

مطالعات مقدماتی لرزه‌زمین‌ساختی در چهار گوش ساوه، جنوب غرب تهران

مهسا عبداللہی*؛ کارشناس ارشد زمین‌شناسی دانشگاه شهیدبہشتی، ایران

حسین حاجی علی بیگی؛ دانشیار زمین‌شناسی دانشگاه شهیدبہشتی

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۹/۳۰

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۳/۲۶

چکیده

این مطالعه به منظور تهیه نقشه‌های هم‌شتاب زمین لرزه در گستره ساوه بر مبنای نرخ لرزه‌خیزی انجام شد. روش مطالعه شامل شناسایی چشمه‌های لرزه‌زا، برآورد پارامترهای لرزه‌خیزی، و دخیل کردن زمین لرزه‌های تاریخی در تحلیل‌ها بود. در نهایت، با نسبت دادن پارامترهای یادشده به چشمه‌های لرزه‌زا، تحلیل‌ها در محیط نرم‌افزار EZ-Frisk صورت پذیرفت. بر اساس این مطالعات، نقشه‌های هم‌شتاب زمین لرزه در پریود نزدیک به صفر ثانیه (PGA) برای دوره‌های بازگشت ۴۷۵، ۹۷۵، ۲۴۷۵ سال و بر مبنای نرخ لرزه‌خیزی در گستره ساوه تهیه شد. طبق این نقشه‌ها، مقدار بیشینه شتاب در حدود 0.94g و مربوط به زمین لرزه‌ای با دوره بازگشت ۲۴۷۵ سال است. برای دوره بازگشت ۹۷۵ سال، مقادیر بیشینه شتاب حدود 0.69g است. در دوره بازگشت ۴۷۵ سال بیشینه شتاب زمین لرزه در حدود 0.49g است. کلیدواژگان: نرخ لرزه‌خیزی، نقشه‌های هم‌شتاب، EZ-Frisk.

پیش‌نوشتار

گستره مورد مطالعه با دارا بودن مراکز جمعیتی متعدد در یکی از مناطق بسیار فعال لرزه‌خیز خاورمیانه، یعنی فلات ایران زمین، واقع شده است. فلات ایران در محل برخورد بین صفحه‌ای عربی - اوراسیا قرار دارد (Berberian & King 1981). برخورد عربی - اوراسیا منطقه‌ای به وسعت ۳ میلیون کیلومتر مربع از پوسته اقیانوس را تغییر شکل داده است (Berberian 2014). این ناحیه برخورد از غرب ترکیه تا شرق ایران امتداد دارد و در واقع بخش اعظم آن را رشته‌کوه‌های ایران مرکزی تشکیل می‌دهد. بنابراین، موقعیت ایران بین دو قاره قدیمی، یعنی اوراسیا در شمال و آفریقا - عربستان در جنوب، به صورت پلاتفرمی ترد و شکننده، که طی چندمیلیون سال اخیر تحت تنش ناشی از حرکت صفحه عربستان است، از نظر زمین‌ساختی اهمیت بسیار دارد (Berberian 2014). آگاهی از میزان مخاطرات زمین لرزه در این منطقه نیازمند مطالعات تحلیل خطر زمین لرزه است. اگرچه زمین‌ساخت فعال به معنای گسستگی آرام پوسته زمین است که امکان دارد به سازه‌های بشرساز صدمه بزند، فرایندهای زمین‌ساختی فعال، نظیر زمین لرزه، که قادرند رویدادهای ناگهانی به وجود آورند، اهمیت دارند. بنابراین، با شناخت زمین‌ساخت فعال در یک منطقه می‌توان خطرهای ناشی از وقوع زمین لرزه را پیش‌بینی کرد (Jarahi 2017a).

روش مطالعه

در این مطالعه از روش احتمالی^۱ (PSHA) به منظور تحلیل خطر زمین‌لرزه استفاده شد (Cornell 1968). این روش از ترکیب مفاهیم احتمالات با مسائل ژئوتکنیک لرزه‌ای حاصل شده است. با استفاده از این روش می‌توان عدم قطعیت‌های موجود در متغیرهای مختلف را لحاظ کرد و تغییرات در موقعیت و بزرگی زمین‌لرزه را به نحو مناسب در محاسبات تأثیر داد (Haerifard et al 2018). روش PSHA زمینه‌ای فراهم می‌سازد که در آن می‌توان عدم قطعیت‌ها را شناسایی کرد و به صورت کمی در خطر لرزه‌ای تأثیر داد (Ni 2012).

تحلیل خطر زمین‌لرزه، به منزله تنها راهکار کارآمد در مقابله با مخاطرات زمین‌لرزه آتی، جزء لاینفک مطالعات پایه در هر منطقه مسکونی به شمار می‌رود. مهم‌تر آنکه چنین مطالعاتی دست کم به صورت سالیانه به بازنگری و به‌روزرسانی نیاز دارد. در پهنه مورد مطالعه، مطالعات متعددی در خصوص برآورد شتاب زمین‌لرزه صورت گرفته است. اما، این داده‌ها اغلب مربوط به یک دهه قبل‌اند. همین موضوع علت اصلی انتخاب گستره مورد مطالعه و کنترل پارامترهای جنبش نیرومند زمین بود.

در این زمینه پس از تعیین چشمه‌های لرزه‌زای منطقه به کمک نقشه‌های لرزه‌زمین‌ساختی موجود (Nazari et al 2003; Hessami et al 2013) فهرست زمین‌لرزه‌های منطقه تا سال ۲۰۱۸ به‌روزرسانی و پارامترهای لرزه‌خیزی شامل ضرایب (Gutenberg and Richter 1956) و نرخ لرزه‌خیزی (Kijko 2012; Kijko & Sellevoll 1992) از این داده‌ها استخراج شد. در محاسبه شتاب زمین‌لرزه از روابط کاهندگی نسل جدید^۲ (NGA) برای محاسبات استفاده می‌شود. به دلیل پیچیدگی بیش از حد، روابط کاهندگی نسل جدید، به جز در اندکی از موارد، نظیر مطالعات جراحی و تیم تحقیقاتی وی (Jarahi 2016b; Jarahi et al 2013; Jarahi et al 2015; Jarahi 2016b; Jarahi et al 2016; Jarahi 2017a; Zamanfashami et al 2012; Honarvar et al 2014; Haerifard et al 2018)، تا امروز در پهنه‌بندی خطر زمین‌لرزه کشور ایران استفاده نشده است. به همین سبب از این دیدگاه نیز می‌توان تحقیق حاضر را نوآورانه قلمداد کرد. نرم‌افزار Ez-Frisk برنامه اصلی در برآورد شتاب زمین‌لرزه بود. در نهایت با انتخاب شبکه منظمی از نقاط در گستره ساوه پهنه‌بندی شتاب زمین‌لرزه بر اساس دوره‌های بازگشت اشاره‌شده صورت پذیرفت.

