

تولید شتاب‌نگاشت‌های برساخته برای زلزله‌های تاریخی جهت ارزیابی قابلیت کاربرد در شبیه‌سازی آثار و تدقیق طیف‌های طراحی با مطالعه موردی تبریز

پیمان نرج‌آبادی‌فام^{۱*}، وحید شهامت^۲، یوسف کارگر^۳ و پویا زاهدی^۳

^۱ استادیار گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بناب

^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد خاک و پی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند

^۳ دانشجوی کارشناسی ارشد خاک و پی، گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان

(دریافت: ۹۶/۴/۲۱، پذیرش: ۹۸/۲/۷، نشر آنلاین: ۹۸/۲/۷)

چکیده

استفاده از داده‌های لرزه‌ای یکی از نیازهای اساسی مهندسی زلزله سازه‌ها می‌باشد. کاربرد تاریخچه‌های زمانی ثبت شده زلزله‌های پیشین هر منطقه را جرح‌تر است. در صورت عدم وجود، زلزله‌های سایر مناطق و یا تاریخچه‌های ساخته شده جایگزین می‌گردند. نظر به ضرورت تطابق مشخصات زلزله‌های سایر مناطق با خصوصیات لرزه‌ای منطقه مورد نظر، زلزله‌های ساخته شده مورد توجه قرار می‌گیرند. در این میان نیز زلزله‌های برساخته به علت عدم نیاز به طیفی از پیش تعیین شده نسبت به زلزله‌های مصنوعی برتری می‌یابند. از این رو، در این مقاله تولید کاربردی شتاب‌نگاشت‌های برساخته برای زلزله‌های تاریخی جهت شبیه‌سازی آثار آن‌ها بررسی و تأثیر استفاده از این شتاب‌نگاشت‌ها در تدقیق طیف‌های طراحی ارزیابی می‌شود. به این منظور، اطلاعات زلزله‌های رخ داده در ایران جمع‌آوری، یکسان‌سازی و کاتالوگ مربوط تهیه می‌گردد. نقشه گسل‌های ایران بر پایه مشخصات زلزله‌های رخ داده ترسیم می‌شود. شتاب‌نگاشت‌های برساخته برای زلزله‌های تاریخی شهر تبریز به عنوان نمونه‌ای بارز از شهری با خطر زلزله بسیار بالا بدون داده‌های دستگاهی ثبت شده مهم تولید می‌گردند و طیف‌های طراحی بر اساس زلزله‌های تاریخی برساخته به دست آمده و با طیف آئین‌نامه مقایسه می‌گردند. نتایج حاصل نشان می‌دهند روش این پژوهش طبق راستی‌آزمایی انجام یافته به کمک شتاب‌نگاشت‌های واقعی و شتاب‌نگاشت‌های برساخته سایر روش‌ها دارای دقت لازم برای تولید کاربردی شتاب‌نگاشت‌های برساخته می‌باشد. مقایسه طیف‌های طراحی حاصل از شتاب‌نگاشت‌های برساخته با طیف‌های آئین‌نامه‌ای نیز نشان می‌دهد طیف‌های طراحی دقیق‌تر می‌شوند، طوری که به عنوان مثال برای شهر تبریز مشکل دست پایین بودن طیف‌های آئین‌نامه‌ای برای فواصل کم و محافظه‌کارانه بودن آن‌ها برای فواصل دورتر از گسل مرتفع می‌گردد.

کلیدواژه‌ها: شتاب‌نگاشت برساخته، زلزله تاریخی، کاتالوگ یکسان‌سازی شده تفکیکی، گسل‌های ایران، شبیه‌سازی آثار زلزله، طیف طرح.

۱- مقدمه

به نصب اولین لرزه‌نگار به سال ۱۹۵۸ میلادی (۱۳۳۷ شمسی) در ایران (IRSC، ۲۰۱۶؛ BHRC، ۲۰۱۶)، شهر تبریز نمونه‌ای بارز برای عدم وجود تاریخچه‌ای ثبت شده از حرکات قوی زمین علی‌رغم لرزه‌خیزی بسیار زیاد آن می‌باشد. این در حالی است که مهندسی زلزله سازه به منظورهای طرح مقاوم و یا بهسازی عملاً مستلزم دستیابی به تاریخچه‌های حرکات قوی زمین حین زلزله‌های رخ داده در هر منطقه، شتاب‌نگاشت‌های زلزله‌های رخ داده در سایر مناطق با شرایط مشابه منطقه مورد نظر و یا شتاب‌نگاشت‌های ساخته شده متناسب با شرایط منطقه است. بنابراین، در صورت عدم وجود تاریخچه‌ای ثبت شده از حرکات قوی زمین در چنین

دسترسی به تاریخچه‌های حرکات قوی زمین در مناطق دارای خطر زلزله متوسط و یا کم بنا بر احتمال ضعیف وقوع زلزله‌های قوی یا نسبتاً قوی در چنین مناطقی طبیعتاً میسر نمی‌باشد (Honore و همکاران، ۲۰۱۱؛ Wossner و همکاران، ۲۰۰۲). اما با توجه به این که زلزله‌ها از حوالی سال ۱۹۰۰ میلادی به صورت دستگاهی ثبت شده‌اند (Boore و Bommer، ۲۰۰۵؛ Storchak و همکاران، ۲۰۱۲؛ Albini و همکاران، ۲۰۱۳)، در مناطق لرزه‌خیز دارای خطر بسیار زیاد و یا زیاد نیز ممکن است تاریخچه‌ای ثبت شده از حرکات قوی زمین وجود نداشته باشد. به عنوان مثال، نظر

* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: (داخلی ۱۶۳۲) ۰۴۱-۳۷۷۲۴۸۲۹

جهت تمیز رکوردهای نزدیک به و دور از گسل تعیین می‌گردد. در نهایت نیز بزرگی زلزله و نوع خاک محل مشخص می‌گردند تا تولید شتاب‌نگاشت میسر گردد.

تولید شتاب‌نگاشت‌های برساخته جهت کاربردهای مهندسی سازه و زلزله توسط پژوهشگران مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است. به‌عنوان مثال، Hwang و همکاران (۲۰۰۱) زلزله‌های New Madrid را به‌صورت برساخته شبیه‌سازی نموده و نشان داده‌اند تاریخچه‌های لرزه‌ای تولید شده می‌توانند در تحلیل‌های تاریخچه زمانی سازه‌ها مورد استفاده قرار گیرند. Agarwal (۲۰۰۴) زلزله سال ۱۹۹۱ میلادی Uttarkashi هندوستان را شبیه‌سازی نموده و نشان داده است شتاب‌نگاشت‌های تولید شده به‌خوبی منطبق با شتاب‌نگاشت‌های ثبت شده می‌باشند.

مقدسی موسوی و همکاران (۱۳۸۸) زلزله سال ۱۳۸۱ شمسی آوج را با روش تابع نیمه تجربی گرین شبیه‌سازی نموده و نشان داده‌اند ضمن برتری روش گرین به روش‌های تصادفی (کاتوره‌ای) تحقیقات بیشتر در این زمینه با توجه به تنوع پارامترهای روش گرین مورد نیاز است. Nicknam و همکاران (۲۰۱۰) زلزله سال ۲۰۰۵ میلادی زرنند کرمان را با الگوریتم ژنتیک شبیه‌سازی نموده و امکان کاربرد این الگوریتم را به اثبات رسانده‌اند. Shahjouei و Pezeshk (۲۰۱۵) زلزله‌های مناطق مرکزی و شرقی ایالات متحده آمریکا را شبیه‌سازی نموده و قابلیت کاربرد آن‌ها در مطالعات سازه‌ای و تحلیل خطر زلزله را مشخص نموده‌اند. Zolfaghari (۲۰۱۵) یک کاتالوگ لرزه‌ای از زلزله‌های برساخته شهر تهران را تهیه نموده و این کاتالوگ را جهت ارزیابی خطر لرزه‌ای این شهر مورد استفاده قرار داده است.

در این پژوهش، در ادامه کارهای انجام یافته که در پراگراف-های قبل بررسی گردیدند، تولید شتاب‌نگاشت‌های برساخته بر اساس روش Halldorsson و Papageorgiou (۲۰۰۵) و به کمک نرم‌افزار SeismoArtif ارزیابی می‌گردند. در این راستا، مشخصات زلزله‌های رخ داده در ایران (چه تاریخی و چه دستگاهی) جمع-آوری، یکسان‌سازی و کاتالوگ مربوط تهیه می‌گردد (بخش (۲)). نقشه گسل‌های ایران بر پایه زلزله‌های رخ داده ترسیم می‌شود (بخش (۳)). شتاب‌نگاشت‌های برساخته زلزله‌های مشخص بر اساس روش معرفی شده تولید و جهت راستی‌آزمایی با اطلاعات موجود مقایسه می‌گردند (بخش (۴)). به عنوان نمونه‌ای بارز از شهری با خطر زلزله بسیار بالا بدون داده‌های دستگاهی ثبت شده مهم، در قالب یک مطالعه موردی، شتاب‌نگاشت‌های برساخته برای زلزله‌های تاریخی شهر تبریز تولید می‌گردند (بخش (۵)). طیف-های طراحی با در نظر گرفتن زلزله‌های تاریخی برساخته به دست می‌آیند و با طیف‌های طراحی ویرایش چهارم استاندارد ۲۸۰۰

مناطق به اجبار یکی از دو گزینه آخر مد نظر قرار می‌گیرند. از این میان، جزئیات مختلف مربوط به تطبیق شرایط در صورت کاربرد شتاب‌نگاشت‌های طبیعی سایر مناطق که به‌خصوص در آیین‌نامه‌های جدید بیشتر مورد توجه می‌باشند (Nicknam و همکاران، ۲۰۱۰؛ Zentner و همکاران، ۲۰۱۴) از یک سو و پیشرفت‌های علمی و نرم‌افزاری حاصل در خصوص تولید شتاب-نگاشت‌های ساخته شده (Hwang و همکاران، ۲۰۰۱؛ عشایی و نیکی‌بختان، ۱۳۹۴؛ Shahjouei و Pezeshk، ۲۰۱۵؛ Ghodrati Amiri و همکاران، ۲۰۱۴) از سوی دیگر توجه بر تولید و کاربرد شتاب‌نگاشت‌های ساخته شده را افزایش داده است.

شتاب‌نگاشت‌های ساخته شده در دو نوع شناخته می‌شوند: شتاب‌نگاشت‌های مصنوعی^۱ که صرفاً به صورت عددی جهت انطباق با یک طیف طرح مشخص تولید می‌شوند و شتاب‌نگاشت-های برساخته^۲ که با توجه به مشخصات زمین‌شناختی و لرزه‌ای منطقه تولید می‌شوند. از این میان، شتاب‌نگاشت‌های برساخته به علت عدم نیاز به طیفی از پیش تعیین شده و امکان مستقیم تولید برای زلزله‌های یک منطقه ارجحیت می‌یابند (Rezaeian و Kiureghian، ۲۰۱۰).

روش‌های مختلفی برای تولید شتاب‌نگاشت‌های برساخته وجود دارند که به‌طور کلی در دو دسته روش‌های قطعیتی و روش-های تصادفی قرار می‌گیرند (Lam و همکاران، ۲۰۰۰). اما نیاز به دقت و کارآمدی بیشتر موجب پیشنهاد روش‌هایی مانند استفاده از توابع تجربی گرین^۳ که هر چند عموماً به‌صورت بسطی پیچیده از روش‌های قطعیتی شناخته می‌شود اما عملاً ترکیبی از روش‌های قطعیتی و تصادفی می‌باشد (Agarwal، ۲۰۰۴) نیز شده است. البته اگرچه استفاده از این توابع شاید روشی کارآمد برای تولید شتاب‌نگاشت‌های برساخته می‌باشد اما لزوم دستیابی به مشخصات متعدد و به‌کارگیری آن‌ها در محاسبه توابع عملاً محققین را به جستجوی روش‌های عملی‌تر واداشته است. در این راستا، Halldorsson و Papageorgiou (۲۰۰۵) روشی را بر اساس اصلاح یک مدل تصادفی پیشنهاد داده‌اند که با دقت مناسب برای مناطق مختلف قابل کاربرد می‌باشد. این روش برای فلات ایران هم بررسی (Zafarani و همکاران، ۲۰۰۸) و در مطالعات پژوهشی به کار برده شده است (Soghrat و همکاران، ۲۰۱۲). استفاده از این روش در نرم‌افزار SeismoArtif (SeismoSoft Group، ۲۰۱۶) نیز تولید شتاب‌نگاشت‌های برساخته را کاربردی‌تر نموده است. به این منظور، ابتدا می‌بایست ساختار تکتونیکی منطقه تعریف گردد که با توجه به مفاهیم مهندسی زلزله می‌تواند بین صفحه‌ای^۴ مثل اغلب زلزله‌های روی داده در مرز صفحات یا گسل-ها، مرز افزایش^۵ یا درون صفحه‌ای^۵ باشد. سپس فاصله از گسل

4. Inter-plate
5. Active tectonic extension
6. Intra-plate

1. Artificial
2. Synthetic
3. Green

بحث می‌گردند، خلاصه‌ای از کاتالوگ را به عنوان نمونه برای استان آذربایجان شرقی نشان می‌دهد. چنانچه از جدول (۲) مشخص می‌گردد استان آذربایجان شرقی تا به انتهای سال ۲۰۱۵ میلادی تعداد ۴۲ زلزله نسبتاً بزرگ و بزرگ ($M_w \geq 5$) را تجربه کرده است که از این میان تعداد ۳۱ عدد از زلزله‌ها (حدود ۷۴٪ درصد از کل زلزله‌های رخ داده) زلزله‌های تاریخی (رخ داده قبل از سال ۱۹۰۰ میلادی) و تعداد ۱۱ عدد از زلزله‌ها (حدود ۲۶٪ درصد از کل زلزله‌های رخ داده) زلزله‌های دستگاهی هستند. از این میان نیز تعداد ۳ عدد از زلزله‌های دستگاهی مربوط به دوره نخست دستگاهی (رخ داده بین سال‌های ۱۹۰۰ تا ۱۹۶۳ میلادی) و تعداد ۸ عدد از آن‌ها مربوط به دوره جدید (رخ داده از سال ۱۹۶۴ میلادی تاکنون و ثبت شده پس از استقرار شبکه لرزه‌نگاری استاندارد جهانی) می‌باشند.

