



Probabilistic Seismic Hazard Analysis for Tehran and Suburbs by Using of First Order Second Moment Algorithm

M. Shamekhi Amiri, Kh. Mansouri Seresht*

Department of Civil Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

ABSTRACT: One of the most damaging natural disasters is an earthquake which random process of its motions has made predicting and preventing its occurrence impossible, but it is possible to reduce the probable damages caused by earthquakes through probabilistic seismic hazard studies. Iran is one the countries that always has been exposed to the damages of this natural phenomenon. The experiments of many countries that are at high risk of earthquakes, has shown that damages can be reduced when seismic hazard analysis is achieved in structural design process. Seismic hazard analysis requires the earthquake data and obviously more accurate data can lead to results with more precision. The magnitude, location and focal depth of the earthquakes are the most basic data that needs to be updated carefully. These parameters have a major role in the estimation of the probabilistic seismic hazard analysis in the different regions. The city of Tehran which is the capital and the most populous city of Iran was chosen as our study area. The current research includes a history of more than 300 earthquakes in the past 117 years, which has been analyzed for Tehran and its suburbs with the aim of conducting a new FOSM (First Order Second Moment) algorithm. In this method, four ground motion relationships with the same weight were also used. Based on given design seismic levels and the Iranian Standard No.2800, the present study had the PGA in two levels. The first level which is, Design Basis Earthquake (DBE) defines the peak horizontal accelerations with 10% probability of exceedance in 50 years that was expected to occur once in approximately 475 years. The second is Maximum Considered Earthquake (MCE) that defines the peak horizontal accelerations with 2% probability of exceedance in 50 years which was expected to occur once in approximately 2,475 years. According to the FOSM algorithm, the estimated PGA for both levels was 0.30061 g and 0.55666 g, respectively.

Review History:

Received: 8/21/2018
Revised: 10/19/2018
Accepted: 10/31/2018
Available Online: 12/15/2018

Keywords:

FOSM algorithms
Probability seismic hazard
Annual rate for earthquake
Design base
Return Period

1. INTRODUCTION

Earthquakes, as one of the most devastating and unpredictable natural hazards, have caused numerous loss of life and have had a significant economic impact in recent human history. The global seismic risks are amplified due to population increase, urbanization, and industrial development. While there is no way to prevent an earthquake, there are ways to locate, control and improve constructions and investments to minimize the disastrous effects [1]. Seismic hazard analyses involve the quantitative estimation of ground –shaking hazards at a particular site. Seismic hazards may be analyzing deterministically, as when a particular earthquake scenario is assumed, or probabilistically, in which uncertainties in earthquake size, location and time of occurrence are explicitly considered. Although seismic hazard analysis is a critical part of the development of design ground motions [2]. As a result, the key scope of this study was performing a new seismic hazard assessment for this high-seismicity region, using the FOSM¹ algorithm to estimate the

annual rate of the earthquake motions with the statistics of the earthquakes in the past 117 years that directly generates the uncertainty of the parameters in the results and highly effective in analyzing uncertainty. This method relies on the output variables by using the linearization of the functions of the variables and input parameters to the output variables.

2. PROBABILISTIC SEISMIC HAZARD ANALYSIS

PSHA² considers all possible magnitude earthquakes (usually above some minimum magnitude, on all significant sources, at all possible distances from the site, with consideration given to the likelihood of each combination. Therefore, using PSHA allows a potential facility to be designed for ground motion with a specified probability of exceedance. Obviously, the realism of a seismic hazard analysis is dependent on many factors, including the assumption that the sources chosen are realistic and reasonably complete (a difficult feat in itself in that one is estimating future seismic activity not only with regard to magnitude but also location) [3].

¹ First Order Second Moment

*Corresponding author's email: mansouri.khalil7@gmail.com

² Probabilistic Seismic Hazard Analysis



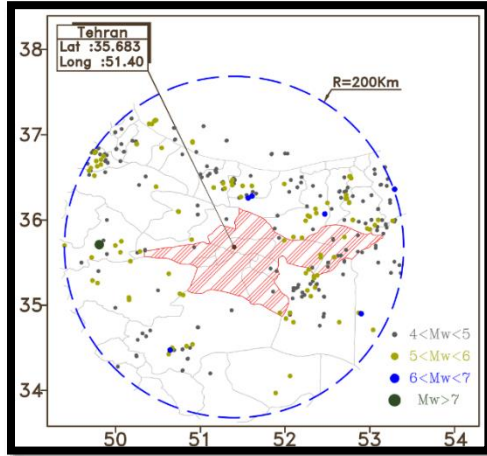


Fig. 1. The locations of 366 earthquakes from Tehran from 1900 until 2017

3. THE FOSM ALGORITHM

This method is based on the Taylor series expansion of the performance function about the expected values of the random variables. If only the first-order terms of the expansion are retained, the expected value of the performance function for independent random variables may be approximated by [4]:

$$E(Y) = f\{E(X_1), E(X_2), \dots, E(X_n)\} \tag{1}$$

Understandably, $E(X_i)$ is the mean value of X_i , the input data of probabilistic analysis. On the other hand, based on the FOSM algorithm, the variance of Y (denoted as $V(Y)$) can be approximated as follows [5]:

$$V(Y) = \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{\partial Y}{\partial X_i} V[X_i] \right\} + 2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \left\{ \frac{\partial Y}{\partial X_i} \frac{\partial Y}{\partial X_j} Cov[X_i, X_j] \right\}; \text{ for } i < j \tag{2}$$

where n denotes the number of X_i s, and Cov is the covariance between two variables. For the case that any of two input variables are independent of each other (covariance is zero when two variables are independent), the variance of Y can be approximated as follows [6]:

$$V(Y) = \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{\partial Y}{\partial X_i} V[X_i] \right\} \tag{3}$$

In summary, Eqs. (1)–(3) present the key algorithms of the FOSM probabilistic analysis, which is derived from the Taylor expansion on the performance function $Y = f(X_i, s)$ [5].

4. GROUND MOTION MODELS

As with any seismic hazard analysis, ground motion models are the performance function of such an analysis. Generally speaking, ground motion models are an empirical relationship characterizing the correlation between earthquake ground motion and earthquake magnitude and source-to-site distance combined. In this method, four ground

Table 1. Summary of the FOSM analyses for earthquake hazard analysis

Ground Motion Models	Variance	Standard Deviation
Amiri	0.138	0.371
Zare	0.145	0.380
Campbell & Bozorgnia	0.618	0.786
Akkar & Bommer	0.108	0.328

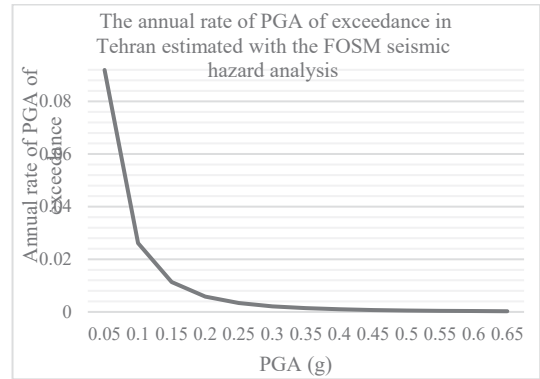


Fig. 2. Hazard Curve for Tehran estimated with FOSM algorithm

motion relationships with the same weight were also used. Amiri Ground motion model (2014), Zare Ground motion model (1999), Campbell & Bozorgnia Ground motion model (1994), Akkar & Bommer Ground motion model (2014) are the four ground motions that used.

5. FOSM SEISMIC HAZARD ANALYSIS

From the earthquake catalog, Figure 1 shows the spatial distribution of 366 earthquakes ($M_w > 4$ and $D < 200$ km) around the center of Tehran.

With such input data and the ground motion models given, the FOSM algorithm in Eqs. (1)– (3) was used in order to calculate the mean and variance PGA induced by such earthquakes, as well as its standard deviation. The output analysis is shown in Table 1.

6. HAZARD CURVE FOR TEHRAN ESTIMATED WITH THE FOSM ALGORITHM

With the input data, the governing Table 1, and using the standard deviation of the PGA for the probabilistic seismic hazard assessment, and calculated four hazard curves for each ground motion relationship and combination with same weight and drawn a unit hazard curve for Tehran in Figure 2.

7. RESULTS AND DISCUSSION

It has been pointed out that not a seismic hazard assessment is perfect without challenge so that the robustness of a seismic hazard analysis is not related to methodology, but to a transparent and repeatable process. Therefore, like many others, this FOSM seismic hazard assessment, which is repeatable with the same input data, is a new, scientific reference to the levels of seismic hazard in Tehran [5].

8. CONCLUSIONS

The result showed that the annual rate for the earthquake with induced PGA exceeds based on given design seismic levels and the Iranian Standard No.2800, The first level which is, Design Basis Earthquake (DBE) defines the peak horizontal accelerations with 10% probability of exceedance in 50 years that is expected to occur once in approximately 475 years. The second is the Maximum Considered Earthquake (MCE) that defines the peak horizontal accelerations with 2% probability of exceedance in 50 years which is expected to occur once in approximately 2,475 years. According to the FOSM algorithm the estimated PGA for both levels was 0.30061 g and 0.55666 g, respectively.