زمین ساخت منطقه

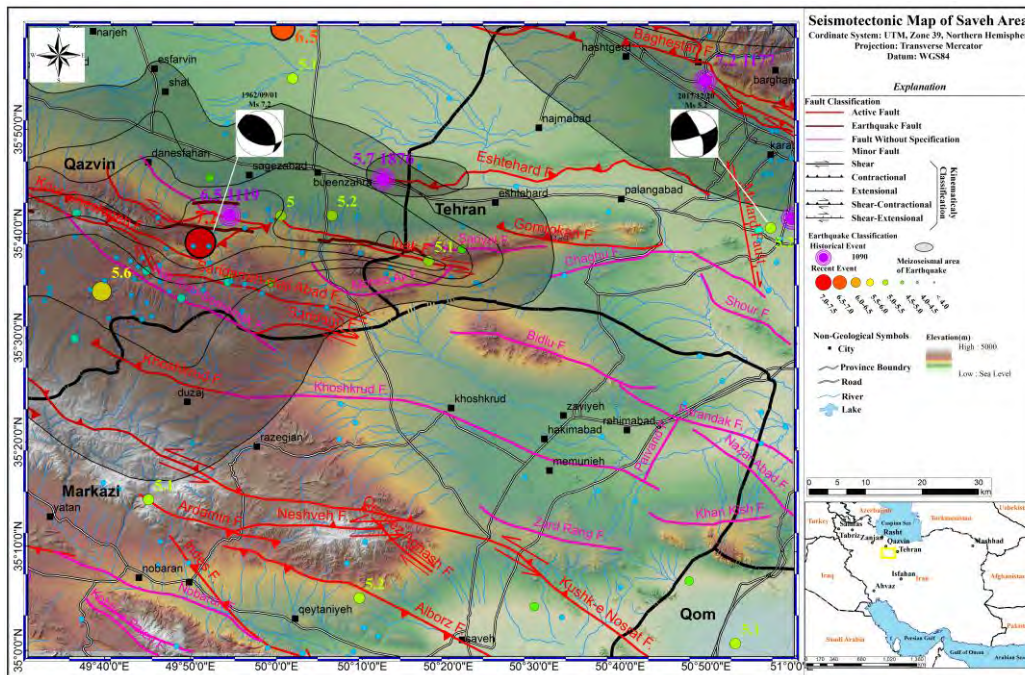
گستره مطالعاتی در حوضه پیش‌بوم جنوبی البرز مرکزی جای دارد (Alavi 1996) که بر پایه تقسیمات زمین‌شناسی ایران مشتمل بر دو پهنه، شامل ایران مرکزی و پهنه ارومیه - دختر، است (Berberian & King 1981)؛ طوری که گستره مفروض در حاشیه شمال غربی ایران مرکزی واقع شده است و بخشی از کمربند آتشفشانی ارومیه - دختر نیز از جنوب آن می‌گذرد (Berberian 1976, 2014). ویژگی‌های چینه‌شناختی این گستره همانند ایران مرکزی است. اما شباهت‌هایی نیز با جنوب البرز و پهنه ارومیه - دختر در آن دیده می‌شود. گسلش فعال کواترنری در این

1. Probabilistic Seismic Hazard Analysis
2. Next Generation Attenuation

پهنه سبب رویداد زمین‌لرزه‌های متعددی شده است (Moinfar et al 1994). گسل ایپک، به طول ۱۰۰ کیلومتر، راستای خم‌دار شرقی - غربی، مؤثرترین عنصر لرزه‌زمین‌ساختی در این گستره به شمار می‌رود. این گسل مسبب رویداد مهیب ۱۹۶۲ میلادی بوئین‌زهرا با بزرگای $M_s 7.2$ است (Berberian 1976). زمین‌لرزه سال ۱۱۷۷، با بزرگای 7.2 ، در شرق گستره مورد مطالعه، بزرگ‌ترین رویداد تاریخی در نظر گرفته می‌شود (Ambraseys & Melville 1982). زمین‌لرزه ۱۱۱۹ میلادی با بزرگای 6.5 نیز دومین زمین‌لرزه بزرگ این پهنه از ایران است (Ambraseys & Jackson 1998). رویداد زمین‌لرزه ۱۹۶۲ با بزرگای 7.2 ، به منزله بزرگ‌ترین رویداد دستگاهی این منطقه، در ارتباط با فعالیت گسل ایپک به وقوع پیوست. زمین‌لرزه ۲۰۱۷ ملارد با بزرگای 5.2 دومین زمین‌لرزه دستگاهی مهم این منطقه است.

چشمه‌های لرزه‌زا

برخی از گسل‌های کواترنری ایران مستقیم با زمین‌لرزه‌های شناخته‌شده بزرگ ایران در ارتباط بوده‌اند و در نتیجه قابلیت ایجاد زمین‌لرزه‌های آینده را دارند (Hessami et al 2003). گسل‌های کواترنری دیگر، که به طور مستقیم با زمین‌لرزه‌ای در ارتباط نیستند، نیز باید چشمه‌های توانمند زمین‌لرزه‌های آینده در نظر گرفته شوند (Berberian 2014). باید توجه داشت که فقط آن گسل کواترنری به عنوان گسل فعال شناخته می‌شود که نشانه‌هایی از فعالیت طی هولوسن یا کواترنری پسین از خود نشان دهد (Trifonov & Karakhanian 2004). با توجه به مطالعات اخیر، که بربریان (Berberian 2014) روی گسل‌های گستره ایران صورت داده است، نمی‌توان گسل‌هایی همچون ماهدشت، خشکه‌رود، گمرکان، و حاجی‌آباد را در رده فعال در نظر گرفت. از طرفی با توجه به ثابت بودن مقادیر پارامترهای لرزه‌خیزی نظیر b در یک پهنه نسبت دادن سهم مساوی از این پارامتر به گسل‌هایی با درجه فعالیت اندک سبب کاهش سهم b برای گسل‌های فعال می‌شود و مقادیر شتاب حاصل کمتر از واقعیت محاسبه خواهند شد. ازین‌رو، فقط گسل‌هایی که دارای شواهد مستند لرزه‌خیزی هستند گسل‌های فعال در نظر گرفته می‌شوند. گسل‌های ایپک (Berberian 1971)، ایندس، باغستان، اشتهارد، البرز، و کوشک نصرت (Berberian 2014) گسل‌های اصلی منطقه مورد مطالعه‌اند که در رده فعال قرار می‌گیرند (شکل ۱). در این میان، گسل ایپک را، با دارا بودن سابقه لرزه‌خیزی شناخته‌شده در دوره تاریخی و دستگاهی، می‌توان مؤثرترین عنصر لرزه‌خیزی این پهنه از ایران‌زمین منظور کرد.



