



تأثیر انتخاب روشهای تحلیل خطر بر اقتصاد طرح سد بهجت آباد

هادی جراحی^{۱*}، ایرج کلابتونچی^۲، ممسن پور کرمانی^۳ و ملیحه نادعلیان^۴

۱) کارشناسی ارشد تکتونیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال، hadijarahi@gmail.com

۲) دانشجوی دکتری تکتونیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات و فناوری

۳) استاد، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات و فناوری

۴) کارشناس گروه زمین‌شناسی، دانشگاه صنعتی شاهرود

* عهده‌دار مکاتبات

دریافت: ۹۱/۴/۴ دریافت اصلاح شده: ۹۲/۱/۲۳ پذیرش: ۹۲/۱/۲۵ قابل دسترس در تارنما: ۹۲/۵/۳۱

هکیده

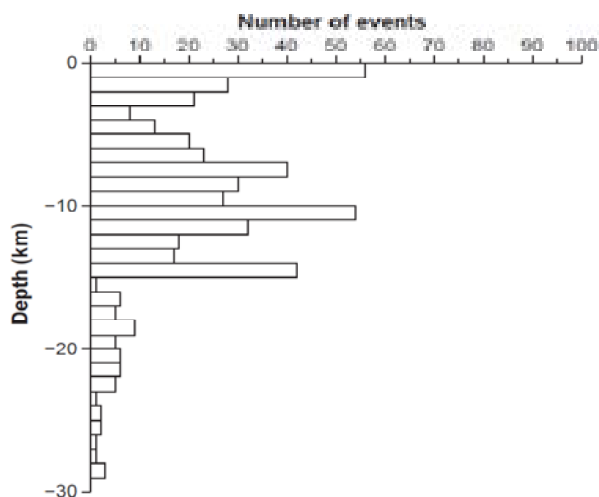
سد بهجت آباد، در استان قزوین و در ۶۵ کیلومتری شمال غرب شهر آبیگ قرار دارد. زمین‌لرزه‌های رخ داده در این پهنه، از نوع کم عمق بوده و اغلب دارای گسیختگی سطحی هستند. در این مقاله سعی شد تا با استفاده از نقشه‌های زمین‌ساخت، بررسی عکس‌های هوایی و ماهواره‌ای و بانک داده‌های لرزه‌ای منطقه سیمای لرزه‌خیزی محدوده سد مشخص گردد. تحلیل خطر زمین لرزه بر اساس پراکنش، نوع و ریخت‌شناسی گسل‌ها و همچنین داده‌های زمین‌لرزه‌های گذشته و معاصر انجام شد. این تحلیل‌ها با بکارگیری نرم‌افزار EZ-Frisk و با استفاده از روابط کاهندگی مناسب، به دو روش تعیینی و احتمالی صورت گرفت. بر مبنای روش تعیینی، مهم‌ترین سناریوی لرزه‌ای مربوط به گسل آبیگ است که در صورت فعالیت، توانایی ایجاد بیشینه شتاب را در ساختگاه خواهد داشت. اما در روش جدید، جدایش خطر لرزه‌ای که به منظور تعیین زمین لرزه کنترل‌کننده انجام شد، نشان‌دهنده اهمیت بیشتر گسل‌های طالقان، شمال تهران و شمال کرج (در فاصله دورتر) نسبت به گسل آبیگ (در فاصله نزدیک تر) در ایجاد بیشینه شتاب می‌باشد. پس از طراحی سد بر مبنای نتایج هر دو روش، در صورت استفاده از روش جدایش خطر لرزه‌ای، به میزان ۱۴ درصد صرفه جویی اقتصادی در هزینه‌های اجرایی سد بهجت آباد حاصل می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: تحلیل خطر زمین لرزه، نرم‌افزار EZ-Frisk، روابط کاهندگی، صرفه جویی اقتصادی.

۱- مقدمه

است. از آن جایی که سد بهجت آباد بر اساس بیشینه زمین لرزه ممکنه در ساختگاه (Maximum Credible Level: MCL) ساخته می‌شود (کلابتونچی ۱۳۹۰)، هزینه‌های اجرایی بالایی را به خود اختصاص می‌دهد. عمده‌ترین روش محاسبه شتاب برای سطح طراحی MCL، روش تعیینی است که معمولاً از دقت بالایی برخوردار نمی‌باشد. در نتیجه، برای برآورد پارامترهای شتاب بر اساس زمین لرزه کنترل‌کننده، از روش جدید جدایش خطر لرزه‌ای استفاده شده است. در این مقاله

سد بهجت آباد از نوع خاکی با هسته رسی و به ارتفاع ۵۷ متر می‌باشد که به منظور کنترل سیلاب‌ها و کمک به کشاورزی منطقه آبیگ پیش‌بینی شده است. محدوده مورد مطالعه در برگیرنده گستره‌ای به شعاع ۱۵۰ کیلومتری پیرامون سد بهجت آباد در استان قزوین، شهرستان آبیگ می‌باشد. این سد در بالادست روستای بهجت آباد و در مختصات ۱۰' ۳۶° عرض شمالی و ۲۰' ۵۰° طول شرقی قرار گرفته



تصویر ۱- ژرفای کانونی زمین لرزه های منطقه

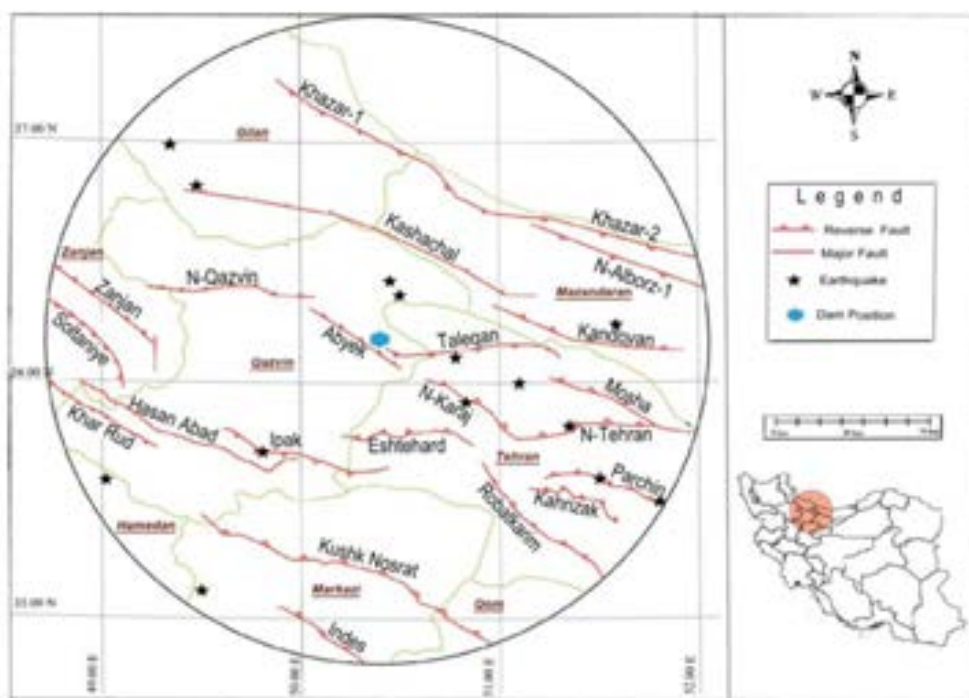
برای شناسایی گسل‌ها، روندهای ساختاری و همچنین پیشینه لرزه‌خیزی منطقه، ابتدا زمین‌شناسی، زمین‌ساخت و لرزه‌زمین‌ساخت محدوده‌ی مورد مطالعه بررسی می‌شود. سپس پارامترهای لرزه‌خیزی، دوره بازگشت و احتمال رخ داد زمین لرزه‌ها بر حسب بزرگای آن‌ها محاسبه و در تحلیل خطر زمین لرزه به چشمه‌های لرزه‌زا نسبت داده می‌شوند.

