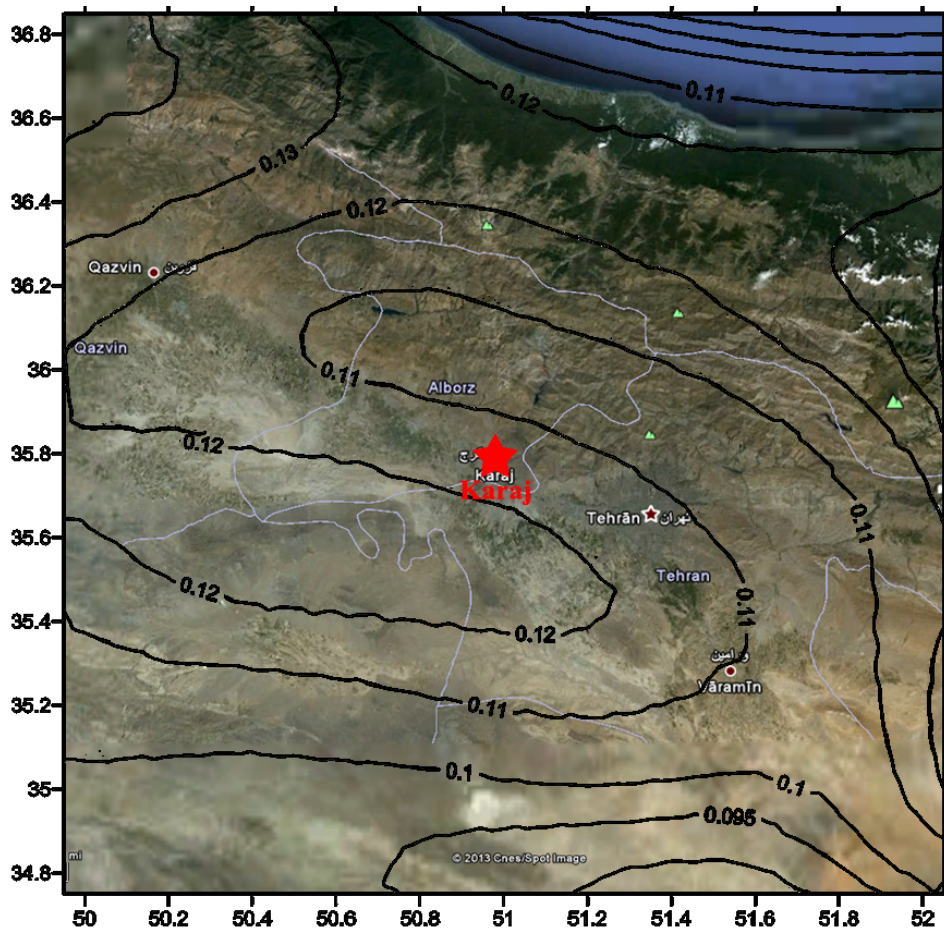
برای مدت یک سال و  $v_g \ll 0.1$  می‌توان رابطه (۶) را به صورت زیر نوشت:

$$P_{total}(G > acc) \approx \sum_{i=1}^n v_{gi} \quad (7)$$

با رسم مقادیر  $P_{total}$  حاصل از رابطه ۷ برحسب پارامتر جنبش  $acc$  منحنی خطر به دست می‌آید. این

