

تحلیل لرزه‌ای با استفاده از کاتالوگ ثبت شده و شبیه‌سازی شده: مطالعه‌ی موردی شهر تهران، ایران

محمدعلی ابراهیمی

دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه اراک، اراک، ایران
m.a.ebrahimi68@gmail.com

علیرضا آذربخت

استادیار، دانشگاه اراک، اراک، ایران
a-azarbakht@araku.ac.ir

کلید واژه‌ها: تحلیل احتمالاتی خطر لرزه‌ای، شبیه‌سازی، کاتالوگ لرزه‌ای

چکیده

این مطالعه به تحلیل احتمالاتی خطر لرزه‌ای برای منطقه‌ی تهران بزرگ پرداخته است. در این مطالعه از سه کاتالوگ لرزه‌ای استفاده شده است: (الف) کاتالوگ ثبت شده با استفاده از مطالعات پیشین؛ شاهوار و زارع (۲۰۱۳) و بربریان (۱۹۹۴)، (ب) کاتالوگ شبیه‌سازی شده با استفاده از الگوریتم شبیه‌سازی هان و چوی (۲۰۰۸) و (ج) کاتالوگ شبیه‌سازی شده با استفاده از نرم‌افزار EqHaz. در ادامه تمامی رخدادهای جنبش زمین به فاصله‌ی ۲۰۰ کیلومتری شهر تهران برای این مطالعه در نظر گرفته شده است. پس‌لرزه و پیش‌لرزه‌ها با استفاده از الگوی ارائه شده توسط گاردنر و نوپوف (۱۹۷۴) از این کاتالوگ حذف شده است. منطقه‌ی مورد مطالعه به ۱۱ چشمه‌ی لرزه‌ای تقسیم بندی شده و با توجه به وجود زلزله‌های تاریخی، مولفه‌های لرزه‌ای این مناطق با استفاده از الگوی ارائه شده توسط کیکو و سلول (۱۹۸۹ و ۱۹۹۲) و مطالعه‌ی ولز و کوپراسمیت (۱۹۹۴) محاسبه شده است. به منظور بررسی نتایج بدست آمده در این مرحله، مولفه‌های لرزه‌ای منطقه با مطالعه‌ی توکلی و غفوری آشتیانی (۱۹۹۹) مقایسه شده است. در ادامه به منظور صحت سنجی نتایج این مطالعه، منحنی خطر بدست آمده برای داده‌های ثبت شده با نتایج مطالعه‌ی قلی‌پور و همکاران (۲۰۰۸) مقایسه شد که حاکی از صحت نتایج بدست آمده دارد. به منظور مقایسه‌ی اثر انتخاب کاتالوگ‌های لرزه‌ای مختلف، این روند برای کاتالوگ شبیه‌سازی شده با استفاده از الگوریتم شبیه‌سازی هان و چوی و کاتالوگ شبیه‌سازی شده با استفاده از نرم‌افزار EqHaz نیز انجام شده است. نتایج بدست آمده برای منحنی خطر با استفاده از کاتالوگ شبیه‌سازی شده با استفاده از نرم‌افزار EqHaz کاملاً مطابق با منحنی خطر بدست آمده با استفاده از کاتالوگ ثبت شده می‌باشد. منحنی خطر بدست آمده با استفاده از کاتالوگ بدست آمده با استفاده از الگوریتم هان و چوی (۲۰۰۸) مقایسه‌ی متفاوت را نسبت به منحنی خطر بدست آمده با استفاده از کاتالوگ ثبت شده نشان داده است. علت این موضوع را می‌توان در شاخص لرزه‌خیزی منطقه دانست در کاتالوگ ایجاد شده با استفاده از الگوریتم هان و چوی (۲۰۰۸) دارای مقادیری تفاوت نسبت به سایر روش‌های موجود می‌باشد.

مقدمه

در بسیاری از تحلیل‌های مهندسی زلزله، هدف نهایی تعیین مقدار حرکت زمین در یک سطح خطر مورد نظر است تا بتوان با استفاده از آن اقدام به طراحی سازه کرد، به نحوی که بتوان پایداری آن را تامین نمود (بیکر ۲۰۰۸). امروزه در میان روش‌های تحلیل خطر لرزه‌ای مورد استفاده بیشترین استفاده از تحلیل احتمالاتی خطر^۱ انجام می‌شود. این مدل توسط کرنل (۱۹۶۸) بیان شده و توسط مک گوایر (۱۹۷۶ و ۱۹۷۷) و

1. Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA)