به منظور برآورد پارامترهای جنبش نیرومند زمین که شامل پیشینه مقادیر شتاب افقی (Peak Horizontal Acceleration, PHA) و قائم (Peak Vertical Acceleration, PVA) در سطوح مختلف طراحی لرزه‌ای می‌باشد، از روش‌های تعینی (Deterministic Seismic Hazard Analysis, DSHA) و احتمالی (Probabilistic Seismic Hazard Analysis, PSHA) استفاده شده است.

۲- تکتونیک منطقه

وجود گسل‌های اصلی و در عین حال فعال (Nazari 2005)، از ویژگی‌های ساختاری این محدوده می‌باشد. در جدول ۱، فهرست گسل‌های منطقه بر اساس نزدیک‌ترین فاصله تا ساختگاه سد به همراه پارامترهای لرزه‌خیزی و بزرگای پیشینه که از روابط تجربی (زارع ۱۳۷۴، Ambraseys & Jackson 1998، Nowroozi 1985, Wells & Coppersmith 1994، Nazari et al. 2009، ۱۳۹۰، قلی‌پور و همکاران ۱۳۹۰، Martini et al. 1997, Ritz et al. 2003) ارایه شده است. موقعیت این گسل‌ها در تصویر ۲ نشان داده شده است.

محدوده‌ی مورد مطالعه در واحد زمین‌ساختی البرز قرار گرفته است (Berberian 1976). از جمله ویژگی‌های لرزه‌زمین‌ساختی این واحد، تعداد نسبتاً کم زمین لرزه با بزرگای متوسط تا زیاد می‌باشد. ژرفای کانونی زمین لرزه‌ها نیز در این منطقه کم و در حدود ۱۲ کیلومتر می‌باشد (تصویر ۱). بررسی زمین لرزه‌های رخ داده در محدوده مورد مطالعه، نشان‌دهنده‌ی سطح بالای لرزه‌خیزی منطقه است. بنابراین می‌توان گفت که این پهنه از گذشته تا کنون شاهد رخداد زمین لرزه‌هایی با بزرگای حدود ۷ و حتی بیشتر بوده است.



تصویر ۲- لرزه‌زمین‌ساخت محدوده‌ی ۱۵۰ کیلومتری سد بهجت آباد

جراحی و همکاران: تأثیر انتخاب روشهای تحلیل خطر بر اقتصاد طرح سد بهجت آباد

جدول ۱ - پارامترهای لرزه خیزی گسل های محدوده ی ۱۵۰ کیلومتری سد بهجت آباد

نام گسل	طول (km)	فاصله (km)	Mmax	نرخ لغزش (mm/year)
آبیک	50	2	6.5	6.42E-03
طالقان	81	10	6.8	4.44E-03
شمال قزوین	76	15	6.7	6.27E-03
شمال کرج	51	27	6.5	6.13E-03
اشتهارد	64	40	6.6	7.20E-03
شمال تهران	64	40	6.6	6.13E-03
کشاچال	167	48	7.2	4.14E-03
آبیک	79	50	6.8	6.13E-03
کندوان	89	55	6.8	7.04E-03
رباط کریم	122	72	7	6.57E-03
حسن آباد	112	80	7	6.23E-03
شمال البرز	170	80	7.2	8.86E-03
مشا	53	93	6.5	3.00E-03
کهریزک	48	97	6.4	1.31E-03
خزر-۲	178	97	7.3	2.05E-03
شمال ری	28	98	6.1	1.37E-03
خزر-۱	142	99	7.1	2.05E-03
کوشک نصرت	170	100	7.2	2.30E-03
زینجان	102	104	6.9	6.21E-03
سلطانیه	111	117	7	6.23E-03
پارچین	32	120	6.2	1.31E-03
ایندس	74	127	6.7	7.04E-03
فیروزکوه	115	134	7	5.72E-03

۳- لرزه فیزی

زمین لرزه های ماقبل تاریخ (Ritz et al. 2012) و تاریخی (Ambraseys & Melville 1982, Berberian 1995) در محاسبات ضروری است. فهرست رویدادهای مهیب منطقه پس از حذف پیش لرزه ها و پس لرزه ها (Powell & Duda 1975, Gardner & Knopoff 1974) در جدول ۲ ارائه گردیده است.

در محاسبه پارامترهای لرزه خیزی ابتدا لازم است تا سابقه لرزه خیزی منطقه بررسی شود. با توجه به کوتاه بودن نسبی بازه زمانی زمین لرزه های دستگاهی (معین فر و همکاران ۱۳۷۳، Engdahl et al. 2006) در مقایسه با دوره بازگشت زمین لرزه های بزرگ، استفاده از

جدول ۲- فهرست زمین لرزه های اصلی منطقه

تاریخ	رومترکز		بزرگا (Ms)	فاصله (km)
	طول	عرض		
4500BC	36.70	49.98	>6.5	70
3000BC	36.82	49.48	>7.0	109
855	35.60	51.50	7.1	118
958/02	35.82	51.35	7.4	95
1119/ 12	36.38	50.00	6.5	42
1177/05	35.92	50.83	7.2	48
1485/ 08	36.43	50.45	7.2	31
1608/ 04	36.37	50.50	7.4	26
1678/ 02	37.20	50.00	6.5	121
1830/ 03	35.53	51.40	7.1	120
1962/ 09	35.71	49.81	7.2	72
1990/ 06	36.98	49.34	7.4	131
2002/ 06	35.58	49.02	6.4	139
2004/ 05	36.24	51.58	6.3	108

مطابق جدول ۳ حاصل گردید. بر این اساس، نرخ لرزه خیزی (λ) در شعاع ۱۵۰ کیلومتری به بیشترین مقدار خود می رسد.

