

بررسی مشخصات چشمه لرزه‌های رودبار و منجیل با استفاده از شبیه‌سازی ترکیبی به روش گسل محدود

محمد علی هادیان^۱، حمید زعفرانی^{۲*}، جمشید فرجودی^۳

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

۲- دانشیار، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

۳- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران

چکیده

برای انجام تحلیل‌های دقیق از نحوه عملکرد سازه‌ها در زلزله، استفاده از رکوردهای مناسب اجتناب ناپذیر است. از آنجا که در اکثر نقاط کشورمان ایران، رکورد زلزله‌های بزرگ موجود نیست، استفاده از روش‌های شبیه‌سازی زلزله مفید خواهد بود. در تحقیق حاضر برای به دست آوردن پارامترهای چشمه لرزه‌زای زلزله رودبار و منجیل (۱۳۶۹) با در نظر گرفتن مدل گسل محدود، یک توزیع فرضی برای لغزش و زاویه‌ی آن در نظر گرفته شده، سپس با استفاده از روش عدد موج-گسسته که روشی تعینی برای محاسبه تابع گرین است، رکورد زلزله در ایستگاه‌های مختلف تولید شده و با فیلتر کردن، از قسمت فرکانس پایین آن استفاده می‌شود. برای به دست آوردن قسمت فرکانس بالای زلزله از روش شبیه‌سازی کاتوره‌ای استفاده شده است. با جمع کردن این دو قسمت در فضای زمان، رکورد نهایی به دست می‌آید که با مقایسه‌ی آن با رکورد واقعی ثبت شده در همان ایستگاه‌ها، می‌توان فرض‌های اولیه را اصلاح کرده و با چند بار سعی و خطا پارامترهای چشمه لرزه‌زا را به دست آورد. برای بررسی صحت نتایج از مقایسه مقادیر شتاب و سرعت با مقادیر شدت مرکالی گزارش شده در نقاط مختلف منطقه استفاده شده است. تطابق خوبی بین تاریخچه زمانی‌های شبیه‌سازی و مشاهده شده و مقادیر شدت بدست آمده و گزارش شده، حاصل شده است. جزئیات نتایج به دست آمده در متن مقاله آورده شده است. بهترین سناریوی به دست آمده در این تحقیق سرعت گسیختگی ۲۵۰۰ متر بر ثانیه، تابع زمان خیزش رمپ با زمان خیزش ۳ ثانیه و مرکز زلزله 36.82° شمالی و 49.40° شرقی می‌باشد.

کلمات کلیدی: گسل محدود، شبیه‌سازی سینماتیکی، زلزله رودبار-منجیل، روش کاتوره‌ای

Investigation of Source Parameters of Roudbar-Manjil Earthquake Using Hybrid Simulation Method

Ali Hadian¹, Hamid Zafarani^{2*}, Jamshid Farjoodi³

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

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

3- Associate Professor, Department of civil Engineering, University of Tehran.

* مؤلف مسئول: حمید زعفرانی، hamzafrani@yahoo.com

تاریخ دریافت مقاله: ۹۳/۲/۱۸ - تاریخ پذیرش مقاله: ۹۴/۲/۱۴

Abstract

For time history analysis of structures, appropriate records are needed. Due to the lack of strong-motion records from large earthquakes in some parts of Iran (e.g. Tehran region), earthquake simulation is a useful tool for studying strong-motion characteristics. In this study, a hybrid method has been used for obtaining source parameters of the 1990 Rudbar-Manjil earthquake (Mw7.3). In this simulation we assume fault plane, slip distribution and etc., then each parameter optimized after comparing simulated results with observed ones. In this hybrid method low frequency component of record obtained by the wave-number scheme that is a deterministic method and high frequency component obtained by the stochastic simulation method of Boore (2003), extended to the case of finite faults. Records from the stochastic method filtered with a high pass filter ($f_c=1.5$ Hz) and results from the deterministic method filtered with low pass filter ($f_c=1.5$ Hz), then the time-histories have been combined/added in the time domain. Final results have been compared with observed PSA and PSV in specified strong-motion stations. After comparing, optimized parameters have found, then based on this optimized parameters intensity contour has drawn; simulated intensity contours show good match with and observed ones. Best parameters are 2500 m/s for rupture velocity and 3 seconds for ramp function (i.e. rise time) and 36.82° N and 49.40° for earthquake epicenter. The results are important for the assessment of hazards in other seismically active parts of Alborz mountains (e.g. Greater Tehran area).

Keywords: Earthquake simulation, Hybrid simulation method, Roudbar-Manjil earthquake

۱- مقدمه

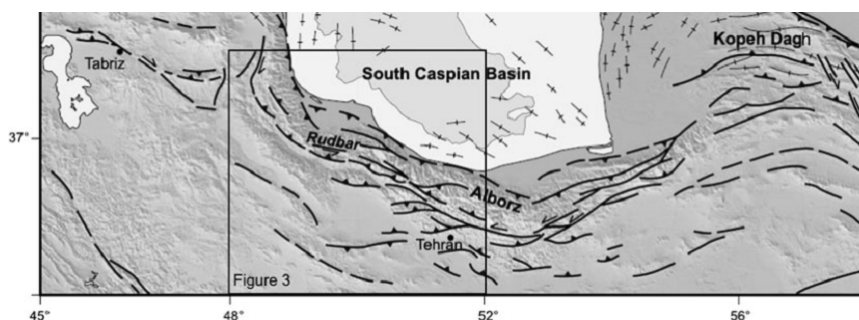
در حالی که در کشور ما ایران، زلزله عامل مهمی در طراحی سازه‌ها و تعیین نیروی مؤثر بر آنها است، اما داده‌های زیادی از زلزله‌های بزرگ در ایران موجود نیست که این موضوع به علت زمان بازگشت بالای زلزله‌های قوی در این ناحیه و قدمت نسبتاً کم شبکه لرزه‌نگاری در کشور است. به همین سبب استفاده از روشهای شبیه‌سازی برای پی بردن به مشخصات گسل‌های زلزله‌های قدیمی مفید خواهد بود. در اغلب شبیه‌سازی‌های انجام شده برای شبیه‌ساز زلزله از یک نوع شبیه‌سازی (کاتوره‌ای یا تعینی) استفاده شده است. اما روش‌های کاتوره‌ای (تصادفی) در شبیه‌سازی فرکانس‌های بالا دارای عملکرد بهتری هستند و روش‌های تعینی در شبیه‌سازی فرکانس‌های پایین بهتر عمل می‌کنند که در هر شبیه‌سازی بنا به نظر محققین از هر یک از آنها استفاده می‌شود. به عنوان مثال اینگار و راجو کانت [۱] با توجه به داده‌های ریزلرزه نگاری اقدام به شبیه‌سازی زلزله‌ی ۲۱ ژانویه ۲۰۰۱ میلادی در ناحیه کاج کشور هندوستان کردند و پس از اجرای مدل، نتایج به دست آمده برای حداکثر جابجایی را با استفاده از رابطه‌ای تجربی که بین حداکثر تغییر مکان و حداکثر شتاب بر اساس داده‌های جهانی به دست آورده بودند به حداکثر شتاب تبدیل کرده و سپس میزان حداکثر شتاب را در هر نقطه به دست آوردند.

