

شبیه‌سازی جنبش نیرومند زمین برای زمین‌لرزه ۱۳۸۳ فیروزآباد-کجور، شمال ایران

هدا رحیمی باهوش^۱ و حسین حمزه‌لو^{۲*}

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران

^۲ دانشیار، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۲/۱، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۴/۷، دسترسی برخط: ۱۳۹۰/۱۲/۱)

چکیده

در تاریخ ۸ خرداد ۱۳۸۳ زمین‌لرزه فیروزآباد کجور با بزرگای $6/2$ در منطقه البرز مرکزی به وقوع پیوست. به منظور برآورد پارامترهای چشمه و نحوه انتشار گسیختگی شتاب‌نگاشت‌های حاصل از این زمین‌لرزه با استفاده از دو روش شبیه‌سازی تابع تجربی گرین و کاتوره‌ای گسل محدود شبیه‌سازی و مقایسه شد. این مقایسه نشان می‌دهد که طول و عرض صفحه گسیختگی 15km در 15km و مختصات نقطه شروع گسیختگی $E 51/60^\circ$ ، $N 36/33^\circ$ و در عمق 29km است. انتشار گسیختگی روی صفحه گسل به صورت یک‌طرفه از شرق به سمت غرب منتشر شده است. سازوکار کانونی به‌دست آمده معکوس با مولفه کوچک چپ‌گرد است. راستا و شیب و ریک صفحه گسل به ترتیب $34, 110$ و 71 درجه برآورد شده است. نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی تابع تجربی گرین و کاتوره‌ای گسل محدود به ترتیب برای ایستگاه‌هایی که در آنها رویداد کوچک (پس‌لرزه) موجود بوده و ایستگاه‌هایی که رویداد کوچک در آنها ثبت نشده است، همخوانی مناسبی با رکوردهای مشاهده شده نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: شبیه‌سازی، کاتوره‌ای گسل محدود، تابع تجربی گرین، زمین‌لرزه فیروزآباد کجور

Simulation of strong ground motion for the 2004 Firozabad Kojoor earthquake in northern Iran

Hoda Rahimi Bahoosh¹ and Hossein Hamzehloo^{1*}

¹International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, Tehran, Iran

(Received: 21 April 2010, accepted: 28 June 2011, available online: 20 February 2012)

Summary

In recent years, seismologists have attempted to develop quantitative models of the earthquake rupture process with the ultimate goal of predicting strong ground motion. 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 the following: (i) deterministic methods, (ii) stochastic methods, (iii) empirical Green's function, (iv) semi-empirical methods, (v) composite source models, and (vi) hybrid methods.

*Corresponding author:

hhamzehloo@iiees.ac.ir

*نگارنده رابط:

The Firozabad Kojoor earthquake occurred on May 18, 2004, with a magnitude of 6.2 in the central Alborz region. We have used the empirical Green's function and stochastic finite fault modeling to study the source parameters and rupture propagation and make a comparison between the observed and simulated records. The empirical Green's function method synthesizes the ground motion from a large earthquake (target) by exploiting actual small-event ground motions as the Green's functions of the earth. It is based on the concept of self-similarity, a notion that assumes a constant stress drop for earthquakes of all magnitudes and provides scaling values for determining related faulting parameters of earthquakes of varying size. The simulation of the ground motion from the target event is expressed as a superposition of contributions from the subfaults separated by a time difference that depends on (1) the location of the particular sub-element on the fault relative to the rupture initiation point and (2) the rupture propagation characteristics. It assumes that the rupture propagates radially from the rupture initiation point at a constant fraction of the shear wave velocity.

This study also employs the modified stochastic finite fault modeling of Motazedian and Atkinson (2005), which is based on the dynamic corner frequency. In this method, a large fault is divided into N subfaults, where each subfault is considered as a small point source. The ground motions of subfaults are summed with a proper time delay in the time domain to estimate acceleration time history.

The comparison shows that the length and width of the rupture plane is 15×15 km. The coordinate of the nucleation point is estimated as 36.33°N , 51.60°E and 29 km depth, and rupture was determined to have propagated from east toward the west. The estimated focal mechanism is reverse with a minor left-lateral strike slip component. The strike, dip and rake have been estimated as 110° , 34° and 71° , respectively.

Key words: Simulation, stochastic finite fault, empirical Green's function, Firozabad Kojoor earthquake

۱ مقدمه

و این، اطمینان بیشتری در برآورد پارامترهای جنبش نیرومند زمین فراهم می‌کند.

روش کاتوره‌ای به صورت گسترده‌ای برای برآورد جنبش نیرومند زمین مورد استفاده قرار گرفته است. در این روش، جنبش‌های بسامد زیاد به صورت اغتشاش باند محدود گاوسی که از طیف ω^2 پیروی می‌کند، نمایش داده می‌شود. یکی از محدودیت‌های این روش این است که چشمه زمین‌لرزه به صورت نقطه‌ای در نظر گرفته می‌شود. روش کاتوره‌ای با در نظر گرفتن چشمه زمین‌لرزه به صورت گسل محدود بهینه شد و در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفت. روش تابع تجربی گرین را اولین بار هارتزل (۱۹۷۸) معرفی کرد. در این روش، انتشار گسیختگی به صورت تعیینی و انتشار چشمه و تابش با فرض اینکه در رویداد کوچک (پیش‌لرزه یا پس‌لرزه)

جنبش نیرومند زمین در فاصله R از چشمه زمین‌لرزه تحت تاثیر پارامترهای گوناگونی قرار می‌گیرد. این پارامترها عبارت‌اند از اثر چشمه، مسیر و ساختگاه. روش‌های متفاوتی برای شبیه‌سازی جنبش نیرومند زمین عرضه شده است. این روش‌ها به روش‌های کاتوره‌ای، تابع تجربی گرین، نیمه تجربی و روش‌های ترکیبی تقسیم‌بندی می‌شوند. انتخاب روش شبیه‌سازی جنبش نیرومند زمین، ارتباط مستقیم با اطلاعات ورودی برای شبیه‌سازی دارد. روش‌های شبیه‌سازی پیشنهاد شده در نوشتارهای فنی با توجه به اطلاعات ورودی دارای مزیت‌ها و محدودیت‌هایی هستند. مزیت این روش‌ها آن است که اطلاعات مربوط به چشمه زمین‌لرزه، اثر انتشار موج بین چشمه و ایستگاه و شرایط ساختگاهی را در نظر می‌گیرند،

بر مجذور ثانیه روی مولفه طولی ثبت کرده است. رومرکز رویداد اصلی به نقل از مراکز گوناگون، متفاوت است. همچنین، برآوردهای اولیه از عمق کانونی این رویداد از سوی مراکز متفاوت، از ۱۰ تا ۳۵ کیلومتر گزارش شده است.