جدول ۳- ضرائب لرزه خیزی منطقه

شعاع (km)	β	λ	Mmax
100	1.54±0.05	0.19±0.09	7.72±0.51
150	1.60±0.03	0.49±0.05	7.78±0.53
200	1.72±0.05	0.08±0.07	7.83±0.55

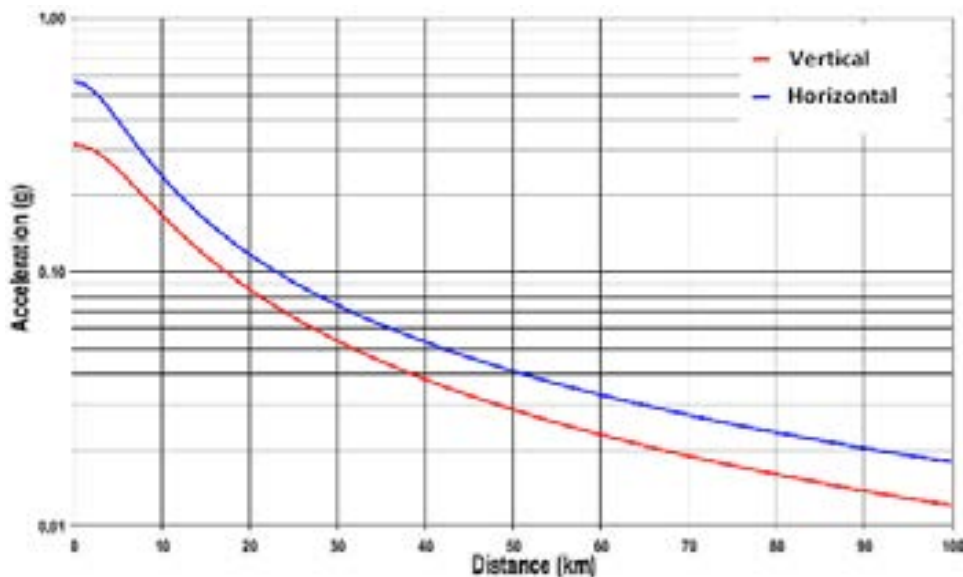
۳-۱-۱- برآورد خطر زمین لرزه به روش تعینی

از این روش برای محاسبه حداکثر شتاب ممکنه زمین (MCL) برای دوره بازگشت ۲۴۷۵ سال استفاده می شود. با شناسایی چشمه های لرزه زا، تعیین پارامترهای آن ها و استفاده از روابط کاهندگی (Abrahamson & Silva 1997, Somerville et al. 2001, Campbell & Bozorgnia 2003, Ambraseys et al. 2005) مشخص شد که مهم ترین چشمه لرزه زا نسبت به ساختگاه سد، گسل آبیگ می باشد. این گسل با توان لرزه زایی ۶/۵ Ms، در جنوب ساختگاه سد و در فاصله ۲ کیلومتری از آن قرار گرفته است که در پیوند نزدیک به صفر (Peak Ground Acceleration, PGA) با توانایی تحمیل بیشینه، شتاب افقی و قائم آن در محل سد به ترتیب ۰/۴۷ و ۰/۳۴ گال می باشد (تصویر ۳).

بزرگ ترین زمین لرزه رخ داده در گستره مورد مطالعه شامل زمین لرزه های ۲۳ فوریه ۹۵۸ میلادی ری- طالقان، ۲۰ آوریل ۱۶۰۸ میلادی رودبارت- طالقان و زمین لرزه ۲۰ ژوئن ۱۹۹۰ میلادی رودبار - منجیل می باشد.

۳-۱-۲- برآورد پارامترهای لرزه فیزی

در محاسبه ضرائب لرزه خیزی منطقه، عمده ترین روش ایجاد رابطه خطی (Gutenberg & Richter 1956) بین بزرگا و فراوانی زمین لرزه های دستگاهی می باشد. این روش دارای دو نقص عمده است، یکی آن که فهرست زمین لرزه ها ناقص و دارای عدم قطعیت در برخی پارامترها بوده و دیگر آن که در این روش فقط از زمین لرزه های دستگاهی ثبت شده استفاده می شود و بخش عظیمی از سابقه لرزه خیزی گذشته را در نظر نمی گیرد. اما روش های جدید و امروزی (Kijko & Sellevoll 1992, Kijko 2011)، با اعمال عدم قطعیت ها و استفاده از زمین لرزه های ما قبل تاریخ به روش تخمین بیشینه محتمل (Maximum Likelihood Estimate, MLE) (Kijko 2011) و تاریخی، پارامترهای لرزه خیزی را با دقت مطلوبی در اختیار می گذارد. با استفاده از این روش در انجام محاسبات، نتایج نهایی برای گستره های شعاعی ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ کیلومتری منطقه مورد مطالعه،



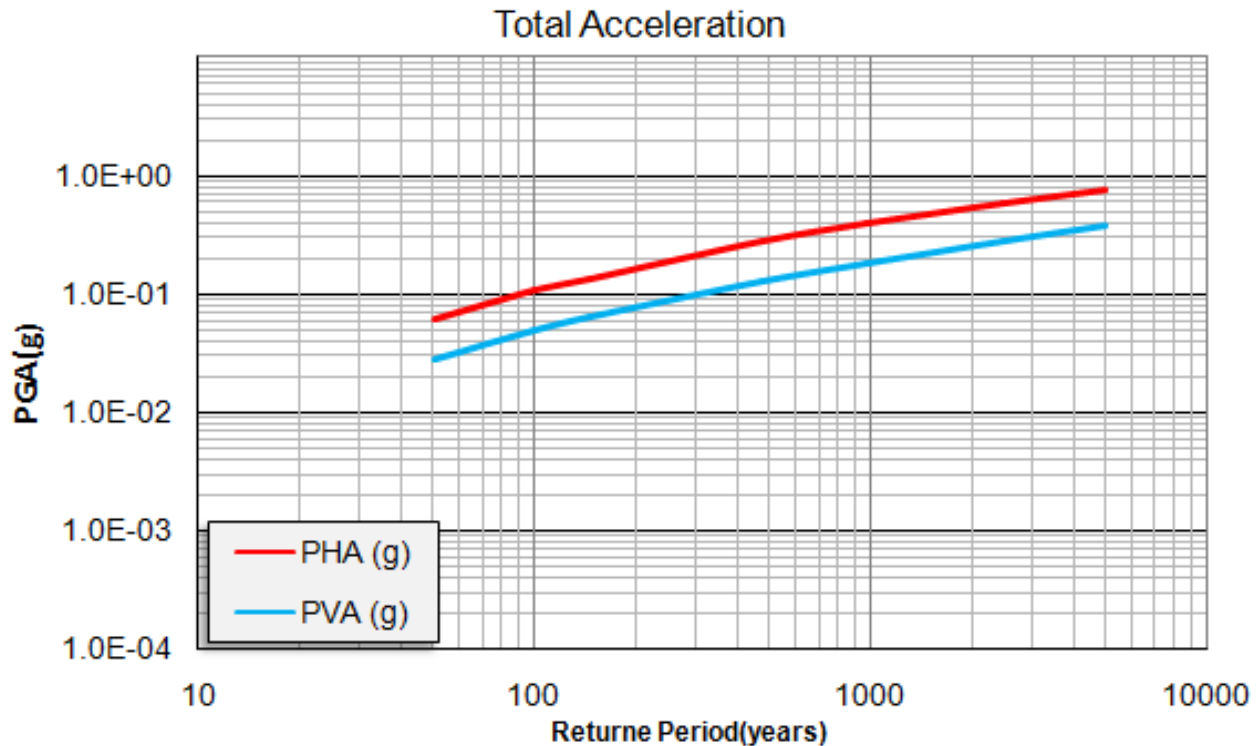
تصویر ۳- منحنی شتاب افقی و قائم زمین به روش تعینی در ساختگاه سد بهجت آباد