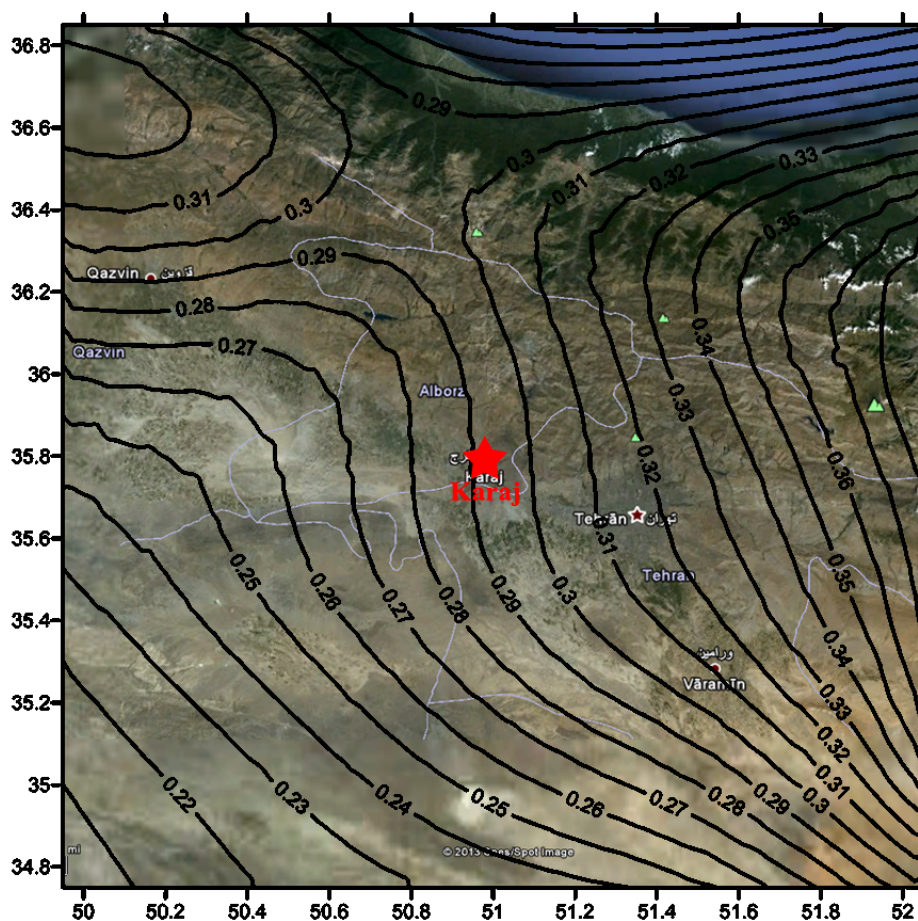
پهنه‌بندی خطر زمین‌لرزه در گستره کرج تهیه و ترسیم شده است. پهنه‌بندی خطر زمین‌لرزه گستره کرج و نواحی مجاور به روش احتمالی در شکل‌های ۴ و ۵، نشان داده شده است.

احتمال افزایش در ۵۰ سال (دوره بازگشت ۴۷۵ سال) و ۶۳٪ احتمال افزایش در ۵۰ سال (دوره بازگشت ۵۰ سال) که در طراحی سازه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد، محاسبه شده و بر اساس آن نقشه‌های



شکل ۴- نقشه پهنه‌بندی زمین‌لرزه‌ای گستره کرج و نواحی مجاور به روش احتمالی

برای ۶۳٪ احتمال افزایش در ۵۰ سال (دوره بازگشت ۵۰ سال)



شکل ۵- نقشه پهنه‌بندی زمین‌لرزه‌ای گستره کرج و نواحی مجاور به روش احتمالی  
برای ۱۰٪ احتمال افزایش در ۵۰ سال (دوره بازگشت ۴۷۵ سال)

### نتیجه‌گیری

افزایش در ۵۰ سال (دوره بازگشت ۵۰ سال)، در گستره کرج تهیه و ارائه شده است. با توجه به این نقشه‌ها، شهر کرج در پهنه‌ای با شتاب جنبش زمین معادل  $0.29g-0.30g$  برای ۱۰٪ احتمال افزایش در ۵۰ سال، و  $0.11g-0.12g$  برای ۶۳٪ احتمال افزایش در ۵۰ سال قرار دارد.

در این مطالعه با استفاده از روش احتمالاتی پارامترهای موجود در محاسبات تحلیل احتمالی خطر زمین‌لرزه محاسبه شده و در نهایت برای شبکه‌ای از نقاط، در منطقه‌ای به مختصات  $36^{\circ}8'N-34^{\circ}8'E$  و  $50^{\circ}-52^{\circ}E$  شامل کرج و نواحی پیرامون، مقادیر شتاب افقی مورد انتظار از رویداد زمین‌لرزه در چشمه‌های بالقوه زمین‌لرزه محاسبه شده و نقشه‌های پهنه‌بندی خطر زمین‌لرزه برای ۱۰٪ احتمال افزایش در ۵۰ سال (دوره بازگشت ۴۷۵ سال)، و ۶۳٪ احتمال

## منابع

- Spectra, 24, 139-171
- Cornell, C.A., 1968, Engineering seismic risk analysis, Bull. Seism. Soc. Am. 58, 1583-1606
  - Ghodrati-Amiri, G., Motammed, R., and Rabet-Eshaghi H., 2003, Seismic hazard assessment of metropolitan Tehran, Iran, J. Earthq. Eng., 7, 347-372
  - Kijko A., and Sellevoll, M.A., 1992, Estimation of earthquake hazard parameters from incomplete data files Part II: Incorporation of magnitude heterogeneity, Bull. Seism. Soc. Am., 82, 120-134
  - Mirzaei, N., 1997, Seismic zoning of Iran. Ph.D. dissertation in Geophysics, Beijing: Institute of Geophysics, State Seismological Bureau
  - Reiter, L., 1990, Earthquake hazard analysis, Colombia Univ. Press, New York, 254 pp
  - Singh, S.K., Rodriguez, M., and Esteva, L., 1983, Statistics of small earthquakes and frequency of occurrence of large earthquakes along the Mexican subduction zone, Bull. Seism. Soc. Am., 73, 1779-1796
  - Tahernia, N., Khodabin M. and Mirzaei, N., 2013, Non-Poisson probabilistic seismic hazard assessment, Arab J Geosci, Accepted for publication
  - Tavakoli, B., and Ghafory-Ashtiany, M., 1999, Seismic hazard assessment of Iran, Annali di geofisica, 42, 1013-1021
  - بربریان، م.، قریشی، م.، ارژنگ‌روش، ب.، مهاجر اشجعی، ا.، ۱۳۶۴، پژوهش و بررسی ژرف نوزمین‌ساخت، لرزه‌زمین‌ساخت و خطر زمین‌لرزه- گسلش در گستره تهران و پیرامون، سازمان زمین‌شناسی کشور، گزارش ۵۶
  - بوستان، ا.، میرزائی، ن.، اسکندری قادی، م.، شفیعی، ع.، ۱۳۹۱، پهنه‌بندی زمین‌لرزه‌ای گستره تهران و نواحی مجاور با استفاده از مجموعه‌های فازی، مجله فیزیک زمین و فضا، دوره سی و هشتم، شماره ۲
  - زارع، م.، ۱۳۸۴، تحلیل خطر زمین‌لرزه در چهار گوش تهران، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله
  - میرزائی، ن.، ۱۳۸۵، برآورد خطر و پهنه‌بندی زمین‌لرزه‌ای گستره تهران، نشر تدبیر
  - میرزائی، ن.، قیطانچی، م.، ناصریه، س.، رئیسی، م.، ظریفی، ز. و طبائی، ق.، ۱۳۸۱، پارامترهای مبنایی زمین‌لرزه‌های ایران، انتشارات دانش‌نگار
  - مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، ۱۳۸۴، آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله استاندارد ۲۸۰۰
  - Campbell K.W., and Bozorgnia, Y., 2008, NGA ground motion model for the geometric mean horizontal component of PGA, PGV, PGD and 5% damped linear elastic response spectra for periods ranging from 0.01 to 10 s, Earthq.

