

شبیه‌سازی جنبش نیرومند زمین برای زمین‌لرزه اول ۲۱ مرداد ۱۳۹۱ اهر-ورزقان، شمال غرب ایران به روش کاتوره‌ای گسل محدود

مجید معهود^{۱*}، نفیسه اکبرزاده^۲ و حسین حمزه‌لو^۳

^۱استادیار، گروه ژئوفیزیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران، ایران
^۲دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه ژئوفیزیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران
^۳دانشیار، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران

(دریافت: ۹۲/۹/۱۸، پذیرش نهایی: ۹۳/۲/۳۰)

چکیده

یکی از روش‌های بررسی زمین‌لرزه‌ها با استفاده از شتاب‌نگاشت‌ها روش شبیه‌سازی جنبش نیرومند زمین است. شبیه‌سازی جنبش نیرومند زمین به‌ویژه برای مناطقی که از آن داده‌ای در دسترس نیست، نقش مهمی در برآورد پارامترهای جنبش نیرومند ایفا می‌کند. در این پژوهش، پارامترهای گسل مسبب اولین زمین‌لرزه ۲۱ مرداد ۱۳۹۱ اهر-ورزقان با بزرگای گشتاوری ۶/۴ که در ایستگاه شتاب‌نگاری مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن ثبت شده است با شبیه‌سازی به روش کاتوره‌ای گسل محدود تعیین شد. برای تعیین پارامترهای گسل مسبب این زمین‌لرزه از ۳۹ شتاب‌نگاشت که تا فاصله رومرکزی ۱۷۵ کیلومتر به ثبت رسیده، استفاده شده است. مقدار پارامتر اُفت طیفی برای مؤلفه افقی و مؤلفه عمودی به ترتیب ۰/۰۳۴ و ۰/۰۴۷ برآورد شد. مدل گسل به‌دست آمده برای این زمین‌لرزه نشان‌دهنده گسلی با ابعاد ۱۰ × ۱۵ کیلومتر است. نتایج حاصل نشان می‌دهد که نقطه شروع گسیختگی در ابعاد ۳ × ۴ بوده که نشان‌دهنده انتشار گسیختگی به سمت غرب است. امتداد و شیب صفحه گسل برآورد شده برای این زمین‌لرزه با میانگین‌گیری وزنی روی پارامترهای به‌دست آمده در هریک از ایستگاه‌های شتاب‌نگاری شبیه‌سازی شده با سطح کیفیت A و B، به ترتیب برابر ۸۵ و ۸۳ درجه به‌دست آمد. ژرفای کانونی ۱۲ کیلومتر و اُفت‌استرس ۶۰ بار برآورد شد. مقادیر به‌دست آمده هم‌خوانی خوبی با نتایج گزارش شده از سوی موسسه‌های گوناگون دارد.

واژه‌های کلیدی: شبیه‌سازی جنبش نیرومند زمین، روش کاتوره‌ای گسل محدود، زمین‌لرزه اهر-ورزقان، شمال غرب ایران

Simulation of the first earthquake August 11, 2012 Ahar-Varzaghan using stochastic finite fault method

Mahood, M.¹, Akbarzadeh, N.² and Hamzehloo, H.³

¹Assistant Professor, Department of Geophysics, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

²M.Sc. Graduated, Department of Geophysics, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

³Associate Professor, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, Tehran, Iran

(Received: 09 Dec 2013, Accepted: 20 May 2014)

Summary

On 11th of August 2012 the region was surprisingly struck by a shallow Mw 6.4 (USGS) earthquake with pure right-lateral strike-slip character only about 50 km north of the North-Tabriz Fault. An east-west striking surface rupture of about 20 km length was observed in the field by Geological Survey of Iran. Only 11 minutes later and about 6 km further NW a second shallow event with Mw 6.2 occurred. It showed an NE-SW oriented oblique thrust mechanism (HRVD). This earthquake sequence provides an opportunity to

better understand the processes of active deformation and their causes in NW-Iran.

In recent years, seismologists have attempted to develop quantitative models of the earthquake rupture process with the ultimate goal of predicting strong ground motion. The choice of ground-motion model has a significant impact on hazard estimates for an active seismic zone such as the NW-Iran. Simulation procedures provide a means of including specific information about the earthquake source, the wave propagation path between the source and the site and local site response in an estimation of ground motion. Simulation procedures also provide a means of estimating the dependence of strong ground motions on variations in specific fault parameters. Several different methods for simulating strong ground motions are available in the literature. A number of possible methods that could be used to generate synthetic records include (i) deterministic methods, (ii) stochastic methods, (iii) empirical Green's function, (iv) semi-empirical methods, (v) composite source models, and (vi) hybrid methods.

The stochastic method begins with the specification of the Fourier spectrum of ground motion as a function of magnitude and distance. The acceleration spectrum is modeled by a spectrum with a ω^2 shape, where ω = angular frequency (Aki, 1967; Brune, 1970; Boore 1983). Finite fault modeling has been an important tool for the prediction of ground motion near the epicenters of large earthquakes (Hartzel, 1978; Irikura, 1983; Joyner and Boore, 1986; Heaton and Hartzel, 1986; Somerville et al., 1991; Tumarkin and Archuleta, 1994; Zeng et al. 1994; Beresnev and Atkinson, 1998). One of the most useful methods to simulate ground motion for a large earthquake is based on the simulation of a number of small earthquakes as subfaults that comprise a big fault. A large fault is divided into N subfaults and each subfault is considered as a small point source (introduced by Hartzel, 1978). The ground motions contributed by each subfault can be calculated by the stochastic point-source method and then summed at the observation point, with a proper time delay, to obtain the ground motion from the entire fault. We used the dynamic corner frequency approach. In this model, the corner frequency is a function of time, and the rupture history controls the frequency content of the simulated time series of each subfault.

In this study, we identify the source parameters of the first earthquake August 11, 2012 Ahar-Varzaghan earthquake using stochastic finite fault method (Motazedian and Atkinson, 2005). We estimated the causative rupture length and the downdip causative rupture width using the empirical relations of Wells and Coppersmith (1994), from the best defined aftershocks zone and depth distribution of these aftershocks as 15km and 10km, respectively. The simulated results compared with recorded ones on both frequency and time domain. The good agreement between the simulations and records, at both low and high frequencies, gives us confidence in our simulation model parameters for NW-Iran. The estimated strike and dip of the causative fault are 85° and 83° . The fault plane was divided into 5×5 elements. Rupture was propagated at $(i,j) = (4 \times 3)$ element from east to west. The focal depth is approximately 12 km. We then obtained a spectral decay parameter (κ) from the slope of smoothed amplitude of the Fourier spectra of acceleration at higher frequencies. The best fit coefficient for the horizontal component is $\kappa = 0.0002R + 0.047$.

