

رابطه کاهندگی بیشینه شتاب طیفی افقی جنبش زمین برای شمال غرب ایران

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

^۱گروه ژئوفیزیک، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
^۲پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۹۲/۰۸/۱۱، تاریخ پذیرش: ۹۴/۰۲/۱۴)

چکیده

در این تحقیق، برای اولین بار رابطه کاهندگی طیفی نظری-تجربی مناسب و کاربردی برای منطقه آذربایجان شرقی-شمال غرب ایران عرضه شده است. به این منظور از ۵۱ شتاب‌نگاشت ثبت شده روی شرایط ساختگاه سنگی در منطقه شمال غرب ایران که در ایستگاه‌های شتاب‌نگاری مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن از سال ۱۹۷۶ تا ۷ نوامبر ۲۰۱۲ به ثبت رسیده است، استفاده شد. به‌منظور تکمیل بانک داده‌ها برای بزرگا و فاصله‌هایی که اطلاعاتی در مورد آنها وجود ندارد، ۶۲ ایستگاه فرضی به موازات و عمود بر راستای دو گسل فعال منطقه (گسل شمال تبریز و گسل مسبب زمین‌لرزه اول اهر-ورزقان) قرار گرفت و با استفاده از شبیه‌سازی به روش تصادفی گسل محدود و با در نظر گرفتن پارامترهای زلزله‌شناسی منطقه، تعداد ۱۲۴۰ شتاب‌نگاشت مصنوعی با بازه بزرگای $M_w = 5-7.7$ و گام بزرگای $\Delta M = 0.2$ برای گسل شمال تبریز و $M_w = 5-6.7$ و گام بزرگای $\Delta M = 0.5$ برای گسل مسبب زمین‌لرزه اول اهر-ورزقان و فاصله تا تصویر سطحی گسل (I_{jb}) کمتر از ۱۵۰ کیلومتر ایجاد شد. با استفاده از روش برازش بیشترین احتمال جویبر و بور (۱۹۹۳) روی ۱۲۹۱ رویداد ثبت شده، ضرایب رابطه کاهندگی نظری-تجربی در ۱۴ تناوب متفاوت، برای منطقه آذربایجان شرقی-شمال غرب ایران عرضه شد. در نهایت به‌منظور حصول اطمینان از دقت رابطه پیشنهادی، مدل به‌دست آمده با روابط جهانی و روابط عرضه شده برای ایران مقایسه شد که هم‌خوانی خوبی با این روابط نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: رابطه کاهندگی جنبش نیرومند زمین، بیشینه شتاب، شبیه‌سازی تصادفی گسل محدود، گسل شمال تبریز، شمال غرب ایران

Attenuation relationship for the horizontal component of peak ground acceleration and acceleration response spectra in NW Iran

Nafiseh Akbarzadeh¹, Majid Mahood^{2*}, Hosseyn Hamzehloo²

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

²International Institute of Earthquake, Engineering and Seismology, Tehran, Iran

(Received: November 2, 2013, accepted: May 4, 2015)

Summary

The region of northwestern Iran is exceptional within the Arabian-Eurasian continental collision zone. The tectonics is dominated by the NW-SE striking right-lateral North Tabriz Fault (NTF) and

*Corresponding author:

m.mahood@iiees.ac.ir

*نگارنده رابط:

regional seismicity (historical and modern one) concentrates. The NTF is a major seismogenic fault in NW Iran. The last damaging earthquakes on this fault occurred in 1721, rupturing the southeastern fault segment, and in 1780, rupturing the northwestern one. The understanding of the seismic behavior of this fault is critical for assessing the hazard in Tabriz, one of the major cities of Iran; the city suffered major damage in both the 1721 and 1780 events. The north of the NTF seismicity is rare, and almost nothing has been revealed about activity of the structures until now.

On 11th of August 2012, the region was surprisingly struck by a shallow Mw 6.5 earthquake with a pure right-lateral strike-slip character only about 50 km to the north of the NTF. 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 to NW, a second shallow event with Mw 6.2 occurred. It showed an NE-SW oriented oblique thrust mechanism. This earthquake sequence provided an opportunity to understand better the processes of active deformations and their causes in NW Iran.

Ground-motion relations describing the expected amplitudes of this motion as functions of the magnitude and distance are key components of seismic hazard analyses. Ground-motion (attenuation) relations are used to estimate strong ground motion for many engineering and seismological applications. Where strong motion recordings are abundant, these relations are developed empirically from strong-motion recordings. Where recordings are limited, they are often developed from seismological models using stochastic and theoretical methods.

The stochastic model is a widely-used tool to simulate acceleration time series and develop ground motion relations (Hanks and McGuire, 1981; Boore, 1983; Boore and Atkinson, 1987; Atkinson and Boore, 1995 and 1997; Atkinson and Silva, 1997 and 2000). The stochastic method begins with the specification of the Fourier spectrum of the ground motion as a function of magnitude and distance. The acceleration spectrum is modeled by a spectrum with ω^2 shape, where ω is the 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, 1998a). One of the most useful methods to simulate ground motion for a large earthquake is based on the simulation of some 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).

In this study, the first region-specific ground motion relations were developed for seismic hazard analysis of NW Iran. The attenuation relation for the horizontal acceleration response spectrum in a period of 0-4 s, with a magnitude range of Mw=5 to 7.7 and distances up to 150 km were established. We used 51 waveforms recorded on a rock site in the NW Iran. Due to the paucity of the data at small distances and large magnitudes, we applied the stochastic method to simulate waveforms for different magnitudes and distances. To overcome the incompleteness of the data set, we simulated 1240 acceleration time series for magnitudes from M5.0 to M7.7 and magnitude steps of 0.2 units for the North Tabriz fault and M5.0 to 6.7 and magnitude steps of 0.5 units for the Ahar fault. The relations were derived by a maximum likelihood regression algorithm from Joyner and Boore (1993) on a set of 1240 simulated strong-motion records and 51 observed ground motions recorded on the rock site in this region. The theoretical-empirical ground motion relation for NW Iran was compared to the ground motion relations for the other regions and had a good agreement with them especially with Akkar and Bommer relations for Europe, the Mediterranean Region and the Middle East. The present results will be useful in estimating strong ground motion parameters and in the earthquake resistant designs in this region.

Keywords: Attenuation relationship, stochastic finite fault modeling, North Tabriz fault, Ahar-Varzaghan fault, NW Iran

۱ مقدمه

از این دست تحقیقات در ایران می‌توان به رابطه کاهندگی حمزه‌لو و معهود (۲۰۱۲) برای شرق ایران مرکزی اشاره کرد. 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 زمین ایفا می‌کند. بزرگا، طول و عرض گسل، راستا و شیب گسل، ابعاد المان، سرعت امواج عرضی، سرعت گسیختگی و نقطه شروع گسیختگی، پارامترهایی هستند که برای شبیه‌سازی موردنیازند. رویداد ثبت شده حاصل هم‌امیخت تابع چشمه، تابع انتشار و اثر ساختگاه است که در حوزه بسامد به‌صورت رابطه (۱) نمایش داده می‌شود:

(۱)

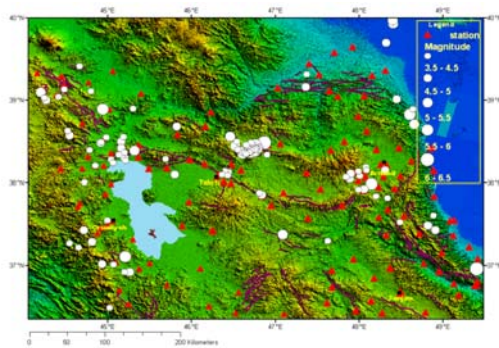
$$A_s(f, r) = S(f)D_{geo}(f)D_{An}(f, r)P(f)Z(f),$$

که $S(f)$ تابع چشمه، $D_{geo}(f)$ عامل کاهندگی هندسی، $D_{An}(f, r)$ عامل کاهندگی مسیر، $P(f)$ عامل پوسته بالایی و $Z(f)$ اثر ساختگاه هستند. اندازه و خصوصیات طبیعی زمین‌لرزه و چگونگی تولید این امواج، با چشمه زمین‌لرزه کنترل می‌شود. اثر محیط و مسیر بیانگر این مطلب است که مسیر انتشار موج از چشمه تا ایستگاه چگونه بر دامنه و محتوای بسامدی امواج تاثیر می‌گذارد. اثر ساختگاه، بیانگر آن است که چگونه ترکیبات و ساختار زمین‌شناسی محلی زیر ایستگاه، باعث تغییر محتوای بسامدی می‌شود. این تأثیرات معیاری از پاسخ لایه‌های بالایی زمین، در حدود چند صد متری سنگ و خاک در زیر ایستگاه و همچنین بیانگر تأثیرات توپوگرافی و شکل ظاهری زمین روی دامنه و محتوای بسامدی امواج زمین‌لرزه هستند.