با توجه به عملکرد هر یک از روش‌های کاتوره‌ای و تعینی، در سال‌های اخیر تلاش شده که در شبیه‌سازی از مزایای هر یک از روش‌ها در جای خود استفاده شود، به همین سبب پیشنهاد شده است که برای شبیه‌سازی قسمت‌های فرکانس بالا از روش‌های تصادفی و برای شبیه‌سازی قسمت‌های فرکانس پایین از روش تعینی استفاده شود و در نهایت این دو با یکدیگر ترکیب شده و جواب نهایی به دست آید. به عنوان نمونه زینه [۲] برای شبیه‌سازی زلزله‌ی تاریخی شهر دمشق که در سال ۱۷۵۹ م به وقوع پیوسته، از روش ترکیبی استفاده کرده است.

در تحقیق حاضر نیز برای پی بردن به مشخصات چشمه لرزه‌زای، زلزله‌ی رودبار و منجیل (در سال ۱۳۶۹) از ترکیب دو روش تعینی و کاتوره‌ای استفاده شده است. در ادامه به معرفی زلزله‌ی رودبار و منجیل، روش مدل‌سازی، سناریوهای مورد بررسی و در نهایت نتایج به دست آمده، پرداخته می‌شود.

۲- معرفی زلزله

زلزله رودبار و منجیل در تاریخ ۳۰ خرداد ۱۳۶۹ شمسی (۲۰ ژوئن ۱۹۹۰) در ناحیه البرز اتفاق به وقوع پیوست. این زلزله با بزرگای گشتاوری ۷٫۳ از بزرگترین زلزله‌های ثبت شده در ایران است [۳]. گسل ایجاد کننده زلزله در ناحیه لرزه‌ای البرز واقع شده است. تلفات جانی این زلزله به ۴۰۰۰۰ نفر رسید و حدود ۲۰۰۰۰۰ نفر را بی‌خانمان ساخت. در شکل زیر محل گسل ایجاد کننده زلزله رودبار و منجیل مشاهده می‌شود.



شکل ۱- گسل مسبب زلزله رودبار و منجیل و موقعیت آن در ایران. [۴]

۳- مشخصات گسل

بر اساس مطالعات ریز لرزه نگاری کامپوس [۷]، مشخصات کلی گسل مطابق این مقاله در نظر گرفته شده است که عبارتند از: صفحه گسل به طول ۹۰ کیلومتر و عرض ۲۰ کیلومتر با زاویه‌ی گسل^۱ ۳۰۱ درجه و زاویه‌ی شیب^۲ ۸۲ درجه و فاصله لبه بالای گسل تا سطح زمین برابر ۱ کیلومتر. توزیع لغزش بر روی گسل با توجه به پیشنهاد کامپوس در نظر گرفته شده است. هر چند که عامل به وجود آورنده‌ی زلزله رودبار و منجیل سه گسل بسیار نزدیک و با زاویه‌های تقریباً یکسان هستند اما برای ساده شدن مدل، گسل به عنوان یک صفحه مسطح در نظر گرفته شد.

جدول ۱- مدل سرعت زمین مورد استفاده در این تحقیق

چگالی لایه (کیلوگرم بر متر مکعب)	سرعت موج برشی (متر بر ثانیه)	سرعت موج فشاری (متر بر ثانیه)	عمق بالای لایه (متر)
۲۱۰۰	۱۰۰۰	۱۹۰۰	۰
۲۱۰۰	۱۶۰۰	۲۶۰۰	۱۰۰
۲۱۰۰	۱۹۰۰	۳۳۰۰	۲۰۰
۲۴۰۰	۲۰۰۰	۴۰۰۰	۳۰۰
۲۶۰۰	۳۱۳۰	۵۴۰۰	۱۳۰۰
۲۶۹۶	۳۴۲۰	۵۹۰۰	۱۲۰۰۰
۲۷۸۴	۳۶۵۲	۶۳۰۰	۱۴۰۰۰
۳۳۶۳	۴۷۵۴	۸۲۰۰	۳۵۰۰۰

Z مشخصات عمق بالاترین قسمت لایه از سطح زمین است.

1- Strike

2- Dip

مرکز زلزله بر اساس آنچه که کامپوس [۵] اعلام کرده است، خارج از صفحه گسل واقع می‌شود که به شبیه‌سازی این تحقیق کمکی نمی‌کند. بنابراین با توجه به مقاله ۲۰۱۰ میلادی بربریان و واکر [۴] مرکز زلزله $36,82^\circ$ شمالی و $49,40^\circ$ شرقی در نظر گرفته شد که مطابقت خوبی با مدل کامپوس که کانون زلزله را در فاصله ۶۵ کیلومتری از انتهای جنوب شرقی و ۲۵ کیلومتری از انتهای شمال غربی گسل معرفی می‌کند، دارد.

مدل اولیه زمین برای استفاده در شبیه‌سازی تعینی، با توجه به تحقیقات تاتار و هاتزفلد [۶] در نظر گرفته شد. سپس با استفاده از روابط تجربی که بروکر [۷] میان سرعت موج برشی، موج فشاری و چگالی ارائه کرده، جدول ۱ برای مدل زمین به دست آمده است.

۴- روش شبیه سازی

در این تحقیق پس از مشخص نمودن مختصات و ویژگی‌های گسل، سناریوهای مختلف برای شبیه‌سازی تهیه می‌شود. شبیه‌سازی رکوردها در ایستگاه‌های مورد نظر با دو روش تعینی و کاتوره‌ای انجام می‌شود و سپس یک فیلتر پایین گذر بر روی شتابنگاشت شبیه سازی شده با روش تعینی و همچنین یک فیلتر بالا گذر بر روی شتابنگاشت کاتوره‌ای اعمال می‌شود. سپس این دو شتابنگاشت در فضای زمان با یکدیگر جمع می‌شوند تا شتابنگاشت نهایی را تشکیل دهند.

از آنجا که روش کاتوره‌ای برای شبیه‌سازی بسامدهای بالا و روش تعینی برای شبیه‌سازی بسامدهای پایین مناسب هستند، حد مرز بین استفاده از روش کاتوره‌ای و تعینی فرکانس $1/5$ هرتز در نظر گرفته شده است.

شبیه سازی تعینی با استفاده از برنامه AXITRA^۳ انجام گرفته است. این برنامه از روش گسل محدود^۴ که یک روش تعینی است، استفاده می‌کند. این برنامه با در نظر گرفتن مختصات مدل زمین، مختصات ایستگاه‌های مورد نظر و گسل، همچنین میزان و جهت لغزش و مختصات و ابعاد هر زیرگسل، تابع گرین مربوطه را ایجاد کرده و سپس بنابر تعریف کاربر، این تابع گرین را در تابع زمان خیزش برای هر زیرگسل ضرب کرده و شتابنگاشت را ایجاد می‌کند.