ریتر (۱۹۹۰) تکمیل شد. در نهایت توسط مک گوایر (۱۹۹۵) به صورت رابطه‌ی (۱) درآمد و تا به امروز بسیار گسترش یافته است. اساس این روش تئوری احتمال کل است که احتمال رخداد یک مقدار شتاب در سایت مورد نظر که به وسیله ی در نظر گرفتن اثر مشترک احتمال شرطی مقدار شتاب بدست آمده از یک زلزله ی موجود با در نظر گرفتن بزرگا و فاصله ی مشخص بدست می آید را محاسبه می کند (موسون ۲۰۰۰). در این مدل تحلیلی از رابطه‌ی گوتنبرگ - ریشتر به منظور بیان حد بالای بزرگا استفاده می‌شود. البته می‌توان برای یک گسل یا یک منبع لرزه‌ای خاص، از یک مدل زمین لرزه‌ای کارا کتری استفاده کرد (شوآرتز و کوپراسمیت ۱۹۸۴).

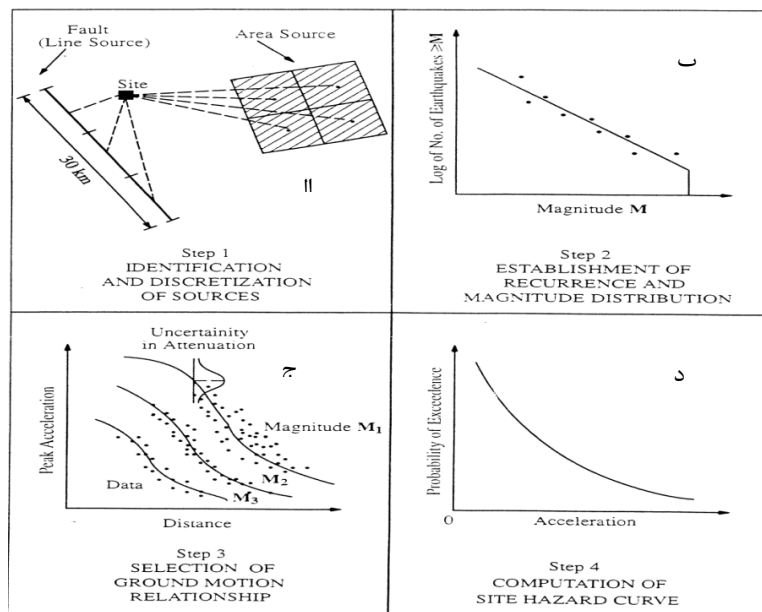
هدف از برآورد پتانسیل خطر زمین‌لرزه، ارزیابی منطقی پارامترهای جنبش زمین (بیشینه شتاب^۲، بیشینه سرعت^۳، شدت^۴ و غیره) در یک ناحیه در مدت زمان معین، که معمولاً عمر مفید سازه است، می‌باشد. همچنین با توجه به آسیب‌پذیری شدید ساختمان‌های مسکونی در مناطق شهری و روستایی، تحلیل خطر لرزه‌ای در برآورد صحیح تلفات انسانی و زیانهای اقتصادی ناشی از آن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و همچنین نتایج تحلیل خطر می‌تواند در سیاست‌گذاری دولت و شناسایی مناطق پر خطر مهم باشد.

$$\lambda(IM > x) = \sum_{i=1}^{n_{sources}} \lambda(M_i > m_{min}) \int_{m_{min}}^{m_{max}} \int_0^{r_{max}} P(IM > x | m, r) f_m(M) f_r(R) dm dr \quad (1)$$

که در آن، IM^5 معیار اندازه‌گیری شدت، $\lambda(IM > x)$ نرخ رخداد $IM > x$ ، M بزرگای گشتاوری، m_{min} حداقل بزرگای قابل قبول، $\lambda(M_i > m_{min})$ نرخ رخداد زلزله‌های بزرگتر از زلزله‌ی حداقل برای هر منبع لرزه‌ای، $P(IM > x | m, r)$ که مقدار آن از روابط پیش‌بینی حرکت زمین^۶ محاسبه می‌شود، $f(M)$ و $f(R)$ تابع چگالی احتمال بزرگا و فاصله هستند.

تحلیل احتمالاتی خطر لرزه‌ای

به طور کلی فرایند تحلیل خطر را می‌توان در چهار گام زیر خلاصه کرد که به صورت شماتیک در شکل ۱ نیز می‌توان مشاهده کرد:



شکل ۱: گام‌های محاسباتی در تحلیل خطر احتمالاتی زلزله (گرین و هال ۱۹۹۴)

(الف) شناسایی چشمه‌های لرزه‌زا فعال بر مبنای مطالعه لرزه زمین، (ب) تعیین رابطه بین بزرگا و نرخ وقوع رخدادها بر پایه مطالعه لرزه‌خیزی، (ج) انتخاب رابطه کاهندگی مناسب جهت برآورد مشخصه جنبش‌های زمین (د) محاسبه منحنی خطر با تجمیع نظام‌مند عدم قطعیت‌های مختلف در بزرگا و فاصله.