REFERENCES

- [1] Hashemi, M., A.A. Alesheikh, and M.R. Zolfaghari, *A spatio-temporal model for probabilistic seismic hazard zonation of Tehran*. Computers & geosciences, 2013. **58**: p. 8-18.
- [2] Kramer, S.L., *Geotechnical earthquake engineering. In prentice-Hall international series in civil engineering and engineering mechanics*. Prentice-Hall, New Jersey, 1996.
- [3] Green, R.A. and W.J. Hall, *An overview of selected seismic hazard analysis methodologies*. 1994, University of Illinois Engineering Experiment Station. College of Engineering. University of Illinois at Urbana-Champaign.
- [4] Ang, A.H.-S. and W.H. Tang, *Probability concepts in engineering: emphasis on applications in civil & environmental engineering*. Vol. 1. 2007: Wiley New York.
- [5] Wang, J. and Y.-M. Wu, *A new seismic hazard analysis using FOSM algorithms*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2014. **67**: p. 251-256.
- [6] Wang, J., X. Yun, and Y.-M. Wu, *A first-order second-moment calculation for seismic hazard assessment with the consideration of uncertain magnitude conversion*. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2013. **13**(10): p. 2649-2657.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

M. Shamekhi Amiri, Kh. Mansouri Seresht, *Probabilistic Seismic Hazard Analysis for Tehran and Suburbs by Using of First Order Second Moment Algorithm*, Amirkabir J. Civil Eng., 52(3) (2020) 193-196.

DOI: [10.22060/ceej.2018.14827.5767](https://doi.org/10.22060/ceej.2018.14827.5767)





تحلیل خطر لرزه‌ای احتمالاتی با استفاده از الگوریتم لنگر دوم - مرتبه اول برای تهران و حومه

محمد شامخی امیری^۱، خلیل منصوری سرشت^{۲*}

۱- دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران.

۲- دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه شمال، آمل، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷-۰۵-۳۰

بازنگری: ۱۳۹۷-۰۷-۲۷

پذیرش: ۱۳۹۷-۰۸-۰۹

ارائه آنلاین: ۱۳۹۷-۰۹-۲۴

کلمات کلیدی:

الگوریتم لنگر دوم - مرتبه اول

تحلیل خطر احتمالاتی

فراگذشت زمینلرزه

شتاب مبنای طرح

دوره بازگشت

خلاصه: یکی از پر خسارت‌ترین حوادث طبیعی، زمین‌لرزه است که فرآیند تصادفی آن پیش‌بینی و یا پیش‌گیری وقوع را در شرایط حاضر ناممکن کرده است. ولی امروزه کاهش خسارات زمین‌لرزه‌ها با مطالعات تحلیل خطر لرزه‌ای ممکن شده است. ایران از مناطقی است که همواره در معرض آسیب این پدیده طبیعی قرار گرفته است. اما تجربه بسیاری از کشورهای مشابه ایران که در معرض زمین‌لرزه‌های متعدد قرار دارند، ولی تلفات و خساراتی به مراتب کمتر را متحمل می‌شوند، نشان داده است که با مطالعات بروز زمین‌لرزه‌ها و بهره‌گیری از این مطالعات در احداث سازه‌ها می‌توان خسارات ناشی از زمین‌لرزه‌ها را کاهش داد. تحلیل خطر لرزه‌ای نیازمند داده‌های زلزله است، که هرچه این اطلاعات بروزتر باشند، نتایج حاصل نیز با دقت بیشتری حاصل خواهند شد. از اساسی‌ترین داده‌هایی که نیازمند به‌روزرسانی هستند، بزرگای زمین‌لرزه‌ها، محل وقوع زمین‌لرزه‌ها، ژرفای کانونی و... با دقت کافی می‌باشد. این پارامترها در برآورد تحلیل خطر زمین‌لرزه احتمالاتی در مناطق مختلف نقش اساسی دارند. این تحقیق تهران را به‌عنوان پایتخت و پرجمعیت‌ترین شهر ایران به‌عنوان منطقه مطالعاتی خود در نظر گرفته است. پژوهش حاضر دربرگیرنده سابقه بیش از ۳۰۰ زمین‌لرزه در ۱۱۷ سال گذشته برای تهران و اطراف آن می‌باشد. هدف تحقیق حاضر ارزیابی خطر لرزه‌ای احتمالاتی جدید به وسیله الگوریتم لنگر دوم - مرتبه اول با استفاده از عدم قطعیت بر روی چهار رابطه کاهندگی با وزن یکسان است. همچنین با توجه به سطوح لرزه‌ای برای طراحی و استاندارد ۲۸۰۰ ایران، پژوهش حاضر بیشینه شتاب زمین‌لرزه را در دو سطح مورد بررسی قرار داده است. زلزله مبنای طرح ۱، زلزله‌ای با احتمال فراگذشت ۱۰٪ در ۵۰ سال (دوره بازگشت ۴۷۵ ساله) که در عمر مفید سازه رخ می‌دهد و همچنین زلزله مبنای طرح ۲، زلزله‌ای با احتمال فراگذشت ۲٪ در ۵۰ سال (دوره بازگشت ۲۴۷۵ ساله) که احتمال رخ‌دادن آن در عمر مفید سازه محتمل می‌باشد. نتایج این پژوهش مبین آن است که بیشینه شتاب زمین‌لرزه به ترتیب اعداد $0.3061g$ و $0.5566g$ برای دو سطح فوق طبق الگوریتم لنگر دوم - مرتبه اول است و همچنین استاندارد ۲۸۰۰ ایران در این زمینه محافظه‌کارانه‌تر عمل کرده است.

۱- مقدمه

است. خطرهای لرزه‌ای در جهان به دلیل افزایش جمعیت شهرها، شهرنشینی افراطی و پیشرفت روزافزون صنعت بیشتر شده است. از طرفی هیچ راهی برای جلوگیری از وقوع زمین‌لرزه وجود ندارد، ولی راه‌هایی برای کنترل و بهبود ساخت‌وساز و همچنین سرمایه‌گذاری برای به حداقل رساندن اثرات فاجعه‌بار آن وجود دارد. ارزیابی‌های

زمین‌لرزه‌ها به‌عنوان یکی از خطرناک‌ترین فاجعه‌های نایمن و غیرقابل پیش‌بینی شناخته می‌شوند که موجب مرگ و میر بسیاری از افراد در طول تاریخ شده و تأثیر اقتصادی قابل توجه در کشورها داشته

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: mansouri.khalil7@gmail.com

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لایسنس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لایسنس، از آدرس <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode> دیدن فرمایید.



علمی، اکنون نیاز به انجام تجزیه و تحلیل خطر لرزه‌ای مربوط به یک شهر مهم و پرجمعیت مانند تهران برای به‌روزرسانی نتایج، بیشتر از همیشه احساس می‌شود [۴].

اهمیت تحلیل خطر احتمالاتی منجر به مطالعات اساسی فراوانی در این زمینه شده است که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به کارهای مروری جی بومر^۳ (۲۰۰۳) در خصوص عدم قطعیت در تحلیل خطر لرزه‌ای مربوط به متغیرهای تصادفی و احتمال بروز رخدادها و همچنین ترکیب این عدم قطعیت‌ها در به دست آوردن تحلیل تعیینی و احتمالاتی اشاره کرد [۵].

تحلیل خطر لرزه‌ای تهران و حومه تا شعاع ۲۰۰ کیلومتر توسط قدرتی‌امیری، محمودی و رضویان (۲۰۰۹) انجام شده است که از گسل‌های فعال تهران در این تحقیق بهره برده‌اند و همچنین از زمین‌لرزه‌های دستگاهی و تاریخی و روابط کاهندگی مختلف برای ترسیم نقشه خطوط هم‌شدت استفاده شده است [۶]. ارزیابی خطر لرزه‌ای با استفاده از الگوریتم پیشرفته لنگر دوم-مرتبه اول برای زمین‌لرزه‌های با بزرگای گشتاور بالای ۷ برای شهر تایوان و برای یک گسل خاص توسط وانگ^۴ و کو چون^۵ (۲۰۱۵) انجام شده و نرخ سالانه بیشینه شتاب زمین‌لرزه‌های بالای ۷ را برای منطقه موردنظر و گسل‌های خاص مورد بررسی و محاسبه انجام داده‌اند [۷].

ارزیابی خطر لرزه‌ای احتمالاتی با الگوریتم لنگر دوم-مرتبه اول را با در نظر گرفتن تغییرات بزرگا با استفاده از رابطه کاهندگی، برای شهر تایوان توسط وانگ و یان^۶ (۲۰۱۳) انجام شده است و نرخ سالانه بیشینه شتاب زمین‌لرزه‌ای برای مقادیر مختلف محاسبه گردیده است. همچنین تحلیل خطری با استفاده از الگوریتم لنگر دوم-مرتبه اول با استفاده از تبدیلات غیرقابل اندازه‌گیری برای تایوان و اطراف آن انجام شده است که از بزرگای محلی و فاصله ۱۰۰ کیلومتر استفاده کرده است و شتاب بیشینه زمین‌لرزه‌ای به مقدار $g/18$ محاسبه شده است. البته از تبدیل بزرگا نیز در این تحقیق بهره برده شده است [۸].