The kappa factor for the vertical component is estimated based on the same procedure and estimated $\kappa = 0.0002R + 0.034$. These equations represent the κ_0 , for horizontal component is larger than that of the vertical component. This confirms that the attenuation of higher frequencies is much less on the vertical than the horizontal component, as the vertical component is less sensitive to the variation of shear-wave velocity of near-surface deposits. The clear difference between vertical and horizontal values suggests that κ_0 contains dependence on near surface site specific attenuation

effects. In the absence of three-component stations, values obtained from vertical components may be helpful for a first estimate of this parameter. We also calculated residuals for each record at each frequency, where the residual is defined as $\log(\text{observed PSA}) - \log(\text{predicted PSA})$, where PSA is the horizontal component of 5% damped pseudoacceleration. We sorted simulated records according to agreement between Fourier spectrum and response spectra into two groups, A and B. The simulation using A quality agrees better with observed records than that using B quality. The lowest residuals averaged over all frequencies are from 0.4 to 18.3 Hz for A quality and from 1.2 to 18 Hz for B quality simulated.

Keywords: Strong ground motion, Stochastic finite fault method, Ahar-Varzaghan earthquake, NW Iran

۱ مقدمه

(Composite Source Model) و پیوندی (Hybrid).
 مزیت این روش‌ها آن است که اطلاعات مربوط به چشمه زمین‌لرزه، انتشار موج بین چشمه و ایستگاه، شرایط ایستگاه و کاهندگی، در شبیه‌سازی جنبش نیرومند زمین در نظر گرفته می‌شود که در نهایت باعث اطمینان بیشتری در برآورد ویژگی‌های جنبش نیرومند زمین در حوزه زمان و بسامد می‌شود. از روش‌های کاتوره‌ای به صورت گسترده‌ای در پیش‌بینی جنبش‌های زمین استفاده شده است. روش‌های کاتوره‌ای دو نوع‌اند: یک نوع از چشمه لرزه‌ای نقطه‌ای و نوع دیگر از چشمه لرزه‌ای گسل محدود استفاده می‌کند. مدل گسل محدود ابزاری مهم برای پیش‌بینی حرکات زمین در نزدیکی رومرکز زمین‌لرزه‌های مهم به شمار می‌رود. روش کاتوره‌ای برای چشمه نقطه‌ای، عملاً در شبیه‌سازی نگاهت‌های جنبش نیرومند مربوط به زمین‌لرزه‌های بزرگ و یا در میدان نزدیک، به علت لحاظ نشدن مسائلی نظیر ابعاد گسیختگی، پدیده جهت‌یافتگی و مانند آن با محدودیت‌هایی همراه است. در روش گسل محدود، شبیه‌سازی حرکات ناشی از تعدادی زمین‌لرزه‌های کوچک ناشی از زیرگسل‌ها که تشکیل دهنده یک گسل هستند، در حکم روشی برای پیش‌بینی حرکات در میدان نزدیک مطرح شده است. معتضدیان و اتکینسون (۲۰۰۵)، روشی را برای شبیه‌سازی نگاهت‌های

جنبش نیرومند زمین بر اثر زمین‌لرزه، نتیجه فرایند فیزیکی پیچیده‌ای است که از سه مرحله تشکیل شده است: موج‌های لرزه‌ای به مثابه بخشی از انرژی کرنشی آزاد شده از گسل فعال هستند که مربوط به اثر چشمه است، سپس در سراسر پوسته زمین منتشر می‌شوند، که این پدیده انتشار موج یا اثر مسیر نام دارد و در نهایت تا رسیدن به سطح، تحت تأثیر تغییرات در لایه‌های کم‌عمق قرار می‌گیرند که همان اثرات ساختگاه است. دستگاه ثبت کننده این امواج نیز، تأثیراتی روی نگاهت ثبت شده، اعمال می‌کند که می‌توان این تأثیرات را با توجه به مشخصات دستگاه حذف کرد. در نتیجه هم‌میخت این عوامل، نگاهت زمین‌لرزه به دست می‌آید که مشخصات اساسی آن برای دوره‌های بلند و کوتاه متفاوت است. ثبت اولین نگاهت در نزدیکی گسل در زمین‌لرزه ۱۹۶۶ پارکفیلد، زمینه را برای معرفی روشی تحت عنوان شبیه‌سازی جنبش نیرومند زمین، برای برآورد ویژگی‌های جنبش نیرومند زمین فراهم کرد. در این روش روند زمانی جنبش نیرومند زمین با استفاده از روش‌های نظری شبیه‌سازی می‌شود. این روش‌ها عبارت‌اند از:

کاتوره‌ای (Random)، تابع تجربی گرین (Empirical Green's Function)، تابع نیمه‌تجربی گرین (Semi-Empirical Green's Function)، مدل چشمه ترکیبی

اندرسون و هاف (۱۹۸۴) در محدوده بسامدهای زیاد طیف فوریه شتاب زمین از رابطه (۲) تبعیت می‌کند:

$$f > f_E, \quad A(f) = A_0 e^{-\pi f} \quad (2)$$

در این رابطه A_0 به خواص چشمه، فاصله رومرکزی و برخی پارامترهای دیگر وابسته است و دامنه طیف را کنترل می‌کند. f بسامد و f_E محدوده بسامد کم است.