۲ روش تحقیق

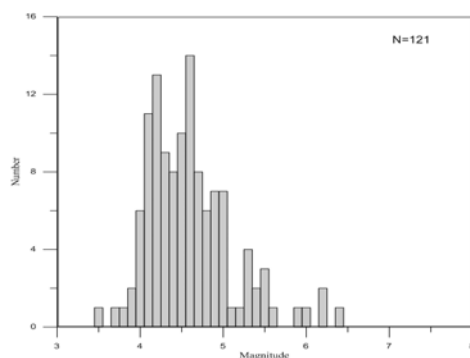
شبکه شتاب‌نگاری ایران فعالیت خود را از ۱۹۷۳ آغاز کرد و در همین سال اولین شتاب‌نگار در کشور نصب شد

زمین‌لرزه‌های تاریخی بی‌شماری در منطقه تبریز روی داده‌است. سه زمین‌لرزه ویرانگر ۱۰۴۲ میلادی با بزرگی $M=7/7$ (امبرسیز و ملویل، ۱۹۸۲) از جمله آنها هستند و با گسیختگی در طول گسل شمال تبریز همراه بوده‌اند. با توجه به اینکه آخرین زمین‌لرزه تاریخی به‌نسبت بزرگ در ۱۷۸۰ یعنی حدود ۲۳۰ سال پیش روی داده است، وقوع زمین‌لرزه‌های متوسط تا بزرگ در آینده نزدیک در این منطقه بسیار محتمل است. از دیگر زمین‌لرزه‌های مخرب در این ناحیه، زمین‌لرزه‌های دو گانه اهر-ورزقان هستند که در ۲۱ مرداد ۱۳۹۱ به وقوع پیوسته‌اند. طبق آمار رسمی، این زمین‌لرزه‌ها حدود ۳۰۰ نفر کشته و بیش از ۲۰۰۰ نفر مجروح در پی داشتند و به چندین روستا خسارت‌های بالای ۵۰ درصد و حتی ۱۰۰ درصد وارد شده است. زمین‌لرزه دو گانه اهر-ورزقان نشان داد که زلزله‌خیزی در منطقه فقط محدود به گسل مهم تبریز نیست و برای عرضه رابطه کاهندگی کاربردی، باید فعالیت لرزه‌ای سایر گسل‌های فعال موجود در منطقه نیز لحاظ شود. وجود رابطه کاهندگی مخصوص منطقه مورد بررسی نیاز به استفاده از روابط کاهندگی دیگر مناطق دنیا برای تحلیل خطر زمین‌لرزه و مقاوم‌سازی سازه‌های موجود منطقه را از بین می‌برد. در نواحی‌ای که نگاشت‌های جنبش زمین فراوان‌اند، روابط کاهندگی به کمک نگاشت‌ها به‌صورت تجربی به‌دست می‌آیند. اما در مناطقی که محدودیت نگاشت وجود دارد این روابط را اغلب از مدل‌های زلزله‌شناسی با استفاده از روش‌های نظری و آماری به‌دست می‌آورند. از روش تصادفی برای غلبه بر کمبود داده‌ها و تولید روابط جنبش نیرومند زمین در مناطق محدودی همانند شمال شرقی امریکا (ENA) و کالیفرنیا استفاده شده است (کمپبل و بزرگنیا، ۲۰۰۳؛ توکلی و پزشک، ۲۰۰۵؛ معضدیان و اتکینسون، ۲۰۰۷).



شکل ۱. لرزه‌خیزی و زمین‌ساخت شمال غرب ایران به همراه موقعیت زمین‌لرزه‌های ثبت شده در شبکه شتاب‌نگاری تا تاریخ ۷ نوامبر ۲۰۱۲ و موقعیت ایستگاه‌های شتاب‌نگاری وابسته به مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن.

آستانه تخریب سازه‌ها در سازه‌های شهری، زلزله‌های با بزرگای بیش از ۵ است. در کارهای مهندسی و روابط موجود از داده‌های جنبش نیرومند زمین استفاده می‌شود که براساس تعاریف موجود، زلزله‌های بیش از ۵، جنبش نیرومند زمین تولید می‌کنند. همچنین به علت نامناسب بودن برخی از نگاشت‌ها (ثبت ناقص نگاشت زمین‌لرزه در ایستگاه‌های شتاب‌نگاری) و بالا بودن دامنه نوفه در آنها، از میان ثبت‌های موجود جنبش نیرومند زمین، ۲۲ زمین‌لرزه مشاهده شده با بازه بزرگای ۵/۰ تا ۶/۴ مورد استفاده و تحلیل قرار گرفته‌اند.



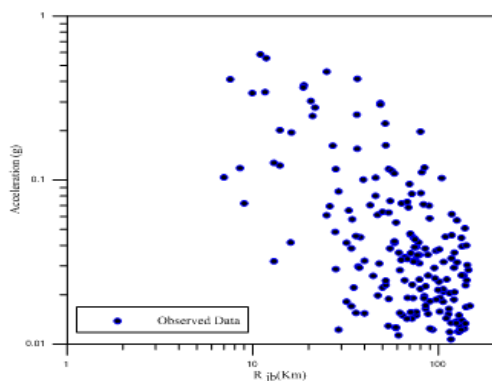
شکل ۲. تعداد رویداد زمین‌لرزه‌های ثبت شده در شبکه شتاب‌نگاری کشور تا تاریخ ۷ نوامبر ۲۰۱۲ در منطقه شمال غرب ایران.

و به تدریج توسعه فراوان یافت. بیشتر دستگاه‌ها و شتاب‌نگارهای این شبکه از نوع SSA-2 رقمی با شتاب آستانه ۱۰ گال (۰/۱ متر بر مجذور ثانیه) و بسامد نمونه‌برداری ۲۰۰ هرتز با بسامد طبیعی ۵۰ هرتز و دقت ۱۲ بیت هستند (وبگاه مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن). از آنجا که شتاب‌نگارهای رقمی داده‌های رقمی ثبت می‌کنند، دسترسی مستقیم به داده‌ها و پردازش هم‌زمان آنها میسر است و در نتیجه تنوع، میزان و احتمال خطا تا حد قابل توجهی کاهش می‌یابد. عملیات پردازشی روی شتاب‌نگاشت‌ها به صورت تصحیح خط مبنا و اعمال صافی (فیلتر) باترورت میان‌گذر صورت گرفته و پس از آن شتاب جنبش زمین از این داده‌های تصحیح شده به دست آمده است. مجموعه داده‌های شتاب‌نگاری ثبت شده در منطقه شمال غرب ایران شامل ثبت‌های جنبش نیرومند زمین ۱۲۱ زمین‌لرزه مشاهده شده است که از ۱۹۷۶ در شبکه شتاب‌نگاری کشوری وابسته به سازمان تحقیقات ساختمان و مسکن ثبت و نگهداری شده است. لرزه‌خیزی و زمین‌ساخت شمال غرب ایران به همراه موقعیت زمین‌لرزه‌های ثبت شده در شبکه شتاب‌نگاری کشور تا تاریخ ۷ نوامبر ۲۰۱۲ و محل قرارگیری ایستگاه‌های شبکه شتاب‌نگاری وابسته به مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن در شکل ۱ به نمایش درآمده است. تعداد رویداد زمین‌لرزه‌های ثبت شده در شبکه شتاب‌نگاری کشوری براساس بزرگای در شکل ۲ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود قسمت عمده بانک اطلاعاتی موجود مربوط به زمین‌لرزه‌هایی با بازه بزرگای ۴ تا ۵ است. در این تحقیق به منظور تهیه رابطه کاهندگی، از داده‌هایی با نسبت سیگنال به نوفه مناسب و در فاصله‌های حداکثر ۱۵۰ کیلومتری استفاده شده است.

در شکل ۵ توزیع زمین‌لرزه‌های ثبت شده براساس PGA و I_{jb} نشان داده شده است. در این شکل دیده می‌شود که بیشتر زمین‌لرزه‌های ثبت شده دارای فاصله رومرکزی بیش از ۳۰ کیلومتر هستند. در واقع بانک اطلاعاتی موجود برای عرضه رابطه کاهندگی نظری-تجربی دارای کمبودهایی برای زمین‌لرزه‌های بزرگ در فاصله‌های نزدیک است.