ایستگاه‌های شتاب‌نگاری مستقر در ناحیه، پس‌لرزه‌های متعددی ثبت کرده‌اند که بزرگ‌ترین آنها با بزرگای گشتاوری ۴/۹، در ساعت ۰۹:۲۳:۴۷ مورخ ۱۳۸۳/۳/۹ به وقوع پیوست. جنبش زمین ناشی از این پس‌لرزه توسط دستگاه‌های شتاب‌نگار موجود در ایستگاه‌های بلده، پول، نوشهر، نور و رئیس کلا ثبت شده است. بیشینه شتاب این پس‌لرزه با ۱۱۱ سانتی‌متر بر مجذور ثانیه در ایستگاه بلده ثبت شده و این در حالی است که دستگاه مستقر در ایستگاه بلده، ثبت تکان اصلی را از دست داده است. با توجه به اینکه در سه ایستگاه پول، نوشهر و نور شتاب‌نگاشت‌های زمین‌لرزه اصلی و پس‌لرزه به ثبت رسیده است، شبه‌سازی به روش تابع تجربی گرین فقط در این ایستگاه‌ها صوت گرفته است. سپس، با استفاده از پارامترهای به‌دست آمده از روش تابع تجربی گرین و به دلیل ثبت نشدن پس‌لرزه‌ها در ایستگاه‌های دیگر از روش کاتوره‌ای برای شبه‌سازی در ایستگاه‌های انتخاب شده، استفاده و رکوردهای مشاهده شده مقایسه شده است.

۳ روش

۱-۳ روش شبه‌سازی تابع تجربی گرین
روش بررسی زمین‌لرزه‌های اصلی با استفاده نگاشت‌های رویدادهای کوچک (پیش‌لرزه یا پس‌لرزه) با عنوان تابع تجربی گرین، را هارتزل (۱۹۷۸) معرفی کرد. ایده اصلی چنین است که اطلاعات چشمه، مسیر و ساختگاه که در رویداد اصلی وجود دارد در رویداد کوچک (پیش‌لرزه یا پس‌لرزه) نیز وجود دارد. روش تابع تجربی گرین دارای

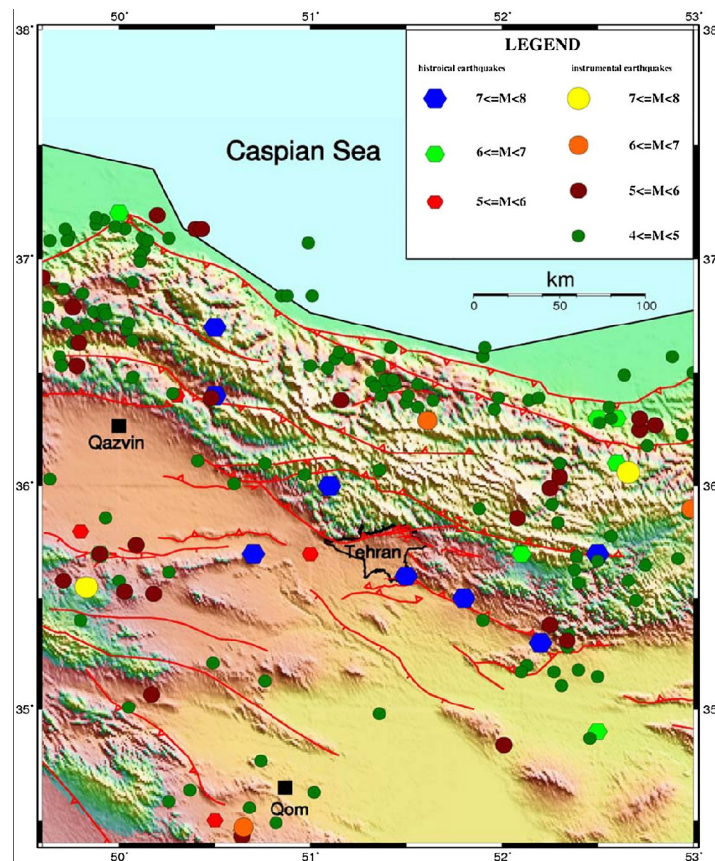
وجود دارد برای شبه‌سازی در نظر گرفته می‌شود. یکی از محدودیت‌های روش پیش‌گفته این است که برای کاربرد آن باید رویداد کوچک موجود باشد. از طرف دیگر، اگر رویداد کوچک تحت‌تأثیر جهت‌پذیری در مقایسه با زمین‌لرزه هدف قرار گرفته باشد، بر اثر این پدیده جنبش نیرومند شبه‌سازی شده زیاد یا کم برآورد می‌شود. در تاریخ ۸ خرداد ۱۳۸۳ زمین‌لرزه فیروزآباد کجور با بزرگای گشتاوری ۶/۲ در منطقه البرز مرکزی به وقوع پیوست (شکل ۱). به منظور برآورد پارامترهای چشمه و نحوه انتشار گسیختگی شتاب‌نگاشت‌های حاصل از این زمین‌لرزه با استفاده از دو روش شبه‌سازی تابع تجربی گرین و کاتوره‌ای گسل محدود شبه‌سازی و مقایسه شد. با توجه به اطلاعات موجود مربوط به زمین‌لرزه ۸ خرداد ۱۳۸۳ فیروزآباد کجور و ثبت پس‌لرزه‌ها در سه ایستگاه پول، نوشهر و نور و ثبت این زمین‌لرزه در ۱۴۵ ایستگاه شتاب‌نگاری مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، برای برآورد پارامترهای جنبش نیرومند زمین از دو روش تابع تجربی گرین و کاتوره‌ای گسل محدود استفاده شده است. لازم به ذکر است که با توجه به محدودیت ثبت پس‌لرزه‌ها در سه ایستگاه، امکان استفاده از روش تابع تجربی گرین برای همه ایستگاه‌ها فراهم نبود.