سناریوهای وقوع زلزله برای دو پارامتر سرعت گسیختگی^۵ و زمان خیزش^۶ برای زیرگسل‌ها^۷ در نظر گرفته شده است.

شبیه‌سازی کاتوره‌ای با برنامه EXSIM انجام شده است که این برنامه از روش احتمالی بور استفاده می‌کند. در این تحقیق از ویرایش سال ۲۰۱۲ م. نرم افزار استفاده می‌شود. این نرم افزار با داشتن مختصات جغرافیایی گسل و ایستگاه‌ها، مدل گسترش امواج، نوع زمین و ... برای هر ایستگاه شتاب‌نگاشت را تهیه می‌کند. با توجه به اینکه روش کاتوره‌ای مورد استفاده این نرم‌افزار فرکانس‌های بالا را بهتر مدل می‌کند و قسمت فرکانس پایین در شتابنگاشت‌های این نرم‌افزار بیشتر بر اساس روابط تجربی به دست می‌آید، در تحقیق حاضر از، از قسمت فرکانس بالای این شتابنگاشت‌ها استفاده شده است و قسمت فرکانس پایین آن فیلتر شده است.

۵- مدل مورد استفاده

در مدل مورد استفاده در نرم افزار AXITRA (قسمت فرکانس پایین) ۵۴ زیرگسل در نظر گرفته شده است که هر زیر گسل دارای طول ۳,۳۳ کیلومتر (در راستای امتداد گسل) و ۱۰ کیلومتر عرض (در راستای عمق گسل) است. میزان لغزش هر زیرگسل بر اساس مدل کامپوس در نظر گرفته شده است.

۳- این برنامه توسط اولیور کونانت (Olivier Coutant) تهیه شده است. در این تحقیق از نسخه سال ۲۰۰۸ میلادی استفاده شده است.

4- Finite fault

5- Rupture velocity

6- Rise time

7- Sub-fault

مدل ارائه شده توسط کامپوس، دارای ۹ زیر گسل در راستای امتداد گسل است که هر زیر گسل ۱۰ کیلومتر طول و ۲۰ کیلومتر عرض دارد. در ابتدا این مدل برای شبیه‌سازی در نظر گرفته شده بود اما نتایج به دست آمده از مدل دارای ۹ زیرگسل مناسب نبوده و به علت کم بودن تعداد زیرگسل‌ها، فعال شدن هر زیرگسل یک پالس جداگانه ایجاد کرد که در عمل انطباق مناسبی با رکوردهای مشاهده شده نداشت. به همین سبب هر زیر گسل در مدل کامپوس به ۶ زیرگسل تقسیم شد تا نتایج از پیوستگی مناسبی برخوردار باشد. مدل مورد استفاده در نرم‌افزار EXSIM برای به دست آوردن قسمت فرکانس بالای رکورد مشابه مدل مورد استفاده رحیمی [۷] می‌باشد که در آن میزان افت تنش برابر ۱۴۰ بار در نظر گرفته شده است.

۶- بررسی سناریوها

سناریوهای برای دو عامل «سرعت گسیختگی»^۸ و «زمان خیزش»^۹ به عنوان دو پارامتر مجهول اصلی در مدل با حل تعیینی (نرم‌افزار AXITRA) مورد بررسی قرار گرفتند.

با توجه به مقاله کامپوس، برای سناریوی سرعت گسیختگی، سرعت‌های ۲۳۰۰، ۲۵۰۰، ۲۷۰۰ و ۲۹۰۰ متر بر ثانیه در نظر گرفته شد. تابع زمان خیزش، رمپ در نظر گرفته شد که با توجه به تجربه قبلی از کاربرد نرم‌افزار AXITRA این نوع تابع زمان خیزش، جواب‌های نزدیک‌تری به واقعیت دارد. سناریوهای زمان خیزش، برای هشت زمان ۰/۵، ۱/۰، ۱/۵، ۲/۰، ۳/۰، ۳/۵ و ۴/۰ ثانیه در نظر گرفته شد. پس از ساختن مدل گسل با پارامترهای هر سناریو، باید برای تشخیص میزان نزدیک بودن هر سناریو با واقعیت، ملاکی مد نظر قرار بگیرد. در این تحقیق برای بررسی این مطلب هفت ایستگاه که در زلزله رودبار و منجیل شتابنگاشت ثبت کرده‌اند، مد نظر قرار گرفته است که این ایستگاه‌ها در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲- ایستگاه‌های مورد بررسی در شبیه‌سازی زلزله رودبار و منجیل

نام ایستگاه	عرض جغرافیایی (درجه، شمالی)	طول جغرافیایی (درجه، شرقی)
آب‌بر	۳۶/۹۲	۴۸/۹۷
زنجان	۴۸/۵۷	۳۶/۶۶
لاهیجان	۵۰/۰۳	۳۷/۲۱
رودسر	۵۰/۳۰	۳۷/۱۳
ایهر	۴۹/۲۲	۳۶/۱۴
تنکابن	۵۰/۸۷	۳۶/۸۱
قزوین	۵۰/۰۱	۳۶/۲۷

برای تعیین میزان اختلاف نتایج به دست آمده از هر سناریو با مشاهدات در ایستگاه‌های مورد نظر، از اختلاف طیف پاسخ الاستیک سرعت میان نتایج شبیه‌سازی و رکوردهای ثبت شده در هر ایستگاه استفاده می‌شود.

برای از بین بردن اثر جهت‌ها در مقایسه، از میانگین هندسی سرعت طیفی در هر جهت و در هر فرکانس استفاده می‌شود. برای تعیین میزان اختلاف از رابطه (۱) استفاده می‌شود:

8- Rupture velocity

9- Rise time

$$Total\ Bias = \sum_{j=1}^{N_{stations}} \sum_{i=1}^{N_{frequencies}} \left| \log \left(\frac{Observed\ Velocity\ Spectrum_{i,j}}{Synthetic\ Velocity\ Spectrum_{i,j}} \right) \right| \quad (1)$$

پس از بررسی ۳۲ سناریوی مورد نظر و تعیین اختلاف‌های هر سناریو با واقعیت، پس از اجرای سناریوها، اختلافات هر سناریو به دست آمد که در جدول زیر آمده است.