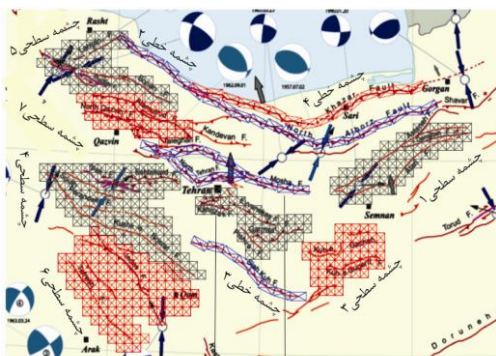
2. Peak Ground Acceleration (PGA)
3. Peak Ground Velocity (PGV)
4. Intensity
5. Intensity measure
6. Ground motion prediction equations (GMPEs)



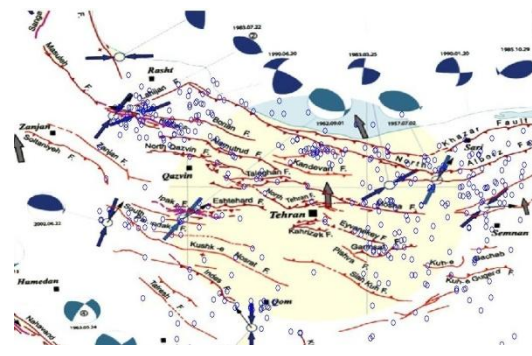
به منظور تحلیل خطر شهر تهران در مرحله اول به جمع‌آوری رخدادهای شتاب حرکت زمین پرداخته شده است. این کار با استفاده از دو منبع اطلاعاتی به شرح زیر صورت گرفته است:

- ۱- اطلاعات زلزله‌های تاریخی گزارش شده توسط بربریان (۱۹۹۴)
- ۲- اطلاعات جمع‌آوری شده از سال ۱۹۹۰ تا سال ۲۰۱۲ توسط شاهوار و زارع (۲۰۱۳) شامل بزرگای گشتاوری

شهر تهران در مختصات جغرافیایی به طول $35/69$ درجه شمالی و $51/42$ درجه شرقی قرار دارد، اطلاعات رخداد حرکت زمین در محدوده جغرافیایی $49/7$ درجه تا $53/6$ درجه شرقی و $33/8$ درجه تا $37/5$ درجه شمالی که محدوده‌ای به شعاع ۲۰۰ کیلومتری شهر تهران را در بر می‌گرفت مورد بررسی قرار داده شده است. در نهایت تعداد ۳۸۲ رخداد برای این محدوده جغرافیایی یافت شد. نتایج این اطلاعات بر روی نقشه‌های گسل‌های ایران که توسط سایت پژوهشگاه بین‌المللی زلزله در دسترس است که در شکل شماره ۲ قابل مشاهده می‌باشد.



شکل ۳: نواحی و خط‌های لرزه‌ای در نظر گرفته شده برای منطقه مورد مطالعه



شکل ۲: رخدادهای حرکت زمین در فاصله ۲۰۰ کیلومتری شهر تهران

تمامی بزرگاها به بزرگای گشتاوری تبدیل شد که این کار برای تبدیل بزرگا در مقیاس امواج سطحی زمین^۷ و بزرگا در مقیاس امواج درونی زمین^۸ به بزرگای گشتاوری^۹ از روابط ارائه شده توسط اسکوردیلیس (۲۰۰۶) و برای تبدیل بزرگای محلی^{۱۰} به بزرگای گشتاوری از رابطه ارائه شده توسط شجاع طاهری (۲۰۰۷) استفاده شده است. هر سه رابطه در جدول ۱ قابل مشاهده می‌باشند.

جدول ۱: روابط تبدیل انواع بزرگا به بزرگای گشتاوری

$M_w = 0.85(\pm 0.04)M_b + 1.3(\pm 0.32)$	$3.5 \leq M_b \leq 6.2$
$M_w = 0.67(\pm 0.005)M_s + 2.07(\pm 0.03)$	$3.0 \leq M_s \leq 6.1$
$M_l = 3.36(\pm 0.12)\ln(M_w) + 0.09 \pm 0.20$	