ارزیابی خطر لرزه‌ای با استفاده از الگوریتم لنگر دوم-مرتبه اول برای شهرهای تایپه و کاهسیونگ در کشور تایوان برای تمامی

پایه‌ای و دقیق برای کاهش خطر لرزه‌ای که بر اساس تصمیم‌های کلان صورت می‌پذیرد، به‌طور مطلوب می‌توانند خسارت‌های زمین‌لرزه‌ای را کاهش دهند. علاوه بر این، بیش از یک قرن است که محققین حوزه‌ی عمران و زلزله برای پیشرفت در مدیریت تلفات ناشی از زمین‌لرزه در ساخت‌وساز شهری به دلیل تخریب ساختمان (بسته به طول عمر مفید سازه و سطح خطر) پژوهش‌هایی آغاز کرده‌اند [۱].

تحلیل خطر لرزه‌ای با هدف توسعه یک سایت خاص، باعث بالا رفتن مقاومت پروژه موردنظر در برابر زمین‌لرزه طراحی بر اساس داده‌های زمین‌لرزه در اطراف یک سایت می‌شود. امروزه، تحلیل خطر زمین‌لرزه تعیینی (DSHA)^۱ و تحلیل خطر زمین‌لرزه احتمالاتی (PSHA)^۲ دو تحلیل متداول هستند. در بسیاری از مطالعه و گزارشات در چند دهه اخیر تحلیل خطر لرزه‌ای با الگوریتم‌های جدید نیز مورد توجه قرار گرفته است [۲]. از این جمله الگوریتم لنگر دوم-مرتبه اول است که به‌طور مستقیم عدم قطعیت پارامترها را در نتایج به وجود آورده و به‌طور گسترده‌ای در تجزیه و تحلیل عدم قطعیت کارایی دارد. این روش با استفاده از خطی‌سازی توابع متغیرها و پارامترهای ورودی را به متغیرهای خروجی مرتبط می‌کند. با توجه به عدم قطعیت در روابط کاهندگی مورد استفاده در تحلیل خطر، لذا این نوع الگوریتم‌ها برای تحلیل خطر لرزه‌ای احتمالاتی قابل استفاده می‌باشد.

۲- مروری بر تحقیقات گذشته

تهران به‌عنوان پایتخت ایران، شهری بسیار پرجمعیت است (با جمعیتی حدود ۱۲ میلیون نفر) که در آن مراکز سیاسی و اقتصادی اصلی قرار دارند. از این‌رو ارزیابی خطر لرزه‌ای آن از اهمیت حیاتی برخوردار است. همچنین ویژگی‌های زلزله‌شناسی و زمین‌شناسی منطقه مورد ارزیابی، همانند: گسل‌های فعال، رسوبات دشت تهران و شهر ری و زلزله‌های بزرگ، نشانگر خطرهای لرزه‌ای شدید است [۳]. بر اساس استاندارد ۲۸۰۰ ایران، مهم‌ترین عامل در محاسبه نیروی زلزله داشتن شتاب مناسب بر اساس شتاب مبنای طراحی بر روی سنگ‌بستر (A) است. استاندارد فوق در ویرایش‌های اول تا چهارم، شتاب مبنای طراحی ($A = 0.35g$) را برای تهران نشان می‌دهد. با توجه به در دسترس بودن اطلاعات تکمیلی و تحقیقات جدید

3 J. Bommer
2 Wang
3 Kuo-Chon
4 Yun

1 Determination Seismic Hazard Analysis
2 Probability Seismic Hazard Analysis

آن ارزیابی خطر حرکت زمین صورت می‌گیرد. سناریو فوق عبارت است از: تخمین وقوع زمین‌لرزه با اندازه خاص در محلی مشخص. روش تعیینی اولین و ساده‌ترین روشی است که در مطالعات مربوط به خطر زمین‌لرزه استفاده می‌شود. این روش ساده، برای برآورد بیشینه شتاب باورپذیر (MCE)^۲ برای یک سایت می‌باشد، که برخلاف روش احتمالاتی وابسته به زمان نیست و صرفاً بر اساس بالاترین سطح محاسبه شده جنبش زمین (شتاب) برای ساختگاه موردنظر برآورد می‌شود. روش فوق برای سایت‌های حساس بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد [۹].

در این روش همه پارامترها از جمله بزرگای تولیدشده در منبع لرزه‌زا و فاصله از سایت به‌طور مطلق انتخاب شده و سپس تحلیل خطر انجام می‌گیرد. اما در صورت در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها در عوامل فوق تحلیل به روش احتمالاتی تغییر پیدا خواهد کرد. از آنجایی که زمین‌لرزه و پدیده‌های مربوط به آن فرآیندهایی غیرقطعی می‌باشند، لذا روش احتمالاتی نتایج قابل استنادتری را عرضه می‌کند؛ اما بدیهی است که حجم داده‌ها و زمان لازم برای انجام این روش بیشتر از روش تعیینی خواهد بود [۱].

۳-۲- تحلیل خطر احتمالاتی

در واقع علت اصلی رجوع به تئوری احتمال در تخمین خطر لرزه‌ای در یک منطقه، تصادفی بودن محل، بزرگا و زمان وقوع زمین‌لرزه‌ها می‌باشد. بنابراین لازم است تا با فرض توزیع احتمالاتی مناسب برای فاصله رخداد زمین‌لرزه از سایت، بزرگای زمین‌لرزه و سایر عوامل مؤثر، همچنین با در نظر گرفتن یک توزیع احتمالاتی زمانی، اقدام به تعیین احتمال رخداد سطوح مختلف شتاب (یا پارامترهای لرزه‌ای دیگر) نمود. نتایج تحلیل خطر احتمالاتی به روش‌های مختلف قابل بیان است. در تمامی آن‌ها محاسبات برای احتمالات، جهت ترکیب عدم قطعیت در اندازه، محل و فرکانس زمین‌لرزه با اثرات آن‌ها به‌منظور تخمین مخاطرات لرزه‌ای انجام می‌شود. روش معمول تحلیل خطر زمین‌لرزه به دست آوردن منحنی‌های خطر لرزه‌ای است که نشان‌دهنده فراگذشت سالانه تجاوز از مقادیر مختلف برای روابط کاهندگی می‌باشد. در نتیجه جهت محاسبه میزان احتمال تجاوز از بیشینه شتاب حرکت زمین در یک دوره زمانی خاص، می‌توان

زمین‌لرزه‌های از سال ۱۹۰۰ تا ۲۰۱۴ توسط وانگ و مین و او^۱ (۲۰۱۴) انجام گرفته است و نرخ سالانه بیشینه شتاب زمین‌لرزه‌های فوق را با روش شبیه‌ساز مونت کارلو و همچنین آیین‌نامه‌های داخلی (تایوان) مقایسه کرده است [۲].

هدف کلی این تحقیق انجام یک ارزیابی جدید خطر لرزه‌ای برای تهران، با لرزه‌خیزی بالا، با استفاده از الگوریتم لنگر دوم-مرتبه اول و برآورد نرخ فراگذشت سالانه زمین‌لرزه با آمار زمین‌لرزه‌های بزرگ در ۱۱۷ سال گذشته می‌باشد. در این مقاله مرور کلی بر تحلیل لرزه‌خیزی احتمالاتی در اطراف تهران (با در نظر گرفتن چهار رابطه کاهندگی) مورد مطالعه قرار گرفته است. علاوه بر این، تخمین خطر لرزه‌خیزی با محاسبات الگوریتم فوق در دو سطح خطر لرزه‌ای صورت گرفته است.

۳- انواع تحلیل خطر لرزه‌ای و عدم قطعیت‌ها

خطر زمین‌لرزه، خاصیتی از زمین‌لرزه است که سبب خرابی یا خسارت می‌شود. در حال حاضر دو روش کلی جهت تخمین خطر لرزه‌ای در یک ناحیه وجود دارد. در روش اول که به روش تعیینی شناخته می‌شود، با استفاده از روابط کاهندگی، زمین‌لرزه‌های رخ داده و خصوصیات تعیینی ناحیه موردنظر از قبیل فاصله تا گسل، نوع خاک و ... اقدام به تعیین میزان بیشینه شتاب سایت می‌گردد. این روش معمولاً محافظه‌کارانه‌ترین حالت نتایج را ارائه می‌دهد و نتایج را به‌صورت تعیینی و بدون در نظر گرفتن احتمالات گزارش می‌کند. روش دوم تحلیل خطر لرزه‌ای، روش احتمالاتی است که در آن با استفاده از تئوری احتمال کل، اقدام به تعیین خطر لرزه‌ای یک محل خاص می‌کند. در این بخش ابتدا مروری بر روش تعیینی خواهد شد و سپس اصول روش تحلیل خطر احتمالاتی زمین‌لرزه مورد بررسی قرار خواهد گرفت و در انتها عدم قطعیت در مهندسی زلزله به‌طور مختصر توضیح داده می‌شود.

۳-۱- تحلیل خطر تعیینی

در سال‌های اولیه مهندسی زمین‌شناسی لرزه‌ای، کاربرد تحلیل‌های خطر زمین‌لرزه تعیینی رایج بوده است. روش تحلیل خطر زمین‌لرزه تعیینی مربوط به تعیین سناریوی خاص لرزه‌ای بوده که بر مبنای

1 Maximum Considered Earthquake

5 Min-Wu

قطعیت ممکن است ترکیب شده و به عنوان یک عدم اطمینان کلی مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرد یا جداگانه مورد بررسی قرار گیرد. در هر دو مورد، اصول آمار و احتمالات به طور مساوی اعمال می‌شود [۱۱].