جدول ۳: میزان اختلاف هر سناریو با رکوردهای واقعی بر اساس رابطه (۱)

سرعت گسیختگی (متر بر ثانیه)

	۲۳۰۰	۲۵۰۰	۲۷۰۰	۲۹۰۰
زمان خیزش (ثانیه)				
۰/۵	۵۵/۴	۵۶/۸	۵۲/۴	۵۲/۶
۰/۱	۲۳/۳	۳۲/۲	۲۸/۶	۲۸/۰
۱/۵	۱۸/۶	۱۹/۰	۱۶/۹	۲۰/۴
۲/۰	۱۸/۲	۱۷/۸	۱۶/۷	۱۶/۱
۲/۵	۱۶/۹	۱۶/۵	۱۵/۶	۱۵/۳
۳/۰	۱۴/۷	۱۴/۹	۱۴/۸	۱۵/۶
۳/۵	۱۶/۶	۱۵/۰	۱۷/۵	۱۷/۹
۴/۰	۱۸/۵	۱۸/۸	۲۰/۹	۲۱/۱

با توجه به نتایج به دست آمده از اجرای شبیه‌سازی‌ها، سناریوی سرعت گسیختگی ۲۷۰۰ متر بر ثانیه و زمان خیزش ۳ ثانیه دارای کمترین میزان اختلاف با مشاهدات واقعی است. اما با توجه به مقاله کامپوس که در آن سرعت گسیختگی برابر ۲۵۰۰ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده بود و اختلاف کم با سناریوی ۲۵۰۰ متر بر ثانیه و ۳ ثانیه، سناریوی سرعت گسیختگی ۲۵۰۰ و زمان خیزش ۳ ثانیه به عنوان سناریوی منتخب برگزیده شد.

۷- بررسی نتایج سناریوی منتخب

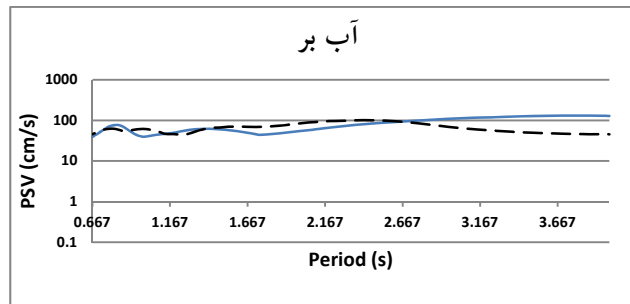
پس از تعیین سناریوی منتخب، نتایج حاصل از آن با مشاهدات ثبت شده مقایسه می‌شود. برای مقایسه، طیف پاسخ سرعت و شتاب برای نتایج شبیه‌سازی و مشاهدات در یک نمودار آورده خواهد شد. همچنین برای بررسی شکل توزیع پارامترهای لرزه‌ای در منطقه، اقدام به تهیه منحنی‌های هم‌شدت در منطقه شده که این منحنی‌ها نیز با مشاهدات عینی مقایسه شده است.

۸- مقایسه در ایستگاه‌ها

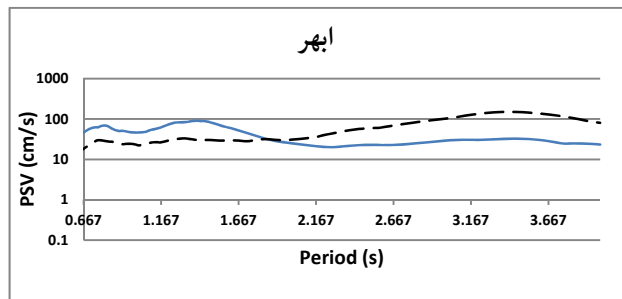
در هفت ایستگاه یاد شده در قسمت‌های قبل نتایج شبیه‌سازی شده طیف پاسخ سرعت تهیه شده و سپس با مشاهدات ثبت شده مقایسه شده است. در ادامه نتایج این مقایسه در نمودارهای طیف پاسخ سرعت نشان داده شده است.

ابتدا برای بررسی سناریوهای مورد بررسی، طیف پاسخ سرعت که تنها بر اساس شبیه‌سازی تعیینی به دست آمده است، با مشابه آن در مشاهدات واقعی مقایسه می‌شود. چون در شبیه‌سازی ترکیبی مورد استفاده در این تحقیق، از شبیه‌سازی تعیینی برای به دست آوردن

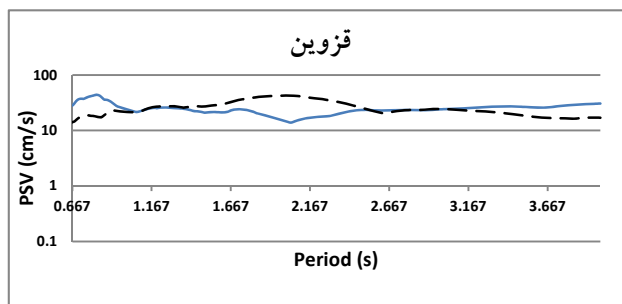
قسمت‌های فرکانس پایین رکوردها استفاده شده است، رکوردهای شبیه‌سازی شده و واقعی با فیلتر پایین‌گذر ۱/۵ هرتز فیلتر شده است. مبدأ مختصات محور افقی (محور زمان تناوب) برابر ۱/۵ هرتز در نظر گرفته شده است که به تشخیص تطابق نتایج شبیه‌سازی با مشاهدات واقعی کمک می‌کند. در واقع قسمت‌های با زمان تناوب بیشتر از ۰/۶۷ ثانیه در نمودارهای زیر دارای معنا است و قسمت‌های با دوره تناوب‌های کمتر از ۰/۶۷ ثانیه دارای ارزش نیست، لذا از نمایش آنها در نمودارها اجتناب شده است.



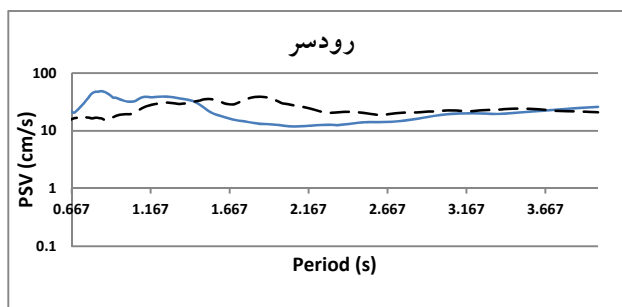
شکل ۲- مقایسه میانگین هندسی سرعت طیفی بر اساس داده‌های شبیه‌سازی شده (خط توپر) و مشاهده شده (خط چین) برای ایستگاه آب‌بر. نتایج شبیه‌سازی و مشاهدات با فیلتر پایین‌گذر ۱/۵ هرتز فیلتر شده‌اند.



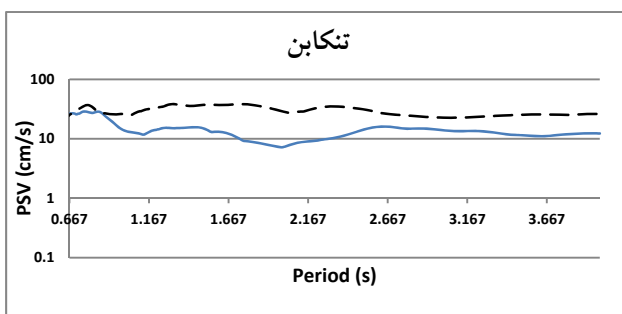
شکل ۳- مقایسه میانگین هندسی سرعت طیفی بر اساس داده‌های شبیه‌سازی شده (خط توپر) و مشاهده شده (خط چین) برای ایستگاه آبهر. نتایج شبیه‌سازی و مشاهدات با فیلتر پایین‌گذر ۱/۵ هرتز فیلتر شده‌اند.



