

استفاده مستقیم از نتایج شبیه‌سازی زلزله در تحلیل خطر احتمالاتی وابسته به زمان مطالعه موردی تهران

بابک حاجی محمدی^۱، حمید زعفرانی^{۲*}، عباس قلندرزاده^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی زلزله، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران

۲- استادیار، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

۳- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران

چکیده

در تحلیل خطر مرسوم برای برآورد عدم قطعیت موجود در حرکت زلزله به طور متداول از روابط کاهندگی استفاده می‌شود. این روابط کاهندگی معمولاً با استفاده از شتابنگاشت‌های زلزله‌هایی که در گذشته واقع شده و ثبت گردیده‌اند، به دست می‌آیند. از آنجا که در مناطق نزدیک به گسل تاریخچه ثبت رکورد زلزله در سراسر دنیا بسیار اندک است، نقص عمده‌ی اکثر روابط کاهندگی، عدم کارایی مناسب آن‌ها در حوزه نزدیک گسل می‌باشد. در این مطالعه برای پرهیز از کاستی‌های روابط کاهندگی مرسوم در حوزه نزدیک، نتایج شبیه‌سازی صورت گرفته در مطالعات گذشته [1] و [2] بدون تبدیلی آن‌ها به رابطه کاهندگی، به طور مستقیم در برآورد تحلیلی خطر احتمالاتی تابع زمان (غی‌پواسونی) گسل شمال استفاده شده است. گسل شمال تهران از شمال شهر تهران عبور می‌کند که در صورت گسیختگی محتمل، قطعاً اثرات حوزه نزدیک در شهر تهران دیده خواهد شد. این مساله ضرورت توجه ویژه به حرکات حوزه نزدیک در برآورد خطر احتمالی ناشی از فعالیت این گسل را نشان می‌دهد.

کلمات کلیدی: شبیه‌سازی زلزله، تحلیلی خطر احتمالاتی تابع زمان، گسل شمال تهران، حوزه نزدیک.

Time-Dependent Probabilistic Seismic Hazard Analysis Using the Simulated Records, the Case of Tehran

Babak Hajimohammadi¹, Hamid Zafarani^{2*}, Abbas Ghalandarzadeh³

1- MSc Student in Earthquake Engineering, Department of Civil Engineering, University of Tehran

2-Assistant Professor, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES)

3- Associate Professor, Department of Civil Engineering, University of Tehran

Abstract

Common attenuation equations are developed by seismic records which belong to earthquakes that have happened so far. Although there are many recorded data during last 50 years, it is not possible to consider all

* مؤلف مسئول: حمید زعفرانی hamzafarani@yahoo.com

تاریخ دریافت مقاله: ۹۳/۱/۱۸، تاریخ پذیرش مقاله: ۹۳/۱۲/۱۴

possible wave propagation paths, site types and fault rupture mechanisms in classical attenuation relations. This fact becomes more serious in near field cases and a common shortcoming in most attenuation equations is their low accuracy in estimation of near field parameters. Many important cities of the world such as Tehran are located nearby some active faults. For example, the North Tehran Fault is such a close seismic source to Tehran Metropolitan area and could be considered as a near field source. Therefore, it is necessary to evaluate near field effects in most of hazard analyses, risk management programs, structural designs, etc. In past, it was routine to use attenuation equations in hazard analyses. In this project for avoiding from insufficient performance of attenuation equations in near field, proposed simulation datum by Zafarani, et al., (2012), were used directly in the hazard analysis without converting them into attenuation equations. Besides, time dependent hazard analysis (Non-Poissonian Model) was used to taking into account the probable seismic activity of the North Tehran Fault.

Keywords: Simulations, Near-field, North tehran fault, Non-poissonian model.

۱- مقدمه

شناخت خصوصیات پالس‌های پری‌د بلند برای طراحی سازه‌ها در حوزه نزدیک گسل از اهمیت زیادی برخوردار است. از سوی دیگر تعداد اندک شتابنگاشت‌های موجود در حوزه نزدیک، لزوم وارد کردن روش‌های شبیه‌سازی را در تخمین بهتر این حرکات ضروری ساخته است (برای نمونه بنگرین به [۳]).

روش‌های شبیه‌سازی به تکرار برای تولید سناریوهای لرزه ای تهدید کننده شهرهای بزرگ دنیا به کار رفته‌اند اما در اغلب موارد این سناریوها از نوع تعینی (حداکثر زلزله محتمل یا باورپذیر) بوده است. برای مثال؛ زعفرانی و همکاران [۴] از روش شبیه‌سازی برای برآورد زلزله حداکثر محتمل بر روی گسل شمال تهران استفاده کرده است. اما تاکنون در کشور از نتایج حاصل از روش‌های شبیه‌سازی در تحلیل احتمالاتی زلزله استفاده نشده است. در این مطالعه با توجه به نزدیکی گسل شمال تهران به شهر و اهمیت برآورد دقیق حرکات حوزه نزدیک آن در چهارچوب تحلیلی خطر احتمالی، برای اولین بار از نتایج شبیه‌سازی‌های صورت گرفته ([۱] و [۲]) به صورت مستقیم در چهارچوب تحلیلی خطر غیب‌سازنی استفاده شده است ([۵]).