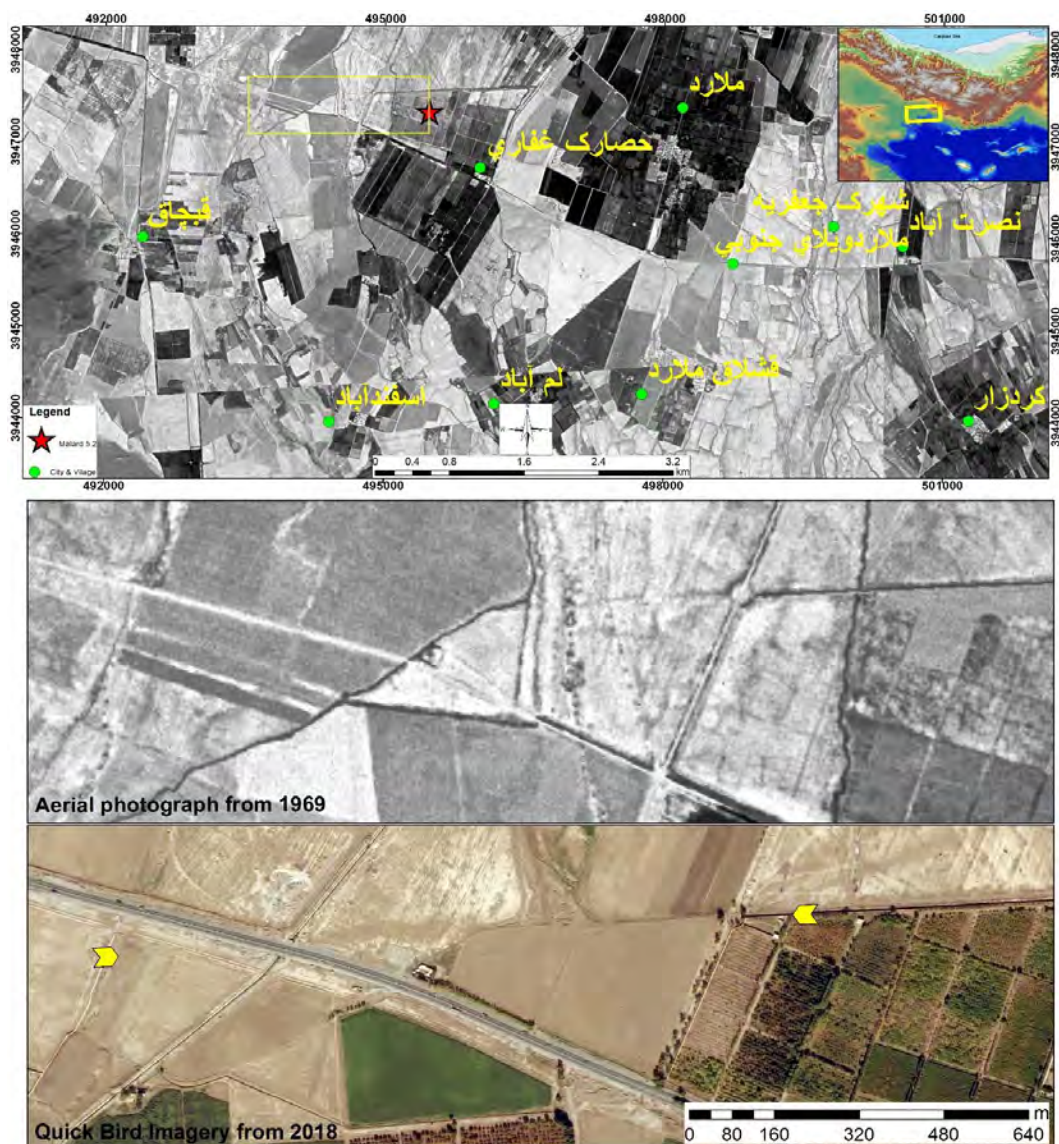
شکل ۱. نقشه لرزه زمین ساخت گستره مورد مطالعه. مدل ارتفاعی رقومی به عنوان زمینه نقشه استفاده شد.

گسل مسبب زمین لرزه ملارد

در سال ۲۰۱۷ زمین لرزه‌ای با بزرگای ۵٫۲ در محدوده شهرستان ملارد به وقوع پیوست. پیش لرزه‌ها و پس لرزه‌های این رویداد روند شمالی - جنوبی داشتند. ازین رو، با توجه به نبود شواهد گسیختگی در سطح زمین و همچنین نبود یک گسل زمین ساختی در سطح که بتواند مسبب این رویداد در نظر گرفته شود، نمی توان این رویداد را به گسل های مجاور این رویداد نسبت داد. در این پهنه، به علت وجود دشت پهناور آبرفتی و توسعه کشاورزی و شهرسازی، رخنمون عوارض زمین شناسی بسیار محدود است. به علاوه، سطح زمین طی هزاران سال سکونت انسان در این منطقه دستخوش تغییرات گسترده شده است. این موضوع سبب شده نتوان شواهد گسلش فعال (در صورت وجود) را در این منطقه شناسایی کرد. مطالعات متعددی در این منطقه صورت گرفته است که در برخی موارد به وجود گسلی به نام ماهدشت - کرج اشاره دارد (سلیمانی و حسینی ۱۳۷۷؛ پورکرمانی و سلیمانی ۱۳۷۷). بیت‌اللهی و همکارانش (۱۳۹۷) ضمن مطالعه گسترده روی شواهد معرفی شده در مطالعات یادشده و همچنین بازدیدهای صحرایی و مطالعه عکس‌های هوایی سال ۱۹۶۹ میلادی وجود گسلی به نام ماهدشت را رد کردند. یکی از مناطق اشاره شده در مطالعه سلیمانی و حسینی (۱۳۷۷) همچنین گزارش‌های محلی در سایت‌های مختلف به وجود اختلاف ارتفاع (پرتگاه نیم‌متری) در مرز زمین‌های کشاورزی منطقه ماهدشت اشاره می کند که کانون سطحی زمین لرزه ملارد در نزدیکی آن واقع شده است. در بررسی‌های صورت گرفته روی عکس‌های هوایی این منطقه و مقایسه بازه زمانی ۴۹ ساله کاملاً واضح است که پدیده یادشده مربوط به فعالیت‌های کشاورزی است و در گذشته وجود خارجی نداشته است (شکل ۲) (بیت‌اللهی و همکاران ۱۳۹۷).

ازین رو، بیت‌اللهی و همکارانش (۱۳۹۷)، ضمن مطالعات صحرایی و بررسی داده‌های دورسنجی، گسلی با امتداد شمالی

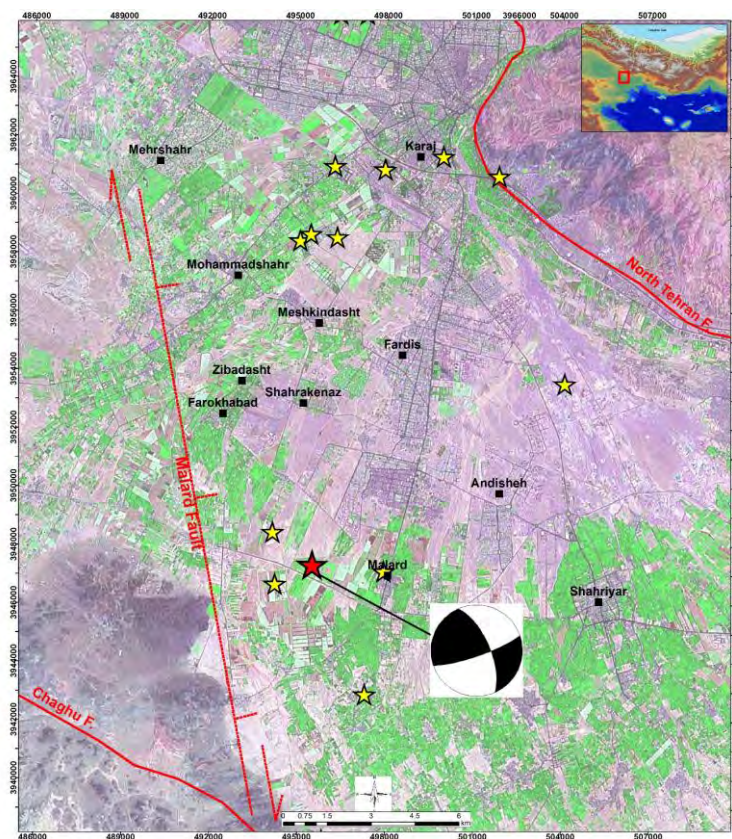
- جنوبی به نام گسل ملارد معرفی کردند که طولی دست کم ۲۰ کیلومتر و شیب ۸۰ درجه به سوی شرق دارد و سازوکار امتدادلغز راست‌گرد با مؤلفه ناچیز معکوس را دنبال می‌کند (شکل ۳). گسل یادشده هم‌خوانی کاملی با موقعیت و روند خطواره مغناطیسی F-3 نشان می‌دهد. این مسئله می‌تواند مدرکی باشد دال بر ارتباط گسل ملارد با پی‌سنگ منطقه.