جدول ۱- تعداد و بازه زمانی وقوع زلزله‌ها در کاتالوگ تهیه شده

به تفکیک استان‌ها		
استان (مرکز استان)	تعداد زلزله‌ها	تاریخ (های) میلادی
البرز (کرج)	۱	۹۵۸
اردبیل (اردبیل)	۸	۱۸۶۱-۱۹۹۷
آذربایجان شرقی (تبریز)	۴۲	۸۵۸-۲۰۱۲
آذربایجان غربی (ارومیه)	۲۴	۱۳۱۹-۱۹۸۸
بوشهر (بوشهر)	۵۲	۱۸۰۶-۲۰۱۵
چهارمحال بختیاری (شهرکرد)	۲۲	۱۰۵۲-۱۹۹۸
فارس (شیراز)	۲۰۶	۱۴۵۹-۲۰۱۴
گیلان (رشت)	۲۹	۱۶۷۸-۲۰۰۶
گلستان (گرگان)	۲۶	۸۷۴-۱۹۹۹
همدان (همدان)	۱۹	۹۵۶-۲۰۰۲
هرمزگان (بندرعباس)	۲۰۹	۱۴۹۷-۲۰۱۵
ایلام (ایلام)	۴۸	۸۷۲-۲۰۱۵
اصفهان (اصفهان)	۱۰	۱۳۴۴-۱۹۷۵
کرمان (کرمان)	۹۴	۱۸۴۹-۲۰۱۵
کرمانشاه (کرمانشاه)	۱۸	۲۰۰۲-۷ سده قبل میلاد
خراسان شمالی (بجنورد)	۳۴	۹۴۳-۱۹۹۸
خراسان رضوی (مشهد)	۶۳	۸۴۰-۲۰۱۵
خراسان جنوبی (بیرجند)	۶۴	۷۳۴-۲۰۱۲
خوزستان (اهواز)	۵۷	۸۴۰-۲۰۰۹
کهگیلویه و بویراحمد (باسوج)	۲۰	۱۸۷۵-۲۰۱۴
کردستان (سنندج)	۴	۱۱۳۵-۱۹۷۱
لرستان (خرم‌آباد)	۳۱	۱۳۱۶-۲۰۰۶
مرکزی (اراک)	۸	۱۱۷۷-۱۹۶۸
مازندران (ساری)	۳۴	۱۱۲۷-۲۰۰۴
قزوین (قزوین)	۱۱	۲۰۰۲-هزاره ۳ قبل میلاد
قم (قم)	۴	۱۸۹۵-۲۰۰۷
سمنان (سمنان)	۳۴	۷۴۳-۲۰۱۰
سیستان و بلوچستان (زاهدان)	۵۹	۸۰۵-۲۰۱۵
تهران (تهران)	۱۸	۱۹۸۸-۴ سده قبل میلاد
یزد (یزد)	۲۴	۱۹۳۳-۲۰۱۳
زنجان (زنجان)	۷	۱۸۰۳-۲۰۰۸

ایران (۱۳۹۳) مقایسه می‌گردند (بخش (۶)). بر این اساس بحث می‌شود (بخش (۷)) آیا تولید شتاب‌نگاشت‌های برساخته به کمک روش معرفی شده برای زلزله‌های تاریخی در مناطقی مانند تبریز مفید و مؤثر بوده و در کاربردهای مهندسی زلزله سازه کارآمد می‌باشد یا خیر.

۲- کاتالوگ یکسان‌سازی شده زلزله‌های ایران

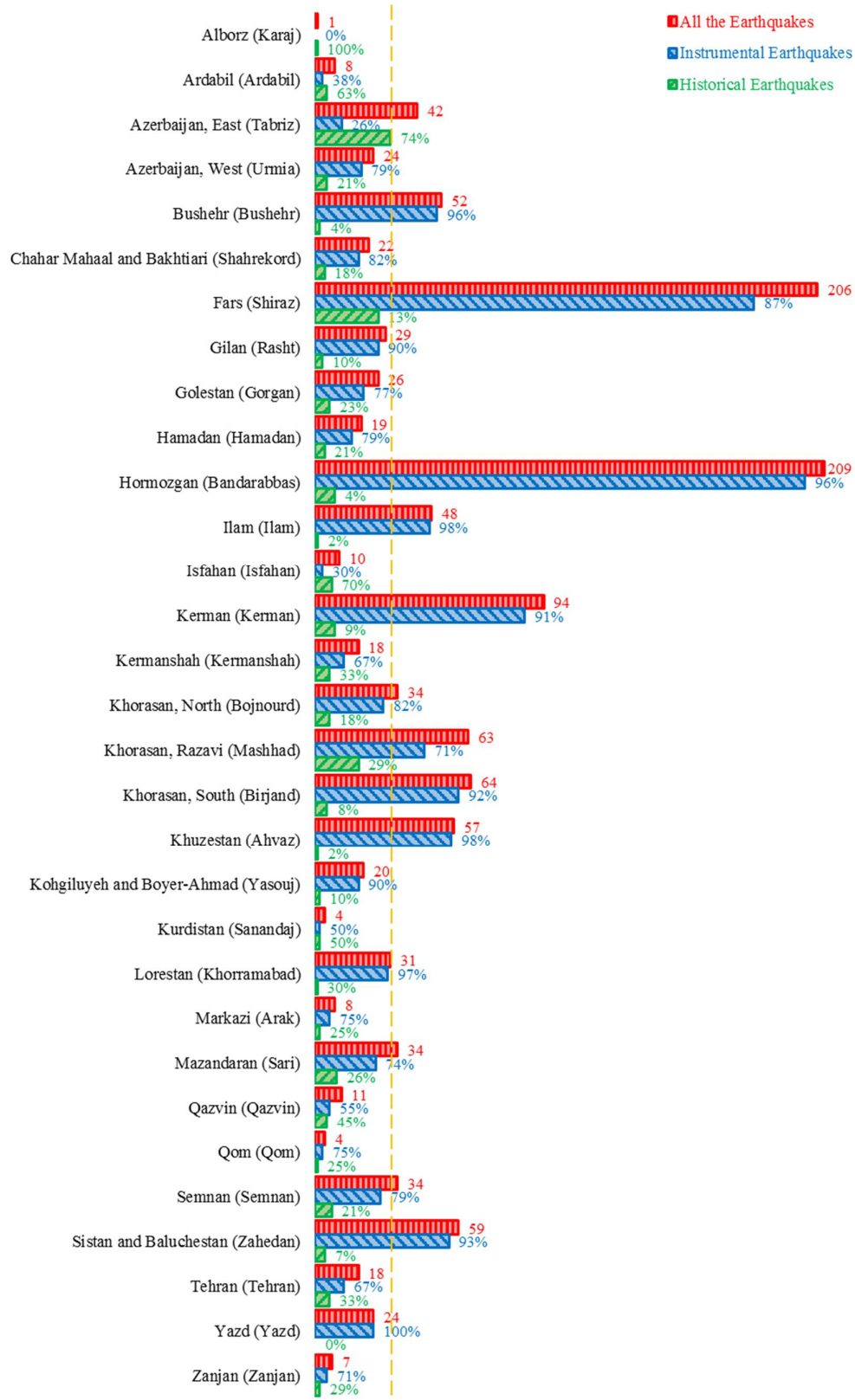
به‌منظور دستیابی به اطلاعات زلزله‌های تاریخی رخ داده در مناطق مختلف ایران و مطالعه وضعیت لرزه‌خیزی هر منطقه یک کاتالوگ یکسان‌سازی شده مشتمل بر زلزله‌های رخ داده با بزرگی بیش از ۵ ($M_w \geq 5$) تا پایان سال ۲۰۱۵ میلادی تهیه شده است که در این بخش جزئیات آن ارائه می‌گردند.

۲-۱- جمع‌آوری اطلاعات و مشخصات کاتالوگ

از آنجاکه ایران تقریباً بین عرض‌های جغرافیایی ۲۵ تا ۴۰ درجه شمالی و طول‌های ۴۴ تا ۶۳ درجه شرقی قرار دارد در کاتالوگ تهیه شده نیز با توجه به هدف مورد نظر زلزله‌های رخ داده در این مختصات جغرافیایی مد نظر قرار گرفته‌اند. منابع مورد استفاده در تهیه این کاتالوگ با توجه ویژه بر زلزله‌های تاریخی به‌خصوص برای شهر تبریز به‌عنوان مطالعه موردی عبارتند از: کتاب تاریخ زمین‌لرزه‌های ایران (رده، ۱۳۷۰) که ترجمه کتاب Ambraseys و Melville (۱۹۸۲) می‌باشد، کاتالوگ تهیه شده توسط میرزایی (۱۳۸۱) جهت پوشش نواقص کتاب تاریخ زمین‌لرزه‌های ایران، کاتالوگ یکسان‌سازی شده Karimiparidari و همکاران (۲۰۱۳) و همچنین نتایج تحقیقات Mousavi-Bafrouei و همکاران (۲۰۱۴) به‌منظور به‌روزرسانی اطلاعات. کاتالوگ تهیه شده با توجه به هدف پژوهش به تفکیک استان‌ها و شامل مجموعه‌ای از اطلاعات در قالب تاریخ وقوع (در اولویت، با توجه به هدف بررسی زلزله‌های تاریخی)، مکان (شهر و منطقه)، زمان وقوع (برای وقایع تاریخی، به تقریب)، موقعیت جغرافیایی مرکز بیرونی زلزله (شهر وقوع، در مورد زلزله‌های تاریخی)، بزرگی زلزله (یکسان‌سازی شده بر اساس M_w) و عمق زمین‌لرزه (در صورت دسترسی، برای زلزله‌های دستگاهی) به همراه مرجع اطلاعات می‌باشد. جزئیات کاتالوگ، بدون حذف رویدادهای وابسته (به علت عدم نیاز در این پژوهش، با توجه به انتخاب معیار $M_w \geq 5$ و عدم انجام کارهای آماری محاسباتی مثل آنچه در تحلیل خطر انجام می‌شود) در جدول‌های (۱) و (۲) ارائه می‌گردد. تعداد زلزله‌های مورد مطالعه در این کاتالوگ و بازه زمانی وقوع آن‌ها به تفکیک استان‌ها در جدول (۱) ارائه شده است و جدول (۲) نیز، با توجه به تمرکز ویژه بر کلان‌شهر تبریز به عنوان مطالعه موردی پژوهش، بر اساس دلایل ارائه شده در بخش (۱) که در ادامه نیز

جدول ۲- جزئیات کاتالوگ برای استان آذربایجان شرقی (تبریز)