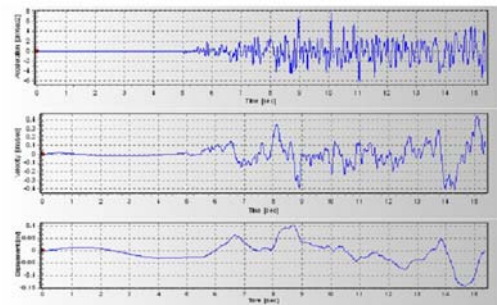
۲-۱ طراحی شبکه‌بندی مناسب

از لحاظ ساختاری، گسل‌های شاخص و مهمی در گستره شمال غرب ایران فعال‌اند و از دیدگاه لرزه‌زمین‌ساختی دارای اهمیت زیادی هستند. از جمله آنها، گسل شمال تبریز است. همچنین علی‌رغم وسعت اندک، این بخش در مقایسه با دیگر بخش‌های ایران از لحاظ روندهای ساختاری، پیچیدگی‌های خاصی دارد و گسل‌های فعالی با راستای شرقی-غربی نیز در این منطقه شناسایی شده‌اند که از جمله آنها می‌توان به گسل مسبب زمین‌لرزه اول اهر-ورزقان اشاره کرد. بنابراین به‌منظور تهیه بانک داده‌های شتاب‌نگاری مصنوعی، فعالیت این دو گسل در حاکم دو سناریو در منطقه آذربایجان شرقی لحاظ شده است.

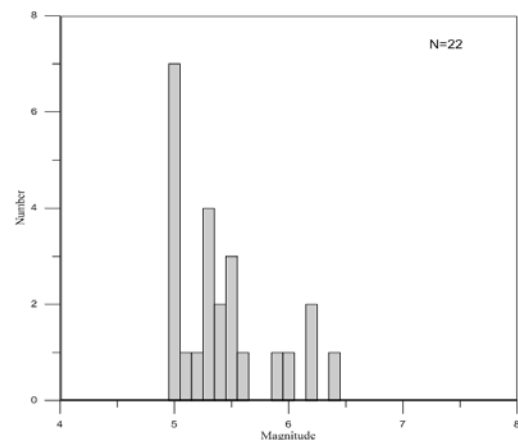


شکل ۵. توزیع زمین‌لرزه‌های ثبت شده براساس PGA و نزدیک‌ترین فاصله افقی تا تصویر قائم سطح گسیختگی گسل روی سطح زمین.

یک نمونه از نداشت‌های ناقص موجود در بانک داده‌های گردآوری شده که در ایستگاه‌های شتاب‌نگاری مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن به ثبت رسیده در شکل ۳ نشان داده شده است. تعداد زمین‌لرزه‌های استفاده شده براساس بزرگا در شکل ۴ به نمایش درآمده است. این شکل بیان می‌کند که بانک اطلاعاتی جمع‌آوری شده به‌منظور عرضه رابطه کاهندگی، دارای کمبودهایی در بزرگای بزرگ‌تر از ۵/۰ است. با توجه به پیشینه تاریخی وقوع زمین‌لرزه‌های با بزرگای بزرگ در منطقه، برای عرضه رابطه کاهندگی دقیق و کاربردی نیاز به وجود اطلاعات زمین‌لرزه‌های بزرگ‌تر از ۶ است.



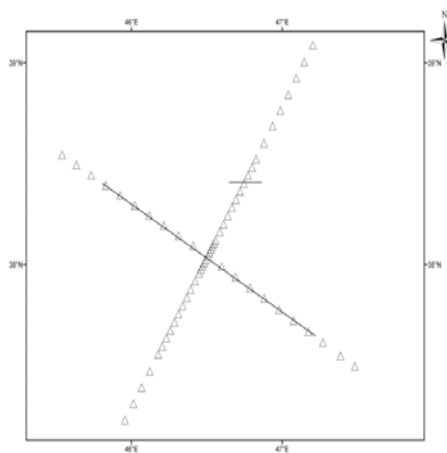
شکل ۳. تاریخچه زمانی تصحیح شده مولفه طولی شتاب، سرعت، جابه‌جایی زمین‌لرزه دوم ۲۱ مرداد ۱۳۹۱ اهر-ورزقان با بزرگای ۶/۲ ثبت شده در ایستگاه بستان‌آباد.



شکل ۴. تعداد زمین‌لرزه‌های استفاده شده برای عرضه رابطه کاهندگی در شمال غرب ایران.

۲-۲ تهیه بانک داده‌های شتاب‌نگاری مصنوعی بهترین شرایط برای عرضه رابطه‌ای دقیق و کاربردی، داشتن بانک داده‌های کامل یعنی داشتن مقدار زیادی اطلاعات با گستره بزرگای وسیع، فاصله‌های متفاوت و مطلوب با سازوکار چشمه‌های شناسایی شده است. همان‌طور که در قبل اشاره شد، داده‌های موجود در شمال غرب ایران برای محاسبات آماری و عرضه رابطه کاهندگی تجربی، کامل نیستند و در این مجموعه تعداد داده‌های زمین‌لرزه‌های بزرگ و نیز زمین‌لرزه‌ها در فاصله‌های کم کافی نیست. همان‌طور که داگلاس (۲۰۰۳) بیان می‌کند، تعداد کم زمین‌لرزه‌ها می‌تواند روابط به‌دست آمده را تحت تأثیر قرار دهد و از دقت آنها بکاهد. یکی از راه‌های تکمیل بانک داده‌های موجود، شبیه‌سازی تاریخچه زمانی و تولید شتاب‌نگاشت‌های مصنوعی با توجه به شرایط لرزه‌خیزی و خصوصیات ژئوفیزیکی منطقه برای بزرگای موردنظر در فاصله‌های مطلوب است. به‌منظور تکمیل بانک داده‌ها از روش تصادفی گسل متناهی برای تولید شتاب‌نگاشت‌های مصنوعی استفاده شده است. برای به‌دست آوردن پارامترهای کلیدی ورودی از جمله پارامترهای مربوط به خصوصیات چشمه و مسیر انتشار امواج برای گسل شمال تبریز و گسل مسیب زمین‌لرزه اول اهر-ورزقان، شبیه‌سازی در ۱۷ ایستگاه ثبت‌کننده زمین‌لرزه ۱۰ آذر ۱۳۸۶ تبریز که براساس تحقیقات حمزه‌لو و همکاران (۲۰۱۰) گسل مسیب آن، گسل شمال تبریز شناخته شده است و همچنین شبیه‌سازی در ۳۹ ایستگاه شتاب‌نگاری مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن تا فاصله رومرکزی ۱۷۵ کیلومتر برای زمین‌لرزه اول ۲۱ مرداد ۱۳۹۱ اهر-ورزقان صورت گرفته است. لازم به ذکر است که در این تحقیق آخرین نسخه ویرایش شده برنامه اکسیم، با عنوان EXSIM12 (اساتورینانس و اتکینسون، ۲۰۱۲) استفاده شده است.

با توجه به اینکه گسل شمال تبریز از بارزترین گسل‌های منطقه است، شبکه‌بندی با استفاده از برنامه Arc GIS به موازات و عمود بر راستای این گسل به گونه‌ای لحاظ شده است که پوشش ایستگاهی فرضی خوبی برای گسل مسیب زمین‌لرزه اول اهر-ورزقان نیز ایجاد شود. محل قرارگیری ایستگاه‌های فرضی در جهت عمود بر راستای گسل از دو طرف مرکز گسل تا فاصله ۱۰ کیلومتر، به فاصله ۲ کیلومتر از هم، سپس تا فاصله ۶۰ کیلومتر به فاصله ۵ کیلومتر از یکدیگر و پس از آن ایستگاه‌ها با فاصله ۱۰ کیلومتر از یکدیگر تا فاصله ۱۰۰ کیلومتر از دو طرف گسل قرار دارند و فاصله بین گره‌ها که در واقع همان محل قرارگیری ایستگاه‌های فرضی است، در جهت موازی راستای گسل، از مرکز گسل در دو طرف و تا فاصله ۱۰۰ کیلومتری به فاصله ۱۰ کیلومتر از یکدیگر است. لازم به ذکر است که در شبکه‌بندی اعمال شده، در جهت عمود بر راستای گسل به سمت شمال شرق، به‌منظور داشتن پوشش ایستگاهی بهتر ایستگاه‌های فرضی تا ساحل رود ارس و تا فاصله ۱۳۰ کیلومتری از مرکز گسل شمال تبریز لحاظ شده‌اند. شکل ۶ شبکه‌بندی اعمال شده روی گسل شمال تبریز و گسل مسیب زمین‌لرزه اول اهر-ورزقان را نمایش می‌دهد.



شکل ۶. شبکه‌بندی اعمال شده روی گسل شمال تبریز و گسل مسیب زمین‌لرزه اهر با تعداد ۶۲ ایستگاه.