مقایسه‌های مختلف بزرگای زمین‌لرزه به‌عنوان پارامتری مهم در تعیین پارامترهای لرزه‌خیزی و مختصات رومرکز زمین‌لرزه‌ها به عنوان یک راهنمای مهم در توصیف زون‌های چشمه زمین‌لرزه، نقش اساسی در تحلیل خطر زمین‌لرزه ایفا می‌کنند. به همین دلیل در یک مطالعه جامع، این عدم قطعیت‌ها باید منظور شود. از طرفی کمبود ایستگاه‌های لرزه‌نگاری محلی و ناحیه‌ای، توزیع بد ایستگاهی و نبود مدل مناسب، باعث ایجاد عدم قطعیت آشکاری در پارامترهای مختلف زمین‌لرزه‌های ثبت‌شده گشته است. از مهم‌ترین پارامترهای لرزه‌ای در عدم قطعیت می‌توان به بزرگای زلزله، رومرکز زلزله، عمق کانونی و عدم قطعیت زمانی اشاره کرد.

در خلال ۲۰ تا ۳۰ سال گذشته استفاده از مفاهیم احتمالات باعث شده است که عدم قطعیت در اندازه، موقعیت و سرعت تکرار زمین‌لرزه‌ها و همچنین تغییرات مشخصات حرکت زمین با بزرگی و موقعیت زمین‌لرزه به طور صریح در ارزیابی خطرات زمین‌لرزه مورد توجه قرار گیرد. تحلیل احتمالاتی خطر زمین‌لرزه چارچوبی ارائه می‌دهد که در آن، این عدم قطعیت‌ها می‌تواند شناسایی شده و به صورت کمی درآمده و در یک روند منظم به‌گونه‌ای ترکیب شوند تا تصویر کامل‌تری از خطر زمین‌لرزه ترسیم گردد [۹].

۴- امید ریاضی، واریانس و انحراف معیار در تحلیل خطر احتمالاتی

انتخاب روابط کاهندگی، بیشترین عدم قطعیت نهایی در برآورد خطر در ساختگاه را رقم می‌زند. بنابراین برخورد مناسب با این عدم قطعیت که جنس آن از نوع عدم قطعیت ذاتی است، کاملاً ضروری است. با توجه به استفاده از توزیع نرمال و لوگ نرمال استاندارد در تحلیل خطر زمین‌لرزه احتمالاتی و همچنین نیاز به محاسبه امید ریاضی، واریانس و متعاقب آن انحراف معیار بزرگا و فاصله کانونی برای استفاده در توزیع‌های فوق و تغییر نتایج تحلیل و تغییر سه مقدار فوق در توابع احتمالاتی، لذا لزوم استفاده از الگوریتم‌های جدید، امری ضروری می‌باشد.

از منحنی‌های خطر لرزه‌ای استفاده نمود [۹]. برخلاف تحلیل تعینی، معمولاً راه‌حل آنالیزی جهت تحلیل احتمالاتی برای توسعه داده‌ها دشوار می‌باشد. در نتیجه، چندین الگوریتم برای حل تحلیل احتمالاتی، از جمله شبیه‌سازی مونت‌کارلو^۱، الگوریتم لنگر دوم-مرتبه اول و روش ارزیابی نقطه‌ای^۲ و دیگر روش‌ها ارائه شده است [۲].

روش معمول برای استفاده از تحلیل احتمالاتی برای توسعه مطالعات خطر لرزه‌ای برای ورود به جنبه‌های مختلف سیاست‌های عمومی و مالی است. تحلیل خطر احتمالاتی، محاسبات حرکات زمین را با احتمال‌های مختلف از فراگذشت در طول یک بازه زمانی خاص محاسبه می‌کند. این اطلاعات در تهیه منحنی‌های خطر لرزه‌ای طراحی شده و همچنین برای تهیه توصیه‌های ملی برای استانداردهای ساختمان در کشورهای مختلف استفاده می‌شود. تحلیل خطر لرزه‌ای با رویکرد تعینی و یک سناریوی خاص را می‌توان با استفاده از آمارهای تجربی بر اساس داده‌های تاریخی محاسبه کرد. در سوی دیگر در یک رویکرد احتمالاتی، تحلیل خطر لرزه‌ای با استفاده از عدم قطعیت در اندازه، موقعیت و زمان وقوع زلزله، محاسبه می‌شود. مطالعات متعددی برای محاسبه شتاب افقی زمین برای منطقه تهران صورت گرفته است، زارع (۲۰۰۵)، قدرتی امیری و همکاران (۲۰۰۳) و میرزایی (۲۰۰۶). همه آن‌ها از روش‌های احتمالاتی برای تخمین شتاب استفاده کرده‌اند [۱۰].

۳-۳- عدم قطعیت در مهندسی

عدم اطمینان در مهندسی امری اجتناب‌ناپذیر است، داده‌های موجود اغلب ناقص یا ناکافی هستند و همیشه دارای تغییرپذیری می‌باشند. علاوه بر این، برنامه‌ریزی و طراحی مهندسی باید بر اساس پیش‌بینی‌ها یا برآوردهای مبتنی بر مدل‌های ایده آل شده با درجه‌های ناشناخته ناشی از واقعیت متکی باشد. بنابراین عدم اطمینان بیشتری را شامل می‌شود. در عمل ممکن است دو نوع عدم اطمینان تشخیص داده شود: (۱) عدم اطمینان مربوط به پدیده‌های تصادفی که به عنوان متغیر در اطلاعات مشاهده‌شده نمایش داده می‌شوند. (۲) عدم اطمینان مربوط به مدل‌های ناقص دنیای واقعی که به دلیل دانش ناکافی یا واقعیت‌های ناقص است. این دو نوع عدم

2 Monte-Carlo Simulations

3 Point Estimate Method

از آن سری فوق به صورت خطی مطابق معادله (۳) محاسبه می‌گردد:

$$Y = g(\mu_{X_1}, \mu_{X_2}, \mu_{X_3}, \dots, \mu_{X_n}) + \sum_{i=1}^n (X_i - \mu_{X_i}) \frac{dg}{dX_i} + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (X_i - \mu_{X_i})(X_j - \mu_{X_j}) \frac{d^2g}{dX_i dX_j} \quad (2)$$

$$Y = g(\mu_{X_1}, \mu_{X_2}, \mu_{X_3}, \dots, \mu_{X_n}) + \sum_{i=1}^n (X_i - \mu_{X_i}) \frac{dg}{dX_i} \quad (3)$$

به ترتیب امید ریاضی مرتبه اول و واریانس Y مطابق معادلات

$$(4) \text{ و } (5) \text{ محاسبه می‌شود:}$$

$$E(Y) \cong g(\mu_{X_1}, \mu_{X_2}, \mu_{X_3}, \dots, \mu_{X_n}) \quad (4)$$

$$\text{Var}(Y) \cong \sum_{i=1}^n \sigma_{X_i} \left(\frac{dg}{dX_i} \right)^2 = \sum_{i,j=1}^n \sum_{i \neq j} \rho_{ij} \sigma_{X_i} \sigma_{X_j} \frac{dg}{dX_i} \frac{dg}{dX_j} \quad (5)$$

معادله (۵) "انتشار عدم قطعیت" نامیده می‌شود و همان‌طور که قابل مشاهده است که تابع فوق از هر دو واریانس متغیر مستقل و ضریب حساسیت منشأ می‌شود که توسط مشتقات جزئی بیان شده است [۱۱].

۵- الگوریتم لنگر دوم - مرتبه اول

الگوریتم لنگر دوم- مرتبه اول، تحلیل احتمالاتی است که از بسط تیلور مشتق شده است. بنابراین، "مرتبه اول" به شرایط اولیه از بسط تیلور دلالت دارد. از سوی دیگر واریانس یک متغیر تصادفی در آمار و احتمالات، "لنگر دوم" است بدان معنی که الگوریتم فوق واریانس یک متغیر را با کمیت عدم اطمینان محاسبه می‌کند [۱۱]. برای استفاده از الگوریتم لنگر دوم-مرتبه اول نیاز به امید ریاضی و واریانس توابع چند متغیره می‌باشد که به توضیح آن در بخش قبل پرداخته شد.

۱-۵ الگوریتم لنگر دوم-مرتبه اول و روابط آن

با توجه به روابط کاهندگی و متغیرهای تصادفی آن به‌عنوان متغیرهای ورودی، مقدار امید ریاضی آن بر اساس الگوریتم فوق به شرح معادله (۶) تقریب زده می‌شود [۱۱]:

$$E(Y) = f\{E(X_1), E(X_2), \dots, E(X_n)\} \quad (6)$$

گیبسون^۱ در سال ۲۰۱۱ از دو الگوریتم مونت کارلو و لنگر دوم - مرتبه اول در یک تحقیق احتمالاتی جهت پایداری و طراحی شیروانی‌ها استفاده کرده است [۱۲]. همچنین کیم^۲ در سال ۲۰۱۲ الگوریتم لنگر دوم - مرتبه اول را جهت محاسبه نرخ بازده داخلی در علم اقتصاد مهندسی مورد استفاده قرار داده است [۱۳]. پس از آن وانگ در سال ۲۰۱۲ از الگوریتم شبیه‌ساز مونت کارلو برای محاسبه تحلیل خطر احتمالاتی برای سائیتی در تایوان جهت به دست آوردن بیشینه شتاب زمین لرزه استفاده کرده است. که تمامی آن‌ها بهره‌گیری از الگوریتم‌های نوین برای بهبود نتایج بوده است [۸].