۲- گسل شمال تهران

گسل شمال تهران مرز کوه و دشت در شمال تهران را تشکیل می‌دهد و در جنوب رشته کوه البرز واقع است [۶]. این گسل از لشگرک در شرق تهران، در نزدیکی گسل مشا، آغاز می‌شود و تا نزدیکی کرج ادامه می‌گیرد. طول آن به طور کلی ۱۱۰ کیلومتر است که قابل تفکیک به دو بخش شرقی (شمال شهر تهران) و غربی (شمال شهر کرج) با امتدادهای متفاوت می‌باشد (شکل ۱). با توجه به ترانشه حفر شده و تفسیری دی‌پنه لرزه‌شناسی نتایج آن توسط ریختر و همکاران [۷]، گسل شمال تهران در ۳۰۰۰۰ سال اخیر، ۶ تا ۷ بار در زلزله‌های مختلف گسیخته شده است. با فرض ۷ بار گسیختگی برای این گسل مقادیر گسیختگی به ترتیب رویدادشان برابر است با: $\{0.20, 0.20, 0.15, 0.20, 0.13+0.40, 1/58, 0.77\}$ بر حسب متر که دو زلزله اخیر نسبت به مابقی زلزله‌ها، مقادیر متفاوتی دارند که در ۸۰۰۰ سال گذشته واقع گشته‌اند. به کمک رابطه تجربی ولز و کوپر اسمیت [۸] می‌توان این مقادیر گسیختگی را بسته به این که حداکثر طی مکانی جانمایی در نظر گرفته شود، به بزرگای گشتاوری ارتباط داد. البته در این رابطه، انتخاب چگونگی سازوکار گسل نیز تعیین کننده است:

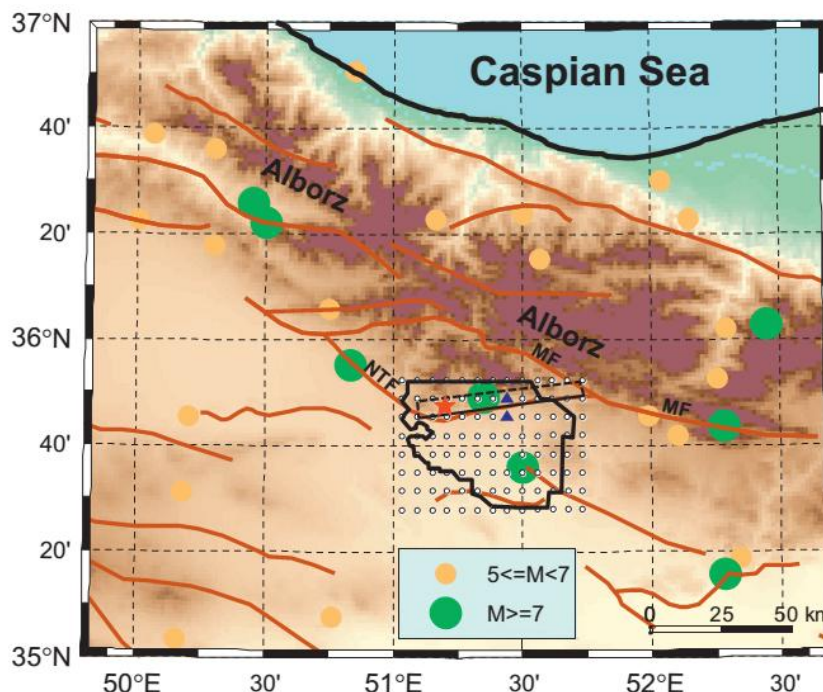
$$M_w = a + b \times \log(AD) \quad (1)$$

$$M_w = a + b \times \log(MD) \quad (2)$$

M_w : بزرگای گشتاوری، AD ^۱: میانگین جابه‌جایی و MD ^۲: بیشینه جابه‌جایی می‌باشند. به کمک این روابط مقادیر بزرگای گشتاوری در بازه‌ای بین ۶/۱ تا ۷/۲ به دست می‌آید. با توجه به ۷ زلزله محتمل نام‌برده برای گسل شمال تهران، می‌توان دوره‌ی بازگشت رخداد زلزله را برای آن برابر با ۳۸۰۰ سال با دقت ۷۰۰ سال^۳ تعیین کرد. البته دو زلزله اخیر این گسل که مربوط به سال‌های ۱۱۷۷ بعد میلاد و ۳۱۲-۲۸۰ قبل از میلاد می‌باشد، از این امر تبعیت نمی‌کنند و فاصله زمانی بین این دو رویداد تقریباً ۱۵۰۰ سال می‌باشد. بربریان و بی‌تس [۶] مقادیر ۷/۶ و ۶/۵، نظری و همکاران [۹] مقادیر ۷/۲ و ۶/۹ را با اولویت رخداد، برای بزرگای دو زلزله اخیر گسل شمال تهران برآورد کرده‌اند. در نهایت ریتز و همکاران [۷] حداکثر زلزله محتمل برای گسل شمال تهران با گسیختگی کامل ۱۱۰ کیلومتر تمامی طول آن را برابر با بزرگای ۷/۴ به دست آورده‌است.