همکاران (۲۰۰۳) مقدار نهایی این کمیت برابر با $95f^{0.8}$ انتخاب شده است. برای تعیین میزان پارامتر افت تنش، 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. در این تحقیق برای طبقه‌بندی نوع خاک، از نتایج سینتایان (۲۰۰۶) در زمینه طبقه‌بندی نوع خاک ایستگاه‌های شبکه شتاب‌نگاری کشور استفاده شده است. به علت شناخته نبودن شرایط ساختگاه ۶۲ ایستگاه فرضی و نبود تحقیقات کافی در زمینه شرایط خاک در منطقه نوع ساختگاه، فقط سنگ برای ایستگاه‌های فرضی لحاظ شده است. همچنین برای تعیین ضرایب تشدید ساختگاه، نتایج تحقیقات بور و جوینر (۱۹۹۷) مورد استفاده قرار گرفته است. در نهایت پارامترهای کلیدی ورودی برای شبیه‌سازی شتاب‌نگاشت‌های مصنوعی به روش تصادفی گسل متناهی و با کمک برنامه EXSIM برای گسل شمال تبریز و گسل مسبب زمین‌لرزه اول اهر-ورزقان در جدول ۱ عرضه شده است.

جدول ۱. پارامترهای ورودی برنامه EXSIM برای شبیه‌سازی شتاب‌نگاشت‌های مصنوعی در ۶۲ ایستگاه فرضی. (a) براساس خصوصیات گسل شمال تبریز، (b) براساس خصوصیات گسل مسبب زمین‌لرزه اول اهر-ورزقان.

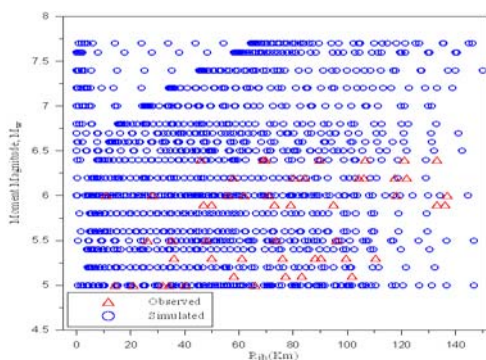
(b)		(a)	
Values	پارامترهای ورودی برنامه EXSIM	Values	پارامترهای ورودی برنامه EXSIM
5 to 6.7	بزرگی کشتوری	5 to 7.7	بزرگی کشتوری
60(hrs)	افت امپرس	60(hrs)	افت امپرس
$1/R (R \leq 85km)$	گسترش هندسی	$1/R (R \leq 85km)$	گسترش هندسی
$1/R^2 (85km < R < 120km)$	شرقی و همکاران (۱۳۹۱)	$1/R^2 (85km < R < 120km)$	شرقی و همکاران (۱۳۹۱)
$1/R^{0.8} (R \geq 120km)$	ناکور کیفیت (Qf)	$1/R^{0.8} (R \geq 120km)$	ناکور کیفیت (Qf)
95g ^{0.8}	مدت دوام	95g ^{0.8}	مدت دوام
$T_0 + 0.1 R$	کاپا	$T_0 + 0.1 R (Km)$	کاپا
0.03(g)	انحداد و نسبت گسل	0.03(g)	انحداد و نسبت گسل
85°, 83°	عمق فوقانی صفحه گسل	310°, 87°	عمق فوقانی صفحه گسل
5(Km)	مساحت فعال (Pulsing Percent)	5(Km)	مساحت فعال (Pulsing Percent)
25%	تابع پنجره Saragoni-Hart	25%	تابع پنجره Saragoni-Hart
3.3(Km/sec)	سرعت موج برشی	3.3(Km/sec)	سرعت موج برشی
0.8 β	سرعت انتشار کسبختگی	0.8 β	سرعت انتشار کسبختگی
2.8 g/cm ³	چگالی پوسته	2.8 g/cm ³	چگالی پوسته
5%	میرایی	5%	میرایی
Random	توزیع لغزش	Random	توزیع لغزش
Random	المانی که کسبختگی از آن شروع می‌شود	Random	المانی که کسبختگی از آن شروع می‌شود

به منظور تعیین میزان توزیع لغزش روی صفحه گسل، با توجه به این که میزان توزیع لغزش و اسپریتی‌ها روی صفحه گسل مسبب این دو زمین‌لرزه در دسترس نبود، از قابلیت برنامه EXSIM برای تولید میزان لغزش به صورت تصادفی و بر مبنای توزیع نرمال استفاده شد. همچنین EXSIM این قابلیت را دارد تا در صورتی که نقطه شروع گسیختگی (کانون رویداد زمین‌لرزه) مشخص نباشد، از انتخاب تصادفی استفاده کند. با این انتخاب، خود برنامه به صورت تصادفی یک المان را به منزله المانی که گسیختگی از آن شروع می‌شود، انتخاب می‌کند و برای بالا بردن میزان دقت کار، می‌توان تنظیمات برنامه را به حالتی درآورد که برنامه چندین بار، به دفعات دلخواه، این عملیات تصادفی را اجرا کند. همچنین برای تعیین سرعت موج برشی، که به منظور توصیف محیط انتشار به کار می‌رود، از تحقیقات صورت گرفته سیاهکالی مرادی و همکاران (۱۳۸۷)، استفاده شده است. آنها ساختار سرعتی پوسته در زون گسلی امتدادلغز تبریز را مورد بررسی قرار داده‌اند.

روابط تجربی ولز و کوپر اسمیت (۱۹۹۴) برای تعیین ابعاد صفحه گسل که یکی از پارامترهای ورودی EXSIM است، در سازوکار گسل امتدادلغز استفاده شده است. با توجه به اینکه دامنه بخش بسامد زیاد طیف با پارامتر افت طیفی کنترل می‌شود، این پارامتر بین مقادیر ۰/۰۲ تا ۰/۰۴ برای ساختگاه سنگی متغیر است (اندرسون وهاف، ۱۹۸۴). در این تحقیق مقدار کاپا ۰/۰۳ به صورت میانگین برای ساختگاه سنگی لحاظ شده است. به علت کمبود داده‌های شتاب‌نگاری برای تعیین عامل کیفیت، مقدار این کمیت را به صورت مدل اولیه و پایه $204f^{0.52}$ (نظام الاسلامی، ۱۳۸۲) برای این ناحیه انتخاب کردیم، اما با توجه به لرزه‌خیزی زیاد منطقه میزان عامل کیفیت بایستی کمتر از مقدار تعیین شده انتخاب می‌شد. با توجه به تحقیقات صورت گرفته در این منطقه از جمله فرهد و

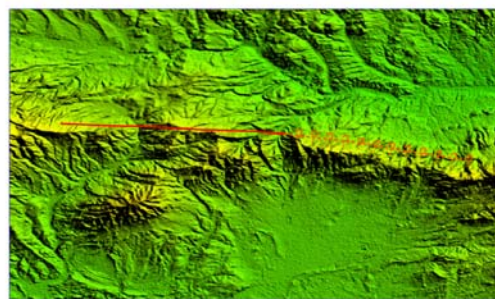
هم ترکیب می‌شوند. باید توجه داشت که اطلاعات اولیه و پایه ورودی و محاسبات براساس نگاشت‌های ثبت شده است و نگاشت‌های شبیه‌سازی شده و نظری با اینکه حجم زیاد بانک داده‌ها را تشکیل می‌دهند ولی طبق نگاشت‌های ثبت شده به دست آمده‌اند و از داده‌های تجربی جدا نیستند.

در شکل ۸ توزیع بزرگا با فاصله نشان داده شده است. در این شکل دایره‌ها بیانگر توزیع ۱۲۴۰ نگاشت شبیه‌سازی شده و مثلث‌ها توزیع ۵۱ نگاشت ثبت شده با فاصله هستند. در شکل ۹ توزیع زمین‌لرزه‌های شبیه‌سازی شده براساس PGA و Γ_{zb} نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود بیشتر کمبود زمین‌لرزه‌های ثبت شده در فاصله کم و با بزرگای مطلوب جبران شده است و در نهایت با استفاده از بانک داده‌های جامع و تعداد ۱۲۹۱ نگاشت جنبش نیرومند زمین جمع‌آوری شده اقدام به عرضه رابطه کاهندگی طیفی برای منطقه شمال غرب ایران شده است. لازم به ذکر است که در بانک اطلاعات جمع‌آوری شده بر پایه زمین‌لرزه‌های ثبت شده در شمال غرب ایران، علاوه بر نگاشت‌های زمین‌لرزه‌های دوگانه اهر-ورزقان، از پس‌لرزه‌های آن که در دستگاه‌های شتاب‌نگاری مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن تا تاریخ ۷ نوامبر ۲۰۱۲ ثبت شده نیز استفاده شده است.



شکل ۸. توزیع نگاشت‌های شبیه‌سازی و مشاهده شده براساس بزرگا و نزدیک‌ترین فاصله افقی تا تصویر قائم سطح گسیختگی گسل روی سطح زمین.