۴-۱ امید ریاضی و واریانس توابع چند متغیره

در نظریه احتمالات، امید ریاضی مقدار یا ارزش مورد انتظار یک متغیر تصادفی گسسته است که برابر با مجموع حاصل ضرب احتمال وقوع هریک از حالات ممکن در مقدار آن حالت است. در نتیجه میانگین برابر است با مقداری که به‌طور متوسط از یک فرآیند تصادفی با بی‌نهایت تکرار انتظار می‌رود. امید ریاضی و یا مرتبه اول درواقع میانگین وزنی متغیر تصادفی می‌باشد. محاسبه امید ریاضی میزان تمرکز داده‌ها (مشاهدات یا مقادیر متغیر تصادفی) را نشان می‌دهد که بر اساس دید فیزیکی درواقع مرکز ثقل تابع توزیع چگالی احتمال است و همچنین مقدار گشتاور مرتبه اول حول یک نقطه می‌باشد. واریانس، یکی از معیارهای اندازه‌گیری پراکندگی داده‌ها است و درواقع همان گشتاور مرتبه دوم بوده اما حول میانگین توزیع محاسبه می‌گردد. امید ریاضی گشتاور مرتبه اول است و این گشتاور درواقع حول مرکز مختصات (یعنی عدد صفر) است. اما واریانس تابع، توزیع احتمال گشتاوری مرتبه دوم است که حول میانگین (امید ریاضی) برآورد می‌شود.

اگر Y تابعی از چند متغیر تصادفی مطابق معادله (۱) باشد:

$$Y = g(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n) \quad (1)$$

مقادیر امید ریاضی و واریانس تقریبی Y به‌طور مشابه به شرح معادله (۲) محاسبه می‌شود. که تابع فوق در یک سری تیلور بر اساس مقادیر میانگین $\mu_{X_1}, \mu_{X_2}, \mu_{X_3}, \dots, \mu_{X_n}$ ارزیابی می‌شوند: که در آن تمامی مشتق‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد [۱۱]. پس

1 Gibson

2 Kim

کاملی بر روابط کاهندگی توسط داگلاس^۲ در سال ۲۰۱۸ منتشر شده است [۱۴].

برای استفاده در این پژوهش سه نوع رابطه کاهندگی مدنظر قرار گرفت است. روابط بومی، که عمدتاً داده‌های لرزه‌ای کشور مبنای توسعه آن‌ها بوده است؛ روابط منطقه‌ای که بر پایه داده‌های منطقه‌ای ارائه شده‌اند (روابط توسعه‌یافته برای منطقه خاورمیانه) و روابط جهانی، که بر پایه داده‌های سراسر دنیا توسعه یافته‌اند.

۶-۱- رابطه کاهندگی قدرتی امیری و همکاران (۲۰۱۴) [۱۵]:
این رابطه برای ناحیه فلات ایران ارائه شده است.

$$\text{Log(PGA)} = \sqrt{2M} - \text{Log}(M+R) + \frac{0.069}{\sqrt{R}} - \text{Log}(A) \quad (10)$$

در معادله (۱۰)، M بزرگای موج سطحی، R فاصله‌ی کانونی و پارامتر A برای بیشینه‌ی شتاب افقی برابر ۱ و برای بیشینه‌ی شتاب قائم برابر ۲ است [۱۵].

۶-۲- رابطه زارع و همکاران (۱۹۹۹) [۱۶]:

این رابطه توسط زارع و همکاران در سال ۱۹۹۹ برای ناحیه البرز مرکزی تهیه شده است.

$$\text{Log(PGA)} = aM - bR - d \text{Log} R - C_i S_i \quad (11)$$

در معادله (۱۱)، M بزرگای موج گشتاوری، R فاصله‌ی کانونی، ضریب S_i از ۱ تا ۴ برای چهار نوع خاک‌های مختلف با توجه به سرعت موج برشی در خاک است و همچنین a, b, c و d مقادیر ثابت هستند [۱۷].

۶-۳- رابطه کاهندگی کمپل و بزرگ نیا (۱۹۹۴) [۱۸]:

این رابطه به صورت جهانی ارائه شده است و دارای جزئیات بیشتری نسبت به روابط کاهندگی قبل از خود است.

$$\text{Ln(PGA)} = a_1 + a_2 M + a_3 \sqrt{R^2 + [a_4 e^{a_5 M}]^2} + [a_6 + a_7 \text{Ln} R + a_8 M] F [a_9 + a_{10} \text{Ln} R + a_8 M] S_{SR} + [a_{11} + a_{12} \text{Ln} R] S_{HR} + f_A(D) \quad (12)$$

$$f_A(D) = \{ [a_{11} + a_{12} \text{Ln} R] - [a_9 + a_{10} \text{Ln} R] S_{SR} \} (1-D)(1-S_{HR})$$

در معادله (۱۲)، M بزرگای موج گشتاوری، R فاصله‌ی کانونی،

از سوی دیگر، اساس الگوریتم فوق با توجه به محاسبه واریانس طبق معادله (۷) تقریب زده می‌شود [۱۱]:

$$V(Y) = \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{\partial Y}{\partial X_i} V[X_i] \right\} + 2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \left\{ \frac{\partial Y}{\partial X_i} \frac{\partial Y}{\partial X_j} \text{Cov}[X_i, X_j] \right\} \quad ; \text{ for } i < j \quad (7)$$

در معادله (۷)، $V(Y)$ برابر واریانس Y است و $\text{Cov}[X_i, X_j]$ برابر کوواریانس بین دو مقدار است. با توجه به اینکه که هر یک از دو متغیر ورودی در یک تحلیل خطر احتمالاتی مستقل از یکدیگر در نظر گرفته می‌شوند، بنابراین کوواریانس برابر صفر می‌شود و واریانس Y به‌عنوان یک تحلیل از طریق معادله (۸) در الگوریتم فوق محاسبه می‌گردد:

$$V(Y) = \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{\partial Y}{\partial X_i} V[X_i] \right\} \quad (8)$$

به‌طور خلاصه، معادلات (۷) و (۸) در حال حاضر کلید الگوریتم فوق برای تحلیل خطر احتمالاتی است که از بسط تیلور مشتق و گسترش یافته‌اند [۲].

با توجه محاسبه $\frac{\partial Y}{\partial X_i}$ در معادله (۸)، با تقریب خوبی می‌توان مشتق رابطه (۸) را به‌صورت معادله (۹) محاسبه کرد:

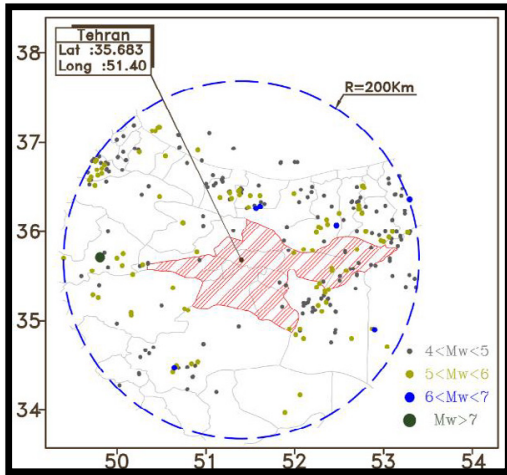
$$\frac{\partial Y}{\partial X_i} = \frac{Y(\mu_1 + \sigma_1, \mu_2, \dots, \mu_n) - Y(\mu_1 - \sigma_1, \mu_2, \dots, \mu_n)}{2\sigma_1} \quad (9)$$

در معادله (۹)، μ و σ به ترتیب امید ریاضی و انحراف معیار می‌باشند [۸].

۶- روابط کاهندگی مورد استفاده

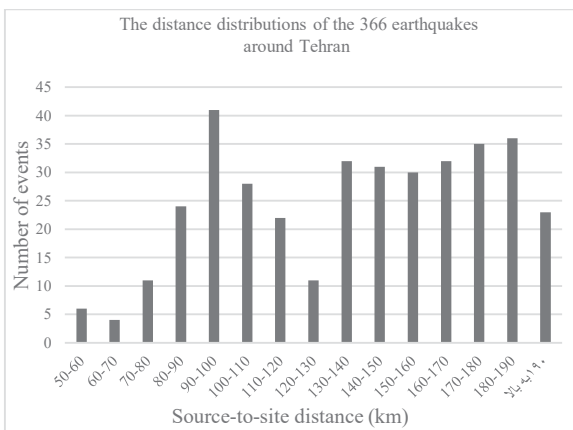
با دور شدن از مرکز زمین لرزه، جنبش زمین با شدت کمتری احساس می‌شود و این مطلب نشان‌دهنده میرایی جنبش زمین است. میزان این میرایی به عوامل مختلفی از جمله شرایط زمین‌شناسی و نوع حرکت گسل مربوط است [۱]. رابطه کاهندگی یک رابطه ریاضی است که بیانگر ارتباط میان پارامترهای جنبش نیرومند زمین با پارامترهای مشخصات منبع لرزه‌زا، محیط انتشار، زمین‌شناسی محل ساختگاه و ... می‌باشد.