۳- سناریوهای شبیه‌سازی در مطالعه زعفرانی و همکاران [۱] و [۲]

زعفرانی و همکاران [۱] و [۲] با کمک شبیه‌سازی ترکیبی تصادفی- تعینی حرکات ناشی از سناریوهای مختلف فعالیت گسل شمال تهران در شهر تهران را برآورد کرده‌اند. روش اجزای محدود- عدد موج گسسته [۱۰] و [۱۱] یکی از روش‌های تعینی شبیه‌سازی جنبش نیرومند زمین می‌باشد که در این تحقیق از آن برای شبیه‌سازی حرکات در فرکانس‌های پایین (زیر یک هرتز) استفاده شده است. برای شبیه‌سازی فرکانس‌های بالای حرکت از روش تصادفی گسل محدود با فرکانس گوشه دینامیکی [۱۲] استفاده شده است. روش به کار رفته قادر است که اثرات مدل سرعت لایه ای در محیط را در نظر بگیرد. برای بررسی نتایج شبیه‌سازی‌ها، ناحیه تهران با یک شبکه مستطیلی به ابعاد ۳۵ کیلومتر در ۶۵ کیلومتر به همراه ۱۰۵ سایت برداشت داده در نظر گرفته شده است. فاصله این نقاط در راستای عرض جغرافیایی ۶/۵ کیلومتر و در راستای طول جغرافیایی برابر ۵/۳ کیلومتر است (شکل ۱).



شکل ۱- جغرافیای ناحیه‌ی شبیه‌سازی لرزه‌ای، برگرفته از زعفرانی و همکاران [۱].

- 1- Average Displacement
- 2- Maximum Displacement
- 3- $3.8 \pm 0.7ka$ (ka : kiloannum)

در شکل ۱ رنگ‌های پس‌زمینه نشان‌دهنده‌ی توپوگرافی منطقه می‌باشد. رنگ سبز به عنوان نواحی با ارتفاع کم از سطح دریای آزاد و قهوه‌ای برای نواحی کوهستانی استفاده شده است. دایره‌های سفیدرنگ به منظور نمایش ۱۰۵ سایت استفاده شده در شبیه‌سازی به کار رفته است. تصویر گسل شمال تهران و ناحیه‌ی شهری تهران نیز در این شکل قابل مشاهده است. علامت ستاره نمایانگر نقطه آغاز گسیختگی و دو مثلث آبی نشان‌دهنده ایستگاه ۶۲ و ۶۳ هستند، که یکی بر روی گسل و دیگری در فاصله یک کیلومتری گسل واقع است. برای دیدن جزئیات بیشتر و نتایج آن به [۱] و [۲] رجوع شود.

در شبیه‌سازی‌ها سعی شده است که سناریوها به زلزله بزرگ محتمل گسل شمال تهران نزدیک باشند. سرعت گسیختگی، زمان اوج^۱، زاویه لغزش و میزان افت تنش پارامترهایی هستند که در سناریوها تغییر می‌کنند. شبیه‌سازی‌ها با فرض برداشت داده از روی سنگ انجام شده است. در شبیه‌سازی‌ها، برای رسیدن به مخرب‌ترین زلزله محتمل، فرض شده است که قسمت شرقی گسل (واقع در شمال شهر تهران) به طول ۵۸ کیلومتر به طور کامل گسیخته شده است که مطابق با زلزله با بزرگای ۷/۲ می‌باشد (شکل ۱). از زلزله‌های منجیل و طبس که به ترتیب در ۱۳۶۹/۰۳/۳۰^۲ به بزرگای گشتاوری ۷/۳ و در ۱۳۵۷/۰۶/۲۵^۳ با بزرگای گشتاوری ۷/۴ واقع گشته در تعیین خصوصیات لغزش روی گسل در شبیه‌سازی‌ها استفاده شده است. این دو زلزله از نظر ماهیت لرزه‌زمین‌ساختی در فلات ایران رخ داده و طبیعتاً به خصوصیات زلزله احتمالی گسل شمال تهران نزدیک هستند.