در این پژوهش مقادیر کاپا برای هر سه مؤلفه جنبش زمین محاسبه شده است ولی فقط مقدار آن برای مؤلفه افقی (که از میانگین‌گیری دو مؤلفه طولی و عرضی به دست می‌آید) درحکم پارامتر ورودی برای شبیه‌سازی جنبش نیرومند زمین به روش کاتوره‌ای دارای اهمیت است و مورد استفاده قرار گرفته است. در این تحقیق از ۳۹ شتاب‌نگاشت ثبت شده از زمین‌لرزه اول اهر-ورزقان، که تصحیح خط مبنا شده‌اند، به منظور تعیین مقدار k استفاده شده است. برای این منظور با کدنویسی در محیط مت‌کب (Matlab) مقدار پارامتر اُفت طیفی هر یک از مؤلفه‌های شتاب‌نگاشت ثبت شده تعیین شد. طیف فوریه دامنه موج برشی هر یک از شتاب‌نگاشت‌ها برحسب بسامد محاسبه و روی محورهای لگاریتمی-لگاریتمی رسم می‌شود. شکل ۱ طیف فوریه دامنه شتاب مؤلفه طولی ایستگاه اهر را روی محورهای لگاریتمی-لگاریتمی نشان می‌دهد. محدوده بخش مسطح طیف برای این ثبت در محدوده بسامد گوشه و بسامد بیشینه مشخص شده است. با توجه به شکل مقدار f_{max} برای این ثبت در بسامد حدود ۱۰ هرتز انتخاب شده است. سپس با گرفتن لگاریتم طبیعی از طرفین رابطه (۲) خواهیم داشت:

$$\ln(A(f)) = -\pi f + \ln(A_0) \quad (3)$$

طبق رابطه (۳) بر طیف دامنه در محدوده بسامدی کم و زیاد، منحنی درجه یک به روش کمترین مربعات برازش داده می‌شود. در شکل ۲ با خطی کردن محور بسامد، کاهش خطی لگاریتم دامنه طیفی شتاب ثبت شده

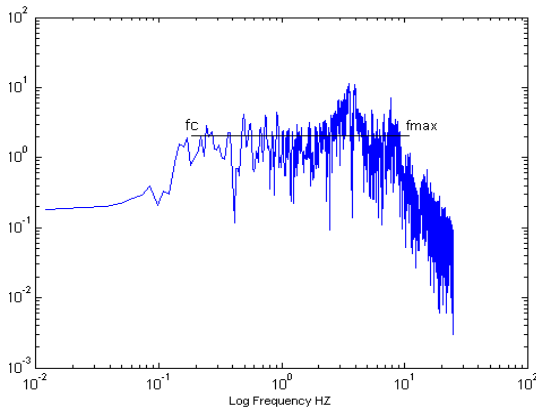
زمین‌لرزه براساس روش کاتوره‌ای گسل محدود براساس بسامد گوشه دینامیکی عرضه کرده‌اند. با بهبود یافتن این روش و افزایش پارامترهای بیشتر، نتایج دقیق‌تری نیز حاصل شده است (اتکینسون و معتضدیان، ۲۰۱۳). در این مدل بسامد گوشه تابعی از زمان است و محتوای بسامدی سری زمانی شبیه‌سازی شده در هر زیرگسل با توجه به تاریخچه گسیختگی کنترل می‌شود. در این روش یک گسل بزرگ به N زیرگسل تقسیم می‌شود و هر کدام از آنها درحکم یک چشمه نقطه‌ای در نظر گرفته می‌شوند. حرکات زمین ناشی از هر کدام از زیرگسل‌ها، که می‌توان آن را بر مبنای روش کاتوره‌ای برای چشمه نقطه‌ای محاسبه کرد، با در نظر گرفتن تأخیر زمانی مناسب برای هر کدام از آنها به منظور تعیین سری زمانی حرکات ناشی از یک گسلش محدود، با یکدیگر جمع می‌شوند (رابطه ۱):

$$a(t) = \sum_{j=1}^{nw} \sum_{i=1}^{nl} a_{ij}(t + \Delta t_{ij}) \quad (1)$$

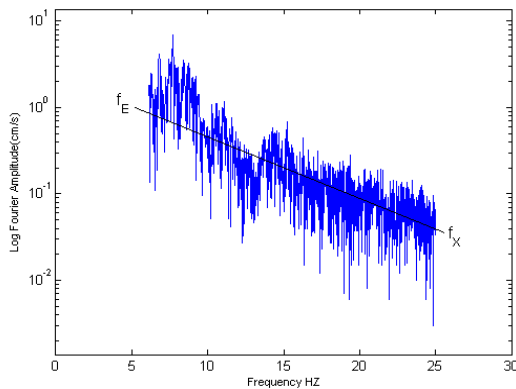
در این رابطه nw و nl تعداد زیرگسل‌ها در امتداد طول و پهناى گسل اصلی هستند. در نتیجه $nl \times nw = N$ و Δt_{ij} تأخیر زمانی مربوط به امواج منتشر شده از i آمین زیرگسلی که به نقطه مورد نظر می‌رسند است. $a_{ij}(t)$ نیز مقدار شتاب محاسبه شده به روش کاتوره‌ای نقطه‌ای است.

۲ تعیین پارامتر اُفت طیفی

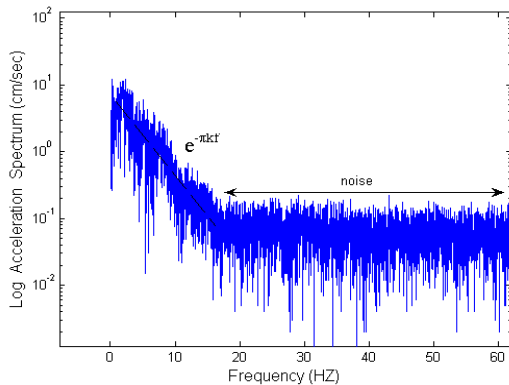
یکی از پارامترهای مهم برای توصیف جنبش نیرومند زمین در بسامدهای زیاد (بیشتر از ۱ هرتز) پارامتر اُفت طیفی (کاپا) است. کاپا یکی از پارامترهای کلیدی ورودی، برای شبیه‌سازی جنبش نیرومند زمین به روش کاتوره‌ای در نواحی است که داده‌های جنبش نیرومند به اندازه کافی وجود ندارد تا بتوان از معادلات تجربی برای پیش‌بینی حرکات نیرومند زمین استفاده کرد (داگلاس و همکاران، ۲۰۰۹). براساس تحقیقات صورت گرفته



شکل ۱. طیف فوری دامنه شتاب ثبت شده از زمین‌لرزه اول اهر-ورزقان در ایستگاه اهر. محدوده f_c و f_{max} به ترتیب در بسامدهای ۰/۲ و ۱۰ هرتز انتخاب شده است.



شکل ۲. نمایش طیف فوری دامنه شتاب ثبت شده از زمین‌لرزه اول اهر-ورزقان در ایستگاه اهر روی محورهای خطی-لگاریتمی. بسامد کم (f_E) و بسامد زیاد (f_X) به صورت تجربی به گونه‌ای انتخاب شده‌اند که آفت دامنه طیف فوری شتاب بین آن دو خطی باشد.