۲ زمین‌لرزه فیروزآباد-کجور

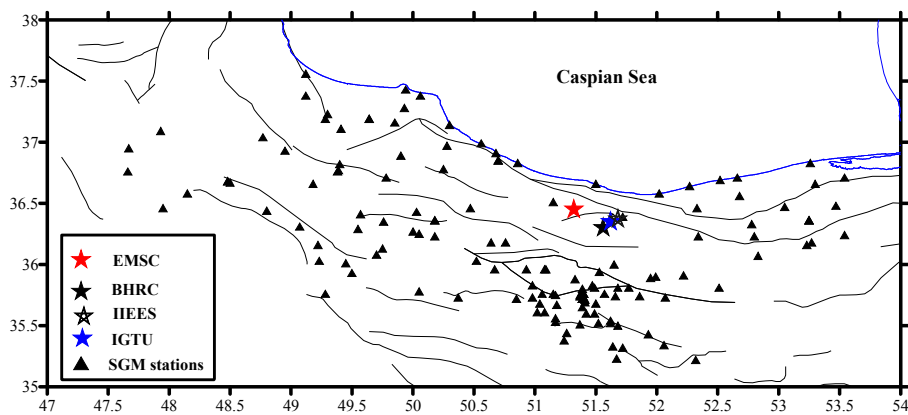
زمین‌لرزه فیروزآباد-کجور در هشتم خردادماه ۱۳۸۳ با بزرگای گشتاوری ۶/۲ در ساعت ۱۷:۰۸ به وقت محلی و GMT ۱۲:۳۸، در منطقه البرز مرکزی، به وقوع پیوست. جنبش زمین‌لرزه اصلی این رویداد در ۱۴۵ ایستگاه شبکه شتاب‌نگاری مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن ثبت شده است (شکل ۲). آستانه تحریک همگی این دستگاه‌ها روی ۰/۰۱ شتاب گرانی زمین تنظیم بوده است. دستگاه شتاب‌نگار مستقر در بخش‌داری پول، نزدیک‌ترین ایستگاه به مرکز زمین‌لرزه بوده و شتابی نزدیک به ۲۹۰ سانتی‌متر

مستطیلی که به $N \times N$ جزء تقسیم شده است در نظر گرفته می‌شود. رابطه بین پارامترهای رویداد اصلی و رویداد کوچک، با روابط مقیاس‌بندی (کاناموری و اندرسون، ۱۹۷۵) تعریف شده است:

این مزیت است که مسیر پیچیده، اثرات ساختگاه و پیچیدگی ساختار غیرهمگن زمین بین چشمه و محل ثبت را در نظر می‌گیرد. در روش شبیه‌سازی تابع تجربی گرین (ایریکورا، ۱۹۸۶)، صفحه گسل به صورت صفحه‌ای



شکل ۱. زمین‌لرزه‌های تاریخی و دستگاهی از ۱۹۰۰ تا ۲۰۰۷ میلادی (حمزه‌لو و همکاران، ۲۰۰۷).



شکل ۲. محل ایستگاه‌های شبکه شتاب‌نگاری مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن که رویداد اصلی در آنها ثبت شده است.

برای شبه‌سازی به روش کاتوره‌ای و با استفاده از برنامه EXSIM (معضدیان و اتکینسون، ۲۰۰۵) برای ایستگاه‌هایی که رویداد کوچک ثبت نشده، در جدول ۲ آورده شده است.

۴ شبه‌سازی جنبش نیرومند زمین برای زمین‌لرزه فیروزآباد-کجور

به منظور شبه‌سازی جنبش نیرومند زمین، ابتدا، پارامترهای اولیه برای شبه‌سازی به روش تابع تجربی گرین در نظر گرفته شده است. سپس، با مشخص شدن پارامترهای نهایی با روش تابع تجربی گرین و استفاده آنها در روش کاتوره‌ای گسل محدود در ایستگاه‌هایی که پس‌لرزه ثبت نشده است، شتاب‌نگاشت‌های شبه‌سازی شده با رکوردهای مشاهده شده، مورد مقایسه قرار گرفته است.

۴-۱ نتایج تابع تجربی گرین

در شبه‌سازی به روش تابع تجربی گرین پارامترهای سرعت موج برشی، سرعت انتشار گسیختگی، طول و عرض صفحه گسیختگی، و ابعاد اجزاء در فرایند شبه‌سازی، ثابت در نظر گرفته شده است. سپس، با تغییر یکی از پارامترهای راستا، شیب، ریک و کانون‌های پس‌لرزه و زمین‌لرزه اصلی و ثابت بودن پارامترهای دیگر، شتاب‌نگاشت‌ها در ایستگاه‌های پول، نور و نوشهر که رکوردهای پس‌لرزه و اصلی در آنها ثبت شده، شبه‌سازی و با شتاب‌نگاشت‌های مشاهده شده مورد مقایسه قرار گرفته است. مقایسه بین رکوردهای مشاهده و شبه‌سازی شده در حوزه زمان و بسامد صورت پذیرفته است. پارامترهای نهایی مدل به روش تابع تجربی گرین در جدول ۱ آورده شده است. شکل‌های ۳ تا ۶ مقایسه بین شتاب‌نگاشت‌های مشاهده و شبه‌سازی شده و طیف پاسخ را برای هر سه مولفه نشان می‌دهند.

$$\frac{L^s}{L^w} = \frac{W^s}{W^w} = \frac{T^s}{T^w} = \frac{F_c^w}{F_c^s} = \left[\frac{M_0^s}{CM_0^w} \right]^{\frac{1}{3}} = N, \quad (1)$$

$$C = \frac{\Delta\sigma^s}{\Delta\sigma^w} \quad (2)$$

که در آن، L^s ، L^w طول گسل، W^s ، W^w عرض گسل، T^s ، T^w مدت دوام لغزش، f_c^w ، f_c^s بسامد گوشه و M_0^w ، M_0^s گشتاور لرزه‌ای برای رویداد هدف (با اندیس بالای s) و رویداد کوچک (با اندیس بالای w) است. ثابت C ، نشان دهنده نسبت اُفت تنش رویداد هدف به رویداد کوچک است. با توجه به ثبت پس‌لرزه‌ها در سه ایستگاه پول، نور و نوشهر، استفاده از پارامترهای ورودی (جدول ۱)، رویداد اصلی در این سه ایستگاه با استفاده از روش تابع تجربی گرین شبه‌سازی شد.