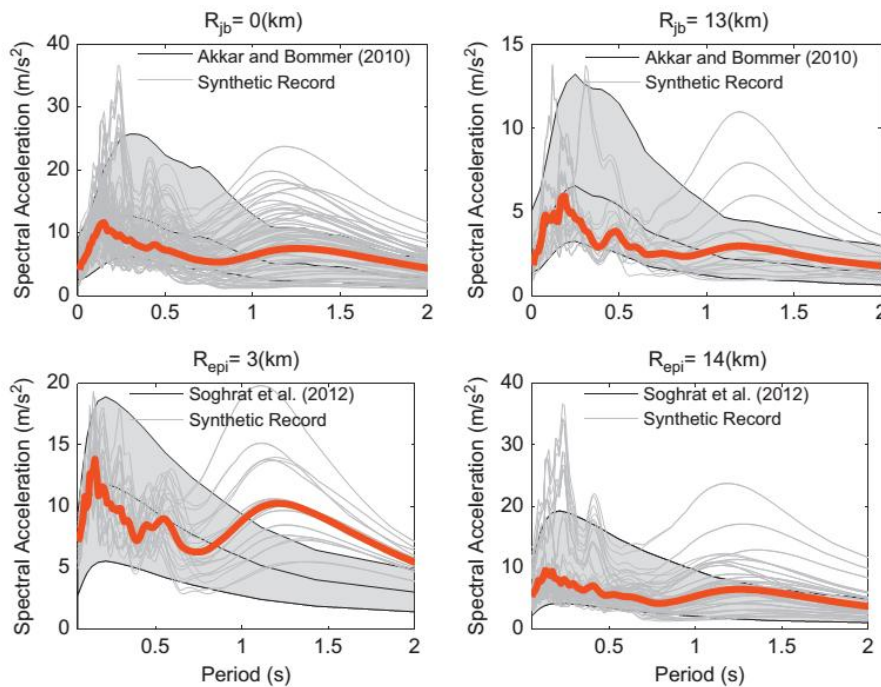
جدول ۱- مشخصات چشمه^۴ سناریوهای زلزله، بر گرفته از زعفرانی و همکاران [۱].

شماره	زاویه گسل	زمان اوج (s)	افت تنش (bars)	سرعت گسیختگی (km/s)
۱	۳۰°	۲/۹	۶۸	۲/۵
۲	۷۵°	۲/۹	۶۸	۲/۵
۳	۳۰°	۰/۷	۶۸	۲/۹
۴	۷۵°	۰/۷	۶۸	۲/۹
۵	۳۰°	۲/۲	۶۸	۲/۵
۶	۷۵°	۲/۲	۶۸	۲/۵
۷	۳۰°	۲/۹	۴۵	۲/۵
۸	۷۵°	۲/۹	۴۵	۲/۵
۹	۳۰°	۰/۷	۴۵	۲/۹
۱۰	۷۵°	۰/۷	۴۵	۲/۹
۱۱	۳۰°	۲/۲	۴۵	۲/۵
۱۲	۷۵°	۲/۲	۴۵	۲/۵

۴- مقایسه نتایج شبیه‌سازی و روابط کاهندگی

در شکل ۲ مقادیر حاصل از روابط کاهندگی به همراه انحراف استاندارد به صورت سایه خورده نمایش داده شده اند. میانگین نتایج شبیه‌سازی‌ها با خط قرمز ضخیم نشان داده شده است. اثر پالس پریرود بلند در میدان نزدیک در نتایج شبیه‌سازی مشهود است در حالی که در روابط کاهندگی این اثر در نظر گرفته نمی‌شود.

1- rise time
2- 20 Jun 1990
3- 16 Sep 1978
4- Source



شکل ۲- مقایسه طیف حاصل از نتایج شبیه‌سازی‌ها با میرایی ۵٪ با طیف حاصل از رابطه کاهندگی آکار و بومر [۱۳] (بالا) و سقراط و همکاران [۱۴] (پایین).

۵- مدل کردن گسل شمال تهران

با فرض اینکه آخرین بار در چه زمانی گسل مورد نظر دچار گسیختگی شده است و دوره بازگشت این زلزله چقدر است و عمر مفید مد نظر برای سازه، چند سال است، می‌توان به تحلیل خطر گسل شمال تهران به صورت غیرپواسونی پرداخت. در محاسبه این داده از مدل BPT استفاده شده است.

تابع چگالی احتمال مدل توزیع BPT برگرفته از متیو و همکاران [۱۵].

$$f_T(t) = \left(\frac{\mu}{2\pi c_v^2 t^3} \right)^{1/2} \exp\left\{ -\frac{(t-\mu)^2}{2c_v^2 \mu t} \right\} \quad (3)$$

$$c_v = \frac{\sigma_T}{T} \quad (4)$$

μ برابر با دوره‌ی بازگشت زلزله به سال، t مقدار زمان گذشته از آخرین فعالیت گسل به سال و c_v میزان انحراف استاندارد در مدل توزیع برونیان است. σ_T انحراف معیار استاندارد و T میانگین زمان درون رخدادی است. اگر گسل به طور کامل رفتاری متناوب و منظم داشت c_v برابر با صفر می‌باشد. در صورتی که رفتار آن کاملاً تصادفی (پواسونی) باشد، c_v برابر با یک و برای رفتار به صورت رخدادهای خوشه‌ای^۳ این مقدار بزرگتر از یک به دست می‌آید. یاکولف و همکاران [۱۶] c_v را برابر با مقادیری در بازه‌ی ۰/۵-۰/۷۵ برای مطالعه گسل به صورت انفرادی برآورد کرده است.