شکل ۳. نمایش طیف فوری دامنه شتاب مؤلفه طولی شتاب‌نگاشت ثبت شده در ایستگاه یکان کهریز روی محورهای خطی-لگاریتمی به همراه محدوده نوفه مشاهده شده روی این نگاشت.

در ایستگاه اهر با بسامد نشان داده شده است. باتوجه به شکل مقدار f_E ، ۵ هرتز انتخاب شده است.

در این تحقیق برای نگاشت‌های ثبت شده در دستگاه‌های رقومی SSA-2 بسامد قطع پایین برای هر مؤلفه هر نگاشت به طور جداگانه به کمک طیف فوری آن تعیین شده و بسامد قطع بالا حداکثر برابر ۲۵/۰ هرتز در نظر گرفته شده است. شکل ۳ طیف فوری دامنه شتاب مؤلفه طولی ایستگاه یکان کهریز را روی محورهای خطی-لگاریتمی نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود در بسامد حدود ۱۷ هرتز روند آفت خطی خاتمه می‌یابد و پس از آن در بسامدهای بیشتر، طیف به علت وجود نوفه، مسطح می‌شود که باید با انتخاب فیلتر پایین‌گذر مناسب، این بخش از طیف حذف شود.

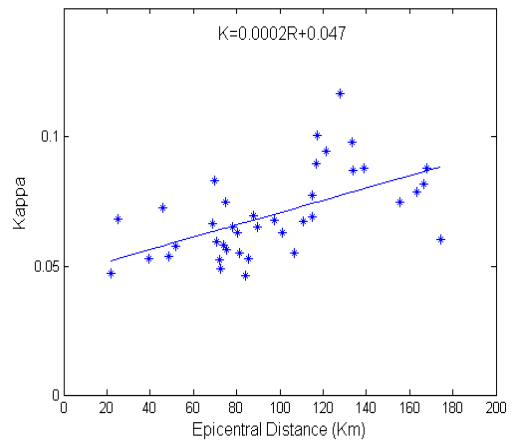
با توجه به اینکه در روش اندرسون و هاف (۱۹۸۴) پارامتر آفت طیفی به صورت تجربی برای هر مؤلفه به دست می‌آید، پارامتر حاصل دارای مقداری خطا است. نتایج به دست آمده از محاسبه مقادیر کاپا در ۱۰ ایستگاه شتاب‌نگاری تا فاصله رومرکزی ۱۷۵ کیلومتر برای سه مؤلفه طولی، عرضی و عمودی در جدول ۱ نشان شده است. روابط به دست آمده برای κ برحسب فاصله رومرکزی برای مؤلفه افقی $\kappa = 0.0002R + 0.047$ و مؤلفه عمودی $\kappa = 0.0002R + 0.034$ است که مقدار k_0 برای مؤلفه افقی کمی بزرگ‌تر از مؤلفه عمودی است. کوچک بودن کاپای مؤلفه عمودی ممکن است به علت بسامد گوشه بالاتر در طیف عمودی در مقایسه با مؤلفه افقی باشد. همچنین مؤلفه عمودی، حساسیت کمتری نسبت به تغییرات سرعت موج برشی رسوبات نزدیک سطح زمین دارد (معتضدیان، ۲۰۰۶). شکل‌های ۴ و ۵ به ترتیب تغییرات مقدار k با افزایش فاصله رومرکزی را برای مؤلفه‌های افقی و عمودی زمین‌لرزه اول اهر-ورزقان نشان می‌دهند.

شتاب‌نگاشت مشاهده شده مورد مقایسه قرار می‌گیرد، پارامترهای صفحه گسل به گونه‌ای انتخاب می‌شوند که بیشترین هم‌خوانی بین نگاشت واقعی و نگاشت مصنوعی وجود داشته باشد. جدول ۲ عرضه کننده پارامترهای ورودی مدل برای شبیه‌سازی شتاب‌نگاشت‌های مصنوعی با استفاده از برنامه اکسیم است. با توجه به کمبود داده‌های شتاب‌نگاری در تعیین فاکتور کیفیت، مقدار این کمیت را به صورت مدل اولیه و پایه $204f^{0.52}$ (نظام اسلامی، ۱۳۸۲) برای این ناحیه انتخاب کردیم، اما با توجه به لرزه‌خیزی زیاد منطقه، میزان فاکتور کیفیت بایستی کمتر از مقدار تعیین شده انتخاب می‌شد. با توجه به سایر تحقیقات صورت گرفته در این منطقه از جمله فرهد و همکاران (۲۰۰۳) مقدار نهایی برای این کمیت برابر $95f^{0.8}$ انتخاب شده است. برای تعیین میزان پارامتر σ استرس، ابتدا میزان ۵۰ بار (کاناموری و اندرسون، ۱۹۷۵) در نظر گرفته شد و در نهایت با آزمون و خطا و تکرار محاسبات، مقدار بهینه ۶۰ بار، بیشترین نسبت هم‌خوانی را بین طیف فوریه مشاهده‌ای و واقعی ایجاد کرد.

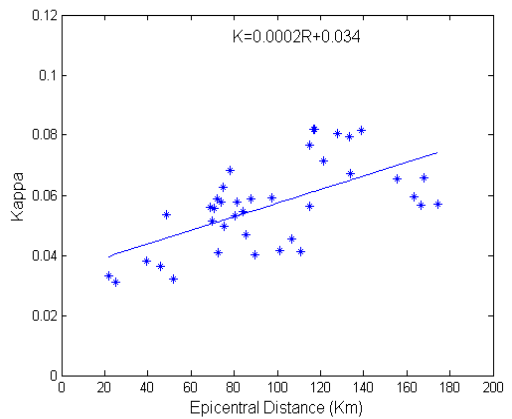
با توجه به اینکه میزان توزیع لغزش و اسپریتی‌ها روی صفحه گسل مسبب این زمین‌لرزه در دسترس نبود، از قابلیت برنامه اکسیم برای تولید میزان لغزش به صورت تصادفی و بر مبنای توزیع نرمال استفاده شد. همچنین به منظور اعمال گسترش هندسی مناسب در منطقه شمال غرب ایران از نتایج تحقیقات شریفی و همکاران (۱۳۹۱) استفاده شد. به منظور تعیین ضرایب تشدید ساختگاه، نتایج تحقیقات صورت گرفته بور و جویئر (۱۹۹۷) مورد استفاده قرار گرفته است.