برای گسل شمال تبریز محدوده بزرگای انتخاب شده از ۵/۰ تا ۷/۷ با گام ۰/۲ است. در مورد گسل مسیب زمین‌لرزه اول اهر-ورزقان، با توجه به بررسی‌های صورت گرفته سازمان زمین‌شناسی، طول گسیختگی و گسلش مربوط به این زمین‌لرزه بین ۱۵ تا ۲۰ کیلومتر اعلام، و با توجه به نقشه مدل ارتفاعی رقمی (DEM) برای این گسل طول حدود ۴۰ کیلومتر لحاظ شده است. بنابراین بازه بزرگای انتخابی برای این گسل بین ۵/۰ تا ۶/۷ با گام ۰/۵ در نظر گرفته شده است. شکل ۷ طول گسیختگی مربوط به زمین‌لرزه اول اهر-ورزقان که سازمان زمین‌شناسی کشور با بازدیدهای صحرائی مشخص کرده است را با خط پیوسته سرخ نشان می‌دهد. همچنین با توجه به نقشه مدل ارتفاعی رقمی، حدود ۲۰ کیلومتر طول گسل به صورت احتمالی در نظر گرفته شده است.



شکل ۷. نمایش گسیختگی سطحی زمین‌لرزه اول اهر-ورزقان به همراه حدود ۲۰ کیلومتر طول گسل به صورت احتمالی روی نقشه مدل ارتفاعی رقمی.

لازم به ذکر است که با افزایش بزرگای گشتاوری، با توجه به روابط تجربی ولز و کوپر اسمیت (۱۹۹۴)، اندازه صفحه گسل افزایش می‌یابد، که این افزایش ابعاد به صورت جانبی لحاظ شده است. پس از پایان عملیات شبیه‌سازی، تعداد کل داده‌های موجود در بانک داده‌های شتاب‌نگاری مصنوعی برابر ۱۲۴۰ ثبت است. در نهایت همه اطلاعات ثبت شده و شبیه‌سازی شده برای تشکیل بانک اطلاعات جامع و عرضه رابطه کاهندگی مناسب، با

رابطه به کمک روش بیشینه احتمال دو مرحله‌ای جویز و بور (۱۹۹۳) محاسبه شده است. جویز و بور (۱۹۸۱) روشی دو مرحله‌ای ابداع کردند که در آن ضرایب مربوط به وابستگی به بزرگای، از ضرایب مربوط به وابستگی به فاصله جدا شدند. در مرحله اول، وابستگی به فاصله به همراه مجموعه‌ای از پارامترهای دامنه برای هر زمین‌لرزه به دست آمد. در مرحله دوم، پارامترهای فاصله در مقابل بزرگای برازش شدند تا وابستگی به بزرگای به دست آید.

در گام اول، وایازش (رگرسیون) در همه تناوب‌ها اعمال و مشاهده شد که ضرایب C_8, C_7, C_6, C_5 در تناوب‌های متفاوت تغییرات زیادی ندارند و همانند معضدیان و اتکینسون (۲۰۰۵) تصمیم گرفته شد که این ضرایب در همه تناوب‌ها ثابت فرض شوند. لذا از مقادیر ضرایب پیش گفته در همه تناوب‌ها میانگین‌گیری صورت گرفت و مقادیر ثابتی برای آنها در تناوب‌ها لحاظ شد.

پس از اعمال وایازش و به دست آوردن ضرایب C_8, C_7, C_6, C_5 شکل رابطه کاهندگی طیفی نظری-تجربی برای آذربایجان شرقی-شمال غرب ایران به صورت رابطه (۳) به دست می‌آید:

(۳)

$$\begin{aligned} \text{Log(PSA)} &= C_1 + C_2(M-6) + C_3(M-6)^2 + (-0.88 + 0.088M)\text{Log}R + C_4R + \delta \\ R &= (R_{jb}^2 + \Delta^2)^{0.5} \\ \Delta &= 3.82 - 0.42M \end{aligned}$$

که میزان خطا در تعیین این پارامترها به صورت زیر است:

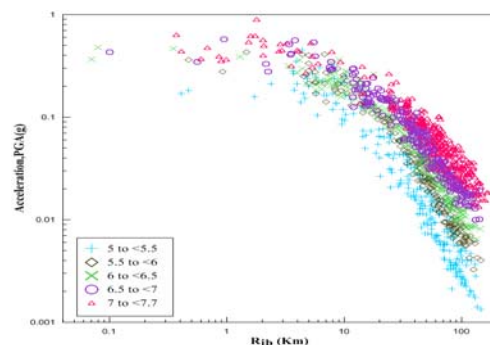
$$C_5 = 3.82 \pm 0.2, C_6 = 0.42 \pm 0.06,$$

$$C_7 = -0.88 \pm 0.08, C_8 = 0.088 \pm 0.005$$

با اجرای مجدد تحلیل وایازشی روی همه داده‌های ثبت شده و شبیه‌سازی شده، ضرایب رابطه کاهندگی طیفی برای PGA و PSA در تناوب‌های ۰/۱ تا ۴ ثانیه محاسبه شد. ضرایب رابطه کاهندگی طیفی نظری-تجربی در

۳ انتخاب مدل ریاضی مناسب

به منظور انتخاب مدل مناسب برای کاهندگی شتاب، مدل‌های موجود که محققان گوناگون عرضه کرده‌اند از جمله مدل آکار و بومر (۲۰۰۹)، مدل فوکوشیما (۲۰۰۳) و مدل جویز و بور (۱۹۹۳) مورد بررسی قرار گرفت. شکل تابع به کار رفته در نهایت به صورت رابطه کاهندگی عرضه شده معضدیان و اتکینسون (۲۰۰۵) برای ناحیه Puerto Rico انتخاب شده است.



شکل ۹: توزیع نگاشت‌های شبیه‌سازی شده براساس PGA و فاصله R_{jb} در بزرگای متفاوت.

از مزایای به کارگیری این رابطه برآورد مقادیر بیشینه شتاب به صورت منطقی‌تر و هماهنگی بیشتر این مدل ریاضی با بانک داده‌های گردآوری شده در فاصله‌های متفاوت است. رابطه انتخاب شده برای مؤلفه افقی PGA و PSA در این تحقیق به صورت رابطه (۲) بیان می‌شود:

(۲)

$$\begin{aligned} \text{Log(PSA)} &= C_1 + C_2(M-6) + C_3(M-6)^2 + (C_7 + C_8M)\text{Log}R + C_4R + \varepsilon \\ R &= (R_{jb}^2 + \Delta^2)^{0.5} \\ \Delta &= C_5 + C_6M \end{aligned}$$

که در این رابطه PSA مؤلفه افقی شبه‌شتاب با میرایی ۵٪ برحسب cm/sec^2 ، M بزرگای گشتاوری، I_{jb} کمترین فاصله تا تصویر سطحی گسل روی سطح زمین برحسب کیلومتر (بور و همکاران، ۱۹۹۷) است. در این رابطه ε خطای میانگین تصادفی با مقدار میانگین صفر و انحراف معیار معادل با خطای برآورد PSA است. ضرایب این

تحلیل وایزشی به خوبی بر توزیع داده‌های ورودی منطبق شده و بیانگر یک وایزش مطلوب است؛ به خصوص اگر توزیع این مانده‌ها به گونه‌ای باشد که تقارنی از مانده‌های مثبت و منفی در اطراف مقدار میانگین (مقدار صفر) به وجود آید. برای مدلی بدون انحراف، مانده‌ها باید دارای میانگین صفر باشند و به پارامترهای موجود در مدل مربوط نباشند. در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ به ترتیب مانده‌های محاسبات وایزش جنبش نیرومند زمین برحسب فاصله برای داده‌های مشاهده شده و مجموع داده‌های مشاهده شده و شبیه‌سازی شده، برای PGA و PSA در تناوب‌های ۰/۲، ۱ و ۳ ثانیه نشان داده شده است. باید توجه داشت که، شکل ۱۰ براساس داده‌های ثبت شده حاصل شده‌اند و کمبود داده‌ها، به‌خصوص در فاصله‌های کم، در نتایج تاثیر دارد. بر همین اساس برای تکمیل داده‌ها به شبیه‌سازی نیاز است. در شکل ۱۱ یعنی بانک داده‌های تکمیل شده، این نقیصه برطرف شده است. این امر، مزیت استفاده از شبیه‌سازی در این زمینه را نشان می‌دهد. مقادیر مانده‌ها در حد میانگین هستند و گسترش آنها کم است و تغییرات زیادی با فاصله نشان نمی‌دهند. شکل‌ها روشن می‌سازند که تابع در نظر گرفته شده و محاسبات صورت گرفته نسبت به پارامتر فاصله بدون انحراف هستند.