این روش، شامل شناسایی چشمه های لرزه زا و استفاده از مدل های کاهندگی مناسب است (مشابه روش تعینی). در ادامه، با در نظر گرفتن ضرائب لرزه خیزی هر چشمه و محاسبه تابع چگالی، احتمال و بزرگا و در نهایت با دادن ضرائب وزنی مساوی به هر یک از روابط کاهندگی،

۳-۱-۳- برآورد خطر زمین لرزه به روش احتمالی

از این روش برای محاسبه سطوح مختلف طراحی لرزه ای مانند (Design Basis Level, DBL)، (Maximum Design Level, MDL)، (Construction Level, CL) استفاده می شود. مراحل اولیه

منحنی میانگین شتاب در سایت مورد نظر به دست آمد (تصویر ۴). با توجه به توصیه های موجود (نیری و همکاران ۱۳۷۵) برای انتخاب سطوح طراحی، نتایج روش احتمالی بر اساس جدول ۴ پیشنهاد می گردد.



تصویر ۴- منحنی میانگین شتاب افقی و قائم زمین به روش احتمالی در ساختگاه سد بهجت آباد

دارد (جراحی ۱۳۹۰). در این روش، خطر لرزه‌ای توسط یک یا چند زلزله غالب با بزرگای M در فاصله R ارائه می‌شود و پارامترهای زلزله برای اهداف مهندسی با استفاده از این جفت‌های M و R انتخاب می‌شوند. معمولاً نمودارهای تفکیک خطر لرزه‌ای به صورت ستون‌های عمودی هستند که ارتفاع آن‌ها متناسب با مشارکت هر چشمه در خطر لرزه‌ای و محورهای افقی فاصله و بزرگی زلزله می‌باشند. به بیان دیگر، بر خلاف روش تحلیل خطر که احتمالات مختلف با یکدیگر جمع می‌شوند، در تفکیک خطر لرزه‌ای این احتمالات بر احتمال مجموع تقسیم می‌شوند تا مشارکت نسبی هر یک از چشمه‌ها در خطر لرزه‌ای به دست آید (Bazzurro & Cornell 1999).

مشارکت‌های نسبی چشمه‌ها اغلب بر حسب یک محدوده مشخص بزرگا و فاصله ظاهر می‌شوند. فرآیند تفکیک کردن مشارکت‌های لرزه‌ای در آرایه‌ای از محدوده‌های بزرگا و فاصله، بسته‌بندی (Binning) نامیده می‌شود. با فرض این که $h_i = \hat{a}.hk$ باشد (که جمع روی همه چشمه‌ها است)، h_i وزن مشارکت بسته نام است و k یک نشانه روی هر دو پارامتر موقعیت و بزرگا می‌باشد. بزرگا و فاصله متوسط بصورت رابطه ۱ تعریف می‌شوند (Harmsen, & Frankel 2001).

جدول ۴- شتاب زمین در سطوح مختلف طراحی

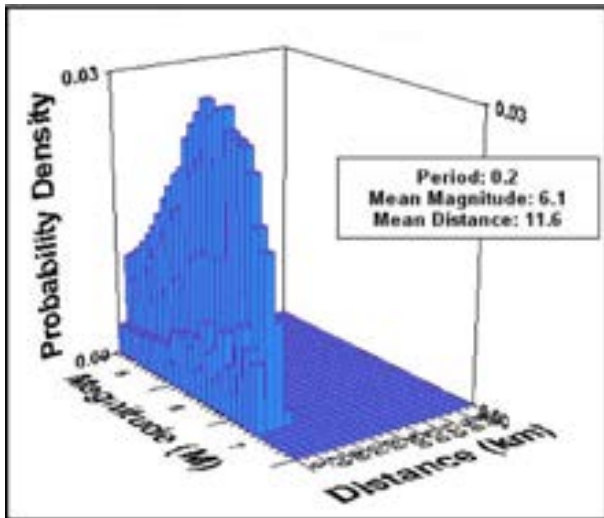
سطح طراحی لرزه ای	دوره بازگشت		شتاب زمین
	افقی	عمودی	
CL	۰/۱۸	۱۰۰	۰/۱۶
DBL	۰/۲۳	۴۷۵	۰/۲۱
MDL	۰/۳۶	۹۷۵	۰/۲۲

۴- هدایش فاصله لرزه ای بزرگا-فاصله (Magnitude – Distance) (Deaggregation)

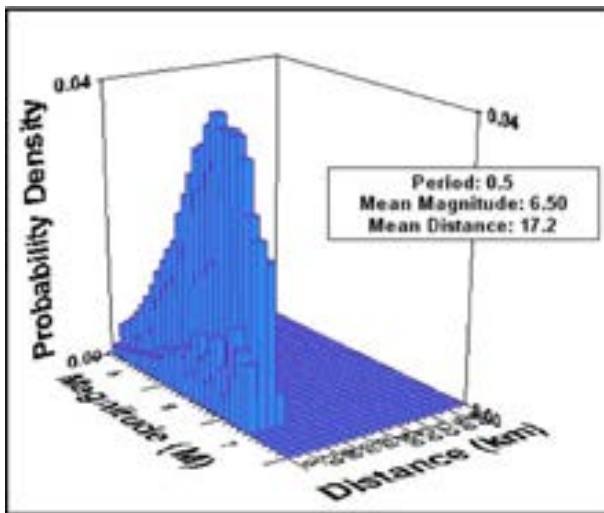
در دهه اخیر، در کنار تحلیل خطر زلزله، تفکیک خطر لرزه‌ای نیز مطرح شده که نقطه مقابل روش قدیمی تعیین می‌باشد. از این روش برای برآورد زمین لرزه کنترل کننده در فواصل مختلف و در نهایت شتاب حاصله استفاده می‌شود. فرآیند تعیین مشارکت نسبی در خطر لرزه‌ای برحسب بزرگا و فاصله، تفکیک خطر لرزه‌ای نامیده می‌شود که در آن میزان مشارکت چشمه‌های لرزه‌ای (برای فواصل مختلف و بزرگی‌های مختلف)، در شتاب حاصله ارائه می‌گردد تا مشخص شود که کدام چشمه لرزه‌ای بیشترین تأثیر را در لرزه خیزی منطقه مورد نظر

$$\bar{M} = \frac{\sum M_i h_i}{\sum h_i} \quad \bar{R} = \frac{\sum R_i h_i}{\sum h_i} \quad (1) \text{ رابطه}$$