ردیف	تاریخ (میلادی)	زمان (ساعت هماهنگ جهانی)	محل وقوع	مختصات جغرافیایی رومرکز زلزله		بزرگی زلزله (M_w)	عمق زلزله (km)
				عرض (° N)	طول (° E)		
۱	۸۵۸	نامشخص	تبریز	۴۶/۳۰	۳۸/۱۰	۶	نامشخص
۲	۱۰۴۲/۱۱/۰۴	۱۲-۱۸	تبریز	۴۶/۳۰	۳۸/۱۰	۷/۵	نامشخص
۳	۱۲۷۳/۰۱/۱۸	۱۲-۱۸	مرند	۴۵/۸۰	۳۸/۴۰	نامشخص	نامشخص
۴	۱۳۰۴/۱۱/۰۷	نامشخص	هادیشهر	۴۵/۵۰	۳۸/۵۰	۶/۷	نامشخص
۵	۱۵۵۰	نامشخص	آذرشهر	۴۶/۰۰	۳۷/۸۰	نامشخص	نامشخص
۶	۱۵۶۷	نامشخص	ارسباران	۴۷/۲۰	۳۹/۰۰	نامشخص	نامشخص
۷	۱۵۹۳	نامشخص	سراب	۴۷/۵۰	۳۷/۸۰	۶/۱	نامشخص
۸	۱۶۲۱/۰۵/۳۱	۱۸-۲۴	میانه	۴۷/۷۰	۳۷/۴۰	نامشخص	نامشخص
۹	۱۶۴۱/۰۲/۰۵	۱۲-۱۸	سهند	۴۶/۱۰	۳۷/۹۰	۶/۸	نامشخص
۱۰	۱۶۶۴	نامشخص	تبریز	۴۶/۳۰	۳۸/۱۰	نامشخص	نامشخص
۱۱	۱۷۱۷/۰۳/۱۲	۲۴-۰۶	تبریز	۴۶/۳۰	۳۸/۱۰	۵/۹	نامشخص
۱۲	۱۷۲۰	نامشخص	تبریز	۴۶/۳۰	۳۸/۱۰	نامشخص	نامشخص
۱۳	۱۷۲۱/۰۴/۲۶	۰۶-۱۲	تبریز	۴۶/۷۰	۳۷/۹۰	۷/۶	نامشخص
۱۴	۱۷۸۰/۰۱/۰۸	۱۸-۲۴	تبریز	۴۶/۰۰	۳۸/۲۰	۷/۷	نامشخص
۱۵	۱۷۸۶/۱۰	۱۲-۱۸	مرند	۴۵/۶۰	۳۸/۳۰	۳/۶	نامشخص
۱۶	۱۸۰۶/۰۵	نامشخص	تبریز	۴۶/۳۰	۳۸/۱۰	نامشخص	نامشخص
۱۷	۱۸۰۷/۰۷/۱۱	۰۶-۱۲	تسوج	۴۵/۲۰	۳۸/۳۰	نامشخص	نامشخص
۱۸	۱۸۱۲/۰۵/۱۴	۱۸-۲۴	تبریز	۴۶/۳۰	۳۸/۱۰	نامشخص	نامشخص
۱۹	۱۸۱۲/۰۶/۲۳	۱۴	تبریز	۴۶/۳۰	۳۸/۱۰	نامشخص	نامشخص
۲۰	۱۸۱۲	نامشخص	حلفا	۴۵/۶۰	۳۸/۹۰	نامشخص	نامشخص
۲۱	۱۸۱۹/۰۱	نامشخص	تبریز	۴۶/۳۰	۳۸/۰۰	نامشخص	نامشخص
۲۲	۱۸۲۰/۰۶	نامشخص	تبریز	۴۶/۳۰	۳۸/۱۰	نامشخص	نامشخص
۲۳	۱۸۲۳/۱۲	نامشخص	تبریز	۴۶/۳۰	۳۸/۱۰	نامشخص	نامشخص
۲۴	۱۸۳۱	نامشخص	تبریز	۴۶/۳۰	۳۸/۱۰	نامشخص	نامشخص
۲۵	۱۸۴۴/۰۵/۱۳	نامشخص	میانه	۴۸/۰۰	۳۷/۴۰	۶/۸	نامشخص
۲۶	۱۸۴۵/۰۷/۱۹	۱۳	مرند	۴۵/۵۰	۳۸/۴۰	نامشخص	نامشخص
۲۷	۱۸۵۶/۱۰/۰۴	۲۰	تبریز	۴۶/۵۰	۳۸/۲۰	نامشخص	نامشخص
۲۸	۱۸۵۷/۰۹/۰۶	نامشخص	تسوج	۴۵/۴۰	۳۸/۳۰	نامشخص	نامشخص
۲۹	۱۸۵۹/۰۶/۰۴	۰۶-۱۲	ورزقان	۴۷/۱۰	۳۷/۷۰	نامشخص	نامشخص
۳۰	۱۸۷۹/۰۳/۲۲	۰۴	میانه	۴۷/۹۰	۳۷/۸۰	۶/۷	نامشخص
۳۱	۱۸۸۶/۰۵/۰۳	۱۲	سراب	۴۷/۲۰	۳۷/۹۰	۶/۲	نامشخص
۳۲	۱۹۳۴/۰۲/۲۲	۰۸:۰۷	خاروانا	۴۵/۹۴	۳۸/۷۶	۵/۸	نامشخص
۳۳	۱۹۳۱/۰۵/۱۲	۱۰:۲۵	هادیشهر	۴۵/۷۲	۳۸/۷۹	۵/۴	۳۳
۳۴	۱۹۶۰/۰۳/۲۰	۲۲:۲۵	تبریز	۴۶/۰۰	۳۸/۲۵	۵/۲	نامشخص
۳۵	۱۹۶۵/۰۲/۱۰	۱۶:۰۹	سراب	۴۷/۰۹	۳۷/۶۶	۵/۲	۴۵
۳۶	۱۹۸۴/۰۸/۲۴	۱۱:۳۱	مرند	۴۵/۹۵	۳۸/۵۰	۵/۳	۱۰
۳۷	۱۹۹۷/۰۳/۰۲	۱۸:۲۹	سراب	۴۷/۸۸	۳۷/۹۸	۵/۳	۱۵
۳۸	۲۰۱۲/۰۸/۱۱	۱۲:۲۳	اهر	۴۶/۸۷	۳۸/۵۵	۶/۱	۱۵
۳۹	۲۰۱۲/۰۸/۱۱	۱۲:۳۴	اهر	۴۶/۷۸	۳۸/۵۸	۶/۲	۱۶
۴۰	۲۰۱۲/۰۸/۱۴	۱۴:۰۲	اهر	۴۶/۷۶	۳۸/۴۶	۵/۲	۱۴
۴۱	۲۰۱۲/۰۸/۱۵	۱۷:۴۹	اهر	۴۶/۶۶	۳۸/۴۵	۵/۱	۱۴
۴۲	۲۰۱۲/۱۱/۰۷	۰۶:۲۶	اهر	۴۶/۵۷	۳۸/۴۸	۵/۸	۱۴



شکل ۱- مقایسه نسبت زلزله‌های تاریخی و زلزله‌های دستگاهی (به درصد) از تعداد کل رخ داده‌های زلزله (محور افقی) به تفکیک استان‌ها (محور قائم)

کاربردی مربوط $3.5 \leq M_n \leq 6.3$ ، رابطه (۳) در محدوده کاربردی مربوط $3.4 \leq M_l \leq 6.3$ ، رابطه (۴) در محدوده زلزله‌های ضعیف تا متوسط $3 \leq M_s \leq 6.1$ و رابطه (۵) در محدوده زلزله‌های قوی تا مرز بسیار بزرگ $6.1 \leq M_s \leq 7.4$ صادق می‌باشند (Karimiparidari و همکاران، ۲۰۱۳).

شکل (۲) نقشه رومرکز زمین‌لرزه‌های مورد مطالعه در کاتالوگ تهیه شده را به تفکیک استان‌ها نشان می‌دهد.

۳- شناسایی گسل‌ها

چنانچه در بخش (۱) توضیح داده شد، تولید شتاب‌نگاشت برساخته به کمک روش Papageorgiou و Halldorsson (۲۰۰۵) اساساً مستلزم تعیین چهار پارامتر است (بزرگی زلزله، فاصله از گسل، نوع خاک و ساختار تکنونیک). بنابراین، پس از تعیین بزرگی زلزله‌ها در قالب تهیه کاتالوگ، با توجه به این که در روش مورد استفاده فاصله از گسل به صورت کوتاه‌ترین فاصله از تصویر گسل در سطح افق (Joyner-Boore Distance) تعریف می‌شود گسل‌های مربوط به زلزله‌های رخ داده به‌طور مستقیم بر اساس مختصات رومرکز زلزله‌ها و مشخصات به دست آمده از دانشنامه گسل‌های ایران (شیخ‌الاسلامی و همکاران، ۱۳۹۲) شناسایی می‌گردند. شکل (۳) نتایج حاصل را به صورت مصور خلاصه و با گزارش‌های مشابه (Vafaie و همکاران، ۲۰۱۱) مقایسه می‌نماید که نشان دهنده دقت مناسب گسل‌های شناسایی شده در این پژوهش می‌باشد. جزئیات مربوط نیز با توجه به این که شهر تبریز برای مطالعه موردی برگزیده شده است در جدول (۳) برای استان آذربایجان شرقی با مرکزیت تبریز ارائه می‌شوند.

البته با توجه به این که چنانچه در بخش (۱) نیز ذکر گردید اولین لرزه‌نگار در سال ۱۹۵۸ میلادی در ایران نصب شده است می‌توان تعداد ۳۳ عدد از زلزله‌های رخ داده در استان آذربایجان شرقی (حدود ۷۹٪ درصد از کل زلزله‌های رخ داده) را مهلزهای (دارای اطلاعات غیر دستگامی) و یا دورلرزه‌ای (ثبت شده با دستگاه‌های مستقر در فواصل دور) دانست. این آمار در مقایسه با آمار سایر استان‌ها که در شکل (۱) ارائه شده‌اند دلیلی موجه برای انتخاب تبریز به عنوان مطالعه موردی می‌باشد (خط‌چین نارنجی رنگ روی شکل را ببینید).

۲- یکسان‌سازی

یکسان‌سازی زلزله‌های دستگامی جهت تبدیل معیارهای مختلف گزارش شده بزرگی به M_W بر اساس روابط (۱) تا (۵) Karimiparidari و همکاران (۲۰۱۳) انجام شده است.

$$M_W = 1(\pm 0.05) \times m_b + 0.19(\pm 0.23) \quad (1)$$

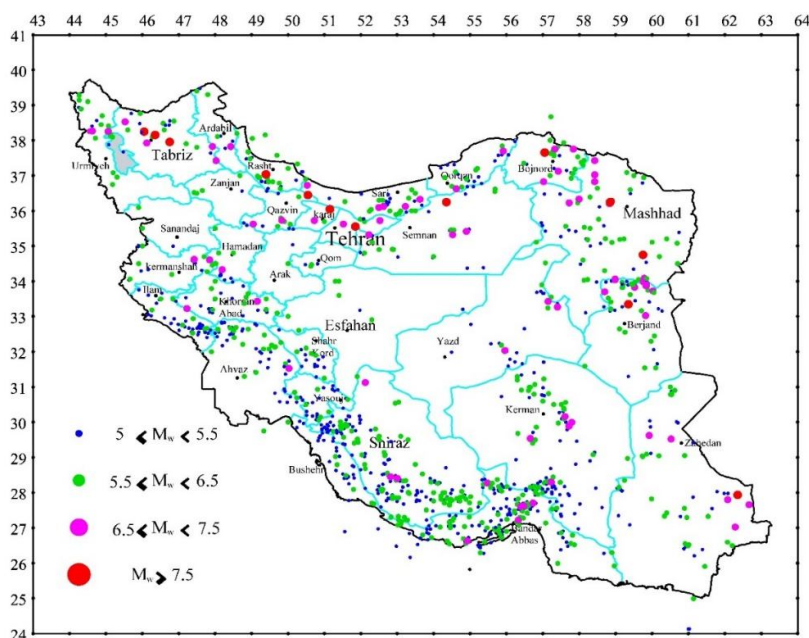
$$M_W = 0.67(\pm 0.09) \times M_n + 1.73(\pm 0.43) \quad (2)$$

$$M_W = 0.54(\pm 0.07) \times M_l + 2.34(\pm 0.34) \quad (3)$$

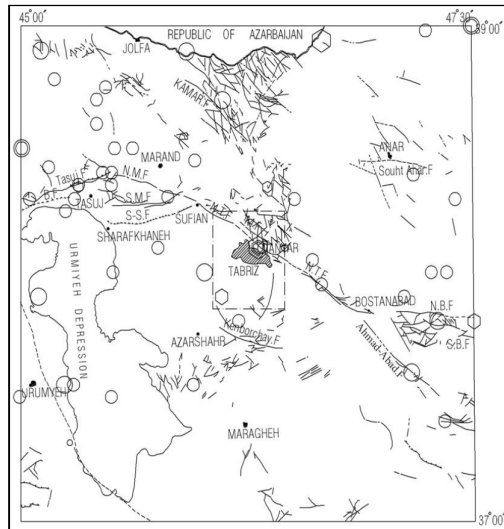
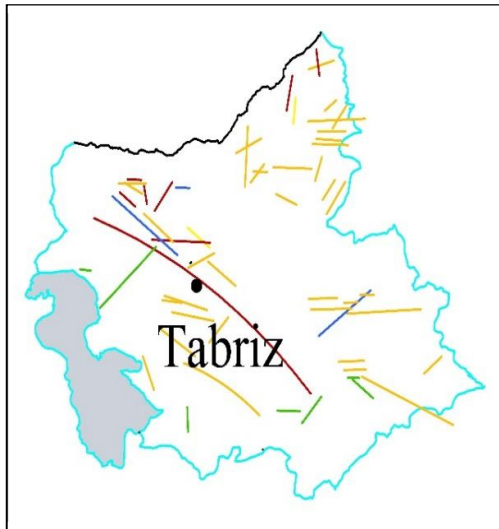
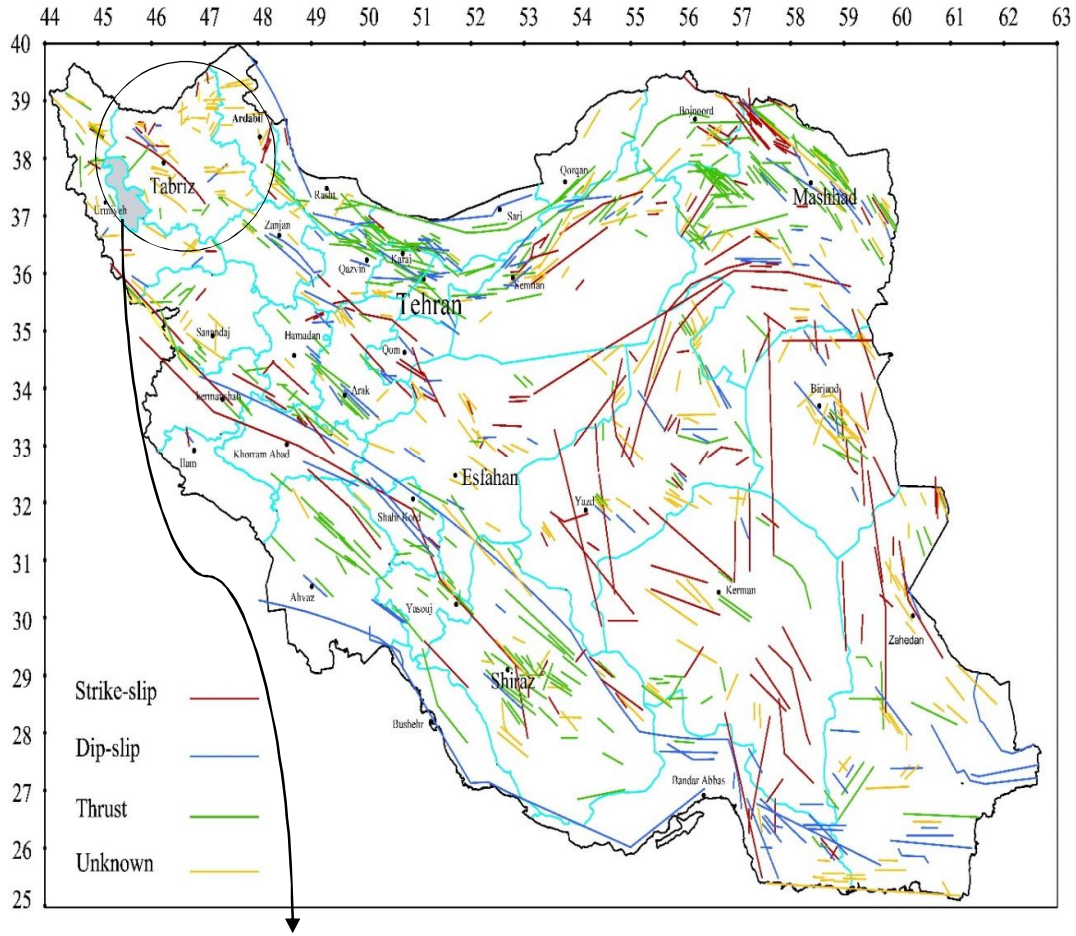
$$M_W = 0.59(\pm 0.03) \times M_s + 2.46(\pm 0.12) \quad (4)$$