تناوب‌های متفاوت در جدول ۲ آمده است. در این جدول ضرایب رابطه کاهندگی در تناوب‌های مرکزی بیان شده‌اند. این مقادیر تناوب‌های کاربردی برای مهندسی سازه‌اند که براساس طبقات سازه لحاظ می‌شوند. با رسم نمودار جنبش زمین در این تناوب‌ها نمودار طیف پاسخ به دست می‌آید که از اطلاعات پایه طراحی سازه محسوب می‌شود.

۴ تعیین مانده‌ها

تفاوت بین مقادیر ثبت شده جنبش نیرومند زمین و مقادیر برآورد شده با رابطه کاهندگی، یا همان مانده‌ها (residuals)، پارامتر مناسبی برای بررسی مدل کاهندگی هستند. با بررسی مانده‌ها می‌توان به دقت مدل و تمایل آن به سویی خاص پی برد. این مقادیر از رابطه (۴) به دست می‌آیند:

(۴)

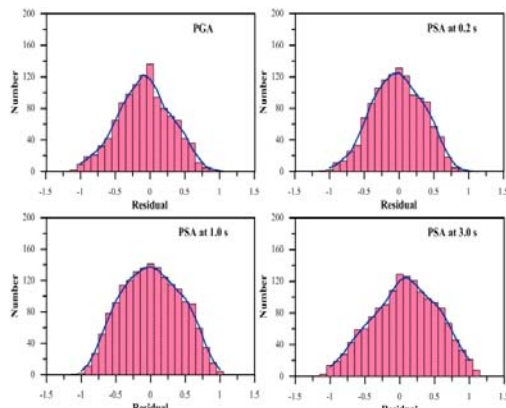
$$\text{Residual} = \text{Log}Y_{\text{Observed}} - \text{Log}Y_{\text{Predicted}}$$

که Y_{Observed} مقادیر شتاب به دست آمده از ثبت‌ها و $Y_{\text{Predicted}}$ مقادیر شتاب برآورد شده از رابطه کاهندگی است. با توجه به اینکه به ازای هر داده ورودی، یک داده پیش‌بینی می‌شود، در نتیجه به همین تعداد نیز مانده وجود دارد. در صورتی که تعداد مانده‌هایی که به صفر نزدیک هستند زیاد باشد، این بدان معنی است که منحنی حاصل از

جدول ۲. ضرایب رابطه کاهندگی نظری-تجربی در تناوب‌های متفاوت برای مؤلفه افقی و ساختگاه سنگی در آذربایجان شرقی-شمال غرب ایران.

Period	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	σ
PGA	2.62	0.35	-0.1	-0.0078	0.35
0.1	2.73	0.34	-0.098	-0.0073	0.39
0.2	2.84	0.33	-0.096	-0.0073	0.39
0.3	2.74	0.35	-0.099	-0.0072	0.32
0.4	2.64	0.37	-0.101	-0.0074	0.33
0.5	2.55	0.39	-0.103	-0.0079	0.38
0.6	2.47	0.43	-0.103	-0.0079	0.37
0.7	2.4	0.45	-0.103	-0.0079	0.34
0.8	2.29	0.5	-0.103	-0.0079	0.32
0.9	2.24	0.51	-0.103	-0.0079	0.35
1	2.21	0.53	-0.107	-0.0078	0.37
2	1.76	0.61	-0.106	-0.0079	0.39
3	1.44	0.65	-0.101	-0.0079	0.37
4	1.21	0.69	-0.096	-0.0079	0.39

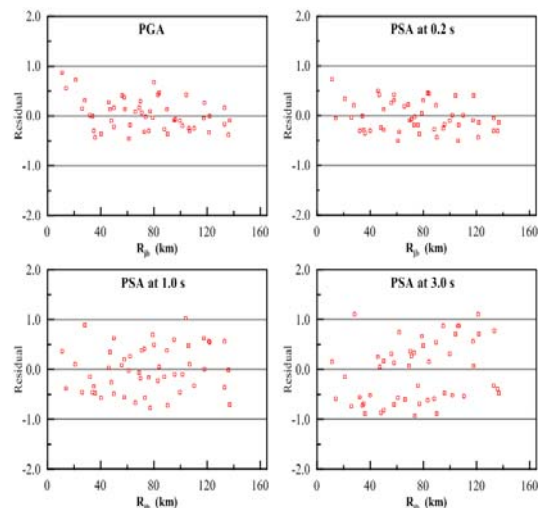
شکل زنگوله‌ای این توزیع، حاکی از آن است که مقادیر مانده‌ها، رفتار تصادفی دارند و از روند خاصی پیروی نمی‌کنند. مانده‌های محاسبات کل بانک اطلاعاتی گردآوری شده در بازه [۱- و ۱] قرار می‌گیرند و گسترش آنها کم است. نتایج آماری نشان می‌دهد که با افزایش تعداد داده‌ها انحراف معیار منحنی نرمال کاهش می‌یابد. بنابراین استفاده از داده‌های شبیه‌سازی شده علاوه بر تکمیل بانک داده، باعث کاهش مانده‌های محاسبات و کمتر شدن انحراف معیار منحنی نرمال می‌شود و بر دقت نتایج به دست آمده می‌افزاید.



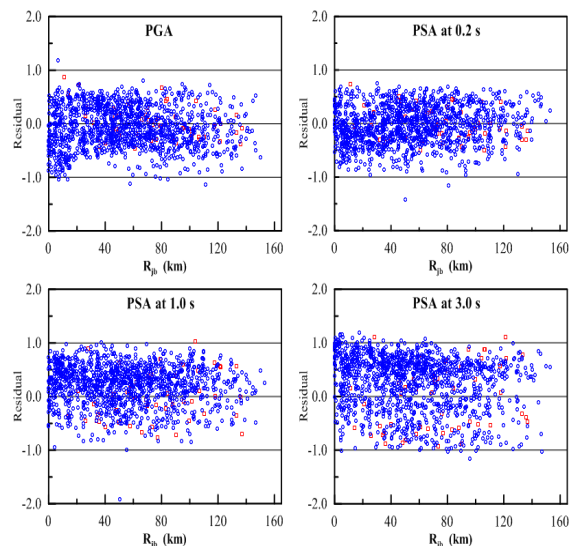
شکل ۱۲. مانده محاسبات برازش بهترین منحنی‌ها برای برآورد ضرایب رابطه کاهندگی با استفاده از کل داده‌های مشاهده شده و شبیه‌سازی شده برای PGA و PSA در تناوب‌های ۰٫۱/۲ و ۳ ثانیه.

همان‌طور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود توزیع نرمال برازش داده شده دارای شکل زنگوله‌ای است و حول مقدار میانگین تقارن دارد. در شکل ۱۳ منحنی‌های روابط کاهندگی طیفی برای مقادیر PGA و PSA در تناوب‌های ۰٫۱/۲، ۰٫۳، ۰٫۵، ۱٫۰ و ۲٫۰ ثانیه با میرایی ۰٫۵ برحسب فاصله برای بزرگای $M_w=5-7.7$ به نمایش درآمده‌اند. در همه این شکل‌ها اشباع بزرگی برای بزرگای بیشتر دیده می‌شود. همچنین در این شکل‌ها بیشترین مقدار شتاب در تناوب نزدیک ۰٫۲ ثانیه مشاهده می‌شود. شکل ۱۴ مقادیر میانگین شتاب طیفی برای

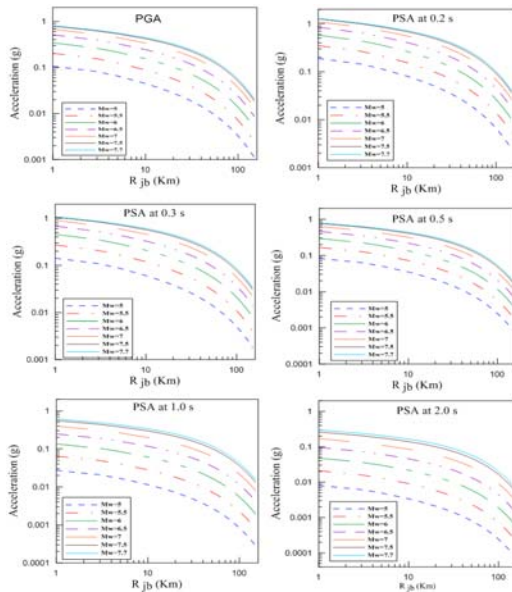
در شکل ۱۲ مانده‌های محاسبات و ایازش برای برآورد ضرایب رابطه کاهندگی نظری-تجربی که با ترکیب همه داده‌های ثبت شده و شبیه‌سازی شده به دست آمده، برای PGA و PSA در تناوب‌های ۰٫۱/۲، ۱ و ۳ ثانیه نمایش داده شده است.