ارائه مدل‌های کاهندگی کمی بیش از ۶۰ سال سابقه دارند که اولین آن در سال ۱۹۵۴ توسط نیومن^۱ ارائه شد. پس از آن مرور

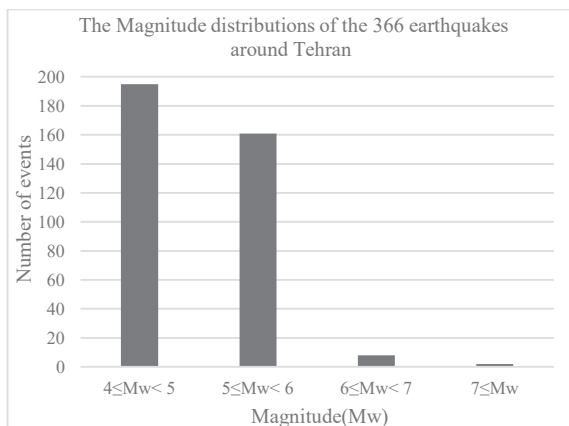


شکل ۱. زمین‌لرزه‌های اطراف تهران از سال ۱۹۰۰ بر اساس کاتالوگ‌های ثبتی

Fig. 1. The locations of 366 earthquakes from Tehran since 1900 until 2017



شکل ۲. هیستوگرام تعداد زمین‌لرزه‌ها در بازه فاصله مکانی به کیلومتر
Fig. 2. Distance Histogram of earthquake events based on the Kilometers



شکل ۳. هیستوگرام تعداد زمین‌لرزه‌ها در بازه‌های بزرگای گشتاور
Fig. 3. Magnitude Histogram of events based on the Mw

ضریب S_k به نوع خاک و سرعت موج برشی در خاک وابسته است، ضریب f_A به عمق وابسته است و همچنین a_1 تا a_{12} مقادیر ثابت می‌باشند [۱۷].

۴-۶- رابطه کاهندگی اکار و بومر (۲۰۰۷) [۱۹]:

این رابطه برای منطقه اروپا و خاورمیانه محاسبه شده است.

$$\text{Log(PGA)} = b_1 + b_2 M + b_3 M^2 + (b_4 + b_5 M) \text{Log}(R^2) \quad (۱۳)$$

در معادله (۱۳)، M بزرگای موج گشتاوری، R فاصله‌ی کانونی، ضریب S_k به نوع خاک و سرعت موج برشی در خاک وابسته است، ضریب F به نوع گسل (نرمال، امتداد لغز و معکوس) وابسته است و همچنین b_1 تا b_{10} مقادیر ثابت است [۱۷].

۷- تحلیل خطر با الگوریتم لنگر دوم - مرتبه اول

اعتبار مطالعه لرزه‌خیزی تا حدود زیادی به دقت مکان‌یابی زمین‌لرزه‌های ثبت‌شده، به‌عنوان اطلاعات پایه وابسته است و همچنین اولین قدم در تمامی روش‌های تحلیل خطر، شناسایی منطقه مورد بررسی و تعیین یک شعاع مؤثر و مفید برای دست‌یابی به اطلاعات زمین‌لرزه می‌باشد. در این تحقیق با در نظر گرفتن موقعیت جغرافیایی تهران با مقدار $۵۱/۴۰$ ، $۳۵/۶۸۳$ درجه (طول و عرض جغرافیایی) و همچنین برای فاصله شعاعی ۲۰۰ کیلومتر از مرکز تهران و بزرگای گشتاور بالای ۴، تحلیل خطر احتمالاتی صورت گرفته است. سپس برای به دست آوردن اطلاعات زمین‌لرزه برای تعیین زمین‌لرزه‌های رخ داده در منطقه، زلزله‌های رخ داده در منطقه از لحاظ بزرگای و فاصله فیلتر شد تا مشخصات مربوط به زمین‌لرزه‌های اتفاق افتاده از سال ۱۹۰۰ تا انتهای سال ۲۰۱۷ تعیین شوند.

۱-۷- آمار لرزه‌خیزی

شکل ۱ توزیع مکانی ۳۶۶ زمین‌لرزه (M_w های بالای ۴ و با فاصله کمتر از ۲۰۰ کیلومتر) اطراف تهران را نشان می‌دهد که پس از فیلتر کردن فاصله و بزرگای به دست آمده‌اند. پس از تجزیه و تحلیل بر روی ۳۶۶ داده آماری، هیستوگرام توزیع بر اساس بزرگای و فاصله کانونی، در شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده شده است.

جدول ۱. امید ریاضی، واریانس و انحراف معیار داده‌های زمین‌لرزه برای تهران و حومه.

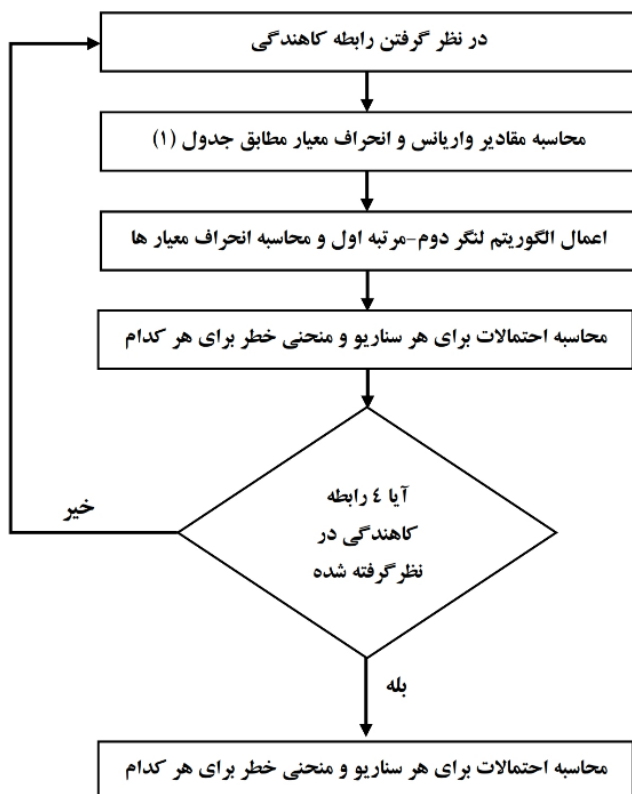
Table 1. Earthquake Data of Mathematical Expectation, Variance, Standard Deviation for Tehran and suburbs

آمار زمین‌لرزه‌ها	بزرگای گشتاور (Mw)			فاصله کانونی (Km)		
	امید ریاضی	واریانس	انحراف معیار	امید ریاضی	واریانس	انحراف معیار
۳۶۶	۵/۰	۰/۱۸۰	۰/۴۲۵	۱۳۷/۳	۱۴۶۳/۱۳۹	۳۸/۲۵۱

جدول ۲. واریانس و انحراف معیار بیشینه شتاب زمین‌لرزه پس از اعمال الگوریتم لنگر دوم - مرتبه اول

Table 2. Summary of the FOSM analyses for earthquake hazard analysis

روابط کاهندگی	لگاریتم بیشینه شتاب زمین لرزه طبق الگوریتم لنگر دوم - مرتبه اول	
	واریانس	انحراف معیار
قدرتی امیری و همکاران	۰/۱۳۸	۰/۳۷۱
زارع و همکاران	۰/۱۴۵	۰/۳۸۰
کمپل و بزرگنیا	۰/۶۱۸	۰/۷۸۶
اکار و بومر	۰/۱۰۸	۰/۳۲۸



بر این اساس میانگین، واریانس و انحراف معیار بزرگای و فاصله تا سایت بر اساس داده‌های زمین‌لرزه‌ای در جدول ۱ آورده شده است. با قرار دادن داده‌ها و روابط کاهندگی در معادله (۳) و استفاده از الگوریتم لنگر دوم-مرتبه اول، واریانس و انحراف معیار بیشینه شتاب زمین‌لرزه برای تهران محاسبه گردید که به طور خلاصه در جدول ۲ درج شده‌اند.

پس از آن، نرخ فراگذشت سالیانه برای هر رابطه کاهندگی مطابق فلوجارت شکل ۴ محاسبه و نمودارهای آن‌ها ترسیم گردیده‌اند.

۷-۲- منحنی‌های تحلیل خطر احتمالاتی

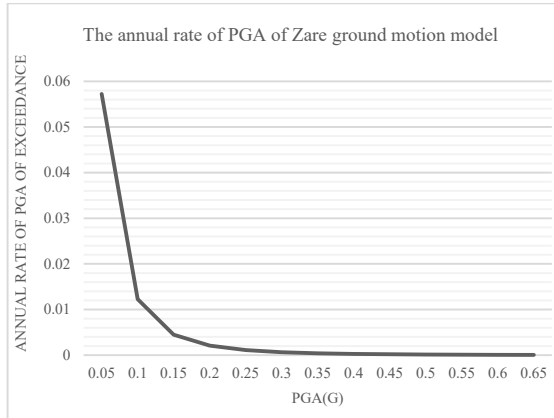
در این پژوهش برای ترسیم منحنی‌های خطر لرزه‌ای به بررسی شتاب از 0.05g تا 0.65g، با افزایش 0.05 پرداخته شده است:

$$acc_0=0.05g, acc_1=0.10g, \dots, acc_{12}=0.65g \quad (14)$$

توزیع نرمال استاندارد در این بخش برای تعیین احتمال بیشینه شتاب افقی (PGA) نسبت به (acc_0) با توجه به وقوع یک زمین‌لرزه با شدت M و در فاصله R تعیین می‌شود [۹].