که در آن M_w بزرگای گشتاوری، M_l بزرگای محلی، M_s بزرگا در مقیاس امواج درونی زمین و M_b بزرگا در مقیاس امواج سطحی زمین است. در ادامه با استفاده از روش مختلف گاردنر و نوپوف (۱۹۷۴) اقدام به حذف پس‌لرزه‌ها شد. این روش به این صورت بود که برای رخدادهای موجود در هر گسل، یک خط بین لگاریتم زمان رخدادها و بزرگا و یک بار نیز بین لگاریتم فاصله و بزرگا طبق رابطه‌های ۲ و ۳ برازش می‌شود و رخدادهایی که در هر رابطه، بالاتر از خط برازش شده باشند به عنوان رخدادهای اصلی و سایر رخدادها به عنوان پس‌لرزه و پیش‌لرزه در نظر گرفته می‌شوند. همان‌طور که در مطالعه‌ی گاردنر و نوپوف (۱۹۷۴) اشاره شده است، این روش برای رخدادهایی تا بزرگای $6/4$ قابل قبول است. برای بررسی رخدادهای بزرگ‌تر از $6/4$ از رابطه‌ی ارائه شده توسط ون سیفات و همکاران (۲۰۰۶) استفاده شد که در ادامه به عنوان رابطه‌ی ۴ آمده است. در شکل ۴ و ۵ رخدادهای زمین و خط‌های برازش شده را برای چشمه‌ی سطحی شماره ۳ در شکل ۳ را می‌توان مشاهده کرد. هم‌چنین مقادیر بدست آمده برای فاصله زمانی و مکانی نیز برای این چشمه‌ی لرزه‌ای در جدول ۲ آمده است. پس از حذف پس‌لرزه‌ها توسط این روش که برای هر گسل به صورت جداگانه انجام شد، تعداد ۲۳۷ زلزله برای این منطقه جغرافیایی شناسایی شد.

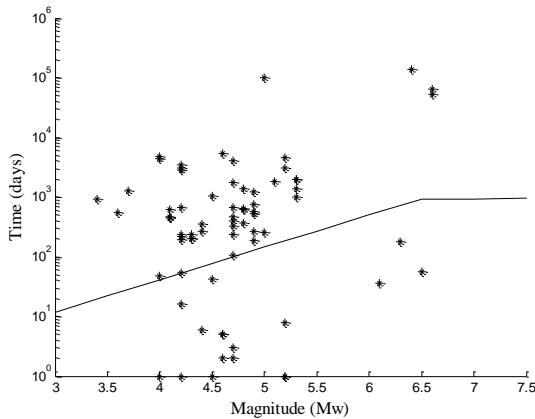
7. Surface wave magnitude (Ms)
8. Body wave magnitude (Mb)
9. Moment magnitude (Mw)
10. Local magnitude (Ml)

$$\log(T)=a_1M+b_1 \quad (2)$$

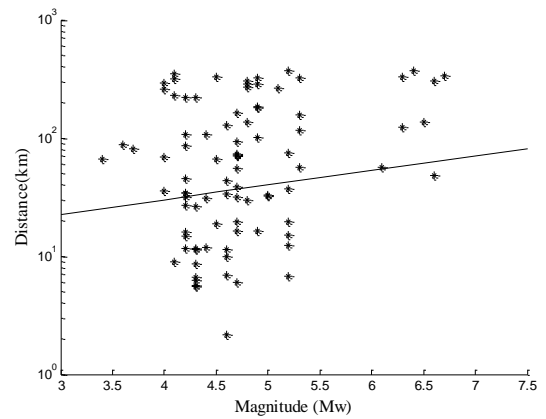
$$\log(R)=a_2M+b_2 \quad (3)$$

$$T=10^{0.032M+2.7389} \quad (4)$$

که در آن، T ، فاصله‌ی زمانی هر یک از رخدادها، M بزرگای رخدادها، R فاصله‌ی هر یک از رخدادها و a_1, a_2, b_1 و b_2 به ترتیب شیب و عرض از مبدا خط برازش شده می‌باشند.



شکل ۵: خط برازش شده با توجه به رابطه ۲ و ۵ رخدادهای ثبت شده در چشمه سطحی ۳



شکل ۴: خط برازش شده با توجه به رابطه ۲ رخدادهای ثبت شده در چشمه سطحی ۳

جدول ۲: فاصله‌های مکانی و زمانی برای بزرگای مختلف برای چشمه سطحی ۳ در شکل ۳

بزرگا (بزرگای گشتاوری)	فاصله زمانی (روز)	فاصله مکانی (کیلومتر)
۳	۱۱/۹	۲۲/۶
۳/۵	۱۸/۲	۲۶/۱
۴	۴۱/۴	۳۰/۱
۴/۵	۷۷/۱	۳۴/۷
۵	۱۴۳/۷	۴۰
۵/۵	۲۶۷/۹	۴۶/۱
۶	۴۹۹/۳	۵۳/۲
۶/۵	۹۳۰/۸	۶۱/۳
۷	۹۳۵/۱	۷۰/۷
۷/۵	۹۵۲/۶	۸۱/۶