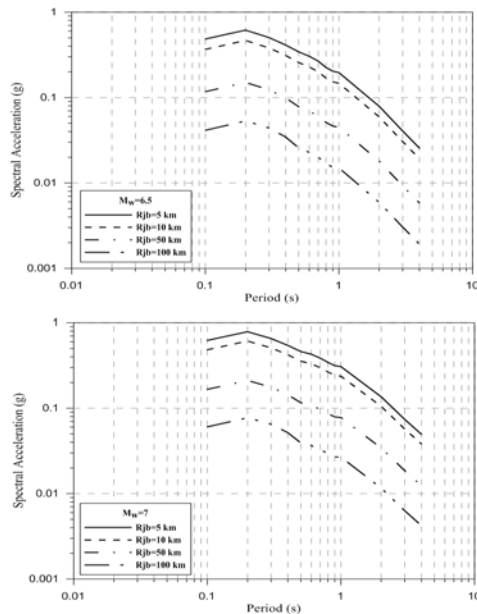
شکل ۱۰. مانده محاسبات و ایازش درحکم تابعی از فاصله برای داده‌های مشاهده شده برای PGA و PSA در تناوب‌های ۰٫۱/۲ و ۳ ثانیه.



شکل ۱۱. مانده محاسبات و ایازش برای کل داده‌های مشاهده شده و شبیه‌سازی شده درحکم تابعی از فاصله برای PGA و PSA در تناوب‌های ۰٫۱/۲، ۱ و ۳ ثانیه (شبیه‌سازی شده: دایره‌های آبی، مشاهده شده: مربع‌های سرخ)



شکل ۱۳. مقایسه مقادیر PGA و PSA در تناوب‌های ۰/۳، ۰/۲، ۱/۰، ۰/۵ و ۲/۰ ثانیه با میرایی ۰/۵ برای زمین‌لرزه‌های با بزرگای $M_w=5$ در ۷.۷ فاصله‌های متفاوت.



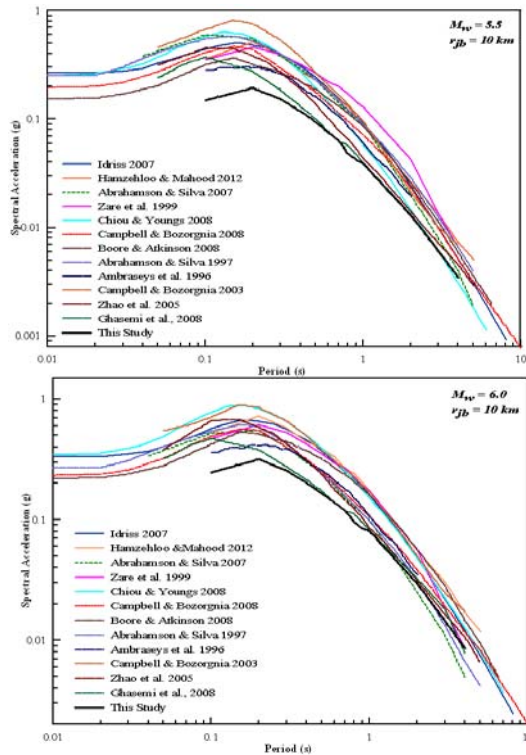
شکل ۱۴. مقایسه مقادیر میانگین شتاب طیفی برای زمین‌لرزه‌های با بزرگای ۶، ۵، ۷، ۵، ۱۰، ۵۰ و ۱۰۰ کیلومتری برحسب تناوب‌های متفاوت.

زمین‌لرزه‌های با بزرگای ۶/۵ و ۷ در فاصله‌های ۵، ۱۰، ۵۰ و ۱۰۰ کیلومتری برحسب تناوب‌های متفاوت را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود با افزایش نزدیک‌ترین فاصله افقی تا تصویر قائم سطح گسیختگی گسل روی سطح زمین مقدار شتاب طیفی کاهش می‌یابد، به طوری که منحنی شتاب طیفی در فاصله ۱۰۰ کیلومتری مقدار شتاب کمتری را نسبت به سایر فاصله‌ها نشان می‌دهد.

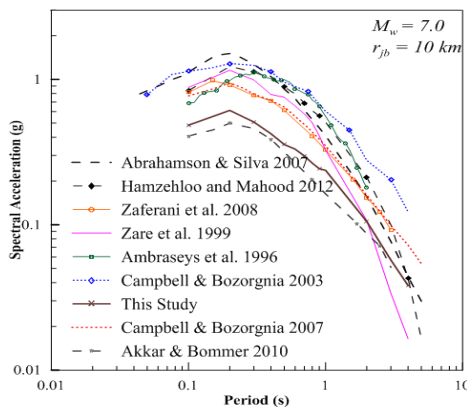
۵ مقایسه مدل پیشنهادی با سایر روابط کاهندگی برای حصول اطمینان از دقت رابطه کاهندگی پیشنهادی، منحنی‌های روابط کاهندگی به دست آمده در این تحقیق با تعدادی از روابط کاهندگی موجود در دنیا که در فعالیت‌های مهندسی و زلزله‌شناسی کاربرد فراوان دارند، همانند روابط آبراهامسون و سیلوا (۲۰۰۷)، بور و اتکینسون (۲۰۰۸)، آمبرسیز و همکاران (۱۹۹۶)، کمپبل و بزرگنیا (۲۰۰۳)، زارع و همکاران (۱۹۹۹)، ژائو و همکاران (۲۰۰۵) و حمزه‌لو و معهود (۲۰۱۲) در شکل‌های ۱۵ تا ۱۷ مقایسه شده‌اند.

همه این روابط برای مناطق فعال لرزه‌ای که زمین‌لرزه‌های کم-عمق دارند صادق است. برای این منظور محاسبات طیفی برای زمین‌لرزه‌هایی با بزرگای $M_w=5.5-6-7-7.5$ در منطقه مورد بررسی انتخاب شده است تا با نتایج حاصل از دیگر روابط مقایسه شود.

برای این مقایسه $r_{zb}=10$ کیلومتر، $r_{rup}=10$ Km ($r_{zb}=r_{rup}=10$ Km) در نظر گرفته شده است. نتایج حاصل از این نمودارها بیانگر این موضوع است که رابطه کاهندگی به دست آمده در این تحقیق همانند روابط دیگر نقاط جهان است و با این روابط هم‌خوانی خوبی دارد.



شکل ۱۵. مقایسه طیف پاسخ شتاب (میرایی ۵٪) به دست آمده در این تحقیق با روابط دیگر نقاط جهان برای شرایط ساختگاه سنگی برای زمین‌لرزه‌های با بزرگای 6، 5.5 = MW و فاصله $r_{jb} = 10$ کیلومتر.



شکل ۱۶. مقایسه طیف پاسخ شتاب (میرایی ۵٪) به دست آمده در این مطالعه با روابط دیگر نقاط جهان برای شرایط ساختگاه سنگی برای زمین‌لرزه‌های با بزرگای 7 = MW و فاصله $r_{jb} = 10$ کیلومتر.

رابطه کاهندگی به دست آمده روند و شکل کلی مشابهی را با رابطه کاهندگی ادریس (۲۰۰۷) و حمزه‌لو و معهود (۲۰۱۲) نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۱۶ مشاهده می‌شود مدل کاهندگی طیفی عرضه شده برای شمال غرب ایران به رابطه کاهندگی تجربی آکار و بومر (۲۰۰۷، ۲۰۰۹) برای منطقه اروپا، مدیترانه و خاورمیانه نزدیک‌تر است. با توجه به اینکه بانک داده‌های جمع‌آوری شده برای عرضه رابطه کاهندگی تجربی آکار و بومر (۲۰۰۷، ۲۰۰۹) شامل زمین‌لرزه‌های رویداده در شرق ترکیه نیز می‌شود، بنابراین هم‌خوانی بیشتری بین رابطه آکار و بومر و مدل پیشنهادی در این تحقیق برای شمال غرب ایران وجود دارد. همچنین می‌توان گفت در تناوب‌های بیشتر از ۰/۲ ثانیه، تقریباً روند کلی این رابطه مشابه همه روابط کاهندگی دیگر است. باید توجه کرد که استفاده از روابط کاهندگی که به صورت منطقه‌ای تعیین می‌شوند میزان دقت بیشتری نسبت به روابط جهانی دارند، مانع از برآورد بیش از حد مقادیر شتاب در تناوب‌های متفاوت می‌شوند و دقت بررسی تحلیل خطر را بالا می‌برند.