۴ تعیین درجه کیفیت هریک از شتاب‌نگاشت‌های شبیه‌سازی شده

مقیاسی دو درجه‌ای برای تعیین کیفیت هریک از



شکل ۴. تغییرات K با افزایش فاصله رومرکزی برای مؤلفه افقی زمین‌لرزه اول ۲۱ مرداد ۱۳۹۱ اهر-ورزقان.



شکل ۵. تغییرات K با افزایش فاصله رومرکزی برای مؤلفه عمودی زمین‌لرزه اول ۲۱ مرداد ۱۳۹۱ اهر-ورزقان.

۳ شبیه‌سازی زمین‌لرزه اول ۲۱ مرداد ۱۳۹۱ اهر-ورزقان (استان آذربایجان شرقی)

برای تعیین پارامترهای گسل مسبب این زمین‌لرزه از ۳۹ شتاب‌نگاشت که در ایستگاه‌های شتاب‌نگاری مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن تا فاصله رومرکزی ۱۷۵ کیلومتر به ثبت رسیده، استفاده شده است. به منظور شبیه‌سازی جنبش نیرومند زمین‌لرزه اول اهر-ورزقان با استفاده از روش کاتوره‌ای گسل محدود و با به کارگیری برنامه اکسیم (EXSIM)، برای هریک از ایستگاه‌ها، شتاب‌نگاشت شبیه‌سازی شده با دو مؤلفه T و L

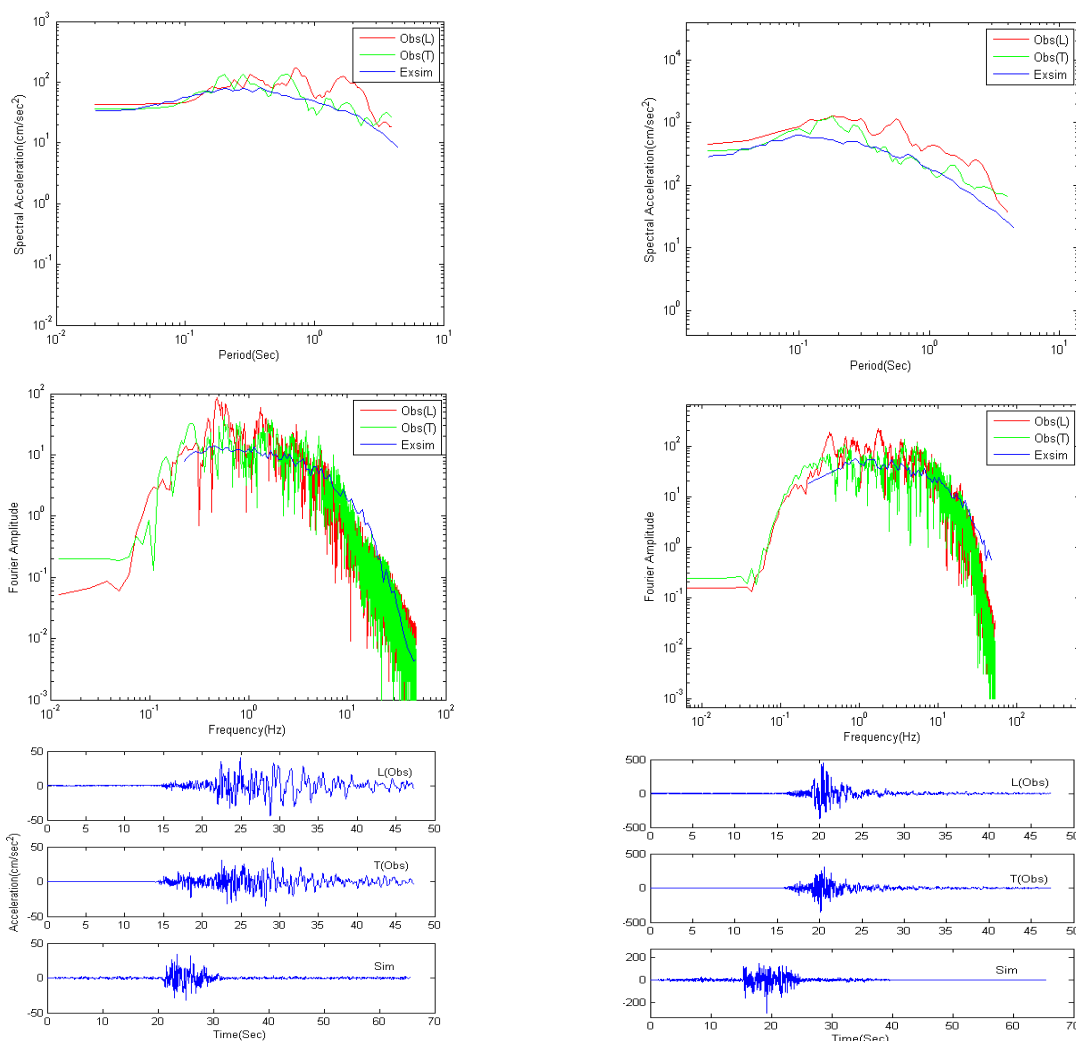
تاریخچه زمانی، طیف پاسخ و طیف فوریه شبیه‌سازی شده با سطح کیفیت B را نشان می‌دهد.

به منظور تعیین مقدار بهینه پارامترهای صفحه گسل مسبب این زمین‌لرزه، میانگین‌گیری وزنی روی پارامترهای به‌دست آمده در هر یک از ایستگاه‌های شتاب‌نگاری به گونه‌ای لحاظ شده که نکاشت‌های شبیه‌سازی شده با سطح کیفیت A وزن ۰/۶ و به نکاشت‌های با کیفیت B وزن ۰/۴ داده شده است. با این روش مقدار بهینه امتداد و شیب صفحه گسل به ترتیب برابر ۸۵ و ۸۳ درجه به‌دست می‌آید. بررسی‌های به انجام رسیده نشان می‌دهد که گسل مسبب زمین‌لرزه اول اهر-ورزقان گسلی شرقی-غربی است و از گسل مسبب زمین‌لرزه دوم که روند شمال شرق-جنوب غربی دارد متفاوت است.