$$M_W = 0.92(\pm 0.14) \times M_s + 0.51(\pm 0.9) \quad (5)$$

M_W بزرگی گشتاوری زلزله، m_b بزرگی موج کوتاه حجمی، M_l بزرگی محلی، M_n بزرگی Nuttli و M_s بزرگی امواج سطحی بوده و رابطه (۱) در محدوده $3.5 \leq m_b \leq 6.7$ ، رابطه (۲) در محدوده



شکل ۲- نقشه رومرکز زمین‌لرزه‌های مورد مطالعه در کاتالوگ تهیه شده به تفکیک استان‌ها



شکل ۳- نقشه گسل های شناسایی شده در این پژوهش (بالا) و مقایسه آن برای شهرستان تبریز (پایین چپ) با گزارش Vafae و همکاران (۲۰۱۱) برای این ناحیه (پایین راست)

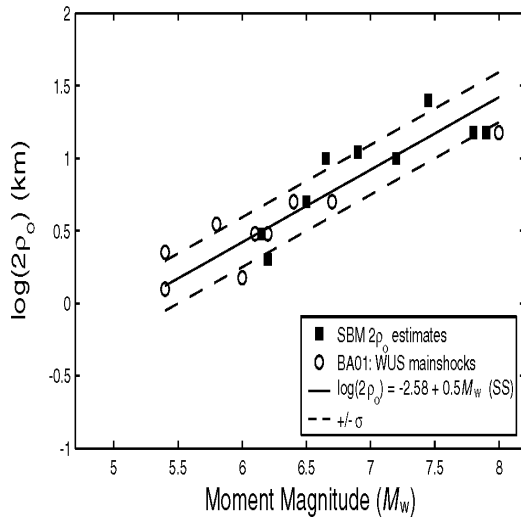
جدول ۳- گسل‌های استان آذربایجان شرقی (تبریز)

نام گسل	موقعیت مکانی	امتداد	طول (km)	سازوکار	توان لرزه‌ای (M _w)	زلزله‌ها*
شمال تبریز	میشو - بستان آباد	شمال غربی - جنوب شرقی	۲۲۵	راست‌گرد	۷/۵	۱۴
همپا	میانه	شمال غربی - جنوب شرقی	۸۲	رانندگی	۷	نامشخص
مراغه	مراغه	شمال غربی - جنوب شرقی	۷۵	راست‌گرد	۷	نامشخص
تسوج	تسوج	شمال شرقی - جنوب غربی	۶۱	رانندگی	۶/۹	۲
بزقوش	سراب	شمال شرقی - جنوب غربی	۵۲	معکوس	۶/۸	۲
بنارون	سراب	شرق - غرب	۶۲	نامشخص	۶/۹	نامشخص
شمال میشو	مرند	شمال غربی - جنوب شرقی	۶۵	معکوس	۶/۹	۱
جنوب میشو	مرند	شرق - غرب	۴۸	راست‌گرد	۶/۸	نامشخص
آورسین	اهر	شرق - غرب	۴۸	نامشخص	۶/۸	نامشخص
قلعه ملک	اهر	شمال - جنوب	۳۸	نامشخص	۶/۷	نامشخص
وارکش	سهند	شمال شرقی - جنوب غربی	۳۵	رانندگی	۶/۷	نامشخص
انباران	سراب	شرق - غرب	۳۳	نامشخص	۶/۶	نامشخص
چراغعلی	آذرشهر	شمال غربی - جنوب شرقی	۳۳	نامشخص	۶/۶	نامشخص
اوربات	سهند	شمال غربی - جنوب شرقی	۳۳	نامشخص	۶/۶	نامشخص
بشکندی	سراب	شرق - غرب	۳۴	نامشخص	۶/۶	نامشخص
آغلاقان جیق	اهر	شرق - غرب	۳۰/۵	نامشخص	۶/۶	نامشخص
شاهونی	اهر	شرق - غرب	۳۰	نامشخص	۶/۶	نامشخص
کمار	کمار	شمال شرقی - جنوب غربی	۲۸	نامشخص	۶/۵	نامشخص
بابا باغی	تبریز	شمال غربی - جنوب شرقی	۲۷	نامشخص	۶/۵	نامشخص
براخوش	اهر	شمال شرقی - جنوب غربی	۲۵	نامشخص	۶/۵	نامشخص
مجدآباد	هوراند	شمال غربی - جنوب شرقی	۲۵	نامشخص	۶/۵	نامشخص
آستاری	تبریز	شمال شرقی - جنوب غربی	۲۴	نامشخص	۶/۵	نامشخص
پهلول داغی	تبریز	شمال شرقی - جنوب غربی	۲۴	نامشخص	۶/۵	نامشخص
غرافه آغل	اهر	شرق - غرب	۲۴	نامشخص	۶/۵	نامشخص
قید باشی	اهر	غرب - شرق	۲۴	نامشخص	۶/۵	نامشخص
استرخان	خاروانا	شمال غربی - جنوب شرقی	۲۲	نامشخص	۶/۵	نامشخص
خاروانا (خرواق)	خاروانا	شمال شرقی - جنوب غربی	۲۲	راست‌گرد	۶/۵	نامشخص
سیدو	مرند	غرب - شرق	۲۲	نامشخص	۶/۵	نامشخص
شیر امین	شیرامین	شمال - جنوب	۲۱	نامشخص	۶/۴	نامشخص
طالبی کندی	هشترود	شمال غربی - جنوب شرقی	۲۱	رانندگی	۶/۴	نامشخص
عربشاه	کلپیر	غرب - شرق	۲۰	نامشخص	۶/۴	نامشخص
قلعه جوق	میانه	غرب - شرق	۲۰	نامشخص	۶/۴	نامشخص
قره ناز	چاراویماق	شمال شرقی - جنوب غربی	۲۰	رانندگی	۶/۴	نامشخص
متجاو	کلپیر	شمال شرقی - جنوب غربی	۲۰	راست‌گرد	۶/۴	نامشخص
مه کوه	میانه	شرق - غرب	۱۸	نامشخص	۶/۴	نامشخص
تخت پایین	هشترود	شرق - غرب	۱۸	رانندگی	۶/۴	نامشخص
بیملو	اهر	شمال شرقی - جنوب غربی	۱۸	نامشخص	۶/۴	نامشخص
چنکو	مرند	شمال غربی - جنوب شرقی	۱۷	نامشخص	۶/۳	نامشخص
قطار	بناب	شمال - جنوب	۱۶	رانندگی	۶/۳	نامشخص
کوچان	مرند	شمال شرقی - جنوب غربی	۱۶	راست‌گرد	۶/۳	نامشخص
گلوچه	مرند	شمال شرقی - جنوب غربی	۱۶	نامشخص	۶/۳	نامشخص
گویزه	اهر	شمال - جنوب	۱۶	نامشخص	۶/۳	نامشخص
مختکان	کلپیر	شمال - جنوب	۱۶	معکوس	۶/۳	نامشخص
هوراند	کلپیر	شمال - جنوب	۱۵	نامشخص	۶/۳	نامشخص
شران	اهر	شرق - غرب	۱۵	نامشخص	۶/۳	نامشخص
گوش	سلماس	شمال غربی - جنوب شرقی	۱۳	نامشخص	۶/۲	نامشخص
لیلاب	تبریز	شرق - غرب	۱۲	معکوس	۶/۲	نامشخص
کومربالا	مرند	شمال - غرب	۱۲	راست‌گرد	۶/۲	نامشخص
دنیق	سراب	شرق - غرب	۱۲	نامشخص	۶/۲	نامشخص
اندراب	سراب	شرق - غرب	۱۲	نامشخص	۶/۲	نامشخص
آون	مرند	شرق - غرب	۱۲	نامشخص	۶/۲	نامشخص
آرپران	اهر	شرق - غرب	۱۲	نامشخص	۶/۲	نامشخص
خانقاه	اهر	شمال غربی - جنوب شرقی	۱۱	نامشخص	۶/۱	نامشخص
صوفیان	شرفخانه	شرق - غرب	۱۰	رانندگی	۶/۱	نامشخص
لعل کان	چارایماق	شرق - غرب	۱۰	رانندگی	۶/۱	نامشخص

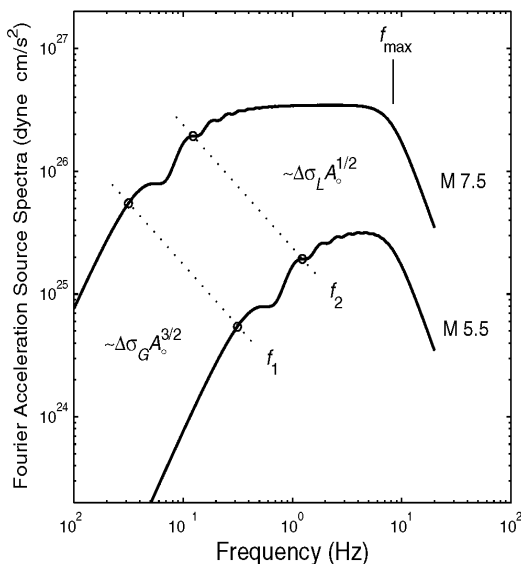
* به عنوان مثال، ۱۴ زلزله مهم حاصل از فعالیت گسل شمال تبریز عبارتند از زلزله‌های سال‌های (۱) ۸۵۸، (۲) ۱۰۴۲، (۳) ۱۶۶۴، (۴) ۱۷۱۷، (۵) ۱۷۲۰، (۶) ۱۷۳۱، (۷) ۱۷۸۰، (۸) ۱۸۰۶، (۹) ۱۸۱۹، (۱۰) ۱۸۲۰، (۱۱) ۱۸۲۳، (۱۲) ۱۸۳۱، (۱۳) ۱۸۵۶ و (۱۴) ۱۹۶۰ میلادی

۴- تولید شتاب‌نگاشت‌های بر ساخته

صورت مجموعه‌ای از ترک‌های دایره‌ای با قطر $2\rho_0$ مدل می‌شود که در هنگام گسیختگی با سرعت v ، در هر ترک افت تنش محلی $\Delta\sigma_L$ صورت می‌گیرد.



شکل ۴- رابطه میان قطر ترک‌های دایره‌ای شکست ($2\rho_0$) و بزرگی گشتاوری زلزله در مدل Papageorgiou و Halldorsson (۲۰۰۵)

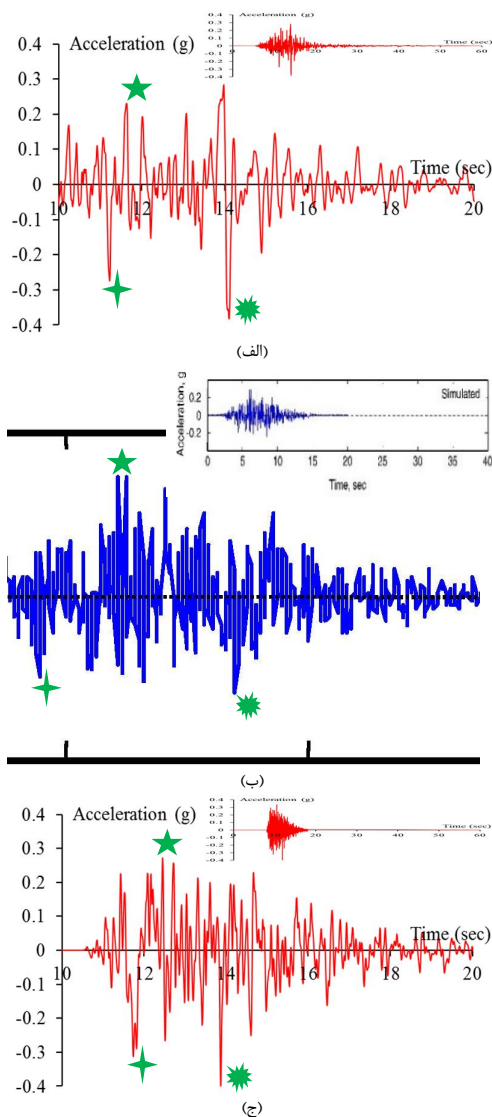


شکل ۵- نمودار نمادین طیف چشمه در مدل Halldorsson و Papageorgiou (۲۰۰۵) برای دو بزرگی $5/5$ و $7/5$ بر اساس مکان فرکانس‌های گوشه اول (f_1) و دوم (f_2)، اثرات f_{max} برای فرکانس‌های بالاتر و وابستگی مقادیر طیفی بالاتر از فرکانس گوشه دوم و پایین‌تر از فرکانس گوشه اول بر افت تنش‌های محلی ($\Delta\sigma_i$) و کلی ($\Delta\sigma_0$) و نیز مساحت چشمه اصلی (A_0)

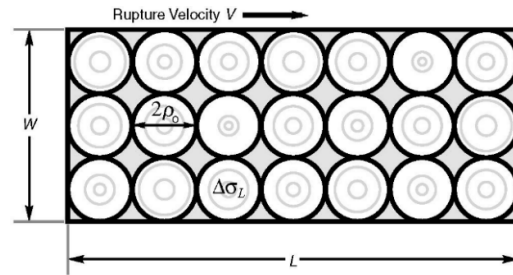
با توجه به مشخص شدن بزرگی زلزله‌های تاریخی (بخش (۲)) و موقعیت گسل‌ها جهت اعمال فاصله از گسل (بخش (۳))، با استفاده از نرم‌افزار کاربردی SeismoArtif (۲۰۱۶a) می‌توان شتاب‌نگاشت‌های بر ساخته را برای زلزله‌های مختلف تولید نمود. به این منظور، پس از تعیین ساختار تکتونیکی منطقه (به شرح بخش (۱)) و نیز نوع خاک، شتاب‌نگاشت‌های بر ساخته با اعمال هر یک از حالت‌های نزدیک به و یا دور از گسل برای فواصل متفاوت از گسل تولید می‌شوند.