شکل ۲. موقعیت رو‌مرکز زمین‌لرزه ملارد (ستاره قرمز رنگ). جایگاه پرتگاهی اشاره‌شده در مطالعات سلیمانی و حسینی (۱۳۷۷) در عکس هوایی ۱۹۶۹ میلادی و تصویر ماهواره‌ای کونیک‌برد در سال ۲۰۱۸ میلادی نشان داده شده است. (بیت‌اللهی و همکاران ۱۳۹۷)

پارامترهای طول و توان لرزه‌زایی گسل‌های اشاره‌شده در جدول ۱ می‌آید. در جدول ۱ طول گسیختگی معادل ۳۰ درصد (Zare 1995) طول گسل منظور شده است. در برخی مطالعات میزان درصد گسیختگی تا ۷۰ درصد نیز منظور

می‌شود. این در حالی است که منظور کردن چنین اعدادی در مطالعه حاضر سبب می‌شود اعدادی باورنکردنی برای بزرگای بیشینه گسل‌ها به دست آید. از طرفی مرجع علمی برای چنین ضریبی هنوز در دسترس نیست. درباره گسل ایپک، با توجه به اینکه زمین‌لرزه دستگاهی مربوطه بزرگای ۷٫۲ دارد، میزان گسیختگی ۷۰ درصد در نظر گرفته شد. شایان ذکر است گسل‌هایی که در ادامه بدان‌ها اشاره می‌شود در رده گسل‌های فعال قرار دارند. از ارائه مشخصات سایر گسل‌ها در دیگر رده‌بندی‌های فعالیت خودداری شد.



شکل ۳. پراکندگی خردلرزه‌ها در گستره جنوب کرج نسبت به زمین‌لرزه ملارد (بیت‌اللهی و همکاران ۱۳۹۷)

جدول ۱. مشخصات عمومی گسل‌های گستره مورد مطالعه. Lf طول گسل و Lr طول گسیختگی است.

Total	Magnitude (Mw)				Length (km)		Fault Name (Zare 1995; Wells and Coppersmith 1994; Nowroozi 1985; Ambraseys and Jackson 1998)	No.
	Ambraseys & Jackson, 1998	Nowroozi, 1985	Wells & Coppersmith, 1994	Zare, 1995	Lr	Lf		
7.2	7.2	7.2	7.1	7.4	60	103	Ipak	1
6.8	6.7	6.8	6.8	6.8	30	100	Indes	2
6.7	6.7	6.8	6.7	6.7	27	90	Baghestan	3
6.5	6.5	6.6	6.6	6.3	19	63	Eshtehard	4
6.2	6.2	6.4	6.4	6.0	14	45	Alborz	5
7.3	7.2	7.3	7.2	7.5	66	220	Kushk-e Nosrat	6

تعیین پارامترهای لرزه خیزی

به منظور بررسی پیشینه لرزه خیزی منطقه و محاسبه پارامترهای مورد نیاز در تحلیل های نرم افزاری، فهرست رویدادهای تاریخی (Ambraseys & Melville 1982; Berberian & Yeats 1999) و دستگاهی (Engdahl et al 2006;) (Moinfar et al 1994) (ISC) گردآوری (جدول ۲) و پس از حذف پیش لرزه ها و پس لرزه ها با استفاده از پنجره مکانی - زمانی (Gardener & Knopoff 1974) در محیط نرم افزار Zmap پردازش شد. در جدول ۲ فقط به آمار زمین لرزه ها اشاره شده است. با این حال، در محاسبات، بزرگای آستانه برابر ۳،۴ در نظر گرفته شد. نهایتاً ضرایب a و b (Gutenberg & Richter 1956)، نرخ لرزه خیزی، و دوره بازگشت بزرگای زمین لرزه ها (جدول ۳ و شکل ۴) برای هر یک از چشمه های لرزه زا محاسبه شد. این نتایج به قرار ذیل است:

RESULTS

Beta = 1.10 +- .08 (b = .48 +- .03)
 Lambda = .06 +- .01 (for Mmin = 4.29)
 M_max = 7.21 +- .10 (for SIG (Xmax) = .10)

جدول ۲. تعداد زمین لرزه های منطقه در بازه های زمانی تاریخی و دستگاهی

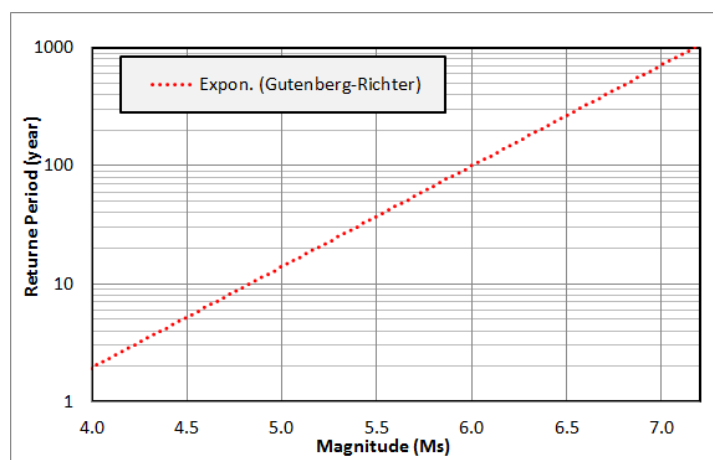
Date Range	Magnitude Range					Grand Total
	3-3.9	4-4.9	5-5.9	6-6.9	7-7.9	
Historical (0-1900)			3	1	1	5
1900-1959						
1960-1969		6	5		1	12
1970-1979	1	3		1		5
1980-1989	1	2	2			5
1990-1999		1	1			2
2000-2009	12	6				18
2010-2018	34	5	2			41
Grand Total	48	23	10	1	1	83