شتاب‌نگاشت‌های شبیه‌سازی شده به روش کاتوره‌ای گسل محدود و با برنامه اکسیم انتخاب شده است. رده A معرف بالاترین کیفیت و رده B نشان‌دهنده سطح کیفیت کمتر است. نکاشت‌هایی که طیف فوریه دامنه شتاب شبیه‌سازی شده و مشاهده شده آنها همبستگی خوبی در دامنه و شکل به‌ازای گستره بسامدی ۰/۲ تا ۲۰ هرتز و یا انطباق بهتری در محدوده بسامدی بالاتر یعنی ۱ تا ۲۰ هرتز داشته باشند و یا بین طیف پاسخ مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده آنها در دوره‌های گوناگون هم‌خوانی قابل قبولی وجود داشته باشد، در سطح کیفیت A قرار می‌گیرند، در غیراین صورت کیفیت B خواهند داشت. یک نمونه از نکاشت‌های شبیه‌سازی شده با سطح کیفیت A در شکل ۶ نشان داده شده است. همچنین شکل ۷ یک نمونه از

جدول ۱. نتایج حاصل از محاسبه مقدار K در ۱۰ ایستگاه شتاب‌نگاری ثبت‌کننده زمین‌لرزه اول ۲۱ مرداد ۱۳۹۱ اهر-ورزقان.

Station	Long.	Lat.	Epi. Dis. (km)	Spectral Decay Parameter(κ)			
				L.com.	T.com.	Ave.(L,T)	V.com.
Ahar	47.059	38.474	21.66	0.0576	0.037	0.047	0.0432
Varzaqan	46.64	38.507	25.01	0.0764	0.0602	0.068	0.0311
Haris	47.119	38.247	39.404	0.0467	0.0586	0.053	0.0382
Kaleibar	47.039	38.87	45.888	0.0848	0.0601	0.072	0.0662
Khajeh	46.589	38.154	48.696	0.0619	0.0456	0.054	0.0535
Nahand	46.47	38.248	51.711	0.056	0.059	0.058	0.0322
Hoorand	47.369	38.858	68.944	0.0744	0.0586	0.067	0.0561
Damirchi	47.373	38.123	69.89	0.07	0.0962	0.083	0.0715
Basmanj	46.471	37.996	70.573	0.0628	0.0559	0.059	0.0555
Bostan Abad	46.837	37.846	72.106	0.0534	0.0511	0.052	0.0588
Sharabiyān	47.101	37.887	72.394	0.0553	0.0423	0.049	0.041



شکل ۶. نمایش طیف فوریه، طیف پاسخ و تاریخچه زمانی مؤلفه‌های افقی نگاشت‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده با کیفیت A زمین‌لرزه اول ۲۱ مرداد ۱۳۹۱ اهر-ورزقان در ایستگاه ورزقان.

شکل ۷. نمایش طیف فوریه، طیف پاسخ و تاریخچه زمانی مؤلفه‌های افقی نگاشت‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده با کیفیت B زمین‌لرزه اول ۲۱ مرداد ۱۳۹۱ اهر-ورزقان در ایستگاه تبریز ۵.

در جدول ۳ نتایج حاصل از این تحقیق به همراه نتایج گزارش شده دیگر مرجع‌ها آورده شده است. با مقایسه نگاشت‌های واقعی و شبیه‌سازی شده، مقدار به‌دست آمده برای امتداد و شیب صفحه گسل در این تحقیق هم‌خوانی بسیار خوبی با نگاشت‌های واقعی و نتیجه گزارش شده HRVD نشان می‌دهد. برای به‌دست آوردن عمق کانونی این زمین‌لرزه با استفاده از مقدار بهینه عمق بالای صفحه گسل که حدود ۷ کیلومتر به‌دست آمده و کانون این زمین‌لرزه که در المان

۳ عرضی برآورد شده است، عمق کانونی این زمین‌لرزه حدود ۱۲ کیلومتر به‌دست می‌آید که با نتایج گزارش شده مطابقت دارد. همچنین قرار گرفتن کانون زمین‌لرزه در المان 3×4 ، نشان‌دهنده انتشار گسیختگی به سمت غرب است.

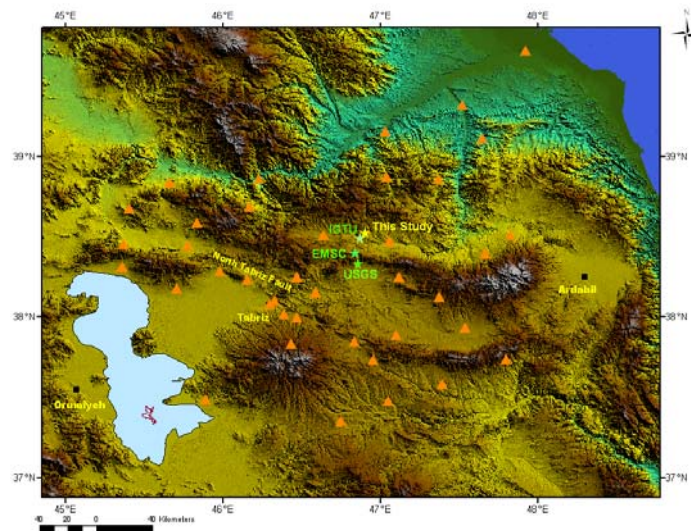
در شکل ۸ موقعیت رومرکز اعلام شده مرجع‌های گوناگون در مقایسه با نتیجه به‌دست آمده در این تحقیق به همراه ایستگاه‌های شتاب‌نگاری ثبت کننده این زمین‌لرزه نشان داده شده است.

جدول ۲. پارامترهای ورودی برنامه اکسیم برای شبیه‌سازی جنبش نیرومند زمین‌لرزه اول اهر-ورزقان

Values	پارامترهای ورودی برنامه اکسیم (EXSIM)
6.4	بزرگای گشتاوری
60(bars)	اُفت استرس
$95t^{0.8}$	فاکتور کیفیت Q(f)
$T_0 + 0.1 R$ (Km)	مدت دوام
0.047(s)	کاپا
15 Km × 10 Km	ابعاد صفحه گسل
5 , 5	تعداد خرد گسل‌ها در راستای طول و عرض صفحه گسل
7(Km)	عمق فوقانی صفحه گسل
50%	مساحت فعال (Pulsing Percent)
Saragoni-Hart	تابع پنجره
3.3(Km/sec)	سرعت موج برشی
0.8β	سرعت انتشار گسیختگی
2.8 g/cm ³	چگالی
5%	میرایی
Random	توزیع لغزش
4 × 3	المانی که گسیختگی از آن شروع می‌شود

جدول ۳. نتایج حاصل شده از این تحقیق به همراه نتایج گزارش شده دیگر مرجع‌ها برای زمین‌لرزه اول اهر-ورزقان.