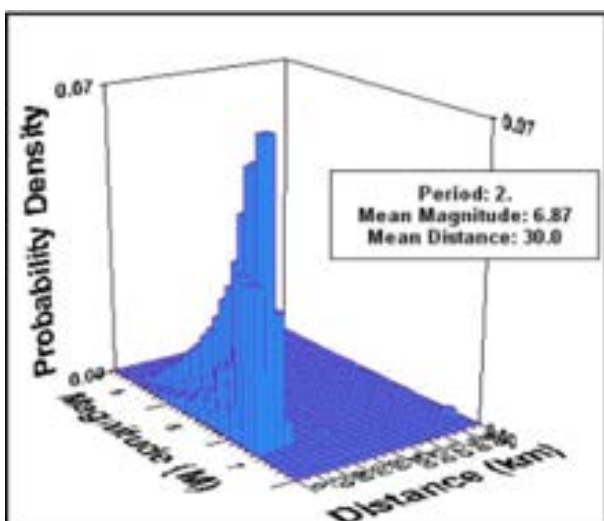
در این رابطه، M_i متوسط بزرگای چشمه‌ها و R_i متوسط فاصله چشمه‌ها در بسته i ام می‌باشد. جمع روی A ، مشارکت همه چشمه‌های لرزه‌ای را در نظر می‌گیرد. از آن جا که \bar{M} و \bar{R} مستقل از اندازه بسته‌ها است، پارامترهای مناسبی در تفکیک خطر لرزه‌ای می‌باشند. بنابراین انتخاب مقادیر \bar{M} و \bar{R} به دست آمده از تفکیک خطر لرزه‌ای یک انتخاب منطقی در شبیه‌سازی زلزله است. بزرگای کنترل کننده، نقطه میانی یک بازه از بزرگای زمین لرزه‌هایی است که احتمالاً کنترل کننده طراحی می‌باشد (جراحی ۱۳۹۰). جدایش خطر لرزه‌ای برای تعیین زمین لرزه‌های کنترل کننده، در محیط نرم افزار EZ-Frisk برای دوره بازگشت‌های ۴۷۵ و ۲۴۷۵ سال برای بیشینه شتاب و پریودهای ۰/۲، ۰/۵، ۲ و ۴ ثانیه بر حسب فاصله از سایت و بزرگای زمین لرزه، برای سد بایچه باغ محاسبه شد (جدول ۵ و تصاویر ۵ تا ۱۴).



تصویر ۶- جدایش خطر لرزه‌ای برای دوره بازگشت ۴۷۵ سال در پریود ۰/۲ ثانیه.



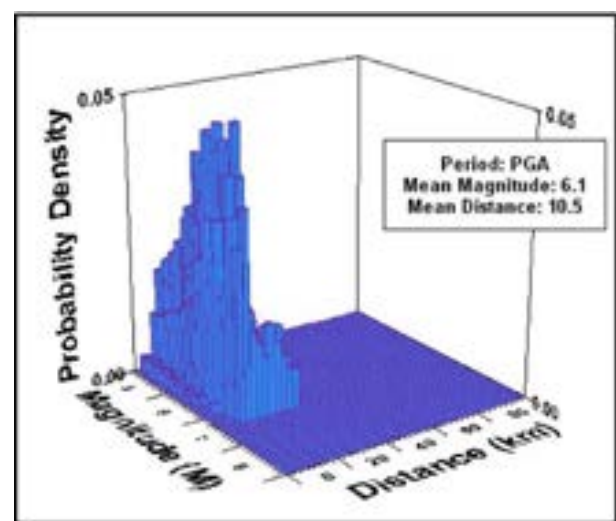
تصویر ۷- جدایش خطر لرزه‌ای برای دوره بازگشت ۴۷۵ سال در پریود ۰/۵ ثانیه.



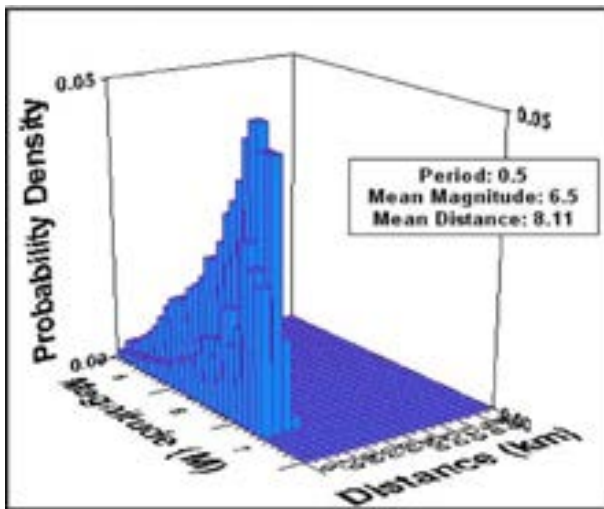
تصویر ۸- جدایش خطر لرزه‌ای برای دوره بازگشت ۴۷۵ سال در پریود ۲ ثانیه.

جدول ۵- زمین لرزه‌های کنترل کننده بر حسب فاصله برای دوره بازگشت‌های ۴۷۵ و ۲۴۷۵ سال

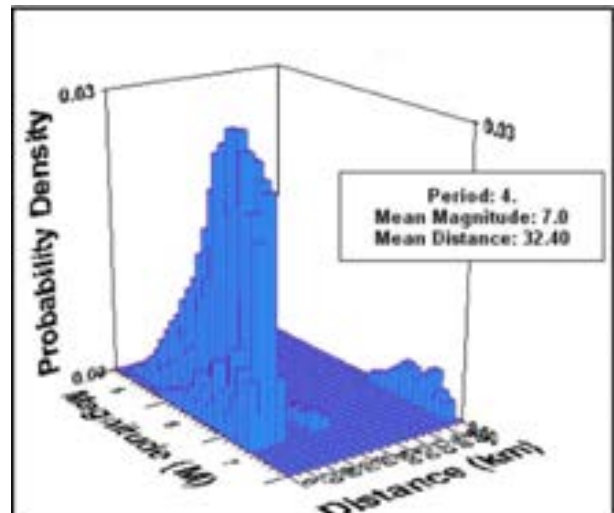
دوره بازگشت (سال)		فاصله (کیلومتر)	پریود (ثانیه)	PGA
۲۴۷۵	۴۷۵			
۶/۵	۶/۵	۱۰/۵	۰/۲	۰/۲
۶/۵	۶/۵	۱۱/۶	۰/۵	۰/۵
۶/۵	۶/۵	۱۷/۲	۲	۲
۶/۹	۶/۹	۳۰	۴	۴
۷	۷	۳۲/۴		