با توجه به وجود زلزله‌های تاریخی در داده‌ها، برای محاسبه‌ی بتا و نرخ رخداد زلزله‌ی حداقل هر منبع لرزه‌ای از روش کیجو (۱۹۸۹ و ۱۹۹۲) و با استفاده از نرم افزار kijko2001 استفاده شد. برای این کار لازم بود ابتدا بیشینه‌ی زلزله‌ی قابل رخداد در هر گسل و یا ناحیه‌ی لرزه‌خیزی محاسبه شود که برای این کار از روابط موجود در ولز و کوپراسمیت (۱۹۹۴) استفاده شد. با توجه به اینکه این روابط بر مبنای طول گسلش ارائه شده بودند، به منظور محاسبه‌ی طول گسلش از مقاله‌ی ولز و کوپراسمیت (۱۹۹۴) که اشاره کرده بود طول گسلش برای زلزله‌ها ۲۰٪ طول گسل است و تحقیقات بیاسی (۲۰۰۶) که در آن بیان شده بود حداقل طول گسلشی که باید در نظر گرفته شود ۵۰ کیلومتر است، بیشینه‌ی این دو مقدار به عنوان طول گسلش در نظر گرفته شد. نوع هر گسل نیز با استفاده از نقشه‌ی گسل‌های ایران که توسط پژوهشگاه بین‌المللی زلزله ارائه شده است در نظر گرفته شد. در پایان مقایسه‌ی نتایج کار در بخش محاسبه‌ی بزرگترین زلزله‌ی قابل رخداد، بتا و نرخ رخداد زلزله‌ی حداقل به همراه مقایسه با تحقیقات توکلی و غفوری آشتیانی (۱۹۹۹) در جدول ۳ آمده است.

همان طور که در جدول ۳ نیز مشاهده می شود، مقادیر ارائه شده توسط توکلی و غفوری آشتیانی (۱۹۹۹) برای هر ایالت لرزه ای، در واقع نزدیک به بزرگ ترین مقدار محاسبه شده از نتایج حاصل از روش کیکو (۱۹۸۹ و ۱۹۹۲) بر مبنای داده های مستخرج از ولز و کوپراسمیت (۱۹۹۴) و بیاسی (۲۰۰۶) برای داده های مرتبط با آن ایالت لرزه ای می باشد.

جدول ۳: نتایج اطلاعات کلی نواحی لرزه ای و مقایسه ی داده آنها با توکلی (۱۹۹۹)

ردیف	نام گسل	تعداد زمین لرزه	طول گسل (کیلومتر)	نوع گسل	حداکثر بزرگای قابل رخداد (طبق رابطه ی ۴)	بتا (با استفاده از نرم افزار Kijko2001)	مطالعه ی توکلی و غفوری آشتیانی (۱۹۹۹)	
							شماره ایالت لرزه ای	حداکثر بزرگای قابل رخداد
۱	مشا	۲۸	۱۶۵	امتداد لغز	۱۱۷/۳	۱/۹۴	۱۵	۷/۹
۲	شمال البرز	۵۴	۴۲۸	معکوس	۷/۳۶	۱/۷۹	۱۵	۷/۹
۳	آستانه	۳۵	۱۸۰	امتداد لغز	۷/۰۷	۲/۰۴	۱۵	۷/۹
۴	کندوان		۸۵	معکوس				
۵	سیاه کوه	۱۲	۱۴۵	معکوس	۷/۰۷	۱/۹۲	۸	۷/۴
۶	ایوانکی	۱۷	۹۵	معکوس				
۷	گرمسار		۷۰	معکوس	۷/۰۷	۱/۹۶	۱۵	۷/۹
۸	پیشوا		۴۰	نرمال				
۹	کوه گوگرد	۱۴	۷۰	معکوس	۷/۰۷	۲/۲	۸	۷/۴
۱۰	خزر	۱۷	۲۹۵	معکوس	۷/۱۶	۲/۱۱	۲۰	۷/۵
۱۱	کوشک نصرت	۲۵	۲۲۵	نرمال				
۱۲	اشتهارد		۷۰	معکوس	۷/۰۷	۱/۴۸	۸	۷/۴
۱۳	ایپک		۷۰	معکوس				
۱۴	جنوب پزندک		۱۲۰	نرمال				
۱۵	رودبار	۱۹	۷۵	معکوس				
۱۶	بنان		۷۰	نرمال	۷/۱	۱/۹۶	۱۵	۷/۹
۱۷	ماسوله		۹۵	معکوس				
۱۸	اینده	۱۸	۹۸	معکوس	۷/۰۷	۲/۰۲	۹	۷/۳
۱۹	تفرش		۱۲۰	نرمال				
۲۰	علمورت رود	۱۲	۱۳۵	معکوس	۷/۰۷	۲/۲	۱۵	۷/۹
۲۱	شمال قزوین		۷۵	معکوس				

برای انجام تحلیل احتمالاتی خطر لرزه ای منطقه، با استفاده از رابطه ۱ که توسط مک گوایر (۱۹۹۵) ارائه شده صورت گرفته است. محاسبه ی تابع چگالی احتمال بزرگا طبق رابطه ۵ که توسط کرنل (۱۹۶۸) ارائه شده است، انجام شده است.