Reference	Latitude	Longitude	Strike	Dip	Magnitude	Depth(Km)
IGUT	38.49	46.87	95	87	Mn=6.2	9
IEES	38.55	46.87	Mb=6.1	15
HRVD	38.31	46.8	84	84	Mw=6.5	15
BHRC	38.52	46.86	Mw=6.1	12
USGS	38.33	46.86	89	57	Mw=6.4	10
This study	38.51	46.89	85	83	Mw=6.4	12



شکل ۸. ایستگاه‌های شتاب‌نگاری مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن ثبت کننده زمین‌لرزه اول اهر-ورزقان (مثلث) به همراه موقعیت رومرکز گزارش شده مرجع‌های گوناگون و به‌دست آمده از تحقیق حاضر.

۵ تعیین مقادیر باقی مانده

مقدار باقی‌مانده برای همه ثبت‌های شبیه‌سازی شده محاسبه شده است. باقی‌مانده‌ها به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\text{Residual} = \log(\text{Observed Pseudoacceleration [PSA]}) - \log(\text{Predicted PSA}) \quad (۴)$$

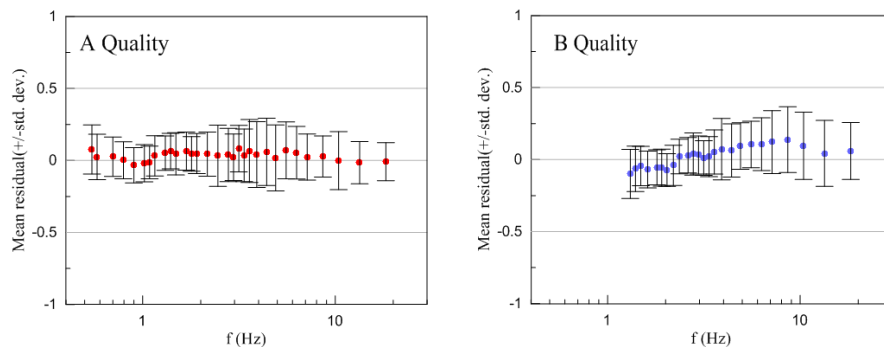
در این رابطه PSA مؤلفه افقی ۵٪ میرا شده شبه‌شتاب است. شکل ۹ کمترین مقدار میانگین باقی‌مانده‌ها را به منزله تابعی از بسامد برای نگاشت‌های شبیه‌سازی شده با کیفیت A و B نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود میانگین باقی‌مانده‌ها در سطح کیفیت A نزدیک‌تر از کیفیت B به صفر است. کمترین مقدار میانگین باقی‌مانده‌ها برای همه نگاشت‌های انتخاب شده در سطح کیفیت A در محدوده بسامدی ۰/۴ تا ۱۸/۳ هرتز و برای نگاشت‌های شبیه‌سازی شده با کیفیت B در محدوده بسامدی ۱/۲ تا ۱۸ هرتز است. کمتر بودن میزان میانگین باقی‌مانده‌ها در محدوده بسامدی بیشتر از یک هرتز حاکی از آن است که روش شبیه‌سازی کاتوره‌ای گسل محدود برای شبیه‌سازی جنبش‌های نیرومند زمین در

محدوده بسامدهای زیاد، دقت بیشتری دارد.

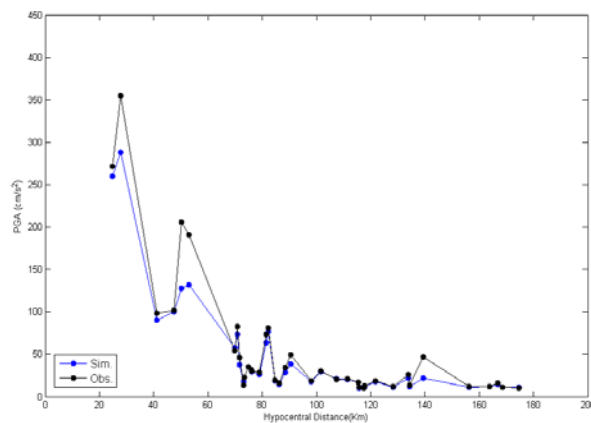
به‌منظور کسب اطمینان بیشتر از انتخاب مناسب پارامترهای ورودی لازم برای شبیه‌سازی این زمین‌لرزه، PGAهای شبیه‌سازی شده به روش کاتوره‌ای گسل محدود در ایستگاه‌های شبکه شتاب‌نگاری کشور بر حسب فاصله کانونی در شکل ۱۰ رسم شد. روند کلی نمودار به‌دست آمده، مشابه نمودار PGAهای مشاهده شده در هر یک از این ایستگاه‌ها بر حسب فاصله کانونی است و در هر دو نمودار، مقادیر PGA با افزایش فاصله کانونی، کاهش می‌یابد. هم‌روند بودن این دو نمودار، حتی در فواصل دور، بیانگر این است که پارامترهای مدل گسل در حکم پارامترهای ورودی برای شبیه‌سازی به روش کاتوره‌ای گسل محدود، در فواصل دور از گسل نیز، می‌تواند پارامترهای مناسبی برای اجرای عملیات شبیه‌سازی با این روش، در این منطقه باشد. در جدول ۴، مقایسه شتاب اوج مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در ۱۰ ایستگاه شتاب‌نگاری ثبت کننده زمین‌لرزه اول اهر-ورزقان نشان داده شده است.

جدول ۸. مقادیر PGA شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای تصحیح شده در ۱۰ ایستگاه ثبت کننده زمین‌لرزه اول اهر-ورزقان.