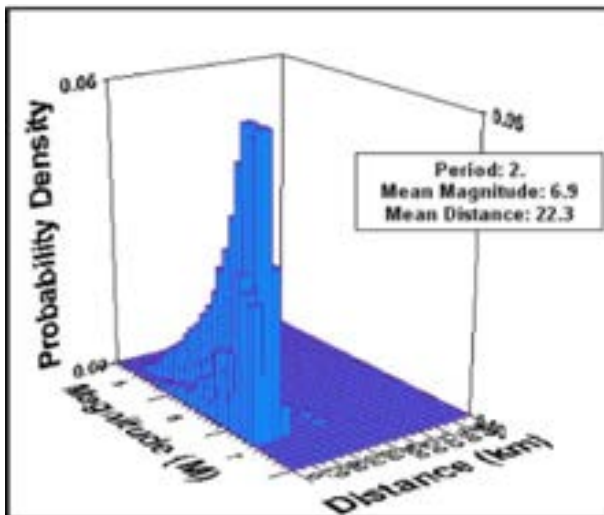
تصویر ۵- جدایش خطر لرزه‌ای برای دوره بازگشت ۴۷۵ سال در بیشینه شتاب.



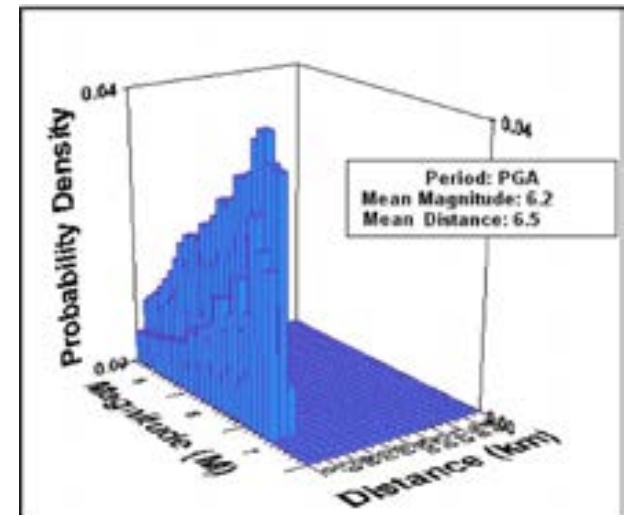
تصویر ۱۲- جدایش خطر لرزه ای برای دوره بازگشت ۲۴۷۵ سال در پیوند ۰/۵ ثانیه.



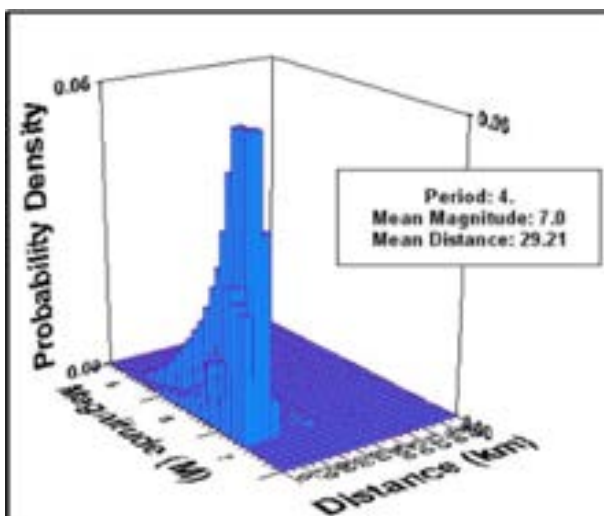
تصویر ۹- جدایش خطر لرزه ای برای دوره بازگشت ۴۷۵ سال در پیوند ۴ ثانیه.



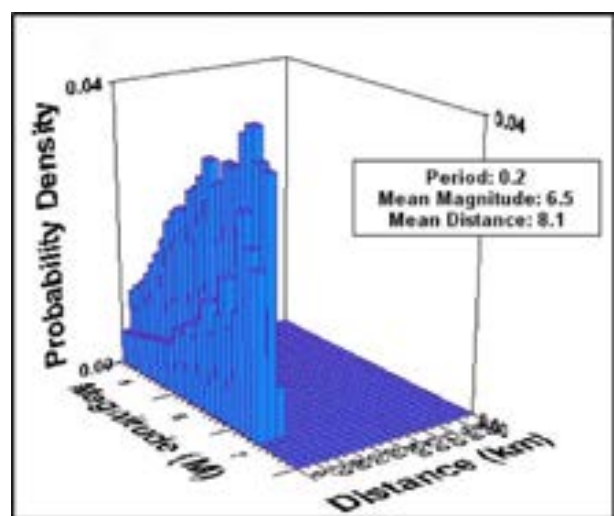
تصویر ۱۳- جدایش خطر لرزه ای برای دوره بازگشت ۲۴۷۵ سال در پیوند ۲ ثانیه.



تصویر ۱۰- جدایش خطر لرزه ای برای دوره بازگشت ۲۴۷۵ سال در بیشینه شتاب.



تصویر ۱۴- جدایش خطر لرزه ای برای دوره بازگشت ۲۴۷۵ سال در پیوند ۴ ثانیه.



تصویر ۱۱- جدایش خطر لرزه ای برای دوره بازگشت ۲۴۷۵ سال در پیوند ۰/۲ ثانیه.