1- BPT: Brownian Passage Time
2- pdf: Probability density function
3- Clustered Recurrence

تابع توزیع تجمعی^۱

$$F(t) = p(0 \leq T \leq t) = \int_0^t f(T) dT \quad (5)$$

احتمال اینکه زلزله بعدی در زمانی بیش از گذشت t سال از آخرین زلزله اتفاق بیفتد:

$$p(t \leq T < \infty) = \int_t^{\infty} f(T) dT \quad (6)$$

احتمال اینکه زلزله در بازه زمانی بین t و $t + \Delta t$ واقع گردد، در حالی که t سال از آخرین زلزله گذشته باشد و عمر مفید بنای مورد نظر برابر با Δt باشد:

$$p(t < T < t + \Delta t | T > t) = p(t|\Delta t) = \frac{\int_t^{t+\Delta t} f(T) dT}{\int_t^{\infty} f(T) dT} \quad (7)$$

با توجه به تحقیقات ریتز و همکاران [۷] و مطالعه ۳۰,۰۰۰ ساله گسل شمال تهران، با صرف نظر کردن از فاصله بین دو زلزله اخیر^۲، می توان دوره ی بازگشت 3800 ± 700 را برای آن در نظر گرفت. با توجه به دو زلزله اخیر این گسل، دوره ی بازگشت را می توان به ۱۵۰۰ سال کاهش داد. برای به دست آوردن نمودارها و قیاس های مناسب، دو مقدار ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ سال نیز در نظر گرفته شده اند. پس با این تفاسیر، می توان ۶ مقدار برای دوره ی بازگشت زلزله با بزرگای بیش از ۷ برای گسل شمال تهران برآورد کرد.

$$\mu = \{1000, 1500, 2000, 3100, 3800, 4500\}$$

اگر فرض کنیم که گسل شمال تهران آخرین بار در سال ۱۱۷۷ میلادی گسیخته است:

$$t = 2014 - 1177 = 837 \cong 840 \quad (8)$$

با فرض اینکه گسل شمال تهران آخرین بار در سال ۳۱۲ قبل از میلاد گسیخته باشد:

$$t = 2014 - (-312) = 2326 \cong 2330 \quad (9)$$

به کمک مقادیر تعریف شده در روابط قبل، می توان حالات مختلفی از زلزله را برای گسل شمال تهران داشت. از این حالات، فقط مقادیر خاصی قابل استفاده در تحلیل خطر می باشند. عموماً زلزله طرح زلزله ای است که در ۵۰ سال عمر مفید سازه، برابر با احتمال ۱۰ درصد اتفاق بیفتد. زلزله حد نهایی زلزله ای است که در ۵۰ سال عمر مفید سازه، برابر با احتمال دو درصد اتفاق بیفتد. به کمک رابطه ۱۰، می توان دوره ی بازگشت این دو زلزله را برابر با ۴۷۵ و ۲۴۷۵ سال به دست آورد. در ادامه این مقادیر را برای ۱۰۰ سال آینده نیز می توان محاسبه کرد.

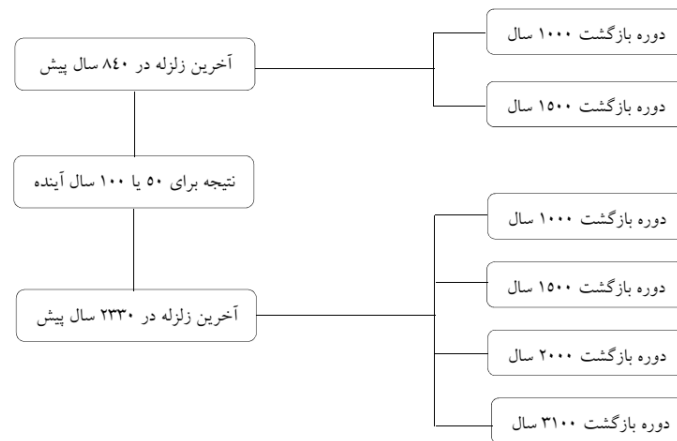
$$p = 1 - e^{-\lambda T} \quad (10)$$

p برابر با میزان احتمال، T عمر مفید بنا به سال و λ برابر با عکس دوره ی بازگشت می باشد. اگر یک رابطه برای محاسبه یک احتمال شرطی داشته باشیم، به عنوان نمونه:

1- cdf: cumulative distribution function
2- 312 B.C, 1177 A.C

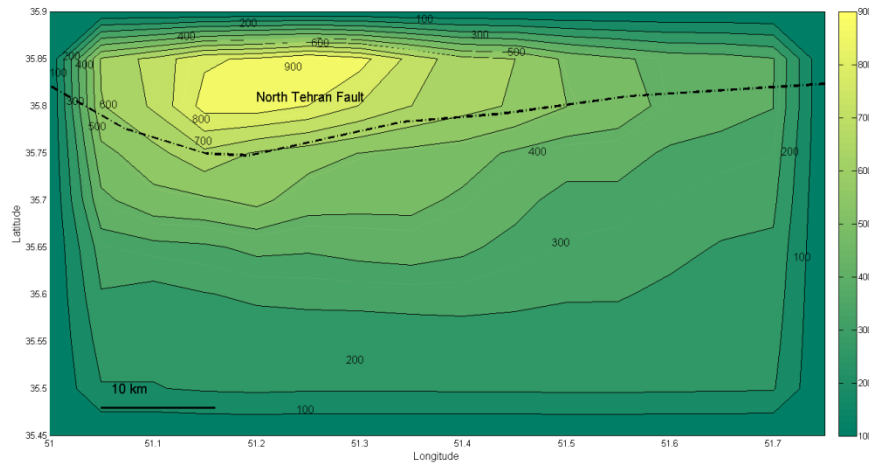
$$p[A \geq A_0 \cap EQ] = p[A \geq A_0|EQ].p[EQ] \quad (11)$$

در این رابطه A یک پارامتر لرزه خیزی زلزله و EQ احتمال رخداد زلزله است. اگر احتمال میزان رخداد زلزله به عنوان مثال ۱۰ درصد باشد، احتمال وقوع چنان زلزله‌ای برای اینکه پارامتر لرزه خیزی آن از A_0 بزرگتر باشد قطعا از ۱۰ درصد کمتر باید باشد. مشابه این امر در برنامه کرایسیس دیده می شود. در برنامه مقدار احتمالی که در فایل غیرپواسونی برآورد می شود همان مقدار EQ در رابطه ۱۱ و تحلیل خطر نهایی این زلزله همان مقدار $p[A \geq A_0 \cap EQ]$ می باشد. پس برنامه تحلیل خطر مورد استفاده، فقط فایل های غیر پواسونی که داده احتمال در آن از این مقدار بزرگتر باشد را بررسی می کند. پس می توان تحلیل خطر گسل شمال تهران را برای حالت های خاصی وابسته به احتمال برآورد شده در بخش غیرپواسونی انجام داد. در نهایت کلیه محاسبات تحلیل خطر برای زلزله بهره برداری در ۵۰ و ۱۰۰ سال آینده برآورد شده اند. نتایج نهایی حاصله در شکل ۴ و شکل ۵ آمده است. این نتایج از تمامی حالات محتمل لرزه خیزی گسل شمال حاصل شده است که به کمک تعریف در درخت منطقی (شکل ۳) با یکدیگر ترکیب شده اند.

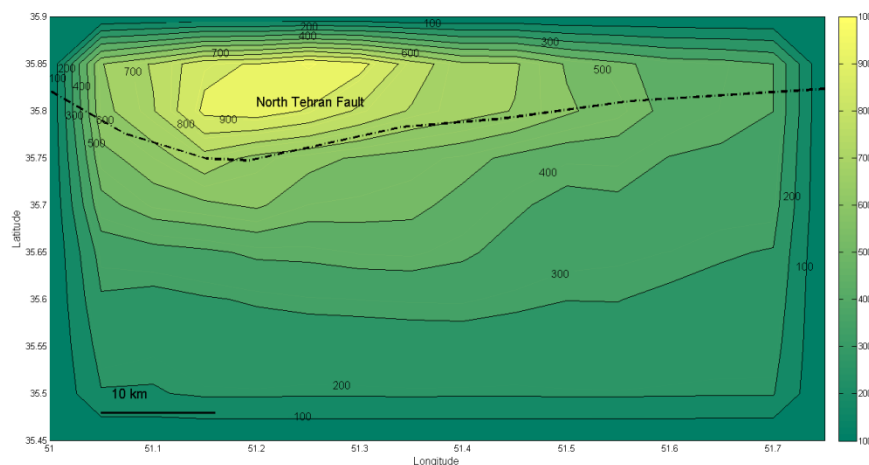


شکل ۳- درخت منطقی برای در نظر گرفتن تمامی حالات محتمل زلزله با توزیع غیرپواسونی برای گسل شمال تهران

در شکل ۳ برای دو دوره بازگشت ۱۵۰۰ و ۳۱۰۰ سال ضریب دو در نظر گرفته شد زیرا براساس منبع [۷] برآورد شده بودند ولی مقادیر ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ سال فرضی هستند. در ادامه با اینکه زمان وقوع آخرین زلزله، هر دو مربوط به [۷] می باشد، چون مستندات جدیدتر، موثقی تر از موارد گذشته می باشند، نسبت وزنی وقوع زلزله در ۸۴۰ سال پیش دو برابر وقوع زلزله در ۲۳۳۰ سال در نظر گرفته شد. از آنجایی که مقادیر احتمال در حالی که آخرین بار زلزله در ۸۴۰ سال پیش اتفاق افتاده باشد برای دوره های بازگشت ۲۰۰۰ و ۳۱۰۰ سال بسیار جزئی به دست آمدند، در ادامه محاسبات در نظر گرفته نشدند.