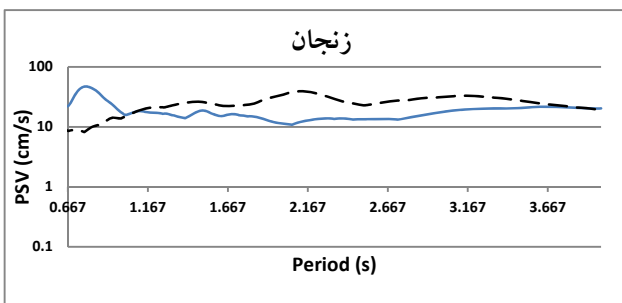
شکل ۴ - مقایسه میانگین هندسی سرعت طیفی بر اساس داده‌های شبیه‌سازی شده (خط توپر) و مشاهده شده (خط چین) برای ایستگاه قزوین. نتایج شبیه‌سازی و مشاهدات با فیلتر پایین‌گذر ۱/۵ هرتز فیلتر شده‌اند.



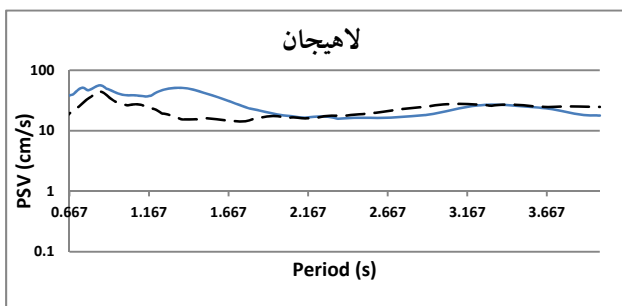
شکل ۵- مقایسه میانگین هندسی سرعت طیفی بر اساس داده‌های شبیه‌سازی شده (خط توپر) و مشاهده شده (خط چین) برای ایستگاه رودسر. نتایج شبیه‌سازی و مشاهدات با فیلتر پایین‌گذر ۱/۵ هرتز فیلتر شده‌اند.



شکل ۶- مقایسه میانگین هندسی سرعت طیفی بر اساس داده‌های شبیه‌سازی شده (خط توپر) و مشاهده شده (خط چین) برای ایستگاه تنکابن. نتایج شبیه‌سازی و مشاهدات با فیلتر پایین‌گذر ۱/۵ هرتز فیلتر شده‌اند.



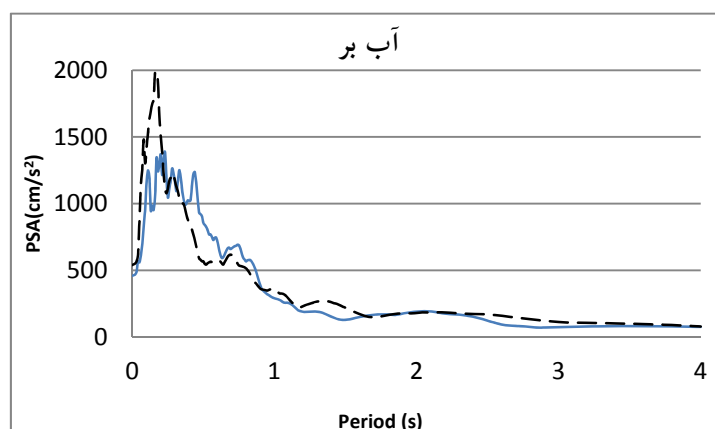
شکل ۷- مقایسه میانگین هندسی سرعت طیفی بر اساس داده‌های شبیه‌سازی شده (خط توپر) و مشاهده شده (خط چین) برای ایستگاه زنجان. نتایج شبیه‌سازی و مشاهدات با فیلتر پایین‌گذر ۱/۵ هرتز فیلتر شده‌اند.



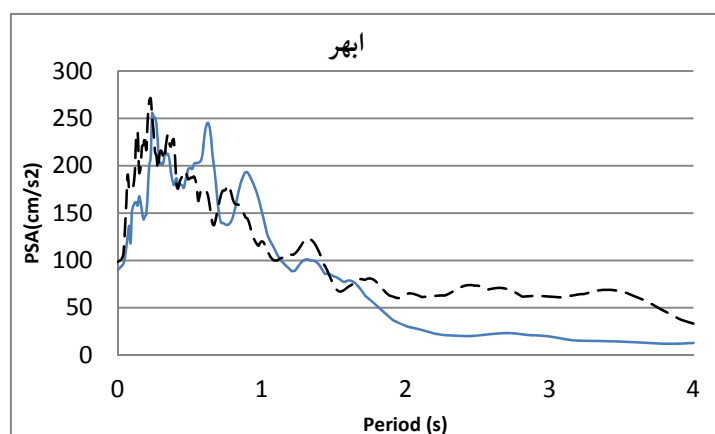
شکل ۸- مقایسه میانگین هندسی سرعت طیفی بر اساس داده‌های شبیه‌سازی شده (خط توپر) و مشاهده شده (خط چین) برای ایستگاه لاهیجان. نتایج شبیه‌سازی و مشاهدات با فیلتر پایین‌گذر ۱/۵ هرتز فیلتر شده‌اند.

پس از تهیه مدل گسل محدود با توجه به طیف پاسخ سرعت، نتایج شتاب‌نگاشت حاصل از نرم‌افزار AXITRA به دست آمده و باید این رکورد در فضای زمان با رکورد به دست آمده از روش تصادفی ترکیب شوند. نتایج شتاب‌نگاشت نرم‌افزار AXITRA بر اساس روش تعینی بوده و بر همین اساس زمان تأخیر رسیدن امواج از لحظه شروع گسیختگی تا ایستگاه مورد نظر در نتایج لحاظ می‌شود اما نرم‌افزار EXSIM این تأخیر را لحاظ نمی‌کند به همین سبب باید برای ترکیب دو رکورد اشاره شده، یک تأخیر زمانی در رکوردهای فرکانس بالای به دست آمده از EXSIM ایجاد شود. در پژوهش حاضر، سرعت متوسط (متوسط وزن‌دار نسبت به ضخامت لایه‌ها تا عمق لبه پایینی صفحه گسل) موج برشی لایه‌های زمین به عنوان سرعت ثابت امواج برشی در نظر گرفته شده و با توجه به فاصله هر ایستگاه تا مرکز زلزله زمان رسیدن امواج به هر ایستگاه محاسبه می‌شود. سپس با در نظر گرفتن این تأخیر زمانی، ابتدا نتایج حاصل از نرم‌افزار AXITRA با فیلتر پایین‌گذر ۱/۵ هرتز و نتایج حاصل از نرم‌افزار EXSIM با فیلتر بالاگذر ۱/۵ هرتز فیلتر شده و سپس در فضای زمان با یکدیگر جمع می‌شوند تا شتاب‌نگاشت نهایی حاصل شود. با توجه به اینکه نرم‌افزار EXSIM تنها امواج برشی را مدل‌سازی می‌کند، در نظر گرفتن سرعت متوسط امواج برشی برای محاسبه مدت تأخیر در شتاب‌نگاشت، منطقی به نظر می‌رسد؛ نتایجی که برای شدت زلزله در ادامه ارائه می‌گردد، منطقی بودن این فرض را تأیید می‌کند.