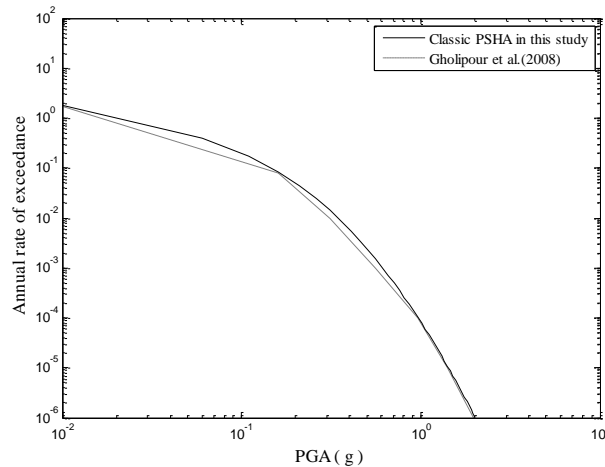
$$f_M(m) = k\beta e^{-\beta(m-m_{min})}, m_{min} \leq m \leq m_{max} \quad (5)$$

$$k = [1 - e^{-\beta(m_{max}-m_{min})}]^{-1}$$

که در آن $f(m)$ تابع چگالی احتمال بزرگا، β قدر مطلق شیب خط برازش شده بین بزرگا و لگاریتم نرخ رخداد زمین لرزه، m بزرگای مورد نظر، m_{min} حداقل بزرگای در نظر گرفته شده، m_{max} حداکثر بزرگای قابل ایجاد توسط گسل در ناحیه لرزه ای مورد نظر و k ضریب ثابت است.

۱۱- بزرگای گشتاوری محاسبه شده توسط رابطه ۷/۱ بود ولی با توجه به اینکه بزرگترین زمین لرزه ی ثبت شده دارای بزرگای گشتاوری ۷/۳ بود، این مقدار در نظر گرفته شد.

تابع چگالی احتمال فاصله به این صورت تعریف شد که احتمال رخداد زلزله در تمامی فاصله‌ها به یک میزان در نظر گرفته شود و رابطه‌ی پیش‌بینی حرکت زمین مورد استفاده در این تحلیل، مدل پیش‌بینی جنبش حرکت زمین ارائه شده توسط بور و اتکینسون (۲۰۰۸) بود. با توجه به اینکه در این رابطه نیاز به بیان نوع گسل و سرعت موج برشی خاک نیز بود، نوع گسل‌ها مطابق با جدول ۳ در نظر گرفته شد. سرعت موج برشی خاک نیز از مطالعه‌ی زارع و غفوری‌آشتیانی (۱۹۹۹) و هم چنین داده‌های ثبت شده توسط مرکز تحقیقات مسکن و ساختمان بدست آمده است. منحنی خطر حاصل از این تحلیل در مقایسه با گزارش ارائه شده توسط قلی‌پور و همکاران (۲۰۰۸) در شکل ۶ آمده است. همان طور که در شکل ۶ قابل مشاهده است، منحنی خطر بدست آمده انطباق قابل قبولی با منحنی خطر ارائه شده در این گزارش دارد که حاکی از صحت تحلیل خطر انجام شده در این مرحله است.



شکل ۶: مقایسه منحنی خطر لرزه‌ای تهران بزرگ در گزارش قلی‌پور و همکاران (۲۰۰۸) و منحنی خطر ارائه شده در این مطالعه

کاتالوگ‌های شبیه‌سازی شده

به منظور ایجاد کاتالوگ شبیه‌سازی شده با استفاده از الگوریتم هان و چوی (۲۰۰۸) ابتدا منطقه‌ی مورد مطالعه به قسمت‌هایی به مقدار ۰/۱ درجه جغرافیایی تقسیم شده است. سپس نرخ رخداد برای هر یک از این قسمت‌ها تعیین شده و سپس با ۱۰ بار استفاده از ماتریس وزن ارائه شده در مطالعه‌ی فرانکل و همکاران (۱۹۹۶) به هموار کردن نرخ رخداد اقدام شده است. در ادامه توابع تجمعی احتمال بزرگا و محل رخداد بر مبنای آنچه که در کاتالوگ ثبت شده بود ایجاد شد. به منظور ایجاد زمین‌لرزه‌های شبیه‌سازی شده، یک عدد تصادفی بین صفر و یک برای تابع تجمعی احتمال بزرگا و یک بار برای محل رخداد در نظر گرفته شد. درایه متناظر با آن، بزرگا و محل رخداد زلزله‌ی شبیه‌سازی شده را بیان می‌کند.