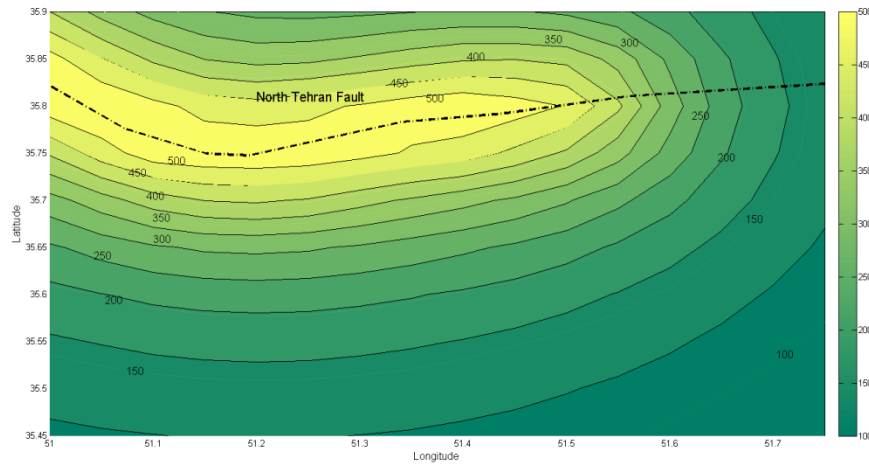
شکل ۴- نقشه تحلیل خطر شتاب بیشینه^۱ بر حسب گال^۲ برای زلزله با احتمال وقوع ۲ درصد در ۵۰ سال آینده با استفاده از نتایج شبیه سازی.



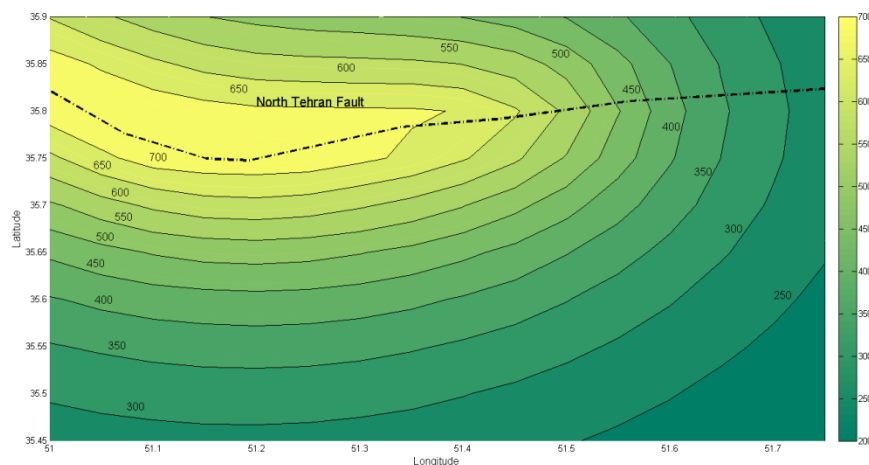
شکل ۵- نقشه تحلیل خطر شتاب بیشینه بر حسب گال برای زلزله با احتمال وقوع ۲ درصد در ۱۰۰ سال آینده با استفاده از نتایج شبیه سازی.

در شکل ۴ و شکل ۵ خط چین نمایشگر گسل شمال تهران است. جهت شمال به سمت بالا می باشد. از آنجایی که شمال گسل قسمت فرادیواره می باشد، تشدید شتاب در آن نواحی مشهودتر است. البته در نظر گرفتن اثر جهت پذیری زلزله و نقطه آغاز گسیختگی، که به کمک شبیه سازی در برآورد تحلیل خطر منظور شده مزید بر علت شده که تشدید شتاب بیشینه در این نقاط را در پیش داشته است. با بزرگتر شدن بازه مورد مطالعه، مقادیر شتاب نیز افزایش می یابند. رنگ های مختص به مقادیر شتاب که در نقشه با کانتور از هم جدا شده اند، در ستون رنگی واقع در سمت راست شکل توضیح داده شده است.

1- PGA: Peak Ground Acceleration
2- gal: cm/s²



شکل ۶- نقشه تحلیلی خطر شتاب بیشینه بر حسب گال برای زلزله با احتمال وقوع ۲ درصد در ۵۰ سال آینده، با استفاده از رابطه کاهندگی آکار و بومر [۱۳].



شکل ۷- نقشه تحلیلی خطر شتاب بیشینه بر حسب گال برای زلزله با احتمال وقوع ۴ درصد در ۱۰۰ سال آینده، با استفاده از رابطه کاهندگی آکار و بومر [۱۳].

مشخصات شکل ۶ و شکل ۷ مشابه شکل ۴ و شکل ۵ می‌باشد. در این دو شکل از رابطه کاهندگی آکار و بومر [۱۳] برای برآورد تحلیل خطر منطقه استفاده شده است. حساس بودن نتایج به دور شدن از گسل در این نتایج مشهود است. تفاوت عمده‌ای که این دو شکل با دو شکل قبلی دارند، تأثیر نداشتن چگونگی گسیخته شدن گسل و فرادیواره بودن شم ال گسل بر روی نتایج می‌باشد که در رابطه کاهندگی آکار و بومر قابل تعریف نیست.