شبیه‌سازی در نرم‌افزار SeismoArtif بر اساس مدل سد جنبشی Papageorgiou و Aki (۱۹۸۳ a, b) انجام می‌گردد که در کار Papageorgiou و Halldorsson (۲۰۰۵) با مطالعات آماری گسترده بسط داده شده است. مدل سد جنبشی که در حقیقت ترکیبی از مدل‌های قطعیتی و تصادفی برای اصلاح مدل تصادفی است با پنج پارامتر چشمه (یا گسل) شامل طول (L)، پهنا (W)، سرعت گسیخت (V)، افت تنش محلی ($\Delta\sigma_i$) و همچنین مجموعه‌ای از ترک‌های دایره‌ای (به شعاع ρ_0) تعریف و کنترل می‌شود. به این ترتیب ضمن اعمال مشخصات هندسی گسل، ساز و کار گسل نیز به کمک روابط تجربی میان ابعاد گسیختگی و بزرگی گشتاوری زلزله که توسط Wells و Coppersmith (۱۹۹۴) پیشنهاد شده‌اند بر اساس تکتونیک محل و مقادیر بزرگی زلزله تخمین زده می‌شود. تأثیرات فاصله از گسل هم از این طریق طبق روابط پیشنهادی Andrews (۲۰۰۱) و Papageorgiou (۲۰۰۳) بر اساس وابستگی مقادیر طیفی، موقعیت فرکانس گوشه اول (f_1)، فرکانس گوشه دوم (f_2) و فرکانس‌های بالاتر (f_{max}) به مساحت چشمه اصلی (A_0)، افت تنش محلی ($\Delta\sigma_i$) و همچنین افت تنش کلی ($\Delta\sigma_0$) لحاظ می‌گردند. شکل (۴) رابطه میان قطر ترک‌های دایره‌ای شکست ($2\rho_0$) و بزرگی زلزله در مدل Papageorgiou و Halldorsson (۲۰۰۵) را نشان می‌دهد. نمودار نمادین طیف چشمه در مدل Papageorgiou و Halldorsson (۲۰۰۵) هم به عنوان نمونه برای دو بزرگی گشتاوری $5/5$ و $7/5$ بر اساس موقعیت فرکانس‌های گوشه اول و دوم، اثرات f_{max} برای فرکانس‌های بالاتر و همچنین وابستگی مقادیر طیفی بالاتر از فرکانس گوشه دوم و پایین‌تر از فرکانس گوشه اول به افت تنش محلی و افت تنش کلی و همچنین مساحت چشمه اصلی در شکل (۵) نشان داده شده است. شکل (۶) نیز جزئیات مدل‌سازی شکست گسل بر اساس مدل سد جنبشی Papageorgiou و Aki (۱۹۸۳ a, b) که طبق فرآیند مشروح Papageorgiou و Halldorsson (۲۰۰۵) در نرم‌افزار SeismoArtif به کار رفته است را نشان می‌دهد و در آن شکست در سطح گسل با طول L و پهنای W به

چنانچه ملاحظه می‌گردد شکل کلی شتاب نگاشت بر ساخته تولید شده تطابق خوبی با شتاب نگاشت ثبت شده داشته و حداکثر شتاب تخمین زده شده برابر $190/314$ سانتی‌متر بر مجذور ثانیه در مقابل $190/62$ ثبت شده می‌باشد. مقایسه این روش با روش‌های دیگر موجود نیز چنانچه بر اساس مطابقت شتاب نگاشت‌های ثبت شده (شکل ۸-الف))، بر ساخته تولید شده توسط Rezaeian و Kiureghian (شکل ۸-ب)) و بر ساخته تولید شده در این پژوهش (شکل ۸-ج)) برای مؤلفه مورد بحث زلزله Northridge (PEER، ۲۰۱۷) مشخص می‌گردد نشان دیگری از قابلیت‌های اعتماد و کاربرد این روش می‌باشد.

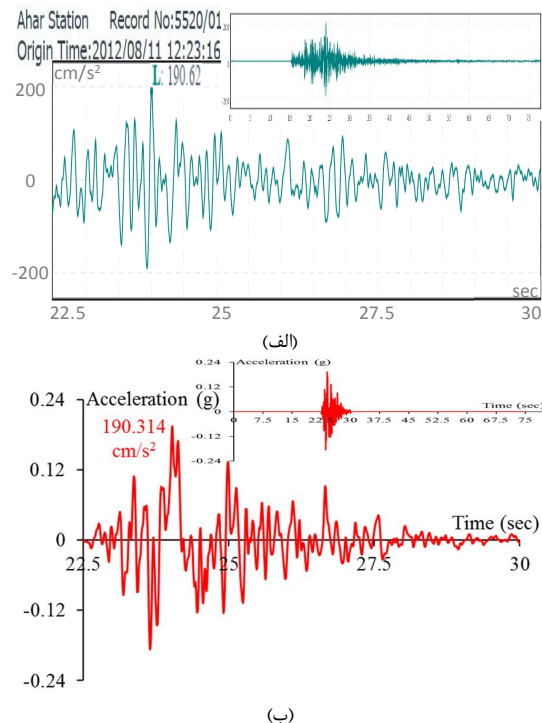


شکل ۸- شتاب نگاشت‌های مؤلفه 090 ایستگاه LA 00 زلزله سال ۱۹۹۴ میلادی Northridge: (الف) ثبت شده (PEER، ۲۰۱۷)، (ب) بر ساخته Rezaeian و Kiureghian (۲۰۱۰)، (ج) بر ساخته تولید شده در این پژوهش



شکل ۶- جزئیات مدل سازی شکست گسل در مدل Shalldorsson و Papageorgiou (۲۰۰۵) که در نرم افزار SeismoArtif به کار رفته است

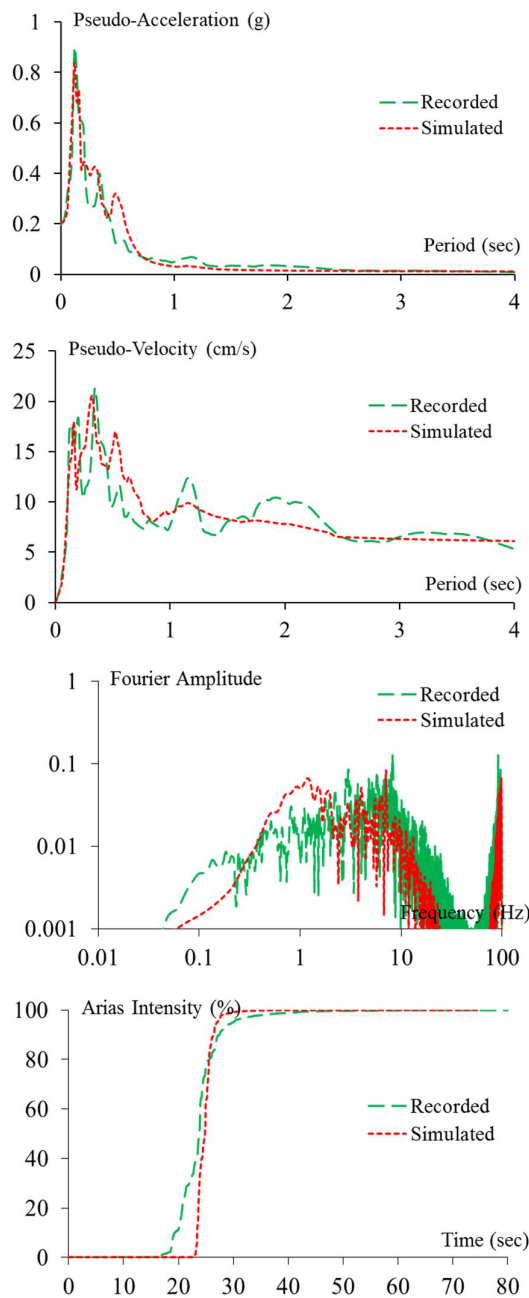
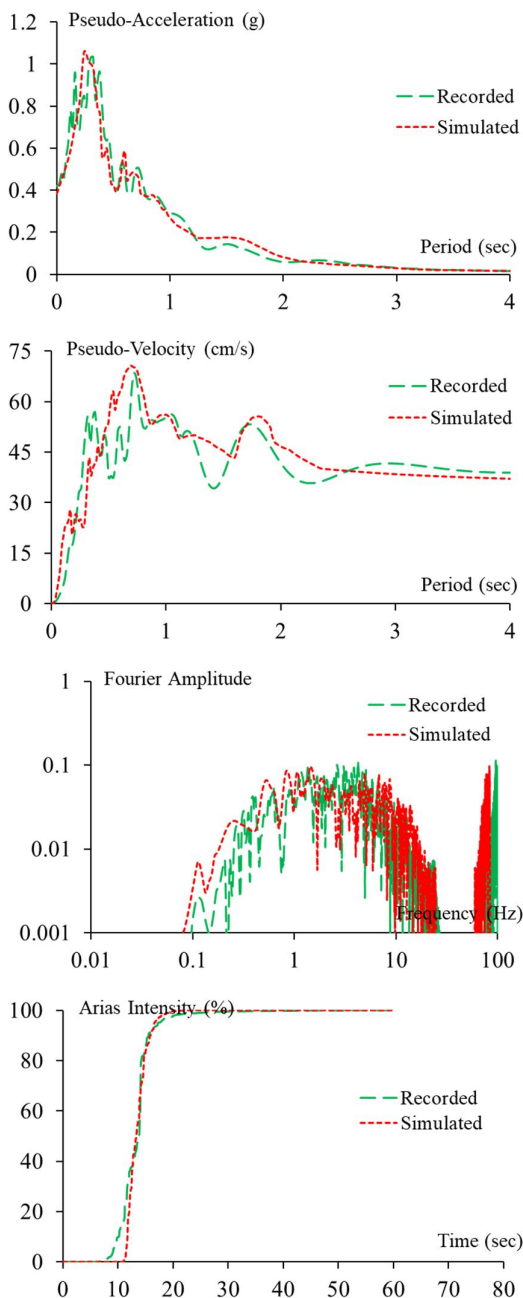
در این بخش، به عنوان نمونه و جهت راستی آزمایی، شتاب نگاشت‌های بر ساخته مؤلفه L ایستگاه اهر زلزله اول سال ۲۰۱۲ میلادی اهر- ورزقان (BHRC، ۲۰۱۷) و مؤلفه 090 ایستگاه LA 00 زلزله سال ۱۹۹۴ میلادی Northridge (PEER، ۲۰۱۷) تولید و با شتاب نگاشت‌های ثبت شده مربوط و برای زلزله Northridge همچنین با شتاب نگاشت بر ساخته Rezaeian و Kiureghian (۲۰۱۰) مقایسه می‌گردند. شکل (۷) شتاب نگاشت ثبت شده زلزله اهر در ایستگاه و مؤلفه مورد بحث (شکل ۷-الف)) و شتاب نگاشت بر ساخته این پژوهش (شکل ۷-ب)) را در بازه زمانی شروع تا خاتمه و جهت مقایسه دقیق تر در طول زمان مؤثر آن‌ها نشان می‌دهند.



شکل ۷- شتاب نگاشت‌های مؤلفه L ایستگاه اهر زلزله اول سال ۲۰۱۲ میلادی اهر: (الف) ثبت شده (BHRC، ۲۰۱۷)، (ب) بر ساخته تولید شده در این پژوهش

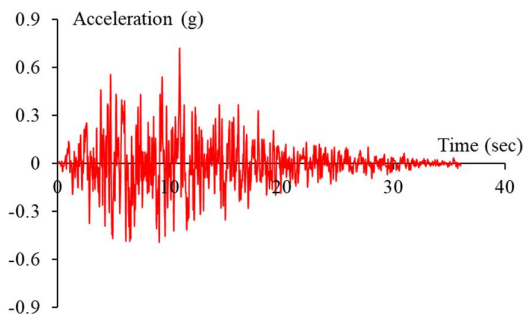
در شکل (۱۰) نیز جزئیات مشابه شکل (۹) برای زلزله Northridge پژوهش Rezaeian و Kiureghian (۲۰۱۰) بررسی می‌گردند که انطباق‌های قابل قبول طیف‌های زلزله بر ساخته با طیف‌های نظیر زلزله ثبت شده مؤید دقت بحث شده می‌باشند.