۳-۲ روش شبه‌سازی کاتوره‌ای گسل محدود

در روش کاتوره‌ای گسل محدود یک صفحه مستطیلی برای گسل در نظر گرفته و به اجزاء مستطیلی تقسیم می‌شود. در این روش فرض می‌شود که شکست از مرکز یکی از اجزاء (کانون زمین‌لرزه) شروع شده و به صورت شعاعی انتشار می‌یابد. شتاب‌نگاشت‌های به دست آمده از هر جز که براساس طیف چشمه برون‌اند با در نظر گرفتن تاخیر زمانی متناظرشان با یکدیگر جمع می‌شوند تا شتاب‌نگاشت کلی حاصل از سراسر صفحه گسل مطابق رابطه (۳) (معضدیان و اتکینسون، ۲۰۰۵) به دست آید.

$$a(t) = \sum_{j=1}^{mw} \sum_{i=1}^{nl} a_{ij}(t + \Delta t_{ij}) \quad (3)$$

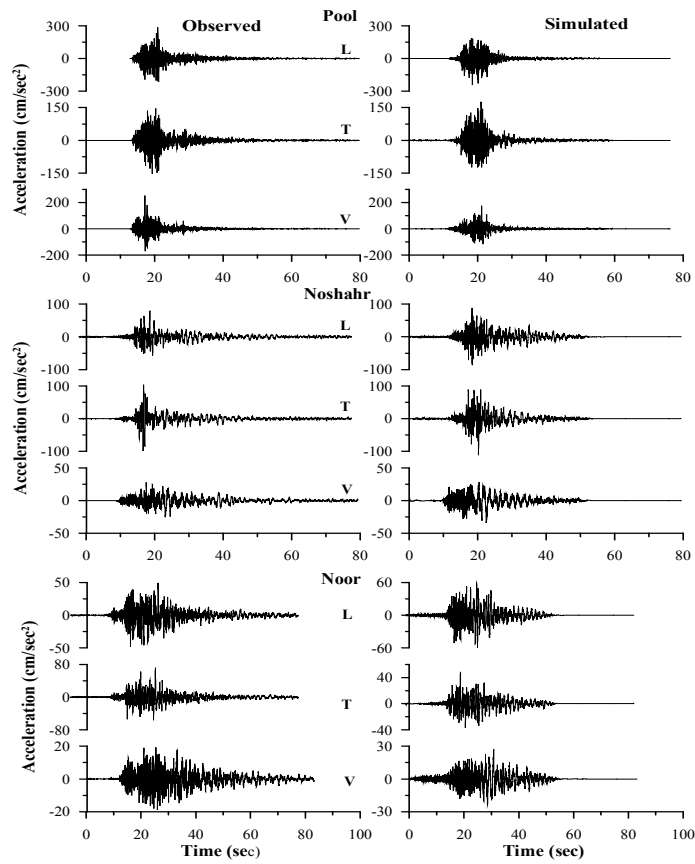
که در این رابطه، mw ، nl تعداد اجزاء در امتداد طول و عرض گسل، و $n \times m = N$ تعداد اجزاء $t + \Delta t_{ij}$ تاخیر زمانی مربوط به امواج منتشر شده از جزء ij به نقطه مشاهده است. $a_{ij}(t)$ نیز مقدار محاسبه شده به روش تصادفی نقطه‌ای (بور، ۱۹۸۳) است. پارامترهای ورودی

جدول ۱. پارامترهای شبیه‌سازی به روش تابع تجربی گرین.

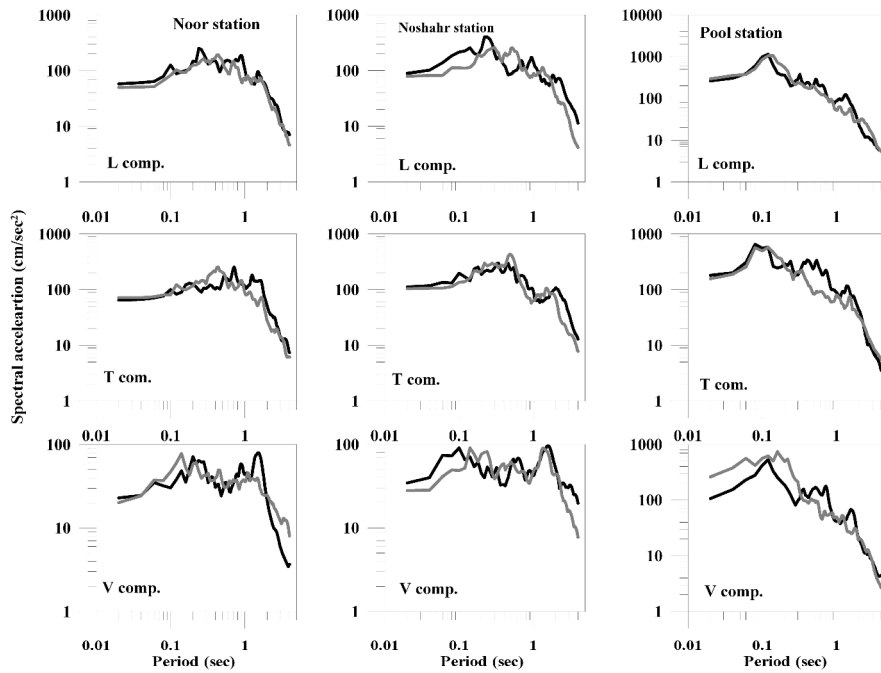
مقادیر	پارامتر
۷۱° ۳۴° ۱۱۰°	راستا شیب ریک
۱۵km	طول گسل
۱۵km	عرض گسل
۲۹km ۵۱/۶۱°E ۳۶/۳۳°N	مختصات کانون زمین‌لرزه هدف-عمق کانونی
۲۹km ۵۱/۴۶°E ۳۶/۴۶°N	مختصات کانون زمین‌لرزه کوچک-عمق کانونی
۶,۲/۴,۹	نسبت بزرگای گشتاوری رویداد هدف به رویداد کوچک
۵	تعداد اجزاء در امتداد عرض گسل
۵	تعداد اجزاء در امتداد طول گسل
۳km	طول جزء
۳km	عرض جزء
۳/۲(km/sec)	سرعت موج برشی
۲/۵۶(km/sec)	سرعت گسیختگی
۶۸ bar	افت تنش