۶- نتیجه گیری

با توجه به نتایج متفاوت حاصل از این روش جدید با محاسبات مرسوم تحلیل خطر، و حساسیت روش جدید به میانگین زمان رخداد زلزله‌ها، نیاز به مطالعات دقیقتر روی نرخ لغزش سالانه گسل‌های اطراف تهران (بخصوص دو گسل مشاء و گسل شمال تهران) احساس می‌شود. همچنین، پیش بینی می‌شود که به کمک تعریف سناریوهای متفاوت و جامع که کلیه حالات محتمل گسیختگی گسل شمال تهران

را در برگیرد بتوان به نتایج موثق تری دست یافته و بر ناکارایی محاسبات مربوط به حوزه نزدیک که از کمبود داده ها ناشی می شود فائق آمد. این سناریوها به عنوان نمونه می توانند نقطه آغاز و یا سرعت گسیختگی متفاوت را دارا باشند تا بتوان نزدیک ترین نتایج را به گسیختگی محتمل گسل شمال تهران به دست آورد. در ادامه توصیه می شود که از این روش برای گسل های دیگر واقع در حوزه نزدیک استفاده گردد تا بتوان تحلیل جامعی از لرزه خیزی مناطق شهری در نزدیکی گسل ها داشت. مطالعات دقیقتر روی نرخ لغزش سالانه گسل های اطراف تهران نیز به تدقیق نتایج منجر خواهد شد.

Archive of SID

7- مراجع

- [1] H. Zafarani, H. Vahidifard and A. Ansari, "Sensitivity of ground-motion scenarios to earthquake source parameters in the Tehran metropolitan area, Iran," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 43, pp. 342-354, 2012.
- [2] H. Zafarani, H. Vahidifard and A. Ansari, "Prediction of broadband ground-motion time histories: the case of Tehran, Iran," *Earthquake Spectra*, vol. 29, no. 2, pp. 633-660, 2013.
- [3] P. Spudich and B. Chiou, "Directivity in NGA earthquake ground motions: analysis using isochrone theory," *Earthquake Spectra*, vol. 24, no. 1, pp. 279-298, 2008.
- [4] H. Zafarani, A. Noorzad and K. Bargi, "Stochastic modeling of Iranian earthquakes and estimation of ground motion for future earthquakes in Greater Tehran," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 29, no. 4, pp. 722-741, 2009.
- [5] M. Villani, K. Demartinis, M. Vanini and E. Faccioli, "Application of ground shaking scenarios to PSHA and risk assessment in the near field," Ohrid, Republic of Macedonia, 2010.
- [6] M. Berberian and R. Yeats, "Patterns of historical earthquake rupture in the Iranian Plateau," *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 89, no. 1, pp. 120-139, 1999.
- [7] J.-F. Ritz, H. Nazari, S. Balescu, M. Lamothe, R. Salamati, A. Ghassemi, A. Shafei, M. Ghorashi and A. Sajdi, "Paleoearthquakes of the past 30,000 years along the North Tehran Fault (Iran)," *Journal of Geophysical Research: Solid Earth (1978-2012)*, vol. 117, no. B6, 2012.
- [8] D. Wells and K. Coppersmith, "New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area and surface displacement," *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 84, no. 4, pp. 974-1002, 1994.
- [9] H. Nazari, J. Ritz, R. Salamati, S. Solaymani, S. Balescu, J. Michelot, A. Ghassemi, M. Talebian, M. Lamothe and M. Massault, "Paleoseismological Analysis in central Alborz, Iran," in *50th anniversary earthquake conference commemorating the 1957 Gobi-Altay earthquake*, Ulaanbaatar, Mongolia, 2007.
- [10] A. Olson, J. Orcutt and G. Frazer, "The discrete wavenumber/finite element method for synthetic seismograms," *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, vol. 77, no. 2, pp. 421-460, 1984.
- [11] P. Spudich and L. Xu, "85.14 Software for calculating earthquake ground motions from finite faults in vertically varying," *International Geophysics*, vol. 81, pp. 1633-1634, 2003.
- [12] D. Motazedian and G. Atkinson, "Stochastic finite-fault modeling based on a dynamic corner frequency," *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 95, no. 3, pp. 995-1010, 2005.
- [13] S. Akkar and J. Bommer, "Empirical equations for the prediction of PGA, PGV, and spectral accelerations in Europe, the Mediterranean region, and the Middle East," *Seismological Research Letters*, vol. 81, no. 2, pp. 195-206, 2010.
- [14] M. Soghrat, N. Khaji and H. Zafarani, "Simulation of strong ground motion in northern Iran using the specific barrier model," *Geophysical Journal International*, vol. 188, no. 2, pp. 645-679, 2012.
- [15] M. Matthews, W. Ellsworth and P. Reasenber, "A Brownian model for recurrent earthquakes," *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 92, no. 6, pp. 2233-2250, 2002.
- [16] G. Yakovlev, D. Turcotte, J. Rundle and P. Rundle, "Simulation-based distributions of earthquake recurrence times on the San Andreas fault system," *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 96, no. 6, pp. 1995-2007, 2006.