شکل (۹) جزئیات بیشتر این راستی‌آزمایی را برای زلزله مورد بحث اهر و بر اساس مقایسه طیف‌های شبه شتاب و شبه سرعت (Chopra, ۲۰۰۷ و Mentrasti, ۲۰۰۸)، فوریه و آریاس زلزله ثبت شده (Recorded) با طیف‌های نظیر زلزله بر ساخته شبیه‌سازی شده (Simulated) نشان می‌دهد.

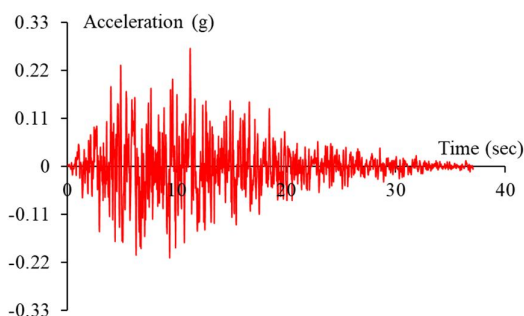


شکل ۱۰- مقایسه طیف‌های شبه شتاب، شبه سرعت، فوریه و آریاس مؤلفه L ثبت شده (Recorded) ایستگاه LA 00 در زلزله سال ۱۹۹۴ میلادی Northridge با طیف‌های نظیر زلزله بر ساخته شبیه‌سازی شده (Simulated)

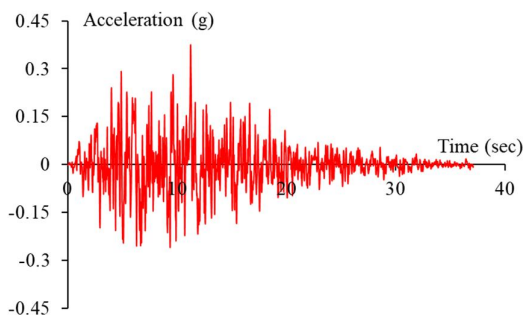
شکل ۹- مقایسه طیف‌های شبه شتاب، شبه سرعت، فوریه و آریاس مؤلفه L ثبت شده (Recorded) ایستگاه اهر در زلزله اول سال ۲۰۱۲ میلادی اهر با طیف‌های نظیر زلزله بر ساخته شبیه‌سازی شده (Simulated)



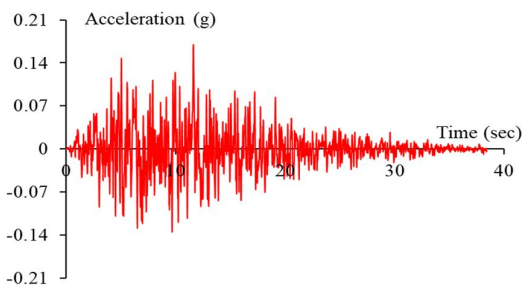
شکل ۱۲- شتاب‌نگاشت برساخته زلزله سال ۱۷۸۰ میلادی تبریز برای خاک نوع III در فاصله ۵ کیلومتری از گسل



شکل ۱۳- شتاب‌نگاشت برساخته زلزله سال ۱۷۸۰ میلادی تبریز برای خاک نوع II در فاصله ۲۰ کیلومتری از گسل



شکل ۱۴- شتاب‌نگاشت برساخته زلزله سال ۱۷۸۰ میلادی تبریز برای خاک نوع III در فاصله ۲۰ کیلومتری از گسل

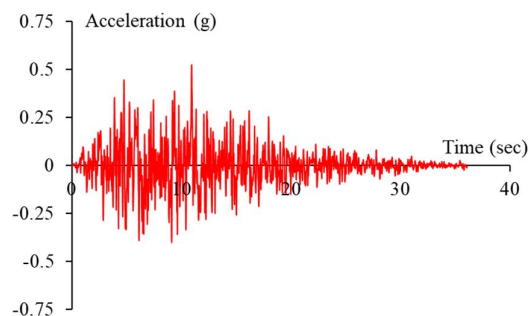


شکل ۱۵- شتاب‌نگاشت برساخته زلزله سال ۱۷۸۰ میلادی تبریز برای خاک نوع II در فاصله ۳۵ کیلومتری از گسل

۵- شتاب‌نگاشت‌های برساخته زلزله‌های تاریخی تبریز

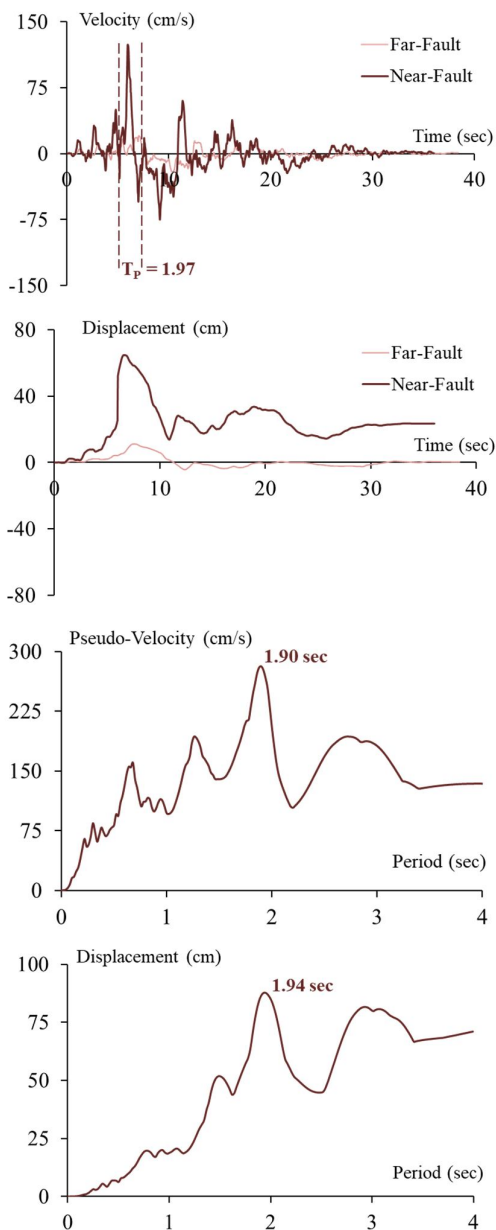
نظر به اهمیت لرزه‌های شهر تبریز، با توجه به دلایل اشاره شده در بخش (۱) و اثبات آن‌ها در بخش (۲)، در این بخش شتاب‌نگاشت‌های برساخته زلزله‌های تاریخی شهر تبریز تهیه و به عنوان نمونه برای بزرگترین زلزله تاریخی ارائه می‌گردند. این شتاب‌نگاشت‌ها با فرض خاک‌های نوع II و III استاندارد ۲۸۰۰ ایران و در فواصلی معادل ۵، ۲۰ و ۳۵ کیلومتر تولید شده‌اند تا با در نظر گرفتن فاصله ۲۰ کیلومتری به عنوان معیاری جهت تفکیک حالت‌های نزدیک به و دور از گسل اطلاعات لازم برای ارزیابی تأثیر زلزله‌های تاریخی در تخمین زلزله‌های طرح (موضوع بخش (۶)) نیز به دست آیند. با توجه به اهمیت گسل‌های شهرستان تبریز در مقایسه با گسل‌های مجاور، جهت تخمین زلزله طرح در این پژوهش زلزله‌های تاریخی مرتبط با گسل‌های موجود تا شعاع ۳۵ کیلومتری مرکز شهر مطالعه می‌شوند. البته بدیهی است در شرایط نزدیک گسل (فاصله ۵ کیلومتری مفروض) آثاری مانند جهت‌پذیری و ماندگاری جابه‌جایی محتمل خواهند بود. برای در نظر گرفتن این آثار، حالت نزدیک گسل در نرم‌افزار انتخاب می‌شود که به شرح بخش (۴) وجود هر دوی پالس‌های سرعت و جابه‌جایی را در نظر می‌گیرد. به هر حال، این شتاب‌نگاشت‌های برساخته می‌توانند به طور مستقیم در قالب تحلیل‌های تاریخچه زمانی و یا بعد از تبدیل به طیف طرح در قالب تحلیل‌های طیفی جهت شبیه‌سازی آثار زلزله‌های مربوط روی سازه‌های مختلف به کار بروند. همچنین به کمک شتاب‌نگاشت‌های تولید شده می‌توان دقت و سازگاری طیف‌های طرح در تخمین زلزله‌های مورد انتظار را افزایش داد که این موضوع به صورت یک ارزیابی اولیه در بخش بعد (بخش (۶)) برای شهر تبریز بررسی می‌گردد.

شکل‌های (۱۱) تا (۱۶) شتاب‌نگاشت‌های برساخته بزرگترین زلزله تاریخی این شهر (زلزله سال ۱۷۸۰ میلادی با بزرگی گشتاوری ۷/۷) را برای خاک‌های نوع II و III و در فواصل ۵، ۲۰ و ۳۵ کیلومتری از گسل نشان می‌دهند.

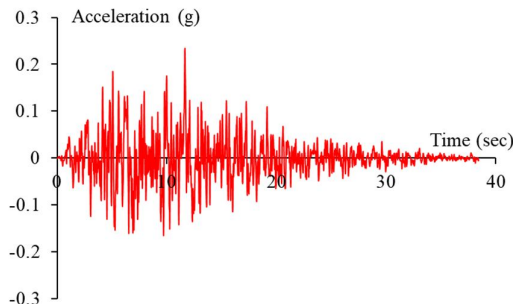


شکل ۱۱- شتاب‌نگاشت برساخته زلزله سال ۱۷۸۰ میلادی تبریز برای خاک نوع II در فاصله ۵ کیلومتری از گسل

همین طور با پیروید مشهود در تاریخچه سرعت و همچنین تخمین دقیق تر به کمک طیف جابه‌جایی طبق پژوهش‌های Shahi و Baker (۲۰۱۱)، Vaez و همکاران (۲۰۱۳) و Mimoglou و همکاران (۲۰۱۷) مورد قبول به نظر می‌رسند.

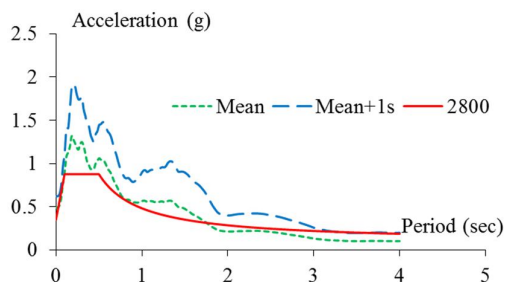


شکل ۱۷- مقایسه تاریخچه‌های سرعت و جابه‌جایی بر ساخته نزدیک به گسل (در فاصله ۵ کیلومتری از گسل) و دور از گسل (در فاصله ۳۵ کیلومتری از گسل) زلزله سال ۱۷۸۰ میلادی تبریز جهت بررسی جزئیات شبیه‌سازی آثار نزدیک گسل و تشخیص پالس و تعیین پیروید آن به کمک طیف‌های شبه سرعت و جابه‌جایی حالت نزدیک گسل

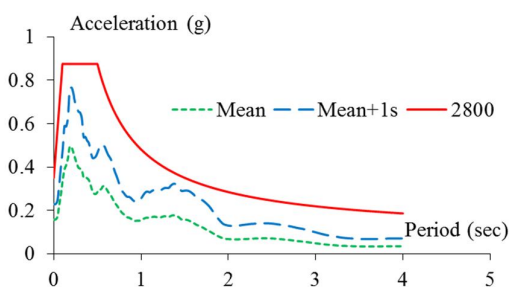


شکل ۱۶- شتاب‌نگاشت بر ساخته زلزله سال ۱۷۸۰ میلادی تبریز برای خاک نوع III در فاصله ۳۵ کیلومتری از گسل