جدول ۲. پارامترهای شبیه‌سازی به روش کاتوره‌ای گسل محدود.

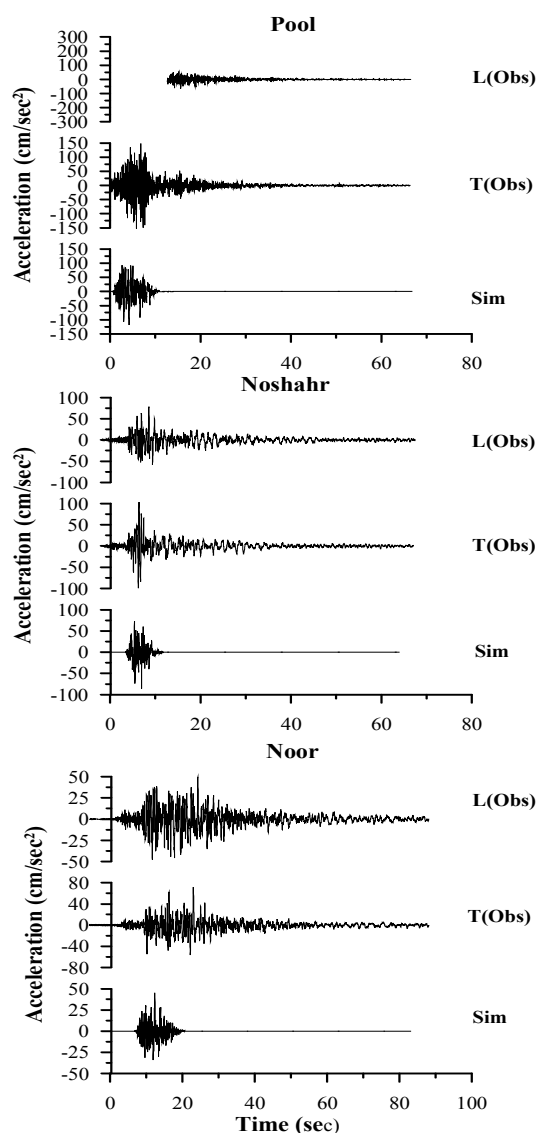
مقادیر	پارامتر
۶۸ (bar)	افت تنش
$۹۰f^{1/4}$	رابطه بسامدی فاکتور کیفیت $Q(f)$
۳/۲(km/sec)	سرعت موج برشی
۲/۵۶ (km/sec)	سرعت انتشار گسیختگی (α/β)
۲/۸ (g/cm ³)	چگالی
۱۵ km	طول گسل
۱۵ km	عرض گسل
۷×۷	تعداد اجزاء
۲/۸km	طول جزء
۲/۸km	عرض جزء
۳۶/۳۳N ۵۱/۶E	نقطه شروع گسیختگی



شکل ۳. شتاب‌نگاشت‌های شبیه‌سازی شده (سمت راست) و مشاهده شده (سمت چپ) برای سه مولفه V, T, L در سه ایستگاه پول، نوشهر و نور!!



شکل ۴. طیف‌های پاسخ مشاهده شده (خاکستری) و شبیه‌سازی شده (مشکی) در ایستگاه‌های نور، نوشهر و پول.



شکل ۵. مقایسه شتاب‌نگاشت‌های مشاهده و شبیه‌سازی شده به روش کاتوره‌ای گسل محدود در سه ایستگاه پول، نوشهر و نور.

برای انتخاب بهترین نقطه به‌منزله کانون، به غیر از نقاط گزارش شده از مراجع متفاوت، که در جدول ۳ آمده است، از مختصات ۹ نقطه در مرکز ۹ جزء صفحه گسل نیز استفاده شده است (شکل ۹). بهترین حالت مربوط به مرکز جزء شماره ۵ با مختصات $51/60^{\circ} E$ و $36/33^{\circ} N$ در عمق $29 km$ است. مختصات رومرکز به‌دست آمده در