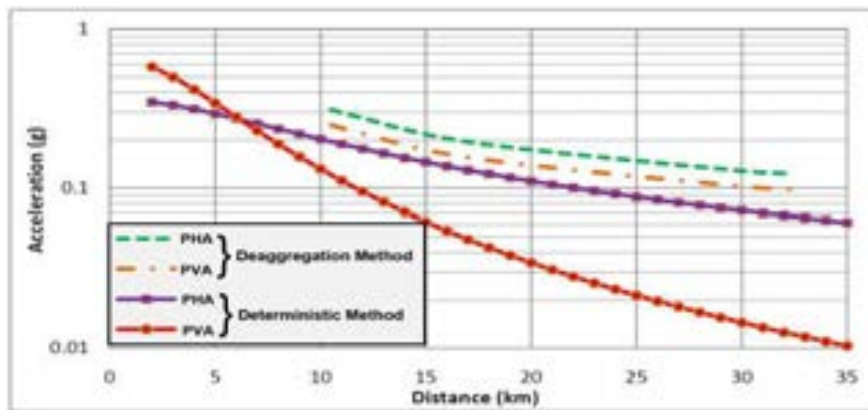
جراحی و همکاران: تأثیر انتخاب روشهای تحلیل خطر بر اقتصاد طرح سد بهجت آباد

جدول ۶- شتاب ناشی از زمین لرزه های کنترل کننده بر حسب فاصله برای دوره بازگشت ۲۴۷۵ سال

PVA	PHA	بزرگا	فاصله (کیلومتر)	پریود (ثانیه)	PGA
۰/۲۵	۰/۳۱	۶/۵	۱۰/۵	۰/۲	
۰/۲۳	۰/۲۸	۶/۵	۱۱/۶	۰/۵	
۰/۱۵	۰/۱۹	۶/۵	۱۷/۲	۲	
۰/۱	۰/۱۳	۶/۹	۳۰	۴	
۰/۱	۰/۱۲	۷/۰	۳۲/۴		

به طور کلی، پارامتر شتاب افقی و قائم برای دوره بازگشت ۲۴۷۵ سال از هر دو روش تعیینی (تصویر ۳) و جدایش خطر لرزه ای برآورد می شود (جدول ۶).

با توجه به نمودار شتاب-فاصله (تصویر ۱۵) حاصل از محاسبات فوق، روش جدایش خطر لرزه ای، دید واقع گرایانه تری را در ارتباط با زمین لرزه محتمل در ساختگاه سد نشان می دهد. بر این اساس، شتاب افقی و قائم محاسبه شده به روش جدایش خطر لرزه ای در پریود PGA به ترتیب ۴۴ درصد و ۲۷ درصد پایین تر از نتایج روش تعیینی است.

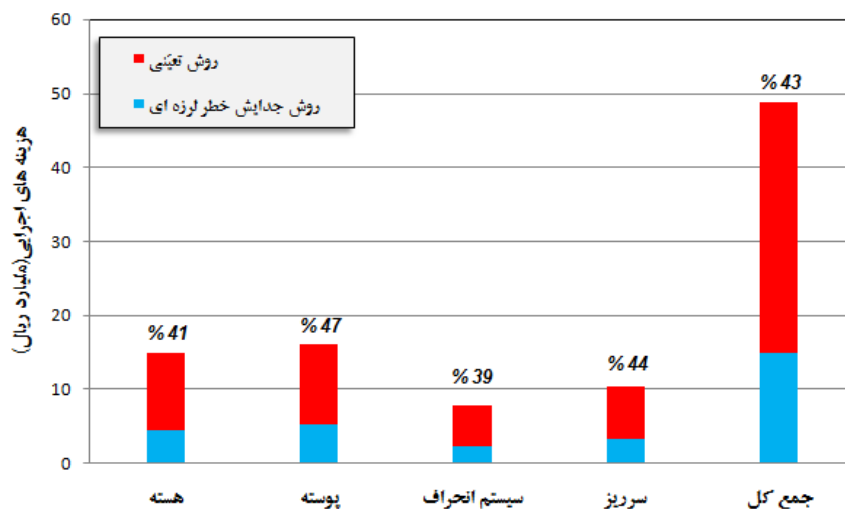


تصویر ۱۵- مقایسه شتاب نیرومند زمین در دوره بازگشت ۲۴۷۵ سال از روش تعیینی و جدایش خطر لرزه ای

مذکور، طراحی سد طی دو مرحله و بر اساس پارامترهای شتاب حاصل از هر دو روش صورت پذیرفت. تصویر ۱۶، نشان دهنده اختلاف ریالی در طراحی سد و پیامد اقتصادی هر دو روش می باشد. بر این اساس، به طور متوسط هزینه های طراحی سد بر مبنای نتایج روش جدایش خطر لرزه ای در مقایسه با روش تعیینی، به میزان ۴۳ درصد مقرون به صرفه تر بوده است.

۵- تأثیر در به گزینی اقتصادی

همان گونه که اشاره شد، در محاسبه زمین لرزه کنترل کننده به کمک روش جدایش خطر لرزه ای با وجود دقت بالای این روش، پارامترهای شتاب تا حد چشم گیری نسبت به روش تعیینی کاهش پیدا کرده است. طراحی این سد بر اساس سطح MCL انجام شد (گلابتونچی ۱۳۹۰). به منظور مقایسه اقتصادی بین نتایج دو روش



تصویر ۱۶- مقایسه هزینه های اقتصادی سد بهجت آباد

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، تحلیل خطر زمین لرزه برای ساختگاه سد بهجت آباد به روش‌های تعینی و احتمالی صورت پذیرفت. در این راستا به شناسایی چشمه‌های لرزه‌زا و برآورد حداکثر توان لرزه‌زایی آن‌ها و معرفی مهم‌ترین چشمه‌های لرزه‌زا نسبت به ساختگاه سد پرداخته شد. سپس شتاب نیرومند زمین برای سطوح مختلف لرزه‌ای جهت استفاده در طراحی سازه سد برآورد گردید. به منظور تعیین زمین لرزه کنترل‌کننده، جدایش خطر لرزه‌ای برای مشارکت توأم بزرگا-فاصله در ساختگاه سد مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. بر این اساس، میانگین احتمال خطر مربوط به فاصله‌های ۱۰، ۱۷ و ۳۰ کیلومتری از ساختگاه می‌باشد که هم‌خوانی مناسبی با ویژگی‌های گسل‌های طالقان، شمال قزوین و شمال کرج دارد. بنابراین می‌توان گفت که اگرچه گسل آبیگ در فاصله نزدیکتری (۲ کیلومتری) نسبت به ساختگاه سد قرار دارد ولی با در نظر گرفتن جدایش خطر لرزه‌ای، مشخص می‌شود که اهمیت گسل آبیگ کمتر از سایر چشمه‌های لرزه‌زا است. این مهم در طراحی لرزه‌ای سد بهجت آباد، مورد توجه قرار گرفت و مشخص گردید که در صورت طراحی سد بر اساس پارامترهای حاصل از روش جدایش خطر لرزه‌ای می‌توان حدود ۴۳ درصد در هزینه‌های اقتصادی عملیات اجرایی سد بهجت آباد صرفه‌جویی نمود.

همچنین پیشنهاد می‌گردد با توجه به اهمیت و بار مالی پروژه‌های عمرانی همانند سدها، نیروگاه‌ها، برج‌ها و ...، به جای روش تعینی از روش جدایش خطر لرزه‌ای برای تعیین زمین لرزه کنترل‌کننده در سطح طراحی MCL استفاده شود.

تشکر و قدر دانی

نگارندگان مقاله از مدیریت شرکت عمران فرآب به جهت در اختیار گذاشتن محیط، امکانات و اطلاعات مورد نیاز این پژوهش تشکر و قدردانی می‌نمایند.