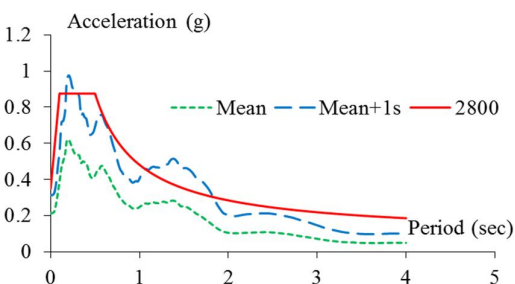
چنانچه ملاحظه می‌گردد حداکثر شتاب زمین در اثر کاهش فاصله از گسل و تغییر نوع خاک محل از نوع II به نوع III با افزایش‌های مورد انتظار شبیه‌سازی می‌گردد. جهت بررسی بیشتر شبیه‌سازی آثار نزدیک گسل نیز شکل (۱۷) تاریخچه‌های سرعت و جابه‌جایی مربوط به شتاب‌نگاشت‌های بر ساخته زلزله تاریخی سال ۱۷۸۰ میلادی تبریز برای خاک نوع III در فاصله ۵ کیلومتری از گسل (شکل (۱۲) نزدیک گسل) و فاصله ۳۵ کیلومتری از گسل (شکل (۱۶) دور از گسل) را مورد مقایسه قرار داده و به کمک تاریخچه سرعت و طیف‌های شبه سرعت و جابه‌جایی حالت نزدیک گسل ضمن تشخیص وجود پالس همچنین پیروید آن را تعیین می‌نماید. بر این اساس، اولاً وجود پالس در رکورد شبیه‌سازی شده نزدیک گسل مشهود می‌باشد که با توجه به حضور پالس‌های سرعت در هر دو جهت مثبت و منفی تاریخچه سرعت و نیز افت جابه‌جایی حداکثر به جابه‌جایی کاهش یافته ماندگار در نتیجه سرعت‌های جهت منفی بعد از پالس تاریخچه سرعت نشان‌دهنده لحاظ آثار نزدیک گسل در شبیه‌سازی انجام‌یافته و با احتساب ساز و کار امتداد لغز گسل شمال تبریز به عنوان گسل مسبب این زلزله سازگار با مشخصات مؤلفه عمود بر گسل^{۱۱} می‌باشد. ثانیاً با مقایسه تاریخچه‌های جابه‌جایی و سرعت در کنار تاریخچه‌های شتاب شکل‌های (۱۲) و (۱۶) مشخص می‌گردد که مقدار نسبت سرعت حداکثر به شتاب حداکثر در رکورد نزدیک گسل بزرگتر از مقدار آن در رکورد دور از گسل و مقادیر نسبت جابه‌جایی حداکثر به سرعت حداکثر تقریباً برابر می‌باشند طوری که بر اساس واحدهای نشان داده شده در شکل‌ها نسبت‌های سرعت حداکثر به شتاب حداکثر در رکوردهای نزدیک گسل و دور از گسل به ترتیب برابر با ۱۷۴/۶ و ۸۸/۷ و نسبت‌های جابه‌جایی حداکثر به سرعت حداکثر نیز به ترتیب برابر با ۰/۵۲ و ۰/۵۵ هستند. ثالثاً پیروید پالس از تاریخچه سرعت زلزله معادل ۱/۹۷ ثانیه به دست می‌آید که البته این پیروید با توجه به طیف شبه سرعت برابر با ۱/۹۰ ثانیه و بر اساس طیف جابه‌جایی نشان داده شده برابر با ۱/۹۴ ثانیه می‌باشد و تطابق نسبی آن‌ها با یکدیگر و



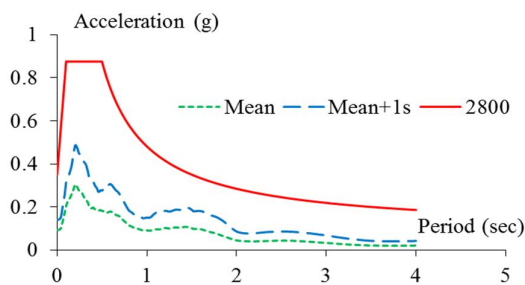
شکل ۲۰- مقایسه طیف طرح ویرایش ۴ استاندارد ۲۸۰۰ ایران با طیف‌های طرح ایده‌آل‌سازی نشده زلزله‌های تاریخی شهر تبریز برای خاک نوع III در فاصله ۵ کیلومتری از گسل



شکل ۲۱- مقایسه طیف طرح ویرایش ۴ استاندارد ۲۸۰۰ ایران با طیف‌های طرح ایده‌آل‌سازی نشده زلزله‌های تاریخی شهر تبریز برای خاک نوع II در فاصله ۲۰ کیلومتری از گسل



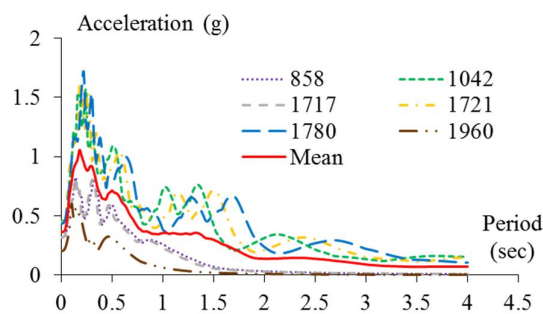
شکل ۲۲- مقایسه طیف طرح ویرایش ۴ استاندارد ۲۸۰۰ ایران با طیف‌های طرح ایده‌آل‌سازی نشده زلزله‌های تاریخی شهر تبریز برای خاک نوع III در فاصله ۲۰ کیلومتری از گسل



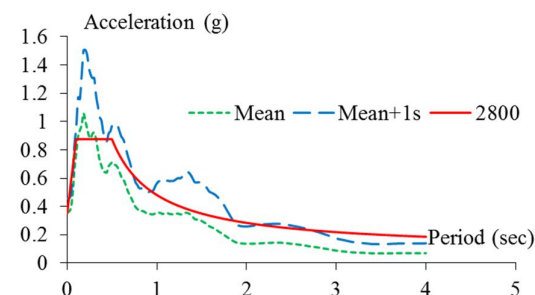
شکل ۲۳- مقایسه طیف طرح ویرایش ۴ استاندارد ۲۸۰۰ ایران با طیف‌های طرح ایده‌آل‌سازی نشده زلزله‌های تاریخی شهر تبریز برای خاک نوع II در فاصله ۳۵ کیلومتری از گسل

۶- تأثیر زلزله‌های تاریخی در تدقیق طیف‌های طرح

اهمیت و نقش طیف‌های طرح در مهندسی زلزله سازه‌ها به‌خوبی در متون علمی (Chopra, ۲۰۱۲) بیان شده است. امروزه به کمک رایانه‌ها با سرعت و دقت بالایی می‌توان طیف‌های پاسخ و یا طرح زلزله را تهیه نمود. نرم‌افزار SeismoSpect (SeismoSoft Group, ۲۰۱۶b) یکی از پرکاربردترین نرم‌افزارها در این زمینه است. در این پژوهش نیز با استفاده از همین نرم‌افزار طیف‌های طرح شهر تبریز بر اساس شتابنگاشت‌های برساخته زلزله‌های تاریخی آن تهیه شده‌اند. شکل (۱۸) طیف میانگین (Mean) ایده‌آل‌سازی نشده حاصل برای طرح سازه‌ها روی خاک نوع II در فاصله ۵ کیلومتری از گسل را به همراه طیف‌های پاسخ مربوط نشان می‌دهد. شکل‌های (۱۹) تا (۲۴) نیز به ترتیب طیف‌های طرح ایده‌آل‌سازی نشده میانگین و میانگین به علاوه یک انحراف معیار (Mean+1s) به دست آمده از شتابنگاشت‌های برساخته زلزله‌های تاریخی شهر تبریز برای خاک نوع II در فاصله ۵ کیلومتری از گسل، خاک نوع III در فاصله ۵ کیلومتری از گسل، خاک نوع II در فاصله ۲۰ کیلومتری از گسل، خاک نوع III در فاصله ۲۰ کیلومتری از گسل، خاک نوع II در فاصله ۳۵ کیلومتری از گسل و خاک نوع III در فاصله ۳۵ کیلومتری از گسل را متناظراً با طیف‌های طرح مربوط استاندارد ۲۸۰۰ مورد مقایسه قرار می‌دهند.



شکل ۱۸- طیف میانگین زلزله‌های تاریخی تبریز برای خاک نوع II در فاصله ۵ کیلومتری از گسل، روی طیف‌های پاسخ مربوط



شکل ۱۹- مقایسه طیف طرح ویرایش ۴ استاندارد ۲۸۰۰ ایران با طیف‌های طرح ایده‌آل‌سازی نشده زلزله‌های تاریخی شهر تبریز برای خاک نوع II در فاصله ۵ کیلومتری از گسل

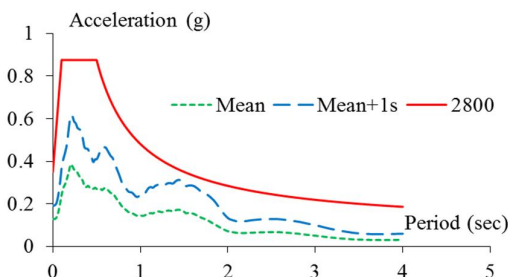
۷- نتیجه گیری

تولید شتاب‌نگاشت‌های برساخته برای زلزله‌های تاریخی جهت شبیه‌سازی آثار آن‌ها در مناطقی مانند تبریز که علی‌رغم خطر بالای زلزله فاقد زلزله‌های قوی ثبت شده می‌باشند بررسی و امکان کاربرد این شتاب‌نگاشت‌ها در تدقیق طیف‌های طراحی ارزیابی گردید.

این پژوهش با تهیه کاتالوگ زلزله‌های ایران به تفکیک استان‌ها، جهت ارزیابی اهمیت شهر تبریز در استان آذربایجان شرقی شروع و با تهیه نقشه گسل‌ها ادامه یافت تا اطلاعات لازم برای بررسی هدف مورد نظر پژوهش حاصل آیند. سپس ضمن بررسی روش‌های مختلف تولید شتاب‌نگاشت‌های برساخته، بهترین روش کاربردی تعیین گردید. راستی‌آزمایی به کمک یک شتاب‌نگاشت طبیعی (مؤلفه L ایستگاه اهر زلزله اول سال ۲۰۱۲ میلادی اهر-ورزقان) و یک شتاب‌نگاشت برساخته دیگر (شتاب‌نگاشت برساخته Rezaeian و Kiureghian (۲۰۱۰) برای مؤلفه 090 ایستگاه LA 00 زلزله سال ۱۹۹۴ میلادی Northridge) انجام و نشان داده شد که روش این پژوهش برای هدف در نظر گرفته شده آن دقتی قابل قبول داشته و می‌تواند قابلیت اعتماد و کاربرد باشد. به این ترتیب، شتاب‌نگاشت‌های برساخته زلزله‌های تاریخی مطالعه شده شهر تبریز به عنوان شهر مطالعه موردی پژوهش تولید شدند تا ارزیابی امکان قابلیت کاربرد آن‌ها در شبیه‌سازی و همچنین مطالعات آثار لرزه‌ای میسر گردند. در این راستا نیز از طریق ایجاد طیف‌های طراحی مربوط و مقایسه آن‌ها با طیف‌های طراحی آیین‌نامه‌ای در شرایط مختلف فاصله از گسل و همچنین خاک محل نشان داده شد با دسترسی به شتاب‌نگاشت‌های برساخته زلزله‌های تاریخی می‌توان طیف‌های طراحی را که برای فواصل نزدیک به گسل دست پایین و برای فواصل دور از گسل محافظه‌کارانه به نظر می‌رسند تدقیق نمود.

۸- قدردانی

این پژوهش با حضور ارزشمند و تلاش‌های علاقمندان انسانی والامقام، با شخصیتی بی‌نظیر و دوست‌داشتنی انجام گرفته است که تمام تألیف گزارش آن با کمال تأسف و تأثر مقارن با اندوه فقدان ایشان است. آقای مهندس "یوسف کارگر شاملو" این بزرگواری هستند که خبر اخیر فقدان ایشان بسیار بسیار دردناک بوده است. تسلی دل برای فقدان چنین انسان وارسته‌ای بی‌شک شاه بیت غزل شیخ اجل سعدی شیرازی است که "سعدیا مرد نکونام نمیرد هرگز - مرده آنست که نامش به نکویی نبرند" و ایشان مصداقی به حق برای این بیت‌اند. روحشان شاد و یادشان گرامی.



شکل ۲۴- مقایسه طیف طرح ویرایش ۴ استاندارد ۲۸۰۰ ایران با طیف‌های طرح ایده‌آل‌سازی نشده زلزله‌های تاریخی شهر تبریز برای خاک نوع III در فاصله ۳۵ کیلومتری از گسل

تمامی طیف‌ها با فرض میرایی ۵٪ به دست آمده‌اند. همچنین با توجه به دسترسی به اطلاعات لازم فقط ۶ زلزله تاریخی شهر تبریز (زلزله‌های سال‌های ۸۵۸، ۱۰۴۲، ۱۷۱۷، ۱۷۲۱، ۱۷۸۰ و ۱۹۶۰ میلادی طبق جدول (۲) تهیه شده بر اساس داده‌های رده، ۱۳۷۰؛ Ambraseys و Melville، ۱۹۸۲؛ میرزایی، ۱۳۸۱؛ Karimiparidari و همکاران، ۲۰۱۳؛ Mousavi-Bafrouei و همکاران، ۲۰۱۴) میانگین‌گیری‌های موضوع شکل‌های (۱۸) تا (۲۴) به جای ۷ زلزله مطرح آئین‌نامه‌ای صرفاً با این ۶ زلزله برساخته انجام یافته و با طیف طرح استاندارد ۲۸۰۰ مقایسه شده‌اند تا ارزیابی اولیه قابلیت کاربرد شتاب‌نگاشت‌های برساخته زلزله‌های تاریخی جهت تدقیق طیف‌های طراحی که بدیهی است خود این تدقیق پس از ارزیابی انجام یافته در این پژوهش مستلزم مطالعات گسترده‌تر و دقیق‌تر با زلزله‌های بیشتر خواهد بود میسر گردد. به این ترتیب، بر اساس این ارزیابی اولیه چنانچه از مطالعه شکل‌های (۱۸) تا (۲۴) ملاحظه می‌گردد طیف‌های طرح آئین‌نامه ضمن تطابق کلی با طیف‌های طرح حاصل از زلزله‌های تاریخی با توجه به فاصله از گسل که در آئین‌نامه لحاظ نشده و نیز بر اساس نوع خاک محل می‌توانند دست پایینی و یا محافظه‌کارانه باشند. این مسئله با معیار قرار دادن فاصله ۲۰ کیلومتری (شکل‌های (۲۱) و (۲۲) برای خاک‌های نوع II و III) به عنوان مرز تفکیک حالت نزدیک گسل (شکل‌های (۱۹) و (۲۰)) از حالت دور از گسل (شکل‌های (۲۳) و (۲۴)) آشکار می‌شود و نظر به فاصله اکثریت نقاط شهر تبریز حداقل از گسل شمال تبریز که حدود ۵ کیلومتر می‌باشد اهمیت بیشتری یافته و از آنجا که خاک شهر تبریز نیز عموماً از نوع III است این اهمیت بنا بر پایینی‌تر بودن شتاب‌های طیفی آیین‌نامه از شتاب‌های طیفی برساخته تخمینی شکل (۲۰) دوچندان می‌گردد. بنابراین تدقیق طیف‌های طرح آئین‌نامه مشابه آنچه در شکل‌های (۱۸) تا (۲۴) نشان داده شده است جهت طرح مقاوم و یا بهسازی سازه‌ها در مقابل زلزله و سایر مطالعات مربوط توصیه می‌گردد.