تفاوت‌های مشاهده شده در مقادیر ارزیابی شده در مناطق گوناگون می‌تواند به علت تفاوت در مدل چشمه‌ها و خصوصیات گستره بزرگای استفاده شده برای محاسبه روابط کاهندگی، بانک داده‌های جمع‌آوری شده و شکل تابع به کار رفته باشد. همچنین تفاوت موجود در عمق زمین‌لرزه‌ها می‌تواند شکل منحنی کاهندگی را تحت تأثیر قرار دهد. کمپیل و بزرگنیا (۲۰۰۳) بیان می‌دارند که با وجود شباهت در گستره بزرگا، خصوصیات گسترش هندسی و کاهندگی ناکشسان در نظر گرفته شده برای عرضه روابط کاهندگی و تفاوت‌های در افت تنش و مدل چشمه می‌توانند در شکل منحنی‌های روابط کاهندگی مناطق گوناگون تأثیر بگذارند.

تشکر و قدردانی

بدین وسیله از مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن به خاطر در اختیار قرار دادن داده‌های شتاب‌نگاری استفاده شده در این تحقیق تشکر و قدردانی می‌شود.

منابع

حمزه‌لو، ح.، فرزادگان، ا.، و میرزایی علویچه، ح.، ۱۳۸۹، سازوکار زمین‌لرزه ۱۰ آذر ۱۳۸۶ تبریز با استفاده از داده‌های شتاب‌نگاری: فصلنامه علمی-پژوهشی علوم زمین، شماره ۷۵.

سیاهکالی مرادی، ع.، تاتار، م.، و هاتسفلد، د.، پل، آ.، ۱۳۸۷، مطالعه ساختار سرعتی پوسته و سازوکار گسلش در زون گسلی امتدادلغز تبریز: فصلنامه علمی-پژوهشی علوم زمین، شماره ۷۰.

شریفی، م.، بایرام‌نژاد، ا.، و شمالی، ظ.ح.، ۱۳۹۱، تعیین ضریب میرایی تجربی برای شمال غرب ایران با استفاده از شتاب‌نگاشت‌ها: پنزدهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران، صفحه ۹۷-۱۰۰.

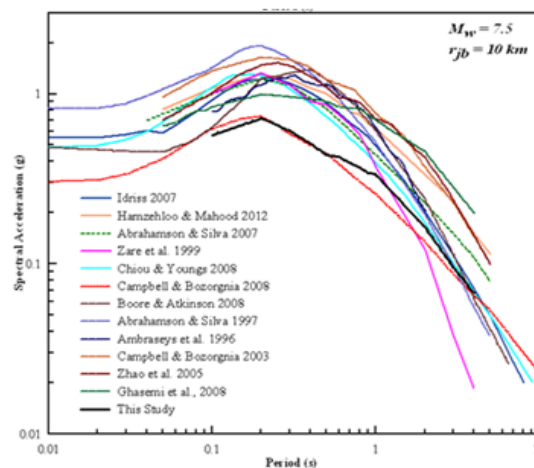
گزارش مقدماتی زمین‌لرزه اهر-ورزقان: سایت سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

نظام الاسلامی، ح.، ۱۳۸۲، تعیین عامل کیفیت برای پیرامون تبریز: پایان‌نامه کارشناسی ارشد، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران.

Abrahamson, N. A., and Silva, W. J., 2007, Abrahamson and Silva NGA Ground Motion Relations for the Geometric Mean Horizontal Component of Peak and Spectral Ground Motion Parameters: PEER Report 200x/xx.

Akkar, S., and Bommer, J. J., 2009, Empirical equations for the prediction of PGA, PGV and spectral accelerations in Europe, the Mediterranean Region and the Middle East: Seis. Res. **81**, 195-206.

Ambraseys, N. N., and Melville, C. P., 1982, A History of Persian Earthquakes: Cambridge University Press, UK, 219 pp.



شکل ۱۷. مقایسه طیف پاسخ شتاب (میرایی ۵٪) به دست آمده در این مطالعه با روابط دیگر نقاط جهان برای شرایط ساختگاه سنگی برای زمین‌لرزه‌های با بزرگای $M_w = 7.5$ و فاصله $r_{jb} = 10$ کیلومتر.

۶ نتیجه‌گیری

با استفاده از روش شبیه‌سازی جنبش نیرومند زمین به روش تصادفی گسل متناهی، داده‌های شتاب‌نگاری مصنوعی در فاصله‌ها و بزرگای دلخواه برای منطقه آذربایجان شرقی به گونه‌ای تهیه شد که کمبودهای موجود در بانک داده ثبت شده در شبکه شتاب‌نگاری کشور به‌خوبی جبران شود. در نهایت به کمک ۱۲۹۱ شتاب‌نگاشت مشاهده شده و شبیه‌سازی شده و با استفاده از مدل ریاضی انتخابی و بهره‌گیری از تحلیل وایزاشی جوینر و بور (۱۹۹۳)، ضرایب رابطه کاهندگی طیفی نظری-تجربی برای مؤلفه افقی و شرایط ساختگاهی سنگی، در ۱۴ تناوب از تناوب صفر (PGA) تا تناوب ۴ ثانیه، برای زمین‌لرزه‌های با بزرگای $M_w = 5-7.7$ و فاصله r_{jb} تا ۱۵۰ کیلومتر برای شمال غرب ایران عرضه شده است. مدل کاهندگی پیشنهادی هم‌خوانی مطلوبی با سایر روابط کاهندگی از جمله رابطه کاهندگی تجربی آکار و بومر (۲۰۰۷، ۲۰۰۹) برای منطقه اروپا، مدیترانه و خاورمیانه نشان می‌دهد.

- Central Iran: Bull. Seism. Soc. Am.: 102(6), 2677–2684.
- Idriss, I. M., 2007, Empirical Model for Estimating the Average Horizontal Values of Pseudo-Absolute Spectral Accelerations Generated by Crustal Earthquakes; Vol. 1, Sites with $V_{s30}=450$ to 900 m/s: Interim Report Issued for USGS Review.
- Joyner, W. B. and Boore, D. M., 1993, Methods for regression analysis of strong-motion data: Bull. Seism. Soc. Am., 83(2), 469–487.
- Kanamori, H., and Anderson, D. L., 1975: Theoretical basis of some empirical relations in seismology: Bull. Seism. Soc. Am., 65, 1073–1095.
- Motazedian, D. and Atkinson, G. M. 2004, Ground-motion relations for Puerto Rico: Geological Society of America, 385.
- Motazedian, D. and Atkinson, G. M. 2005, Stochastic finite-fault modeling based on a dynamic corner frequency: Bull. Seism. Soc. Am., 95, 995–1010.
- Sinaiean, F., 2006, A Study of the Strong Ground Motions in Iran: Ph.D. Thesis, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, Tehran, Iran.
- Tavakoli, B., and Pezeshk, S., 2005, Empirical-stochastic ground-motion prediction for Eastern North America: Bull. Seism. Soc. Am., 95, 2283–2296.
- 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.
- Zafarani, H., Mousavi, M., Noorzad, As., and Ansari, A., 2008, Calibration of the specific barrier model to Iranian plateau earthquakes and development of physically based attenuation relationships for Iran: J. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 28, 550–576.
- Zare, M., 1999, Contribution a l'étude des mouvements forts en Iran: du Catalogue Aux Lois D' Attenuation: Ph.D. Thesis, University Joseph Fourier, Geronoble, France.
- 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.
- Beresnev, I. and Atkinson, G., 2002, Source parameters of earthquakes in eastern and western North America based on finite-fault modeling: Bull. Seism. Soc. Am., 92, 695–710.
- Boore, D. M., 2003, Simulation of ground motion using the stochastic method: Pure Appl. Geophys., 160, 635–676.
- Boore, D. M., and Atkinson, G. M. 2008, Ground-motion prediction equations for the average horizontal component of PGA, PGV, and 5% damped PSA at spectral Periods between 0.01 s and 10.0 s: Earthquake Spectra, 24, 99–138.
- Boore, D. M., and Joyner, W. B., 1997, Site amplification for generic rock sites: Bull. Seism. Soc. Am., 87, 327–341.
- Campbell, K. W., 1985, Strong motion attenuation relations: A ten-year perspective: Earthquake Spectra, 1(4), 759–804.
- Campbell, K. W., and Bozorgnia Y., 2003, Updated near-source ground-motion (attenuation) relations for the horizontal and vertical components of peak ground acceleration and acceleration response spectra: Bull. Seism. Soc. Am., 93 (1), 314–331.
- Douglas, J., 2003, Earthquake ground motion estimation using strong motion records: A review of equations for the estimation of peak ground acceleration and response spectral ordinates: Earth-Science Reviews, 61, 43–104.
- Farahbod, A. M., Alahyarkhani, M., 2003, Attenuation and propagation characteristics of seismic waves in Iran: Fourth International Conference of Earthquake Engineering and Seismology.
- Fukushima, Y., 2003, Attenuation relation for West Eurasia determined with recent near-fault records from California, Japan and Turkey: J. Earth. Eng., 7(4), 573–598.
- Hamzehloo, H., Mahood, M., 2012, Ground-motion attenuation relationship for East