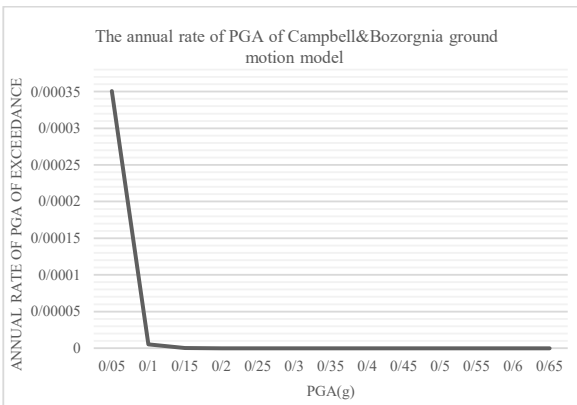
با استفاده از انحراف معیار (σ) محاسبه شده در جدول ۲ که با توجه به الگوریتم لنگر دوم - مرتبه اول می‌باشد، مقدار احتمال

شکل ۴. فلوجارت نحوه اعمال الگوریتم لنگر دوم - مرتبه اول [۸].
Fig. 4. A chart summarizing the FOSM application of this study to earthquake hazard assessment



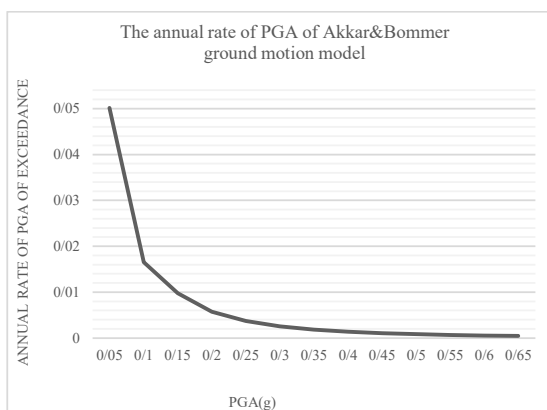
شکل ۶. منحنی خطر لرزه‌ای طبق الگوریتم لنگر دوم - مرتبه اول برای رابطه کاهندگی زارع و همکاران.

Fig. 6. Hazard Curve for Tehran estimated with FOSM algorithm based on the Zare ground motion relationship



شکل ۷. منحنی خطر لرزه‌ای طبق الگوریتم لنگر دوم - مرتبه اول برای رابطه کاهندگی کمپل و بزرگ نیا.

Fig. 7. Hazard Curve for Tehran estimated with FOSM algorithm based on the Campbell & Bozorgnia ground motion relationship



شکل ۸. منحنی خطر لرزه‌ای طبق الگوریتم لنگر دوم - مرتبه اول برای رابطه کاهندگی اکار و بومر.

Fig. 8. Hazard Curve for Tehran estimated with FOSM algorithm based on the Akkar & Bommer ground motion relationship

مربوط به رابطه کاهندگی توسط رابطه (۱۵) محاسبه می‌شود:

$$P(PGA > acc | EQ:R,M) = 1 - \Phi \left(\frac{\text{Log}(acc) - \text{Log}(PGA)}{\sigma_{\text{Log}(PGA)}} \right) \quad (15)$$

در معادله (۱۵)، σ انحراف معیار، $\text{Log}(PGA)$ امید ریاضی، Φ احتمال نرمال استاندارد است. در انتها مدل پیش‌بینی پواسون برای شناسایی احتمال وقوع زلزله به صورت رابطه (۱۶) محاسبه می‌شود: [۹]

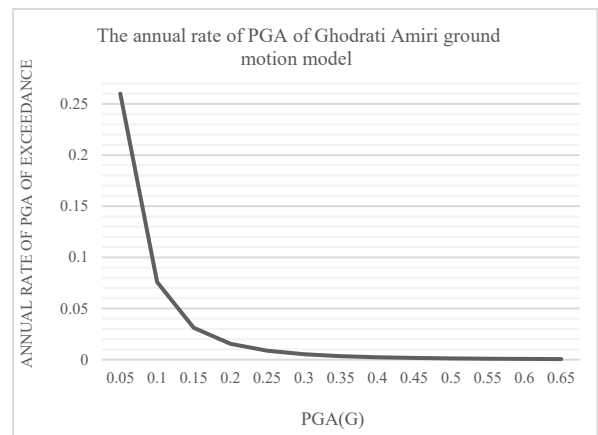
$$P(PGA > acc | EQ) = \sum_R \sum_M P(PGA > acc | EQ:R,M) f(M) \Delta M f(R) \Delta R \quad (16)$$

در معادله (۱۶)، P مقدار احتمال، $f(M)$ تابع احتمالاتی بزرگا، ΔM مقدار تقسیمات بزرگا، $f(R)$ تابع احتمالاتی فاصله، ΔR تقسیمات فاصله است. احتمال کلی برای ناحیه موردنظر نیز با توجه به نرخ متوسط وقوع رخداد (برابر ۵/۱۹۷ تقریب زده شده است)، با رابطه (۱۷) محاسبه می‌شود:

$$P(PGA > acc) = 1 - e^{-\nu P} \quad (17)$$

در معادله (۱۷)، P مقدار احتمال، ν آهنگ متوسط وقوع رخداد برای ناحیه موردنظر است. منحنی‌های خطر لرزه‌ای و محاسبات مربوط به نرخ فراگذشت سالانه برای هر چهار رابطه کاهندگی به ترتیب در شکل‌های ۵ تا ۸ ترسیم گردیده است.

در انتها با استفاده از درصد وزنی ۲۵٪ برای هر رابطه کاهندگی، منحنی‌های خطر طبق الگوریتم لنگر دوم - مرتبه اول باهم ترکیب شده و منحنی خطر کل برای تهران تهیه شده است که در شکل ۸ قابل مشاهده می‌باشد.



شکل ۵. منحنی خطر لرزه‌ای طبق الگوریتم لنگر دوم - مرتبه اول برای رابطه کاهندگی قدرتی امیری و همکاران.

نشده است و یا راه حل خاصی اتخاذ نگردیده است. بنابراین، به منظور بررسی دقت و صحت نتایج محاسبات بر روی مطالعه انجام شده می‌بایست یک مقایسه بین این الگوریتم و روش‌های دیگر نیز صورت پذیرد [۲].

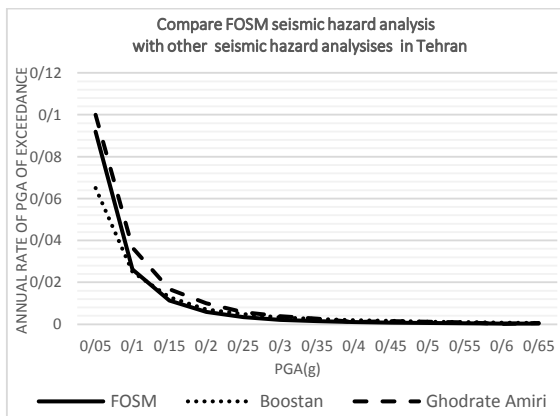
۸-۱- قدرتمندی تحلیل خطر احتمالاتی با داده‌های جدید

تحلیل خطر لرزه‌ای کامل و دقیق، بیشتر از آنکه به روش تحلیل خطر مربوط باشد، به فرآیند تکرار و شفافیت داده‌های آن بستگی دارد. علاوه بر این، باید توجه داشت که یک روش پیچیده (تحلیل خطر زمین‌لرزه احتمالاتی) لزوماً قابل‌اعتمادتر از یک روش ساده (تحلیل خطر زمین‌لرزه تعینی) می‌باشد [۲].

بنابراین همانند بسیاری دیگر از روش‌ها، ارزیابی خطر لرزه‌ای به‌وسیله الگوریتم لنگر دوم-مرتبه اول استفاده از همان داده‌های تکراری به‌صورت جدید و علمی می‌باشند که در نهایت منجر به محاسبه سطح خطر لرزه‌ای در تهران و اطراف آن می‌شود [۲].

۸-۲- مقایسه نتایج تحلیل خطر احتمالاتی

استاندارد ۲۸۰۰ ایران شتاب مبنای طرحی برابر $g/0.35$ برای تهران ارائه می‌دهد و طبق رابطه مابین احتمال و فراگذشت زمین‌لرزه، نرخ فراگذشت سالانه بیشینه شتاب زمین‌لرزه فوق، برابر 0.0021072 محاسبه می‌گردد. ولی طبق الگوریتم لنگر دوم-مرتبه اول مقدار فراگذشت زمین‌لرزه برای شتاب $g/0.35$ برابر 0.00143



شکل ۱۰. مقایسه منحنی خطر با الگوریتم لنگر دوم-مرتبه اول با دیگر نتایج برای تهران و حومه.

Fig. 10. Compare Hazard Curve for Tehran estimated with FOSM algorithm with other ground motion relationships

برای بررسی نتایج نیاز به رابطه مابین احتمال و فراگذشت زمین‌لرزه طبق معادله (۱۸) می‌باشد:

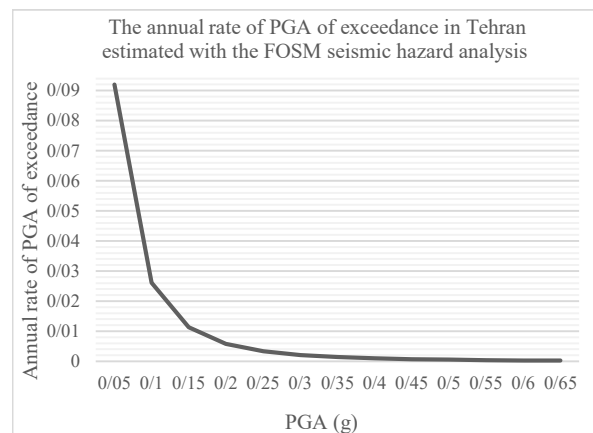
$$P=1-e^{-\lambda t} \quad (18)$$

در معادله (۱۸)، P مقدار احتمال وقوع، λ نرخ فراگذشت و t عمر مفید سازه می‌باشد.