۴-۲ نتایج روش کاتوره‌ای گسل محدود

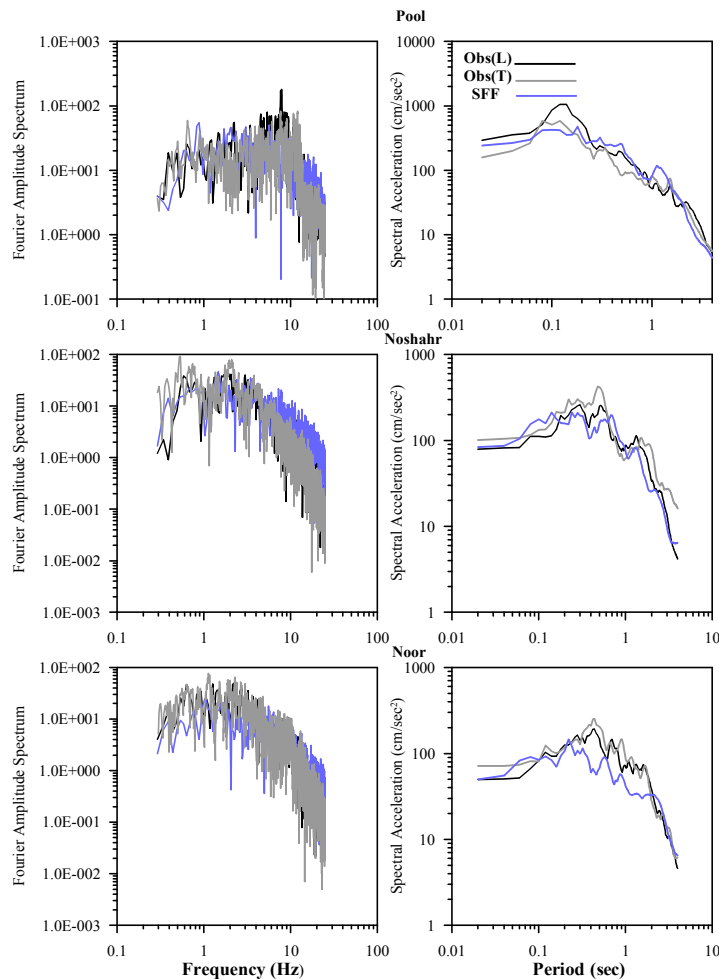
براساس پارامترهای نهایی در روش تابع تجربی گرین، طول، عرض، راستا، شیب، سرعت موج برشی و سرعت گسیختگی ثابت در نظر گرفته شده است. رومرکز نقطه شروع گسیختگی به مختصات $36,33^{\circ} E$ و $51,60^{\circ} N$ بر اساس مدل سازی و مقایسه با رکوردهای ثبت شده برآورد گردیده است. با توجه به اینکه پارامترهای ورودی برای شبیه‌سازی به روش کاتوره‌ای گسل محدود از روش تابع تجربی گرین مشخص شده‌اند، فقط اُفت تنش و رابطه بسامدی ضریب کیفیت امواج برشی براساس پارامترهای جدول ۲ در نظر گرفته شده است. مقایسه رکوردهای مشاهده شده و شبیه‌سازی شده نشان می‌دهد که، رابطه عرضه شده قاسمی و همکاران (۱۳۸۴) و اُفت تنش $68 bar$ براساس تحقیقات معتضدیان (۲۰۰۶) برای شمال ایران برای شبیه‌سازی به روش کاتوره‌ای گسل محدود مناسب است (جدول ۲). شکل‌های ۷ و ۸ تاریخچه زمانی شتاب، طیف‌های فوریه و پاسخ را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه روش کاتوره‌ای فقط یک مولفه افقی را شبیه‌سازی می‌کند، هر دو مولفه افقی مشاهده شده با شبیه‌سازی شده مقایسه شده است.

۵ بحث

پارامترهای کانون زمین‌لرزه فیروز آباد کجور و پس‌لرزه‌های آن را مرکز ملی شبکه لرزه‌نگاری باند پهن پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله برآورد کرده است. در این پژوهش با استفاده از توزیع پس‌لرزه‌ها طول و عرض صفحه گسیختگی برای شبیه‌سازی جنبش نیرومند زمین به ترتیب ۱۵ و ۱۵ کیلومتر (تاتار و همکاران، ۲۰۰۷) در نظر گرفته شده است. برای شبیه‌سازی مقادیر طول و عرض صفحه گسیختگی، سرعت برشی و سرعت گسیختگی ثابت در نظر گرفته شده است.

مقادیر به‌دست آمده در این مطالعه با استفاده از شبیه‌سازی برای صفحه گسل برای راستا، شیب و ریک به ترتیب ۱۱۰، ۳۴ و ۷۱ درجه است. مقادیر به‌دست آمده برای راستا و ریک نزدیک به مقادیر *HRV* و *NEIC* است. اما برای شیب مقدار به‌دست آمده براساس روش تابع تجربی گرین نزدیک به *HRV* است که با نتایج به‌دست آمده حمزه‌لو و همکاران (۲۰۰۷) و تاتار و همکاران (۲۰۰۷) همخوانی دارد. سازوکار به‌دست آمده از نوع معکوس با مولفه کوچک چپ‌گرد است که با سازوکار عرضه شده *HRV* و *NEIC* مشابه است (شکل ۱۰).

این تحقیق، نسبت به مقادیر گزارش شده مراکز دیگر، به مقادیر گزارش شده از سوی *USGS* و *IIIES* نزدیک‌تر است. مختصات نقطه شروع گسیختگی نشان می‌دهد که گسیختگی از شرق شروع و به صورت یک‌طرفه به سمت غرب منتشر شده است. جدول ۴ پارامترهای گسل مسبب زمین‌لرزه اصلی فیروزآباد- کجور که براساس روش شبیه‌سازی تابع تجربی گرین به‌دست آمده است را به‌دست می‌دهد. مراکز *HRV* و *NEIC* براساس تجزیه و تحلیل حوزه دور راستا، شیب و ریک گسل زمین‌لرزه فیروزآباد کجور را برآورد کردند (جدول ۴).

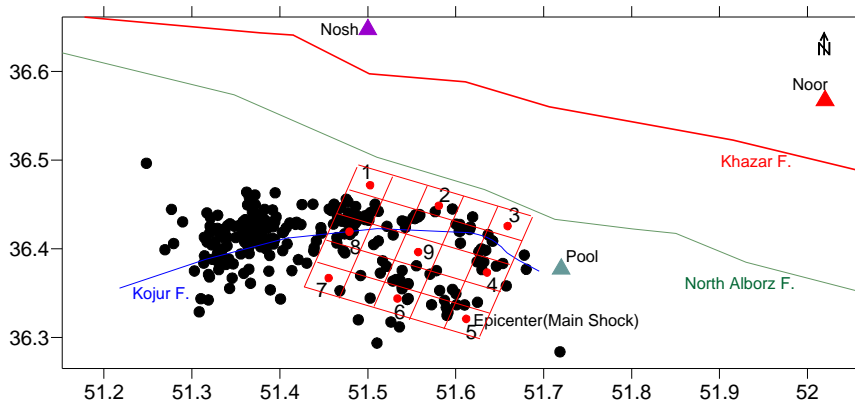


شکل ۶. مقایسه طیفهای فوریه و پاسخ شتاب‌نگاشت‌های شبیه‌سازی شده (آبی) با دو مولفه *L* (مشکی) و *T* (خاکستری) مشاهده شده در سه ایستگاه پول، نوشهر و نور.