جدول ۳. نتایج آماری دوره بازگشت بزرگای زمین لرزه به روش گوتنبرگ - ریشتر

Magnitude	year	Magnitude	year	Magnitude	year	Magnitude	year	Magnitude	Year
3.7	1	4.9	12	5.3	23	6.6	300	7.3	1200
4.0	2	5.0	13	5.3	24	6.7	400	7.3	1300
4.2	3	5.0	14	5.3	25	6.8	475	7.3	1400
4.4	4	5.0	15	5.6	50	6.8	500	7.4	1500
4.5	5	5.1	16	5.9	75	6.9	600	7.4	1600
4.6	6	5.1	17	6.0	100	7.0	700	7.4	1700
4.6	7	5.1	18	6.1	125	7.1	800	7.5	1800
4.7	8	5.2	19	6.2	145	7.1	900	7.5	1900
4.8	9	5.2	20	6.2	150	7.2	975	7.6	2475
4.8	10	5.2	21	6.3	175	7.2	1000	7.9	4000
4.9	11	5.2	22	6.4	200	7.2	1100	8.1	6000

گزینش رابطه کاهندگی

با مطالعه و بررسی روابط کاهندگی مختلف موجود (Douglas 2011) و با توجه به ویژگی‌ها و شرایط زمین‌شناسی و زمین‌ساختی و لرزه‌زمین‌ساختی این پهنه از ایران زمین (Shoja-Taheri et al 2010) و همچنین با در نظر گرفتن ویژگی‌های روابط و محدودیت‌های هر یک، در نهایت، از پنج رابطه کاهندگی NGA و با در نظر گرفتن وزن مساوی برای هر یک (Campbell & Bozorgnia 2008; Idriss 2008; Boore & Atkinson 2008; Chiou & Youngs 2008; Abrahamson & Silva 2008) در تحلیل خطر زمین‌لرزه این منطقه استفاده شد. در این روابط عمق لایه لرزه‌زا ۱۲ کیلومتر (Engdahl et al 2006) منظور شد.



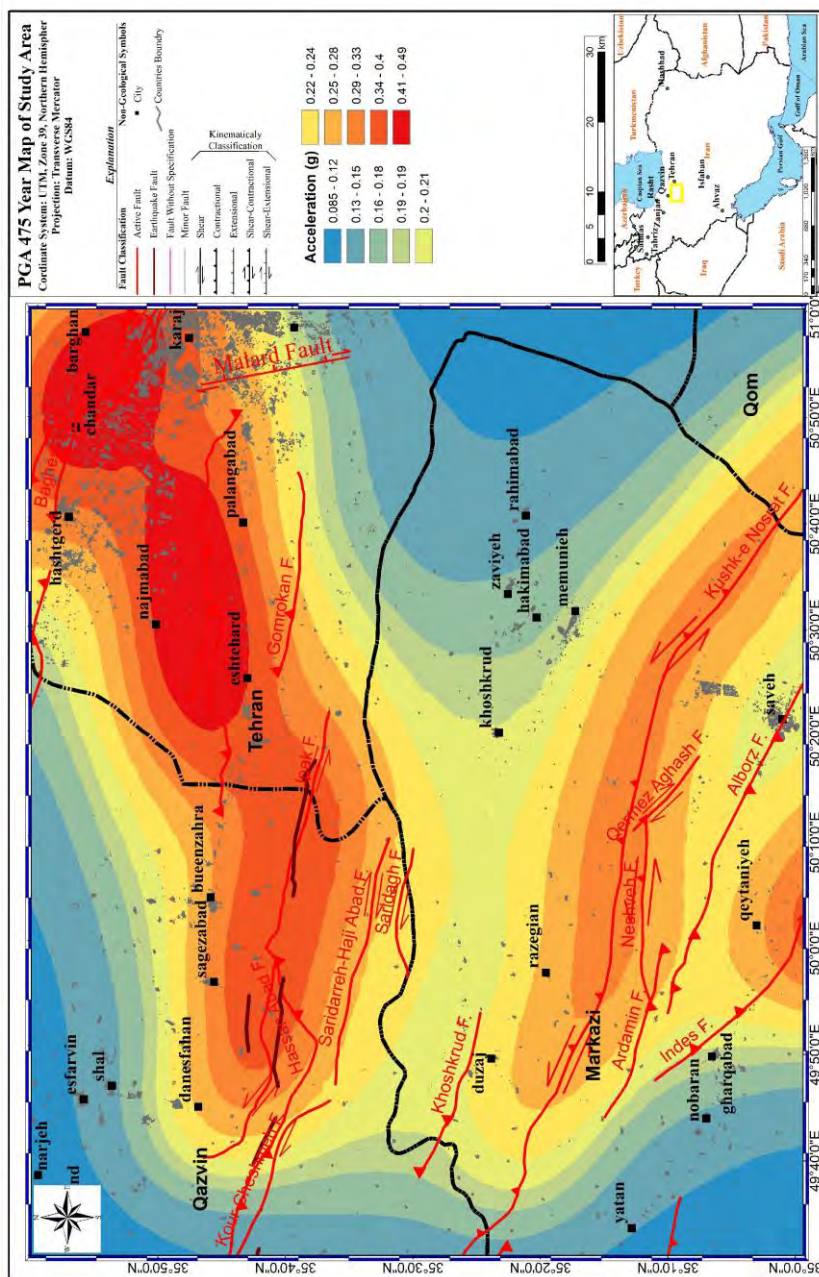
شکل ۴. دوره بازگشت زمین‌لرزه‌ها برحسب بزرگای سطحی با استفاده از روش کوتنبرگ - ریشر

روش احتمالی (PSHA)