Station	PGA(Obs)cm/sec ²			PGA(Exsim)cm/s ²
	L	T	V	
Ahar	199.73	271.89	93.55	259.84
varzaqan	449.79	354.49	214.77	287.88
heris	52.1	98.79	42.82	90.01
Hoorand	66.86	54.35	41.93	58.01
Lahrood	16.01	20.47	11.56	21.21
Kaleibar	101.58	60.95	62.36	100.33
khajeh	205.65	289.27	97.51	127.66
Nahand	191.31	217.21	100.72	131.71
Damirchi	92.85	82.65	39.51	73.31
Basmanj	46.2	45.82	32.12	38.07



شکل ۹. کمترین مقدار میانگین باقی مانده‌ها برحسب بسامد در دو سطح کیفیت A و B برای زمین‌لرزه اول اهر-ورزقان برای ایستگاه‌های شتاب‌نگاری ثبت کننده این رویداد تا فاصله رومرکزی ۱۷۵ کیلومتری. انحراف معیار باقی مانده‌ها با error bar نشان داده شده است.



شکل ۱۰. مقایسه شتاب اوج مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در ۳۹ ایستگاه شتاب‌نگاری ثبت کننده زمین‌لرزه اول اهر-ورزقان.

۶ نتیجه گیری

بررسی های صورت گرفته روی نگاشت های زمین لرزه اول مهر-ورزقان نشان دهنده افزایش k با فاصله رومرکزی است. مقدار کاپا برای مؤلفه افقی و مؤلفه عمودی به ترتیب $0/047$ و $0/034$ برآورد شد. مدل گسل به دست آمده برای این زمین لرزه نشان دهنده گسلی با ابعاد 15×10 کیلومتر است. نتایج حاصل نشان می دهد که نقطه شروع گسیختگی در المان 3×4 بوده است که این امر نشان دهنده انتشار گسیختگی به سمت غرب است. امتداد و شیب صفحه گسل برآورد شده برای این زمین لرزه با میانگین گیری وزنی روی پارامترهای به دست آمده در هریک از ایستگاه های شتاب نگاری شبیه سازی شده با سطح کیفیت A و B، به ترتیب برابر ۸۵ و ۸۳ درجه به دست آمد. ژرفای کانونی، ۱۲ کیلومتر و آفت استرس، ۶۰ بار برای این زمین لرزه برآورد شد، که با نتایج گزارش شده دیگر مرجع ها هم خوانی خوبی نشان می دهد. هم خوانی خوب بین نتایج شتاب نگاشت های شبیه سازی شده و مشاهده ای، به خصوص نگاشت های شبیه سازی شده با سطح کیفیت A، نشان دهنده انتخاب مناسب پارامترهای مؤثر بر جنبش نیرومند زمین (پارامترهای چشمه، مسیر، ساختگاه) در حکم پارامترهای ورودی برنامه شبیه سازی اکسیم است.

تشکر و قدردانی

در اینجا از مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن به خاطر در اختیار قرار دادن داده های شتاب نگاری استفاده شده در این تحقیق تشکر و قدردانی می شود.

مراجع

- استفاده از شتاب نگاشت ها، پانزدهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران، ۹۷-۱۰۰.
- سایت مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، ۱۳۹۱، گزارش زمین لرزه های دوگانه ۲۱ مرداد ۱۳۹۱ مهر-ورزقان.
- نظام اسلامی، ح.، ۱۳۸۲، تعیین فاکتور کیفیت برای پیرامون تبریز، پایان نامه کارشناسی ارشد، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران.
- Aki, K., 1967, Scaling law of seismic spectrum, *J. Geophys. Res.*, **72**, 1217-1231.
- Anderson, J. and Hough, S. E., 1984, A model for the shape of the Fourier amplitude spectrum of acceleration at high frequencies, *Bull. Seism. Soc. Am.* **74**, 1969-1993.
- Atkinson, G. M. and Motazedian, D., 2013, Ground-motion amplitudes for earthquakes in Puerto Rico, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **103**(3), 1846-185987.
- Beresnev, I. and Atkinson, G., 1998, Stochastic finite-fault modeling of ground motions from the 1994 Northridge, California earthquake, I. Validation on rock sites, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **88**, 1392-1401.
- Boore, D. M., 1983, Stochastic simulation of high-frequency ground motion based on seismological models of the radiated spectra, *Bull. Seis. Soc. Am.*, **73**(6), 1865-1894.
- Brune, J. N., 1970, Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes, *J. Geophys. Res.*, **75**, 4997-5009.
- Douglas, J., Gehl, P., Bonilla, L. F. and G'elis, C., 2009, A k model for mainland France, *Pure and Applied Geophysics*, **167**(11), 1303-1315.
- Hartzell, S., 1978, Earthquake aftershocks as Green's functions. *Geophys. Res. Letters*, **5**, 1-14.
- Heaton, T. and Hartzell, S., 1986, Source characteristics of hypothetical subduction earthquakes in the Northwestern United States, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **76**, 675-708.
- Irikura, K., 1983, Semi-Empirical Estimation of Strong Ground Motions During Large Earthquakes, *Bull. Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ.*, Vol. 33, Part 2, No 298.
- Joyner, W. and Boore, D., 1986, On simulating large earthquakes by Green's function additon of smaller earthquakes. In: *Earthquake Source Mechanics. Maurice Ewing Volume 6, Geophys. Monogr. Am. Geophys. Union*, **37**, 269-274.

شریفی، م.، بایرام نژاد، ا. و شمالی، ظ. ح.، ۱۳۹۱، تعیین ضریب میرایی تجربی برای شمال غرب ایران با

- Seism. Soc. Am., **81**, 1-27.
- Tumarkin, A. and Archuleta, R., 1994, Empirical ground motion prediction, *Annali Di Geofisica*, **37**, 1691-1720.
- Wells, D. L. and Coppersmith, K. J., 1994, New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **84**, 974-1002.
- Zeng, Y., Anderson, J. and Yu, G., 1994, A composite source model for computing realistic synthetic strong ground motions, *Geophys. Res. L.*, in press.
- www.bhrc.ac.ir
- Joyner, W. B. and Boore, D. M., 1997, Site amplification for generic rock sites, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **87**, 327-341.
- Motazedian, D. and Atkinson, G. M. 2005, Stochastic finite-fault modeling based on a dynamic corner frequency, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **95**, 995-1010.
- Motazedian, D., 2006, Region-specific key seismic parameters for earthquakes in Northern Iran, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **96**, 1383-1395.
- Somerville, P., Sen, M. and Cohee, B., 1991, Simulations of strong ground motions recorded during the 1985 Michoacan, Mexico and Valparaiso, Chile, earthquakes, *Bull.*