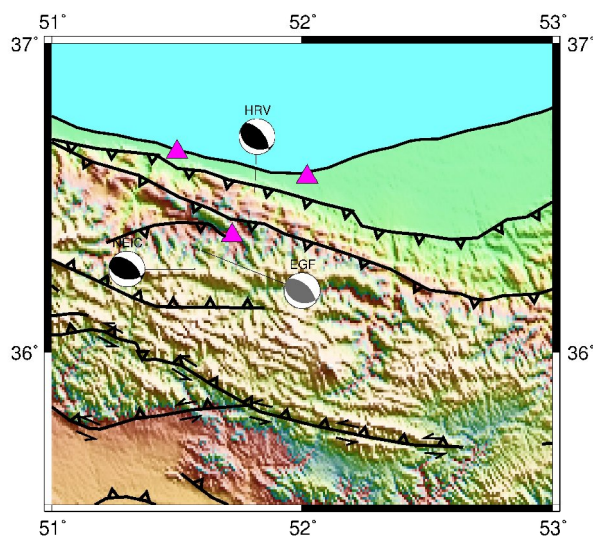
با رکوردهای مشاهده شده دارند. با توجه به پارامترهای شبیه‌سازی شده، بیشینه شتاب در ۳۲ ایستگاه به روش کاتوره‌ای گسل محدود‌برآورد و با بیشینه شتاب مشاهده شده مقایسه گردید (شکل ۱۲). مشاهده می‌گردد که بیشینه شتاب شبیه‌سازی شده دارای روند یکسانی با افزایش فاصله از چشمه زمین‌لرزه در مقایسه با بیشینه شتاب مشاهده شده می‌باشد، که نشان دهنده انتخاب مناسب پارامترها به عنوان پارامترهای ورودی برای شبیه‌سازی کاتوره‌ای گسل محدود است.

در شبیه‌سازی به روش کاتوره‌ای گسل محدود، مختصات نقطه شروع گسیختگی و پارامترهای راستا و شیب گسل، مشابه آنچه از روش تابع تجربی گرین برآورد شده، در نظر گرفته شده است.

با مقایسه موج پوش نقش‌ها و طیف‌های پاسخ و فوریه بین شبیه‌سازی و مشاهده شده (شکل‌های ۷، ۸ و ۱۱) و مقایسه بیشینه شتاب‌های شبیه‌سازی شده حاصل از هر دو روش تابع تجربی گرین و کاتوره‌ای گسل محدود با یکدیگر و با داده‌های مشاهده شده (جدول ۵) نشان می‌دهد که رکوردهای شبیه‌سازی شده همخوانی مناسبی



شکل ۷. مدل گسیختگی صفحه گسل در این تحقیق و رومرکز پس‌لرزه‌ها و زمین‌لرزه‌های ثبت شده (تاتار و همکاران ۲۰۰۷).



شکل ۸. مقایسه سازوکار به‌دست آمده در این تحقیق (رنگ خاکستری) برای زمین‌لرزه اصلی فیروزآباد کجور با HRV و NEIC.

جدول ۳. مقایسه مختصات کانونی به‌دست آمده در این تحقیق با پارامترهای گزارش شده از سوی مراکز متفاوت.

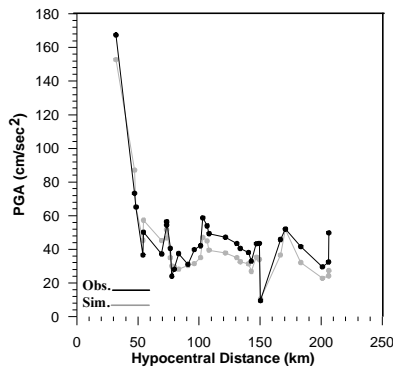
مرجع	مختصات رومرکز		ژرفای کانونی
	طول	عرض	
<i>USGS</i>	۵۱/۵۷	۳۶/۲۷	۱۴
<i>HRVD</i>	۵۱/۸۱	۳۶/۵۲	۳۴/۷
<i>IEES</i>	۵۱/۶۸	۳۶/۳۷	—
<i>Engdahl</i>	۵۱/۵۶	۳۶/۲۵	۲۷
<i>This Study</i>	۵۱/۶۰	۳۶/۳۳	۲۹

جدول ۴. مقایسه پارامترهای سازوکار کانونی به‌دست آمده در این تحقیق با پارامترهای گزارش شده از سوی مراکز متفاوت.

مرجع	ریک	شیب	راستا
(Hamzehloo et al., 2007)	۷۲	۳۳	۱۱۰
<i>NEIC</i>	۶۷	۴۳	۱۰۰
<i>HRV</i>	۶۹	۳۲	۱۱۶
<i>This Study</i>	۷۱	۳۴	۱۱۰

جدول ۵. مقایسه *PGA* های حاصل از روش های شبه‌سازی کاتوره‌ای گسل محدود و تابع تجربی گرین با یکدیگر و مقایسه این نتایج با *PGA* های مشاهده شده در سه ایستگاه پول، نوشهر و نور.

<i>Com.</i>	مشاهده شده <i>PGA (cm/sec²)</i>			تابع تجربی گرین محدود <i>PGA (cm/sec²)</i>			<i>PGA</i> کاتوره‌ای گسل محدود <i>(cm/sec²)</i> <i>Horizontal Com.</i>
	<i>L</i>	<i>T</i>	<i>V</i>	<i>L</i>	<i>T</i>	<i>V</i>	
<i>Pool</i>	۲۵۶/۶	۱۷۷/۳	۱۸۰/۱	۲۸۶/۳	۱۵۲/۷	۲۵۴/۸	۱۵۱/۲
<i>Nosh</i>	۸۸/۱	۱۱۰/۸	۲۳/۸	۷۸/۸	۱۰۳/۶	۲۶/۶	۸۴/۷
<i>Noor</i>	۵۷/۹	۶۴/۱	۵۷/۹	۴۹/۶	۷۱/۴	۴۹/۶	۴۸/۳