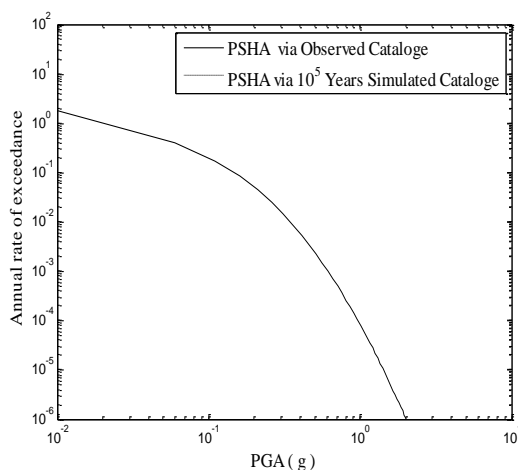
در ادامه به ایجاد کاتالوگ شبیه‌سازی شده با استفاده از نرم افزار EqHaz اقدام شده است. این نرم‌افزار که توسط استوریانز و اتکینسون (۲۰۱۳) ارائه شده است، یک نرم‌افزار متن آزاد^{۱۲} به زبان برنامه‌نویسی فورترن^{۱۳} برای تحلیل خطر لرزه‌ای با استفاده از رویکرد شبیه‌سازی مونت کارلو عمل می‌باشد. این نرم‌افزار با استفاده از پارامترهای لرزه‌ای یک منطقه مانند پارامترهای بتا و نرخ رخداد زلزله‌ی حداقل و حداکثر بزرگای قابل رخداد، اقدام به شبیه‌سازی کاتالوگ لرزه‌ای برای زلزله‌های بزرگتر از بزرگای حداقل می‌کند. این برنامه بسیار سریع، قابل انعطاف و آسان برای انجام تحلیل خطرهای متعارف است. قسمت اول این نرم‌افزار (EqHaz1) کاتالوگ زلزله‌ی مصنوعی برای هر منبع لرزه‌ای با توجه مولفه‌های لرزه‌خیزی ارائه شده به آن با زلزله‌های بزرگتر از زلزله‌ی حداقل ایجاد می‌کند. این نرم‌افزار می‌تواند کاتالوگ با طول‌های مشخص ایجاد کند و خروجی کاتالوگ مصنوعی آن شامل بخش‌های شماره‌ی زیر کاتالوگ، زمان، مختصات (طول و عرض جغرافیایی و عمق)، بزرگای زلزله، نام منبع زلزله و مولفه‌های لرزه‌ای مورد استفاده می‌باشد. روند انجام این برنامه به این صورت است که برنامه فایل ورودی را که شامل مولفه‌های لرزه‌ای گسل است می‌خواند. سپس با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو کاتالوگ مصنوعی را به نحوی ایجاد می‌کند که توزیع احتمال آن با مولفه‌های لرزه‌ای وارد شده در نرم‌افزار منطبق باشد.

12. Open Source

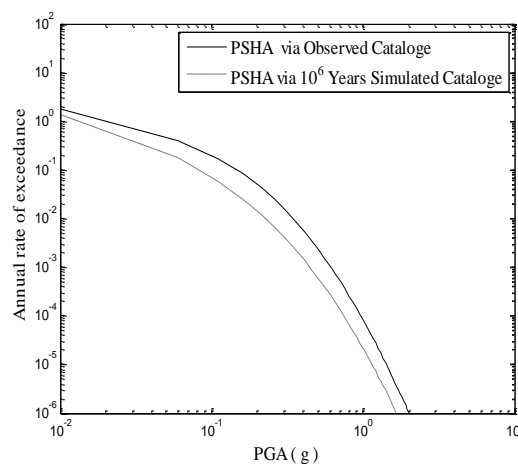
13. Fortran



به منظور تحلیل خطر لرزه‌ای با استفاده از کاتالوگ‌های شبیه‌سازی شده، مانند الگوی بیان شده انجام شده و مولفه‌های لرزه‌ای منطقه با استفاده از کاتالوگ شبیه‌سازی شده انجام شده است. نتایج این نمودارها در شکل های ۷ و ۸ آمده است. مقایسه‌ی منحنی های خطر ارائه شده در شکل ۷ نشان‌دهنده‌ی آن است که منحنی خطر حاصل از کاتالوگ شبیه‌سازی شده بر اساس الگوریتم هان و چوی (۲۰۰۸) نسبت به منحنی خطر ارائه شده با استفاده از کاتالوگ ثبت شده دارای تفاوت است. در شکل ۸ مشاهده می‌شود که دو منحنی خطر با استفاده از کاتالوگ شبیه‌سازی شده با استفاده از نرم افزار EqHaz و با استفاده از کاتالوگ ثبت شده کاملاً بر هم منطبق می‌باشد که این موضوع در مطالعه‌ی فرهادی (۱۳۹۳) نیز مشاهده شده است.