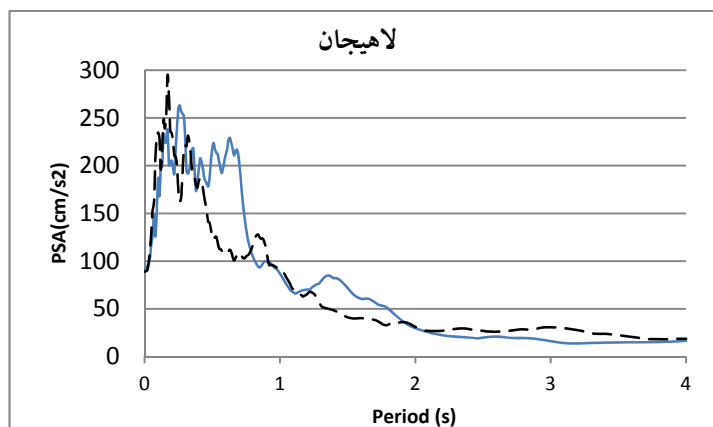
نمودارهای زیر مقایسه‌ی طیف پاسخ‌های شتاب برای رکوردهای شبیه‌سازی شده، پس از ترکیب شدن را با رکوردهای واقعی نشان می‌دهد.



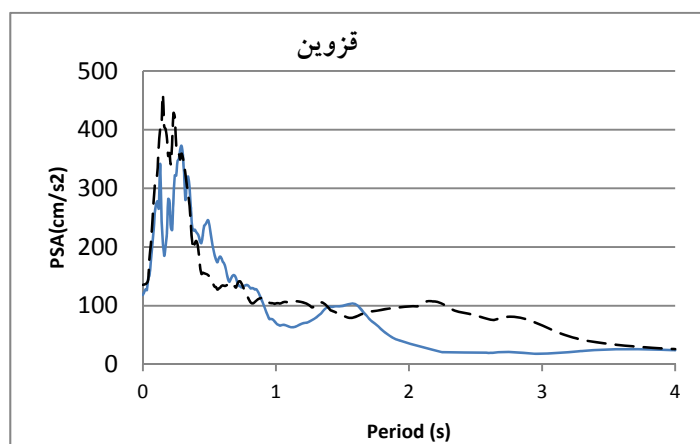
شکل ۹ - مقایسه شتاب طیفی بر اساس داده‌های شبیه‌سازی شده (خط توپر) و مشاهده شده (خط چین) برای ایستگاه آب‌بر



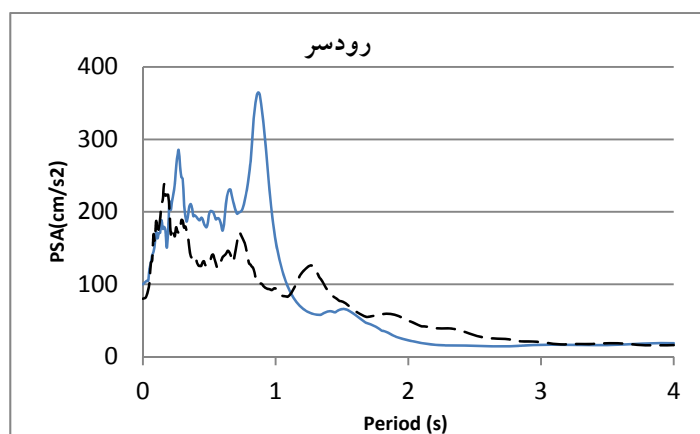
شکل ۱۰ - مقایسه شتاب طیفی بر اساس داده‌های شبیه‌سازی شده (خط توپر) و مشاهده شده (خط چین) برای ایستگاه ابهر



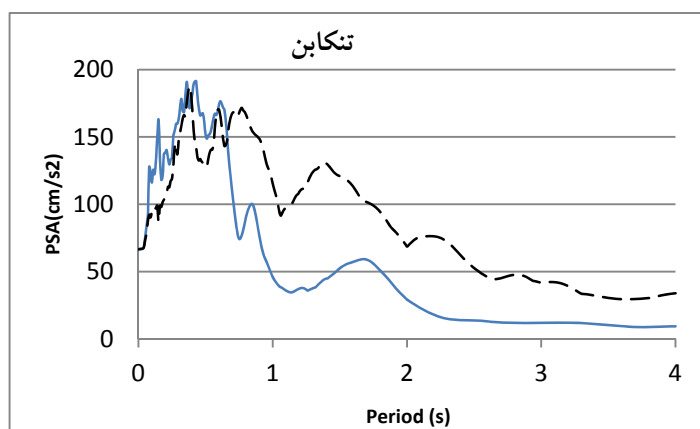
شکل ۱۱- مقایسه شتاب طیفی بر اساس داده‌های شبیه‌سازی شده (خط توپر) و مشاهده شده (خط چین) برای ایستگاه لاهیجان



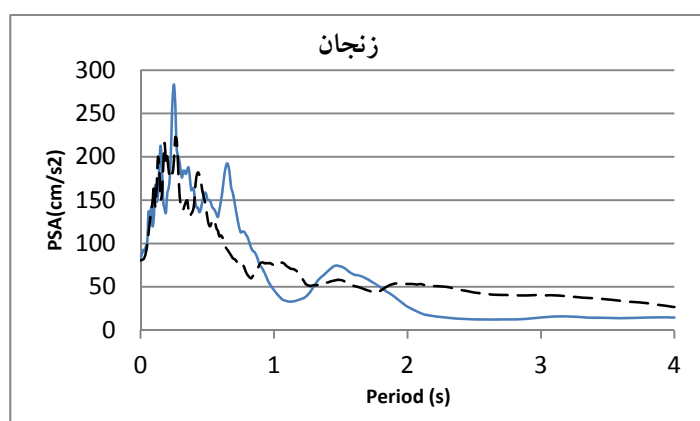
شکل ۱۲- مقایسه شتاب طیفی بر اساس داده‌های شبیه‌سازی شده (خط توپر) و مشاهده شده (خط چین) برای ایستگاه قزوین



شکل ۱۳- مقایسه شتاب طیفی بر اساس داده‌های شبیه‌سازی شده (خط توپر) و مشاهده شده (خط چین) برای ایستگاه رودسر



شکل ۱۴ - مقایسه شتاب طیفی بر اساس داده‌های شبیه‌سازی شده (خط توپر) و مشاهده شده (خط چین) برای ایستگاه تنکابن



شکل ۱۵ - مقایسه شتاب طیفی بر اساس داده‌های شبیه‌سازی شده (خط توپر) و مشاهده شده (خط چین) برای ایستگاه زنجان

۹- مقایسه کانتورهای شدت

پس از مقایسه‌ی نتایج سرعت و شتاب طیفی در ایستگاه‌های منتخب، برای بررسی توزیع پارامترهای لرزه‌ای در محدوده‌ی اطراف گسل از معیار شدت زلزله استفاده می‌شود. این مقایسه علاوه بر نشان دادن نوع توزیع خرابی‌های ایجاد شده بر اثر زلزله و میزان تطابق شبیه‌سازی با واقعیت، مبنایی برای استفاده از روش ترکیبی مد نظر در این مقاله در شبیه‌سازی زلزله‌های تاریخی ناحیه‌ی البرز خواهد بود. با توجه به اینکه برخی خصوصیات زلزله‌های ایجاد شده در یک ناحیه‌ی لرزه‌زا، ثابت هستند، می‌توان از نتایج شبیه‌سازی حاضر به عنوان پایه‌ای برای شبیه‌سازی زلزله‌های تاریخی ناحیه‌ی البرز بهره برد.