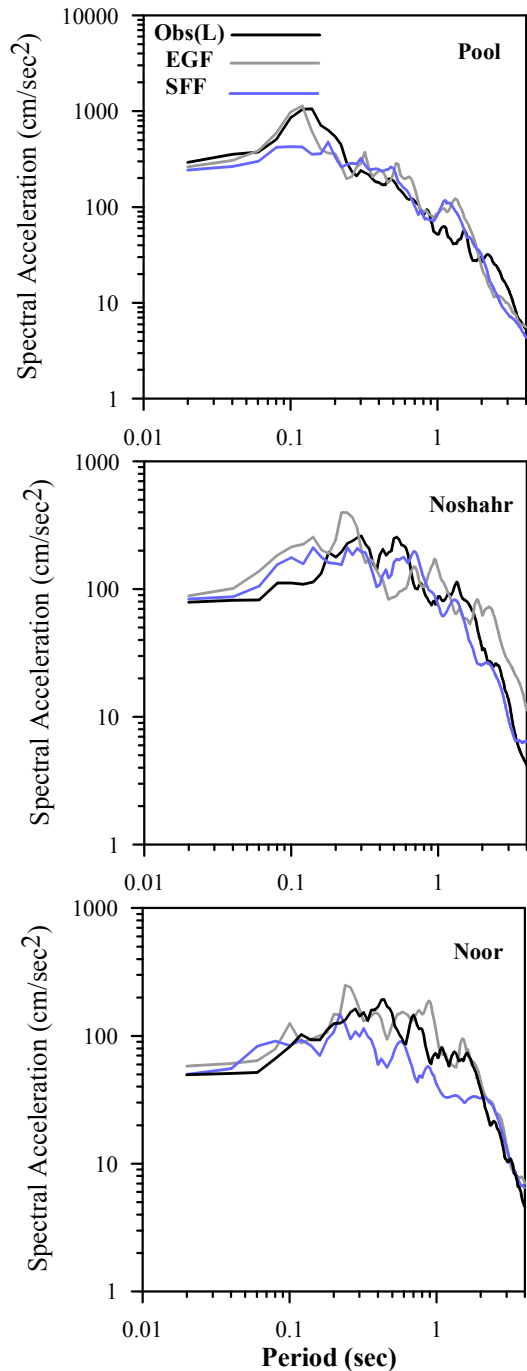
شکل ۱۰. مقایسه پیشینه شتاب مشاهده و شبیه‌سازی شده در ۳۲ ایستگاه مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن.

۶ نتیجه‌گیری

در این مقاله شبیه‌سازی به روش تابع تجربی گرین و کاتوره‌ای گسل محدود و مقایسه با شتاب‌نگاشت‌های مشاهده شده برای زمین‌لرزه فیروزآباد کجور صورت گرفته است. این مقایسه نشان می‌دهد که طول و عرض صفحه گسیختگی 15 km در 15 km است. مختصات نقطه شروع گسیختگی $51/60^\circ E$ و $36/33^\circ N$ و در عمق 29 km و انتشار گسیختگی روی صفحه گسل از شرق به صورت یک طرفه و به سمت غرب بوده است. سازوکار کانونی به دست آمده معکوس با مولفه کوچک چپ‌گرد است. راستا و شیب و ریک صفحه گسل به ترتیب $110, 34^\circ$ و 71° درجه برآورد شده است. نتایج به دست آمده از روش‌های شبیه‌سازی تابع تجربی گرین و کاتوره‌ای گسل محدود همخوانی مناسبی با رکوردهای مشاهده شده دارد.

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. همچنین از آقای دکتر محمد تاتار به خاطر در اختیار قرار دادن مختصات



شکل ۹. طیف پاسخ برای شتاب‌نگاشت‌های مشاهده شده (مشکی) شبیه‌سازی شده به روش کاتوره‌ای گسل محدود (آبی) و تابع تجربی گرین (خاکستری) در سه ایستگاه پول، نوشهر و نور.

- Hartzell, S. H., 1978, Earthquake aftershocks as Green's functions: *Geophys. Res. Lett.*, **5**, 1-4.
- Irikura, K., 1986, Prediction of strong acceleration motions using empirical Green's function: in *Proceedings 7th Japan Earthquake Engineering*, 151-156.
- Kanamori, H., and Anderson, D. L., 1975, Theoretical basis of some empirical relations in seismology: *Bulletin of the Seismological Society of America*, **65**, 1073-1095.
- Motazedian, D., and Atkinson, G., 2005, Stochastic finite-fault modeling based on a dynamic corner frequency: *Bulletin of the Seismological Society of America*, 995-1010.
- Motazedian, D., 2006, Region-specific key seismic parameters for earthquakes in Northern Iran: *Bulletin of the Seismological Society of America*, **96**(4A), 1383-1395.
- Tatar, M., Jackson, J., Hatzfeld, D., and Bergman, E., 2007, The 28 May 2004 Baladeh earthquake (MW 6.2) in the Alborz, Iran: overthrusting the South Caspian Basin Margin, Partitioning of oblique convergence, and the seismic hazard of Tehran: *Geophys. J. Int.*, **166**, 1270-1292.
- مکانی پس‌لرزه‌های زمین‌لرزه فیروزآباد-کجور قدردانی می‌شود.
- منابع
- قاسمی، ه.، کمالیان، ن.، حمزه‌لو، ح.، و بیت‌الهی، ع.، ۱۳۸۴، تعیین فاکتور کیفیت امواج برشی مستقیم Q_β در منطقه البرز به کمک داده‌های میدان نزدیک حرکت نیرومند زمین‌لرزه کجور در محدوده بسامدی ۱ تا ۳۲ هرتز: *مجله فیزیک زمین و فضا*، **۳۱**، ۱۰۳-۱۱۲.
- Boore, D. M., 1983, Stochastic simulation of high-frequency ground motion based on seismological models of the radiated spectra: *Bulletin of the Seismological Society of America*, **73**(6), 1865-1894.
- Hamzehloo, H., Vaccari, F., and Panza, G. F., 2007, Towards a reliable seismic microzonation in Tehran, Iran: *Engineering Geology*, **93**, 1-16.