شکل ۸: منحنی خطر لرزه‌ای با استفاده از کاتالوگ ثبت شده و شبیه‌سازی شده توسط نرم‌افزار EqHaz



شکل ۷: منحنی خطر لرزه‌ای با استفاده از کاتالوگ ثبت شده و شبیه‌سازی شده توسط

نتیجه‌گیری

تفاوت در منحنی های خطر بدست آمده در شکل ۷، با توجه به ثابت بودن تمامی مولفه‌ها و فقط وجود تفاوت در کاتالوگ مورد استفاده، بیان‌گر تفاوت در شاخص لرزه‌ای بتا است. همان‌طور که در روش هان و چوی (۲۰۰۸) بیان شد، برای ایجاد کاتالوگ شبیه‌سازی شده ابتدا هر یک از نرخ‌های رخداد با نرخ‌های رخداد مناطق در همسایگی آن با استفاده از تابع وزن فرانکل و همکاران (۱۹۹۶) هموار شده است و سپس با استفاده از یک عدد رندوم به مقدار بزرگای هر یک از زلزله‌ها تعیین شده است. بنابراین مقدار شاخص لرزه‌خیزی بدست آمده دقیقاً مطابق با آنچه از کاتالوگ ثبت شده بدست می‌آید یکی نیست. روش کار در نرم‌افزار EqHaz برای شبیه‌سازی کاتالوگ به این صورت است که کاتالوگ با استفاده از شاخص لرزه‌ای منطقه و حداکثر بزرگای قابل رخداد، اقدام به ایجاد رخداد‌های زلزله می‌شود. این شبیه‌سازی به نحوی انجام می‌شود که در نهایت رخدادها دارای همان شاخص لرزه‌ای معرفی شده به نرم‌افزار را داشته باشند. بنابراین نتایج منحنی خطر برای کاتالوگ شبیه‌سازی شده با استفاده از نرم‌افزار EqHaz باید کاملاً بر منحنی خطر بدست آمده با استفاده از کاتالوگ ثبت شده منطبق باشد.

با توجه به این که در تحلیل خطر لرزه‌ای، تاثیر کاتالوگ در محاسبه‌ی شاخص لرزه‌ای منطقه می‌باشد، انتخاب الگوریتم شبیه‌سازی در نتایج تحلیل خطر می‌تواند تاثیر گذار باشد.

فهرست مراجع

- فرهادی ع (۱۳۹۳) مطالعه اثر لحاظ عدم قطعیت های تصادفی بر نتایج تحلیل خطر لرزه ای، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه اراک

Assatourians K and Atkinson GM (2013) EqHaz: An open source probabilistic seismic hazard code based on the Monte Carlo simulation approach, Seismological Research Letters 84.3: 516-524

Baker JW (2008) an introduction to probabilistic seismic hazard analysis (PSHA), White paper, version 1

- Berberian M (1994) Natural Hazards and the first earthquake catalogue of Iran. Vol. 1: Historical Hazards in Iran Prior to 1900, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, Tehran
- Biasi GP and Weldon RJ (2006) Estimating surface rupture length and magnitude of paleoearthquakes from point measurements of rupture displacement, *Bulletin of the Seismological Society of America* 96.5: 1612-1623
- Boore DM and Atkinson GM (2008) Ground-motion prediction equations for the average horizontal component of PGA, PGV, and 5%-damped PSA at spectral periods between 0.01 s and 10.0 s." *Earthquake Spectra*, 24(1), 99-138
- Building and Housing Research Center (BHRC) Available from <http://www.bhrc.ac.ir/portal/>. Accessed February 2014
- Council for Geoscience (CGS) Available from <http://www.geoscience.org.za> Accessed September 2013
- Frankel AD et al (1996) National seismic-hazard maps: documentation June 1996." US Geological Survey
- Engineering Seismology Toolbox Available from <http://www.seismotoolbox.ca>. Accessed August 2014
- Gardner JK and Knopoff L (1974) Is the sequence of earthquakes in southern California, with aftershocks removed, Poissonian, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 64.5: 1363-1367
- Gholipour Y, Bozorgnia Y, Rahnama M, Berberian M and Shojataheri J (2008) Probabilistic seismic hazard analysis, phase I—greater Tehran regions. Final report, Faculty of Engineering, University of Tehran, Tehran
- Green RA and Hall WJ (1994) An overview of selected seismic hazard analysis methodologies, University of Illinois Engineering Experiment Station. College of Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign