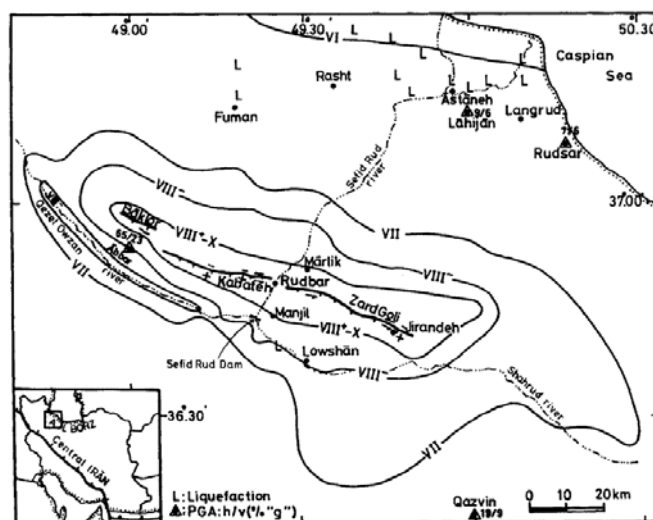
برای به دست آوردن شدت از پارامترهای مهندسی و دقیق، روابط تجربی متعددی ارائه شده است که معمولاً هر کدام از آنها برای برخی مناطق دارای دقت بیشتری هستند. رابطه‌ی منتخب که در تحقیق حاضر مورد استفاده قرار گرفته است، رابطه‌ی ارائه شده توسط والد^[۸] است:

$$MMI = 3.66 \log(PGA) - 1.66 \quad (2)$$

$$MMI = 3.47 \log(PGV) + 2.35 \quad (3)$$

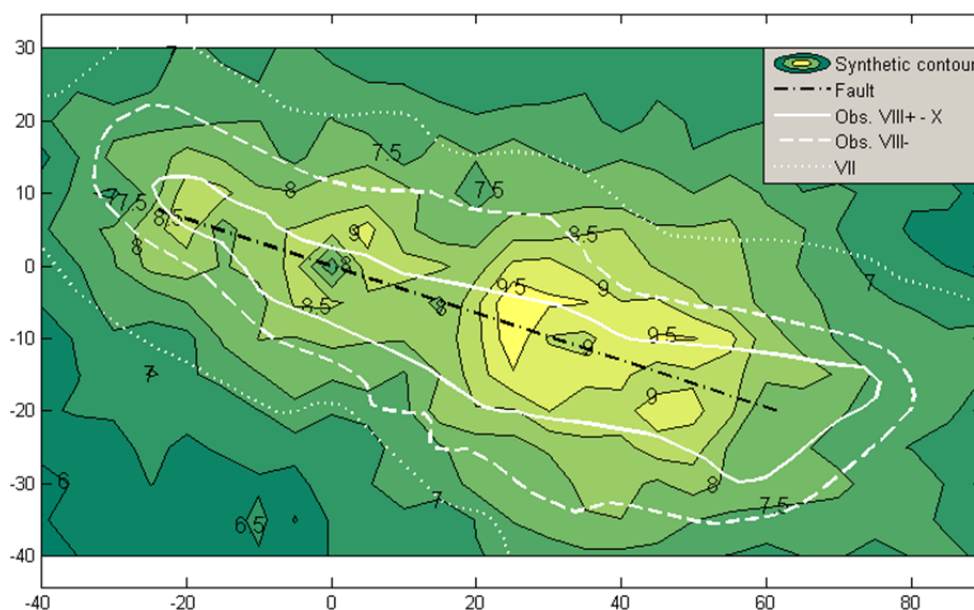
در این روابط PGA حداکثر شتاب بر حسب Gal و PGV حداکثر سرعت بر حسب سانتیمتر بر ثانیه است. برای تهیه‌ی منحنی‌های شدت شبیه‌سازی شده، ناحیه‌ای با ابعاد ۷۰ کیلومتر (شمالی جنوبی) در ۱۳۰ کیلومتر (شرقی غربی) ناحیه‌بندی شده که هر ناحیه ابعاد ۵ در ۵ کیلومتر دارد. پس از تعیین مختصات ناحیه‌ها، مشابه شبیه‌سازی در ایستگاه‌ها، در مورد این ناحیه‌ها نیز شبیه‌سازی صورت گرفت و پس از طی مراحل شبیه‌سازی تعیینی برای تعیین حداکثر سرعت و ترکیبی برای حداکثر شتاب، نتایج با روابط (۲) و (۳) به شدت تبدیل شد. حداکثر سرعت و شتاب نیز با استفاده از رکورد در فضای زمان به دست آمده است (از پاسخ طیفی استفاده نشده است).

برای بررسی میزان تطابق نتایج به دست آمده برای منحنی‌های شدت با واقعیت از منحنی‌های شدت تهیه شده توسط بربریان [۳] برای زلزله رودبار و منجیل استفاده شده است.

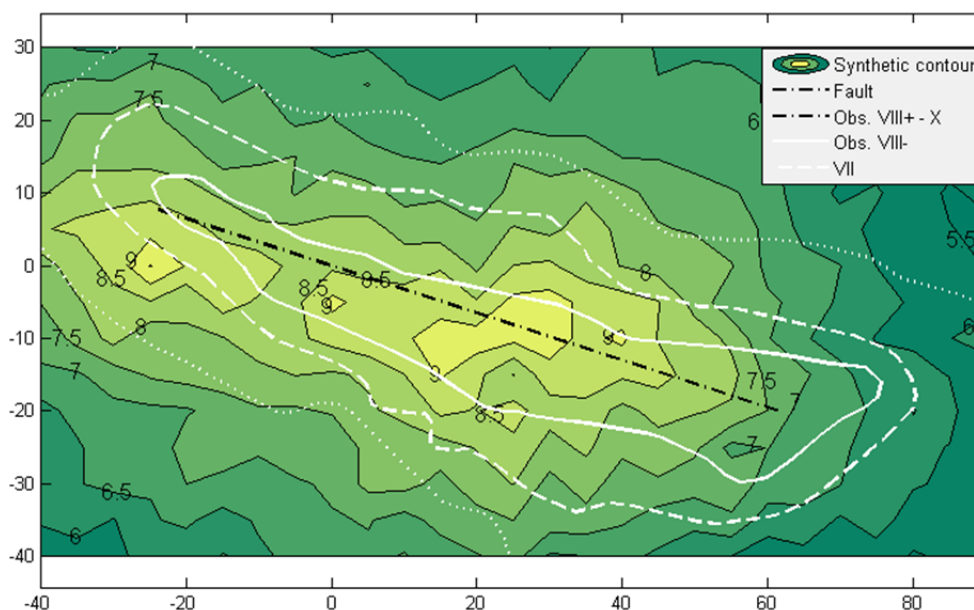


شکل ۱۶- منحنی‌های شدت برای زلزله رودبار و منجیل [3]

در نهایت پس از به دست آوردن منحنی‌های شدت شبیه‌سازی شده و تطبیق آن با منحنی ارائه شده توسط بربریان [۳]، شکل‌های زیر به دست آمده است.



شکل ۱۷- مقایسه منحنی‌های شدت شبیه‌سازی شده با منحنی‌های شدت مشاهده شده بر اساس حداکثر سرعت.



شکل ۱۸- مقایسه منحنی‌های شدت شبیه‌سازی شده با منحنی‌های شدت مشاهده شده بر اساس حداکثر شتاب.

۱۰- نتیجه‌گیری

در پایان با توجه به شبیه‌سازی‌های انجام شده در این تحقیق پارامترهای مناسب برای شبیه‌سازی زلزله‌ی رودبار و منجیل سال ۱۳۶۹، به صورت زیر به دست آمدند که این پارامترها برای مکانیزم گسیختگی گسل مربوطه، بیشترین تطابق را با مشاهدات داشته است: سرعت گسیختگی: ۲۵۰۰ متر بر ثانیه، تابع زمان خیزش: رمپ با زمان خیزش ۳ ثانیه، مرکز زلزله: $36,82^\circ$ شمالی و $49,40^\circ$ شرقی نتایج به دست آمده بیانگر این مطلب است که با افزوده شدن حساسیت پارامترهای مورد بررسی برای تعیین مشخصات مدل بر اساس مشاهدات، روش‌های شبیه‌سازی باید عوامل دخیل بیشتری را در نظر بگیرند. هر چند در نتایج شدت حاصل شده از روش ترکیبی، شکل

کلی منحنی‌های هم شدت نزدیک به منحنی‌های مشاهده شده هستند، اما به نظر می‌رسد برای دقیق‌تر شدن نتایج نیاز است سناریوهایی برای برخی دیگر از پارامترهای مجهول این مسأله از جمله مرکز زلزله و زاویه‌ی شیب گسل و ... تهیه شود و با تشکیل حالات مختلف، بهترین سناریو برگزیده شود.

از دیگر عوامل ایجاد کننده‌ی اختلاف در نتایج شبیه‌سازی با واقعیت، نوع خاک زمین است. هر نوع لایه‌بندی خاک، سبب تشدید یا تضعیف برخی فرکانس‌های خاص شده و طبعاً بر پارامترهای مورد بررسی اثر می‌گذارد. هر چند امکان دارد که با بررسی‌های میدانی یا ... بتوان به تابع تشدید خاک چند ایستگاه مشخص پی برد، ولی عملاً تعیین نوع تشدید خاک هر نقطه در یک وسعت زیاد امکان‌پذیر نیست. علاوه بر این، توپوگرافی زمین نیز بر تشدید فرکانس‌های زلزله تأثیر دارد که آن نیز برای منطقه مورد بررسی به طور کامل شناخته شده نیست. در صورت در نظر گرفته شدن عوامل یاد شده (و برخی عدم قطعیت‌های دیگر)، هر چند حجم عملیات لازم برای رسیدن به نتیجه چند برابر می‌شود، اما نتایج دقیق‌تری حاصل خواهد شد.

نتایج به دست آمده از زلزله‌ی رودبار و منجیل، با توجه به وقوع در ناحیه‌ی البرز می‌تواند برای شبیه‌سازی زلزله در شهرهای مهمی چون تهران یا تبریز که در ناحیه‌ی لرزه‌خیزی البرز قرار دارند و رکوردی از زلزله‌های بزرگ برای آنها در دست نیست به کار برده شود. با توجه به اینکه زلزله‌های تاریخی منبع مهمی برای به دست آوردن اطلاعات نواحی لرزه‌زا هستند، استفاده از روش ترکیبی گزینه‌ی مناسبی برای رسیدن به این هدف است ولی باید این روش برای زلزله‌های ایران در نواحی مختلف، تنظیم و هماهنگ (کالیبره) شود.

۱۱- مراجع

- [1] R. N. Iyengar and S. Raghukanth, "Strong Ground Motion Estimation During the Kutch, India Earthquake," *Pure and Applied Geophysics*, vol. 163, no. 1, pp. 153-173, 2006.
 - [2] H. E. Zaineh, H. Yamanaka, Y. P. Dhakal, R. Dakkak and M. Daoud, "Strong ground motion simulation during the November 1759 Earthquake along Serghaya Fault in the metropolitan of Damascus, Syria," *Journal of Seismology*, vol. 17, no. 4, pp. 1295-1319, 2013.
 - [3] M. Berberian, M. Qorashi, J. A. Jackson and K. Priestley, "The rudbar-tarom earthquake of 20 june 1990 in nw persia: preliminary field and seismological observations, and its tectonic significance," *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 82, no. 4, pp. 1726-1755, 1992.
 - [4] M. Berberian and R. Walker, "The RudbarMw7.3 earthquake of 1990 June 20; seismotectonics, coseismic and geomorphic displacements, and historic earthquakes of the western 'High-Alborz', Iran," *Geophysical Journal International*, vol. 182, p. 1577-1602, 2010.
 - [5] J. Campos, R. Madariaga, J. Nábělek, B. G. Bukchin and A. Deschamps, "Faulting process of the 1990 June 20 Iran earthquake from broad-band records," *Geophysical Journal International*, vol. 118, no. 1, pp. 31-46, 1994.
 - [6] M. Tatar and D. Hatzfeld, "Microseismic evidence of slip partitioning for the Rudbar-Tarom earthquake (Ms 7.7) of 1990 June 20 in NW Iran," vol. 176, no. 2, 2009.
- [۷] م. رحیمی، حل معکوس بر روی گسل‌های محدود با استفاده از الگوریتم ژنتیک، پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی سازه، نورزاد، ا (استاد راهنما)، زعفرانی، ح (استاد راهنمای دوم)، انصاری، ا (مشاور)، ۱۳۹۲.
- [8] D. J. Wald, V. Quintoriano, T. H. Heaton and H. Kanamori, "Relationship between Peak Ground Acceleration, Peak Ground Velocity, and Modified Mercally Intensity in California," *Earthquake Spectra*, vol. 15, no. 3, pp. 557-564, 1999.
 - [9] S. T. G. Raghukanth, "Ground motion estimation during the Kashmir," *Natural Hazards*, vol. 46, no. 1, pp. 1-13, 2007.