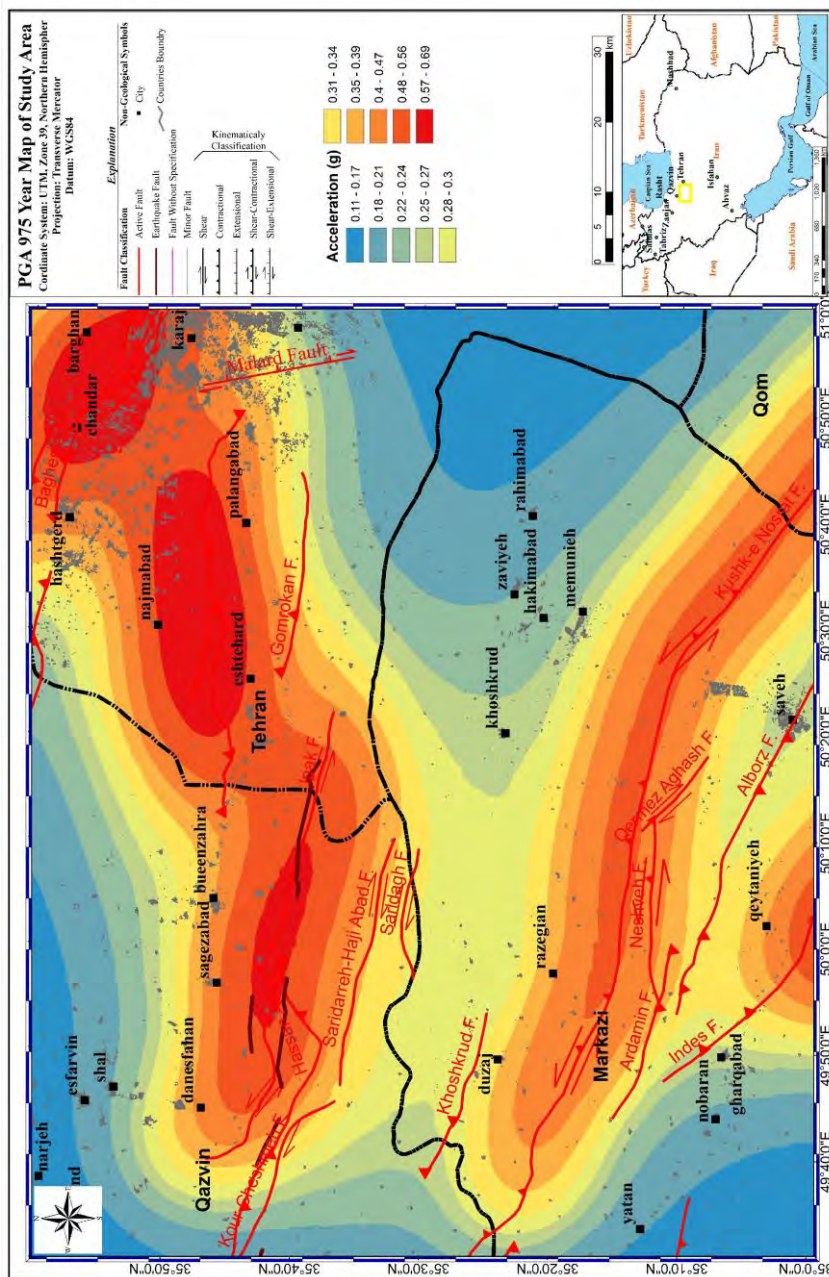
در این پژوهش سعی شد با استفاده از نرم‌افزارهای به‌روز تحلیل خطر زمین‌لرزه، نظیر Ez-FRisk (2018) و همچنین Zmap Wiener (2001)، پارامترهای شتاب زمین‌لرزه تعیین شوند. استفاده محدود از این نرم‌افزار در مطالعات تحلیل خطر زمین‌لرزه در ایران صورت پذیرفته است و از آنجا که این نرم‌افزار در توع خود جزء بهترین‌هاست می‌تواند کاری نو محسوب شود. در این بخش بر اساس روش‌های موجود (Cornell 1968; Green & Hall 1994; McGuire 1995) و تجارب صورت گرفته در کشور (Haerifard et al 2018; Jarahi 2016a, 2017b; Jarahi et al 2015) پهنه‌بندی شتاب زمین‌لرزه در پیوند صفر ثانیه^۱ (PGA) برای دوره‌های بازگشت ۴۷۵ و ۹۷۵ و ۲۴۷۵ سال در گستره ساوه صورت می‌گیرد. محاسبات بخش‌های پیشین به منزله داده ورودی نرم‌افزار EZ-Frisk به منظور تحلیل خطر زمین‌لرزه در این بخش به کار می‌روند. به همین منظور شبکه‌ای از نقاط با پراکندگی مناسب (فواصل ۵*۵ کیلومتر) و به تعداد بیش از ۶۴۵ نقطه در منطقه تعریف و شتاب افقی زمین‌لرزه بر مبنای روابط کاهندگی مورد اشاره برای هر یک از این نقاط محاسبه شد (شکل‌های ۵ و ۶ و ۷). با توجه به نبود اطلاعات ژئوتکنیکی، همچنین عدم دسترسی به بانک اطلاعات خاک

1. Peak Ground Acceleration

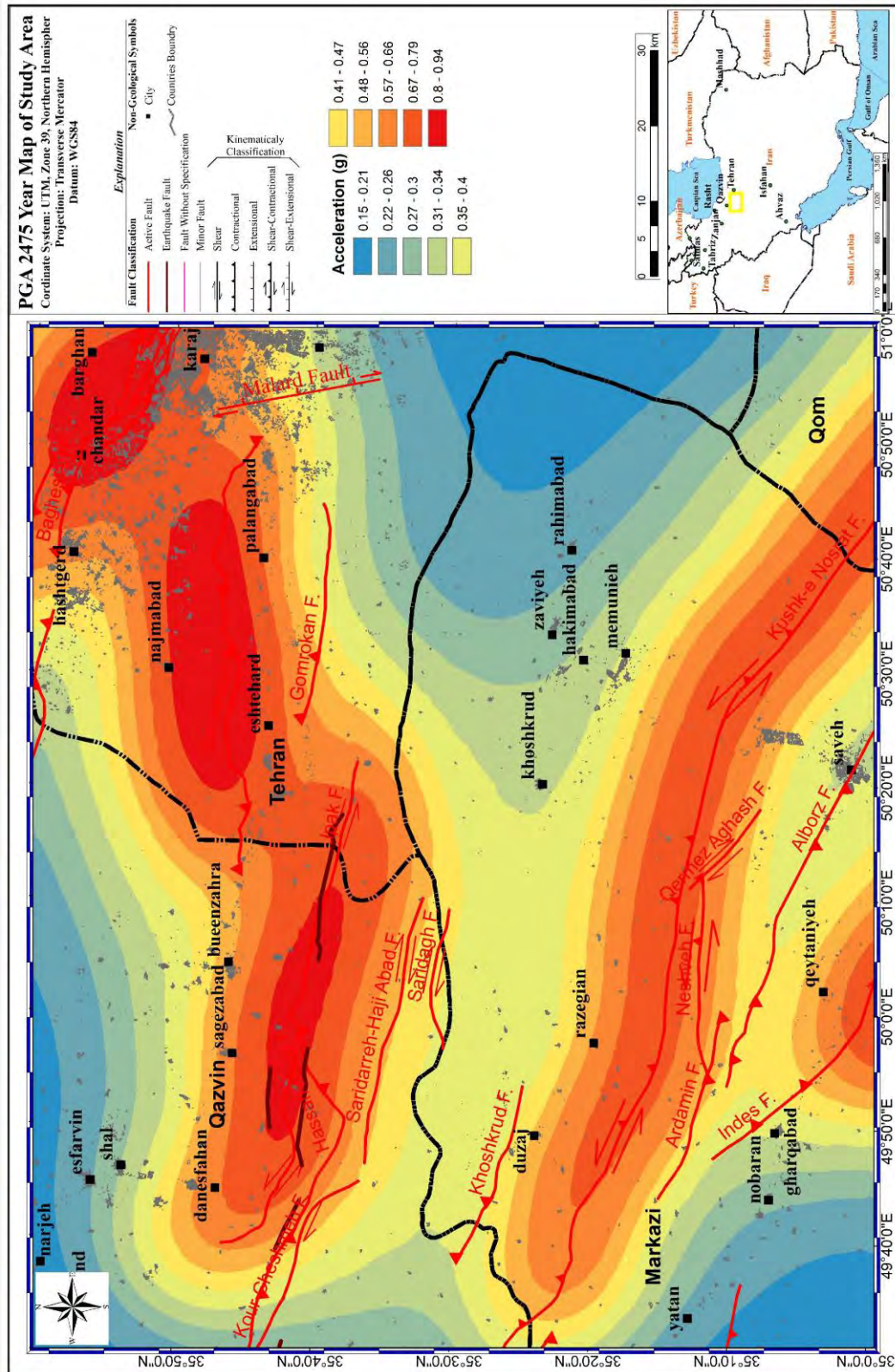
ورودی نرم‌افزار EZ-Frisk (به دلیل تحریم و عدم امکان خرید لایسنس) مقادیر عددی سرعت موج برشی سنگ مدنظر قرار گرفته است ($V_{s30}=760\text{m/s}$).



شکل ۵. نقشه هم‌شتاب افقی زمین برای دوره بازگشت ۴۷۵ سال



شکل ۶. نقشه هم‌شتاب افقی زمین برای دوره بازگشت ۹۷۵ سال



شکل ۷. نقشه هم‌شتاب افقی زمین برای دوره بازگشت ۲۴۷۵ سال

نتیجه

این مطالعه به منظور تحلیل خطر زمین‌لرزه و برآورد پارامترهای لرزه‌خیزی در گستره ساوه صورت پذیرفت. در این پژوهش، با بررسی لرزه‌خیزی منطقه، ضمن تحلیل خطر زمین‌لرزه، نقشه‌های هم‌شتاب افقی برای دوره‌های بازگشت مختلف نیز تهیه شد. گسل ایبک، به طول ۱۰۰ کیلومتر و راستای خم‌دار شرقی - غربی، مؤثرترین عامل لرزه‌زمین‌ساختی در این گستره به شمار می‌رود. این گسل مسبب رویداد مهیب ۱۹۶۲ بونین زهرا با بزرگای ۷٫۲ است. گسل‌های ایندس، باغستان، اشتهارد، و کوشک نصرت دیگر گسل‌های منطقه‌اند که در رده فعال قرار دارند. زمین‌لرزه سال ۱۱۷۷، با بزرگای ۷٫۲، در شرق گستره مورد مطالعه بزرگ‌ترین رویداد تاریخی در نظر گرفته شد. زمین‌لرزه ۱۱۱۹ میلادی، با بزرگای ۶٫۵، نیز دومین زمین‌لرزه بزرگ این پهنه از ایران است. رویداد زمین‌لرزه ۱۹۶۲ با بزرگای ۷٫۲، بزرگ‌ترین رویداد دستگاهی این منطقه، در ارتباط با فعالیت گسل ایبک به وقوع پیوسته است. زمین‌لرزه ۲۰۱۷ ملارد، با بزرگای ۵٫۲، دومین زمین‌لرزه دستگاهی مهم این منطقه است. به منظور برآورد بیشینه مقادیر پارامترهای جنبش نیرومند زمین از روش احتمالی استفاده شد. از روابط نسل جدید در محاسبات مربوط به تعیین بیشینه مقادیر پارامترهای جنبش نیرومند زمین استفاده شد. جهت محاسبه شتاب زمین‌لرزه، شبکه‌ای از نقاط با پراکندگی مناسب (فاصله ۵*۵ کیلومتر) و به تعداد بیش از ۶۴۵ نقطه تعریف و محاسبات شتاب زمین‌لرزه برای هر یک از این نقاط صورت گرفت. نتایج این بررسی‌های در قالب نقشه‌های هم‌شتاب افقی در پریود نزدیک به صفر ثانیه (PGA) ارائه شد. طبق این نقشه‌ها، مقدار بیشینه شتاب در حدود 0.94g و مربوط به زمین‌لرزه‌ای با دوره بازگشت ۲۴۷۵ سال است. برای دوره بازگشت ۹۷۵ سال، مقادیر بیشینه شتاب در حدود 0.69g است. در دوره بازگشت ۴۷۵ سال، بیشینه شتاب زمین‌لرزه در حدود 0.49g است. نتایج این نوشتار با مطالعات جمالی و توکل‌زاده (۱۳۸۷) برای دوره‌های بازگشت ۴۷۵ و ۲۵۷۴ سال قابل مقایسه است. بر این اساس بیشینه شتاب زمین‌لرزه در مطالعه اشاره شده برای دوره‌های بازگشت یادشده به ترتیب 0.41g و 0.57g است. علت متفاوت بودن نتایج را می‌توان ناشی از ضعف‌های نرم‌افزاری در مدل‌سازی سه‌بعدی چشمه‌ها، استفاده از روابط کاهندگی قدیمی با قابلیت‌های محدود، و نحوه مدل‌سازی چشمه‌های لرزه‌زا دانست. قلی‌پور و همکارانش (۱۳۹۰) به منظور پهنه‌بندی شتاب زمین‌لرزه برای دوره‌های بازگشت ۱۰۰ و ۴۷۵ سال مطالعات دیگری انجام دادند. بیشینه شتاب زمین‌لرزه در این مطالعات بر اساس دوره‌های بازگشت اشاره شده، به ترتیب، برابر 0.35g و 0.50g است. بر این اساس با مقایسه نتایج دوره بازگشت ۴۷۵ اعداد برآوردشده هم‌خوانی کاملی با داده‌های این مطالعه دارد؛ که به دلیل یکسان بودن نرم‌افزار، داده‌های ورودی، و روابط کاهندگی نسبتاً جدید است.

منابع

- بیت‌اللهی، ع.، بصیری، م.، و جراحی، ه. (۱۳۹۷). «اولین سالگرد زمین‌لرزه ۵٫۲ ملارد تهران (زلزله ۲۹ آذر ۱۳۹۶) و نگاهی دوباره بر آن»، سازمان راه، مسکن و شهرسازی، گزارش داخلی.
- پورکرمانی، م. و سلیمانی‌آزاد، ش. (۱۳۷۷). «معرفی گسل لرزه‌ای ماهدشت - جنوب کرج به عنوان یکی از سرچشمه‌های لرزه‌ای اصلی در غرب تهران و جنوب کرج»، دومین همایش/انجمن زمین‌شناسی ایران، مشهد، انجمن زمین‌شناسی ایران.

جمالی، ف. و توکلی‌زاده، م. (۱۳۸۷). «برآورد خطر زمین‌لرزه - گسلش (لرزه‌زمین‌ساخت) در گستره چهارگوش ۱:۲۵۰۰۰۰ ساوه»، مهندسين مشاور زمین آب پی، ج ۳، س ۸۹.

سلیمانی آزاد، ش. و حسینی، م. (۱۳۷۷). «تحلیل خطر زمین‌لرزه با رهیافت تعیینی برای نیروگاه منتظر قائم با تأکید بر روش‌های مورفوتکتونیک و نتوتکتونیک»، مؤسسه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله.

قلی‌پور، ی.، بزرگ‌نیا، ی.، رهنما، م.، بربریان، م.، قریشی، م.، طالبیان، م.، نظری، ح.، شجاع‌طاهری، ج.، و شفیع‌ی، ع. (۱۳۹۰). «گزارش تحلیل خطر لرزه‌ای ایران - فاز ۱، محدوده تهران بزرگ»، گروه پژوهشی بهینه‌سازی مهندسی دانشکده فنی دانشگاه تهران.

- Abrahamson, N. A. & Silva, W. J. (2008). "Summary of the Abrahamson & Silva NGA Ground-Motion Relations", *Earthq. Spectra*, 24: pp. 67-97.
- Alavi, M. (1996). "Tectonostratigraphic synthesis and structural style of the Alborz Mountains system in northern Iran", *Journal of Geodynamics*, 11: pp. 1-33.
- Ambraseys, N. N. & Melville, C. P. (1982). "A History of Persian Earthquakes", *Cambridge University Press, Cambridge*, 219.
- Ambraseys, N. N. & Jackson, J. A. (1998). "Faulting associated with historical and recent earthquakes in the eastern Mediterranean region", *Geophys. J. Int.*, 133: pp. 390-406.
- Berberian, M. (1971). "Preliminary report on the structural analysis of Ipak active fault." In, 130. *Geol.Surv. Iran*.
- (1976). "An explanatory note on the first seismotectonic map of Iran; A seismotectonic review of the country. In: Contribution to the seismotectonics of Iran (Part II)", *Geological Survey of Iran*, 39: pp. 7-142.
- (2014). "Earthquake and Coseismic Surface Faulting on the Iranian Plateau" *a Historical, Social, and Physical Approach* (Elsevier).
- Berberian, M. & King, G. C. P. (1981). "Towards a paleogeography and tectonic evolution of Iran", *J. Earth Sci*, 18: pp. 1764-66.
- Berberian, M. & Yeats, R. S. (1999). "Patterns of historical earthquake rupture in the Iranian plateau", *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 89: pp. 120-39.
- Boore, D. M. & Atkinson, G. M. (2008). "Ground-motion prediction equations for the average horizontal 99 component of PGA, PGV, and 5 %-damped PSA at spectral periods between 0.01 s and 10.0 s", *Earthq. Spectra*, 24: pp. 99-138.
- Campbell, K. W. & Bozorgnia, Y. (2008). "NGA ground motion model for the geometric mean horizontal 139 component of PGA, PGV, PGD and 5% damped linear elastic response spectra for periods ranging from 0.01 to 10 s", *Earthquake Spectra*, 24: pp. 139-72.
- Chiou, B. & Youngs, R. R. (2008). "An NGA model for the average horizontal component of peak ground motion and response spectra", *Earthquake Spectra*, 24: pp. 173-216.
- Cornell, A. (1968). "Engineering Seismic Risk Analysis", *BSSA*, 58: 1583-606.
- Douglas, J. (2011). "Ground-motion prediction equations 1964-2010" Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM)." In. PEER
- Engdahl, E. R., Jackson, J. A., Myers, S. C., Bergman, E. A., & Priestly, K. (2006). "Relocation and assessment of seismicity in the Iran region", *Geophysics. J. Int.*, 167: pp. 761-78.
- Ez-FRisk (2018). "Software for Earthquake Ground Motion Estimation", Risk Engineering INC.
- Gardener, J. K. & Knopoff, L. (1974). "Is the Sequence of Earthquakes in Southern California with Aftershocks Removed, Poissonian", *Bull. Seism. Soc. Am.*, 64: 1363-67.

- Green, A. R. & Hall, J. W. (1994). "An Overview of Selected Seismic Hazard Analysis Methodologies." In *Civil Engineering Studies*, 104.
- Gutenberg, B. & Richter, C. F. (1956). "Earthquake Magnitude, Intensity, Energy and Acceleration", *Bull. Seism. Soc. Am.*, 46: 105-45.
- Haerifard, S., Jarahi, H., Pourkermani, M., & Almasian, M. (2018). "Seismic Hazard Assessment at Esfaraen–Bojnurd Railway, North–East of Iran", *Geotectonics*, 52: 151-56.
- Hessami, K., Jamali, F., & Tabassi, H. (2003). "Active fault maps of Iran." In. IIEES: Department of Seismotectonic, Seismology Research Center.
- Honarvar, M., Jarahi, H., & Nadalian, M. (2014). "Seismic Hazard Macrozonation in Karaj Area." In *National Conference in Applied Civil Engineering, and new achievements*. Karaj.
- Idriss, I. M. (2008). "An NGA empirical model for estimating the horizontal spectral values generated by shallow crustal earthquakes", *Earthquake Spectra*, 24: 217–42.
- Jarahi, H. (2016a). "Ground-motion scenarios consistent with Probabilistic Seismic Hazard Deaggregation for Karaj city (Iran)", *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, 9: 520-29.
- (2016b). "Probabilistic seismic hazard deaggregation for Karaj City (Iran)", *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, 9: 520-29.
- (2017a). "Delineate Location of the Last Earthquake Case Study NW of Iran", *American Journal of Geosciences*, 17: 6.
- (2017b). "PSHA Study Using EZ-Frisk Software Case Study Baychebaq Dam site", *Current Research in Geoscience*.
- Jarahi, H., Golabatunchi, I., Pourkermani, M., & Nadalian, M. (2013). "Effect of Seismic Hazard Analysis Methods Selection on Economic Switching at Behjatabad Dam Plan", *Journal of applied geology*, 9: pp. 11-20.
- Jarahi, H., Madadi, M. R., Nadalian, M., & Bandar, F. (2015). "Seismic Hazard Zonation in Terms of Spectral Acceleration at Tehran Region Base on Activity and Slip Rates." In *2st National Congress on Construction Engineering and Projects Assessment*, Semnan-Iran.
- Jarahi, H., Naraghiaraghi, N. & Nadalian, M. (2016). "Short Period Spectral Acceleration Zonation of Tehran a Comparison between Slip and Activity Rates Data's", *American Journal of Geosciences*, 6: pp. 36-46.
- Kijko, A. (2012). "Seismic Hazard Encyclopedia of Solid Earth Geophysics, Harsh Gupta (Ed.)", *Springer*: 1107-21.
- Kijko, A. & Sellevoll, M. A. (1992). "Estimation of Earthquake Hazard Parameters from Incomplete Data Files. Part II. Incorporation of Magnitude Heterogeneity", *Bulletin of the Siesmological Society of America*, 82: 120-34.
- McGuire, R. K. (1995). "Probabilistic seismic hazard analysis and design earthquakes: closing the loop." in, *Geotechnical and Environmental Geophysics* (B. Seismol. Soc. Am.).
- Moinfar, A., Mahdavian, A., & Maleki, A. (1994). "A collection of basic information on Iran earthquakes".
- Nazari, H., Talebian, M., Ghorashi, M., & Fathian, M. A. (2013). "Seismotectonic Map of NW Iran." In. Iran: *GSI*.
- Ni, S. H. (2012). "Design Earthquakes Based on Probabilistic Seismic Hazard Analysis".
- Nowroozi, A. A. (1985). "Empirical Relations between Magnitudes and Fault Parameters for Earthquakes in Iran", *Bull. Seism. Soc. Am.*, 75: 1327-38.
- Shoja-Taheri, J., Nnaserieh, S., & Hadi, G. (2010). 'A Test of the Applicability of NGA Models to the Strong Ground-Motion Data in the Iranian Plateau', *Journal of Earthquake Engineering*, 14: 278–92.
- Trifonov, V. G. & Karakhanian, A. S. (2004). *Geodynamics and the history of civilization* (Nauka:

- Moscou).
- Wells, D. L. & 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.
- Wiemer, S. (2001). "A Software Package to Analyze Seismicity: ZMAP", *Seismological Research Letters*, 72: 373-82.
- Zamanfashami, A., Nadalian, M., & Jarahi, H. (2012). "Determine the Controlling Earthquake by Deaggregation Method in Behjatabad Dam", *Journal of Sciences, Islamic Azad University, (JSIAU)*, 22: pp. 47-58.
- Zare, M. (1995). "Relationships for Magnitude, intensity and pike horizontal acceleration base on Iranian Earthquakes", *journal of seismology and engineering earthquake and research*, 6: pp. 12-14.