مراجع

- گروه پژوهشی بهینه‌سازی مهندسی دانشکده فنی دانشگاه تهران، ۱۸۰ ص.
- گلاتونچی ا.، ۱۳۹۰، "گزارش فنی سد بهجت آباد"، شرکت عمران فرآب، کد: 101RDB011R/00، ۲۵۰ ص.
- معین فر، ع.، مهدویان ع.، مالکی ا.، ۱۳۷۳، "مجموعه اطلاعات پایه زلزله‌های ایران"، مرکز انتشارات مؤسسه نمایشگاه‌های فرهنگی ایران، ۴۴۶ ص.
- نیری، ع.، خادمی، ه.، حدادی، ح. و بهنام، م.، ۱۳۷۵، "استان‌های لرزه‌زمین ساخت ایران زمین"، کمیته فنی لرزه‌خیزی و مهندسی زمین لرزه در طراحی سدها، کمیته ملی سدهای بزرگ ایران، نشریه شماره ۱۲، ۳۲ ص.
- Ambraseys, N. N. & Melville, C. P., 1982, "A history of Persian earthquakes", Cambridge University Press, 219 pp.
- Ambraseys, N. N. & Jackson, J. A., 1998, "Faulting associated with historical and recent earthquakes in the eastern Mediterranean region", *Geophysics Journal Int.*, Vol. 133 (2): 390-406.
- Ambraseys, N. N., Douglas, J., Sarma, S. K. & Smit, P. M., 2005, "Equation for the estimation of strong ground motions from shallow crustal earthquakes using data from Europe and the Middle East: Horizontal peak ground acceleration and spectral acceleration", *Bulletin of Earthquake Engineering*, Vol. 3 (1): 1-53.
- Abrahamson, N. A. & Silva, W. J., 1997, "Empirical Response Spectral Attenuation Relations for Shallow Crustal Earthquakes", *Seismological Research Letters*, Vol. 68 (1): 94-127.
- Bazzurro, P. & Cornell, A., 1999, "Deaggregation of seismic hazard", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Ottawa, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Vol. 89 (2): 501-520.
- Berberian, M., 1976, "An explanatory note on the first seismotectonic map of Iran; a seismo-tectonic review of the country", *Geological Survey of Iran*, Vol. 39: 7-141.
- Berberian, M., 1995, "Natural Hazards and the First Earthquake Catalogue of Iran", Vol. 1: *Historical Hazards in Iran Prior to 1900, A UNESCO/IIIES Publication during UN/IDNDR, IIIES, Tehran*, 649 pp.
- Campbell, K. W. & Bozorgnia Y., 2003, "Updated Near-Source Ground Motion (Attenuation) Relation for the Horizontal and Vertical Components of Peak Ground Acceleration and Acceleration Response Spectra", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 93 (1): 314-331.
- 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 Journal Int.*, Vol. 167 (2): 761-778.
- EZ-FRISK 7.62 User's Manual, 2012.
- Gardner, J. K. & L. Knopoff, 1974, "Is the sequence of earthquakes in Southern California, with aftershocks removed, Poissonian?", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 64 (5): 1363-1367.
- Gutenberg, B. & Richter, C. F., 1956, "Earthquake Magnitude, Intensity, Energy and Acceleration", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 26 (3): 163-168.
- زاد اسلامی، واحد تهران شمال، ۲۵۰ ص.
- زارع، م.، ۱۳۷۴، "رابطه‌های مناسب برای بزرگا، شدت و بیشینه شتاب افقی بر اساس زمین لرزه‌های ایران"، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، سال ۴ (۶): ۱۲-۱۳.
- قلی‌پور، ی.، بزرگ‌نیا، ی.، رهنما، م.، بربریان، م.، قریشی، م.، طالبیان، م.، نظری، ح.، شجاع‌طاهری، ج. و شفیعی، ع.، ۱۳۹۰، "تحلیل خطر لرزه‌ای ایران - فاز ۱ محدود تهران بزرگ"، جلد ۱،

of the Seismological Society of America, Vol. 46 (2): 105-145.

Harmsen, S. & Frankel, A. 2001, "Geographic Deaggregation of seismic hazard in the United States", *Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 91: 13-26.*

Kijko, A. & Sellevoll, M. A., 1992, "Estimation of Earthquake Hazard Parameters from Incomplete Data Files. Part II. Incorporation of Magnitude Heterogeneity", *Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 82 (1): 120-134.*

Kijko A., 2011, "Introduction to Probabilistic Seismic Hazard Analysis", *Encyclopedia of Solid Earth Geophysics, Harsh Gupta (Ed.), Springer.*

Martini, P.M., Hessami K., Pantosti D., Addezio, D., Alinaghi H. & Ghafory-Ashtiani, M., 1997, "A geologic contribution to the evaluation of the seismic potential of the Kahrizak fault (Tehran, Iran)", *Tectonophysics, Vol. 287: 187-199.*

Nazari, H., 2005, "Seismotectonic map of the Central Alborz", *Geological Survey of Iran, Seismotectonic Department, 1:250,000 color map.*

Nazari, H., Ritz, J.-F., Salamati, R., Shafei, A., Ghassemi, A., Michelot, J.-L., Massault, M. & Ghorashi, M., 2009, "Morphological and palaeoseismological analysis along the Taleghan fault (central Alborz, Iran)" *Geophysical Journal International, Vol. 178: 1028-1041.*

Nowroozi, A.A., 1985, "Empirical relations between magnitudes and fault parameters for earthquakes in Iran", *Bulletin of the Seismological Society of America. Vol. 75: 1327-1338.*

Powell, J. A. & Duda, S. J., 1975, "A Statistical Study of Earthquake Occurrence", *Pageoph, Vol. 113: 447-460.*

Ritz, J.F., Balescu, S., Sleymani, S., Abbassi, M., Nazari, H., Fegghi, K., Shabani, E., Tabassi, H., Farbod, Y., Lamothe, M., Michelot, J.L., Massault, M., Chéry, J. & Vernant, P., 2003, "Geometry, kinematics and slip rate along the Mosha active fault, central Alborz", *Nice, France, EGU-AGU-EUG Joint Assembly, 03-A-06057.*

Ritz, J.-F., Nazari, H., Balescu, S., Lamothe, M., Salamati, R., Ghassemi, A., Shafei, A., Ghorashi, M. & Saidi, A., 2012, "Paleoearthquakes of the past 30,000 years along the North Tehran Fault (Iran)", *Journal of Geophysics, Research, Vol. 117 (B6), doi: 10.1029/2012JB009147.*

Somerville, P., Collins, N., Abrahamson, N., Graves, R. & Saikia, C., 2001, "Ground Motion Attenuation Relations for the Central and Eastern United States", *US Geological Survey, Award99HQGR0098, Final Reports.*

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, Vol. 84 (4): 974-1002.*