حال مطابق منحنی خطر کلی شکل ۹ که برگرفته از محاسبات تحلیل خطر لرزه‌ای احتمالاتی است. فراگذشت سالیانه شتاب مبنای طرح برای تهران (با شتاب مبنای طرح $g/0.35$) طبق الگوریتم فوق مقدار 0.00143 می‌باشد و همچنین طبق رابطه (۱۸)، برای دو زلزله مبنای طرح با احتمال فراگذشت 10% و 2% با دوره بازگشت 50 سال که فراگذشت سالیانه آن‌ها به ترتیب برابر 0.0021072 و 0.004041 محاسبه می‌شود. شتاب محاسبه شده برای هر دو زلزله مبنای طرح در این پژوهش، به ترتیب برابر $g/0.3061$ و $g/0.55666$ بوده است.

۸- بررسی نتایج

همان‌طور که قبلاً ذکر شد، تحلیل خطر لرزه‌ای احتمالاتی به روش‌های متعددی قابل انجام می‌باشد. همچنین تحلیل خطر لرزه‌ای احتمالاتی به روش الگوریتم لنگر دوم-مرتبه اول به گونه‌ی می‌باشد که به‌طور کامل از آمار متغیرهای ورودی استفاده می‌شود، به‌طوری‌که تخمین الگوریتم فوق ممکن است در شرایطی بسیار دقیق نباشد؛ به‌ویژه هنگامی که متغیرهای ورودی بسیار نامتقارن باشند. به‌هرحال برای الگوریتم فوق، هیچ راهنمایی برای چگونگی رفع مشکل اشاره



شکل ۹. منحنی خطر کلی تهران و حومه طبق الگوریتم لنگر دوم - مرتبه اول.

Fig.9. Total Hazard Curve for Tehran estimated with FOSM

- hazard zonation of Tehran, Computers & geosciences, 58 (2013) 8-18.
- [2] J. Wang, Y.-M. Wu, A new seismic hazard analysis using FOSM algorithms, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 67 (2014) 251-256.
- [3] G.G. Amiri, H. Razeghi, A. Kazemi, Seismic hazard assessment of Metropolitan Tehran by using deterministic attenuation and epicentral distribution, International Journal of Earth Sciences and Engineering, 4(6) (2011) 200-203.
- [4] G.G. Amiri, G. Abdollahzadeh, S.A.R. Amrei, Near field earthquake effects on Iranian design basis acceleration for Tehran, in: 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, August, 2004, pp. 1-6.
- [5] J.J. Bommer, Uncertainty about the uncertainty in seismic hazard analysis, Engineering Geology, 70(1-2) (2003) 165-168.
- [6] G.G. Amiri, H. Mahmoodi, S.R. Amrei, Probabilistic Seismic Hazard Assessment of Tehran Based on Arias Intensity, International Journal of Engineering-Transactions B: Applications, 23(1) (2009) 1-20.
- [7] J.-P. Wang, H. Kuo-Chen, On the use of AFOSM to estimate major earthquake probabilities in Taiwan, Natural Hazards, 75(3) (2015) 2577-2587.
- [8] J. Wang, X. Yun, Y.-M. Wu, A first-order second-moment calculation for seismic hazard assessment with the consideration of uncertain magnitude conversion, Natural Hazards and Earth System Sciences, 13(10) (2013) 2649-2657.
- [9] S.L. Kramer, Geotechnical earthquake engineering. In prentice-Hall international series in civil engineering and engineering mechanics, Prentice-Hall, New Jersey, (1996).
- [10] E. Boostan, N. Tahernia, A. Shafiee, Fuzzy—probabilistic seismic hazard assessment, case study: Tehran region, Iran, Natural Hazards, 77(2) (2015) 525-541.
- [11] A.H.-S. Ang, W.H. Tang, Probability concepts in engineering: emphasis on applications in civil &

محاسبه شده است که نشان می‌دهد آیین‌نامه فوق در این بخش مقداری محافظه‌کارانه‌تر عمل کرده است.

نتایج پژوهش حاضر قابل‌مقایسه با داده‌های دیگر مطالعات، از جمله پژوهش‌های قدرتی‌امیری و همکاران در سال ۲۰۰۴ و ۲۰۱۱ با مقدار بیشینه شتاب برای زلزله مبنای طرح ۱ برابر عددی بین g ۰/۳۴ تا g ۰/۴۰ می‌باشد. البته باید توجه کرد در پژوهش قدرتی‌امیری و همکاران از دو رابطه کاهندگی استفاده شده ولی در پژوهش حاضر از چهار رابطه کاهندگی بهره گرفته شده است. از دیگر پژوهش‌ها می‌توان به مقاله مهدی هاشمی در سال ۲۰۱۳ با شتابی بین g ۰/۱۶ تا g ۰/۴۰ و همچنین مقاله الهام بوستان در سال ۲۰۱۵ با شتابی بین g ۰/۴۲ تا g ۰/۴۸ اشاره کرد. برای مقایسه بهتر نتایج، منحنی‌های قدرتی‌امیری و همچنین بوستان با الگوریتم فوق در شکل ۱۰ ترسیم شده است.

۹- نتیجه‌گیری

تهران و اطراف آن به‌عنوان مناطقی با لرزه‌خیزی بالا شناخته شده‌اند، به‌طوری‌که مطالعات لرزه‌ای مانند تحلیل خطر احتمالاتی برای کاهش خطر زمین‌لرزه در این مناطق بسیار باارزش می‌باشد. در این مقاله یک ارزیابی جدید خطر لرزه‌ای برای مرکز تهران به‌طور عمده و با بهره‌گیری از داده‌های جدید زمین‌لرزه‌های مشاهده شده از سال ۱۹۰۰ تا سال ۲۰۱۷، با استفاده از الگوریتم لنگر دوم—مرتبه اول صورت گرفته است که تحلیل خوبی با توجه به عدم قطعیت از بزرگای زلزله، محل و روابط کاهندگی داشته است. نتایج بیشینه شتاب زمین‌لرزه طبق الگوریتم پژوهش حاضر برای زلزله مبنای طرح ۱، زلزله‌ای با احتمال فراگذشت ۱۰٪ در ۵۰ سال (دوره بازگشت ۴۷۵ساله) که در عمر مفید سازه رخ می‌دهد و همچنین زلزله مبنای طرح ۲، زلزله‌ای با احتمال فراگذشت ۲٪ در ۵۰ سال (دوره بازگشت ۲۴۷۵ساله) که احتمال رخداد آن در عمر مفید سازه محتمل است، به ترتیب برابر g ۰/۳۰۶۱ و g ۰/۵۵۶۶۶ به دست آمده است. البته نتایج محاسبه شده نشان‌دهنده این است که بیشینه شتاب زمین‌لرزه طبق استاندارد ۲۸۰۰ ایران مقداری محافظه‌کارانه می‌باشد.

مراجع

- [1] M. Hashemi, A.A. Alesheikh, M.R. Zolfaghari, A spatio-temporal model for probabilistic seismic

- law for the strong-motions in Iran, in: Proceedings of the third international conference on seismology and earthquake engineering, 1999, pp. 345-354.
- [17] J. Douglas, Ground-motion prediction equations 1964-2010, Pacific Earthquake Engineering Research Center Berkeley, CA, 2011.
- [18] K. Campbell, N.Y. BOZORG, Near-source attenuation of peak horizontal acceleration from worldwide accelerograms recorded from 1957 to 1993, in, PROCESSING OF US NATIONAL CONFERENCE ON EARTHQUAKE ENGINEERING, EARTHQUAKE ENGINEERING RESEARCH, 1994.
- [19] S. Akkar, J.J. Bommer, Prediction of elastic displacement response spectra in Europe and the Middle East, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 36(10) (2007) 1275-1301.
- environmental engineering, Wiley New York, 2007.
- [12] W. Gibson, Probabilistic methods for slope analysis and design, Australian Geomechanics, 46(3) (2011) 29.
- [13] B.-C. Kim, K.F. Reinschmidt, A second moment approach to probabilistic IRR using Taylor series, The Engineering Economist, 57(1) (2012) 1-19.
- [14] J. Douglas, Ground motion prediction equations 1964-2016, report, Accessible on <http://www.gmpe.org.uk/gmpereport2014.pdf>, (2016).
- [15], ATTENUATION RELATIONSHIPS FOR PEAK GROUND ACCELERATION IN THE IRANIAN PLATEAU USING GENE EXPRESSION PROGRAMMING (GEP), (۲۰۱۴) (۴، ۱)، مهندسی عمران، ۹۵-۸۵.
- [16] M. Zare, M. Ghafory-Ashtiany, P. Bard, Attenuation

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Shamekhi Amiri, Kh. Mansouri Seresht, Probabilistic Seismic Hazard Analysis for Tehran and Suburbs by Using of First Order Second Moment Algorithm, Amirkabir J. Civil Eng., 52(3) (2020) 757-768.

DOI: 10.22060/ceej.2018.14827.5767