- Note", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2007, 36 (1), 3-12.
- Ghodrati Amiri G, Iraj K, Namiranian P, "Generation of Multiple Spectrum-Compatible Artificial Earthquake Accelerograms with Hartley Transform and RBF Neural Network", *Asian Journal of Civil Engineering (BHRC)*, 2014, 15 (4), 587-604.
- Halldorsson B, Papageorgiou AS, "Calibration of the Specific Barrier Model to Earthquakes of Different Tectonic Regions", *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2005, 95 (4), 1276-1300.
- Honore L, Courboux F, Souriau A, "Ground Motion Simulations of a Major Historical Earthquake (1660) in the French Pyrenees Using Recent Moderate Size Earthquakes", *Geophysical Journal International*, 2011, 187 (2), 1001-1018.
- Hoseini Vaez SR, Sharbatdar MK, Ghodrati Amiri G, Naderpour H, Kheyroddin A, "Dominant Pulse Simulation of Near Fault Ground Motions", *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2013, 12 (2), 267-278.
- Hwang H, Pezeshk S, Lin YW, He J, Chiu JM, "Generation of Synthetic Ground Motion", Technical Report, MAEC RR-2 Project, Sponsored by Mid-America Earthquake Center, Center for Earthquake Research and Information and Department of Civil Engineering, University of Memphis, US, February, 2001.
- IRSC (Iranian Seismological Center at Institute of Geophysics), University of Tehran, "Bulletin Search", <http://irsc.ut.ac.ir/istn.php>, 14 July, 2016.
- Karimiparidari S, Zare M, Memarian H, Kijko A, "Iranian Earthquakes, A Uniform Catalog with Moment Magnitudes", *Journal of Seismology*, 2013, 17 (3), 897-911.
- Lam N, Wilson J, Hutchinson G, "Generation of Synthetic Earthquake Accelerograms Using Seismological Modeling: A Review", *Journal of Earthquake Engineering*, 2000, 4 (3), 321-354.
- Mentraci L, "Estimate of Spectral and Pseudo-Spectral Acceleration Proximity", *Engineering Structures*, 2008, 30 (9), 2338-2346.
- Mimoglou P, Psycharis IN, Taflampas IM, "Determination of the Parameters of the Directivity Pulse Embedded in Near-Fault Ground Motions and Its Effect on Structural Response", In: Papadarakakis M, Plevris V, Lagaros N (eds) *Computational Methods in Earthquake Engineering*, Computational Methods in Applied Sciences, Vol 44, Springer, Cham, 2017.
- Mousavi-Bafrouei SH, Mirzaei N, Shabani E, "A Declustered Earthquake Catalog for the Iranian Plateau", *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2014, 57 (6), 1-25.
- Nicknam A, Abbasnia R, Bozorgnasab M, Eslamian Y, "Synthesizing Strong Motion Using Empirical Green's Function and Genetic Algorithm Approach", *Journal of Earthquake Engineering*, 2010, 14 (4), 512-526.
- Papageorgiou AS, "The Barrier Model and Strong Ground Motion", *Pure and Applied Geophysics*, 2003, 160 (3-4), 603-634.
- Papageorgiou AS, Aki K, "A Specific Barrier Model for the Quantitative Description of Inhomogeneous Faulting and the Prediction of Strong Ground Motion, Part I: Description of the Model", *Bulletin of Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2007, 36 (1), 3-12.
- رده ا، "تاریخ زمین لرزه های ایران"، ترجمه، انتشارات آگاه، تهران، ۱۳۷۰.
- شیخ الاسلامی م ر، جوادی ح ر، اسدی سرشار م، آقاسینی ا، کوه پیما م، وحدتی دانشمند ب، "دانشنامه گسله های ایران"، برای سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور، انتشارات رهی، تهران، ۱۳۹۲.
- ع شایری ا، نیکبختان م، "ارائه روابطی برای تولید شتابنگاشت مصنوعی در فلات ایران با رویکرد تصادفی"، فصلنامه علمی- پژوهشی علوم و مهندسی زلزله، ۱۳۹۴، ۲ (۴)، ۱۱-۲۷.
- کمیته دائمی بازنگری آئین نامه طراحی ساختمان ها در برابر زلزله، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، "آئین نامه طراحی ساختمان ها در برابر زلزله، استاندارد ۲۸۰۰ (ویرایش ۴)"، تهران، ۱۳۹۳.
- مقدسی موسوی س ع، حمزه لوح، شکیب ح، "شبیه سازی زلزله سال ۱۳۸۱ آوج با روش تابع نیمه تجربی گرین"، *مجله مهندسی عمران دانشگاه صنعتی امیرکبیر*، ۱۳۸۸، ۴۱ (۲)، ۳۵-۴۲.
- میرزایی ن، "پارامترهای مبنایی زمین لرزه های ایران"، تحت حمایت مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران و جمعیت هلال احمر ایران، انتشارات دانش نگار، تهران، ۱۳۸۱.
- Agrawal SK, "Generation of Synthetic Earthquake Accelerograms Using Engineering Earthquake Source Model", *International Journal of structural Stability and Dynamics*, 2004, 4 (4), 497-514.
- Albini P, Musson-RM W, Gomez Capera AA, Locati M, Rovida A, Stucchi M, Vigano D, "Global Historical Earthquake Archive and Catalogue (1000-1903)", GEM Technical Report 2013-01V1.0.0, 202 p.; Global Earthquake Model (GEM), Pavia, Italy, 2013.
- Ambrasays NN, Melville CP, "A History of Persian Earthquakes", Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1982.
- Andrews DJ, "A Suggestion for Fitting Ground-Motion Attenuation Near an Extended Earthquake Source", *Seismological Research Letters*, 2001, 72 (4), 454-461.
- BHRC (Road, House, and Urban Development Research Center), "Strong Motion Network", <http://www.bhrc.ac.ir/enismn/tabid/1097/Default.aspx>, 14 July, 2016.
- BHRC (Road, House, and Urban Development Research Center), "Strong Motion Network", <http://smd.bhrc.ac.ir/Portal/fa/Records/DrawGraphV1/8156>, 21 May, 2017.
- Boore DM, Bommer JJ, "Processing of Strong-Motion Accelerograms: Needs, Options, and Consequences", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2005, 25 (2), 93-115.
- Chopra AK, "Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering", Prentice Hall, New York, US, 2012.
- Chopra AK, "Elastic Response Spectrum: A Historical

- Porto, Portugal, 30 June- 2 July, 2014, pp 381-386.
- Zolfaghari MR, "Development of a Synthetically Generated Earthquake Catalogue towards Assessment of Probabilistic Seismic Hazard for Tehran", *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2015, 76 (1), 497-514.
- Seismological Society of America, 1983a, 73 (3), 693-722.
- Papageorgiou AS, Aki K, "A Specific Barrier Model for the Quantitative Description of Inhomogeneous Faulting and the Prediction of Strong Ground Motion, Part II: Application of the Model", *Bulletin of Seismological Society of America*, 1983b, 73 (4), 953-978.
- PEER (The Pacific Earthquake Engineering Research Center), "PEER Ground Motion Database Beta (Software/Apps)", <http://ngawest2.berkeley.edu/spectras/14924/searches/13674/edit>, 3 April, 2017.
- Rezaeian S, Kiureghian AD, "Simulation of Synthetic Ground Motions for Specified Earthquake and Site Characteristics", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2010, 39 (10), 1155-1180.
- SeismoSoft Group, "SeismoArtif Release 2016", SeismoSoft Company, Pavia, Italy, 2016a.
- SeismoSoft Group, "SeismoSpect Release 2016", SeismoSoft Company, Pavia, Italy, 2016b.
- Shahi SK, Baker JW, "Regression models for predicting the probability of near-fault earthquake ground motion pulses, and their period", *Proceedings of the 11th International Conference on Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering*, Zurich, Switzerland, 2011.
- Shahjouei A, Pezeshk S, "Synthetic Seismograms Using a Hybrid Broadband Ground-Motion Simulation Approach: Application to Central and Eastern United States", *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2015, 105 (2A), 686-705.
- Soghrat MR, Khaji N, Zafarani H, "Simulation of Strong Ground Motion in Northern Iran Using the Specific Barrier Model", *Geophysical Journal International*, 2012, 188 (2), 645-679.
- Storchak DA, Di Giacomo D, Bondar I, Harris J, Engdahl ER, Lee WHK, Villasenor A, Bormann P, Ferrari G, "ISC-GEM Global Instrumental Earthquake Catalogue (1900-2009)", *GEM Technical Report 2012- 01 V1.0.0*, 128 p.; *Global Earthquake Model (GEM)*, Pavia, Italy, 2012.
- Vafaie J, Taghikhany T, Tehranizadeh M, "Near Field Effect on Horizontal Equal Hazard Spectrum of Tabriz City in North West of Iran", *International Journal of Civil Engineering*, 2011, 9 (1), 49-56.
- Wells DL, Coppersmith KJ, "New Empirical Relationships among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area and Surface Displacement", *Bulletin of Seismological Society of America*, 1994, 84 (4), 974-1002.
- Wossner J, Treml M, Wenzel F, "Simulation of $M_w = 6.0$ Earthquakes in the Upper Rhinegraben Using Empirical Green Functions", *Geophysical Journal International*, 2002, 151 (2), 487-500.
- Zafarani H, Mousavi M, Noorzad AS, Ansari A, "Calibration of the Specific Barrier Model to Iranian Plateau Earthquakes and Development of Physically based Attenuation Relationships for Iran", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2008, 28 (7), 550-576.
- Zentner I, Allain F, Humbert N, Caudron M, "Generation of Spectrum Compatible Ground Motion and its Use in Regulatory and Performance-Based Seismic Analysis", *Proceedings of the 9th International Conference on Structural Dynamics (EURODYN)*,

EXTENDED ABSTRACT

Generation of Synthetic Accelerograms for Historical Earthquakes to Evaluate the Possibility of Applications in Simulating their Effects and Increasing the Accuracy of Design Spectra with Case Study of Tabriz

Peyman Narjabadifam ^{a,*}, Vahid Shahamat ^b, Yousef Kargar ^c, Pouya zahedi ^c

^a Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Bonab, Bonab, Iran

^b Faculty of Civil Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran

^c Civil Engineering Department, Engineering Faculty, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran

Received: 12 July 2017; Accepted: 21 April 2019

Keywords:

Synthetic accelerogram, Historical earthquake, Earthquake catalog, Iranian faults, Earthquake simulation, Design spectrum.

1. Introduction

Time histories of strong ground motion records are of great importance in the field of structural earthquake engineering. They are used as input data in various studies aiming at earthquake protection of structures. Real, artificial, and synthetic seismograms are the three kinds of these input data. Real seismograms are those recorded during earthquake events, artificial seismograms are known as those numerically generate in such a way that their response spectrum corresponds to a target spectrum, and synthetic seismograms are those obtained based on geological considerations (Rezaeian and Kiureghian, 2010). The real seismograms are sometimes unavailable even in high seismicity regions, when strong earthquakes have not been recorded after major historical earthquakes. Such a lack can be overcome through the application of modified real ground motions from other regions, which is a controversial method and may result in unrealistic evaluations (Shahjouei and Pezeshk, 2015). Historical earthquakes should then be synthesized. This is the objective of research being presented.

2. Methodology

The generation of synthetic seismograms is first investigated through the review of the literature, and the most practical method is determined as the method proposed by Halldorsson and Papageorgiou (2005). The history of earthquakes occurred in Iran is then studied, and a uniform catalog is provided. Faults map of Iran is obtained based on the recorded events. The ratio of historical earthquakes to instrumentally recorded events is calculated by province and the most important region for this study is defined as the region with the highest ratio. After the verification by previous studies and recorded ground motions the method of Halldorsson and Papageorgiou (2005) is used to generate synthetic accelerograms for the historical earthquakes occurred in the region considered for the case study. Two different soil types are considered at three different distances from active faults and the synthetic accelerograms are generated by SeismoArtif (SeismoSoft Group, 2016a). The importance of synthesizing historical earthquakes is also evaluated based on their effect on the accuracy of design spectra. SeismoSpect (SeismoSoft Group, 2016b) is used to this purpose, and the mean and mean plus one standard deviation spectra are created for the six events considered to synthesize accelerograms. The 4th edition of the Iranian code of practice for the seismic resistant design of buildings - Standard No. 2800 (PCIRC, 2014) is considered as the reference for comparisons.

* Corresponding Author

E-mail addresses: narjabadi@tabrizu.ac.ir (Peyman Narjabadifam), vshahamat@gmail.com (Vahid Shahamat), ykshamloo@yahoo.com (Yousef Kargar), pzahedi@gmail.com (Pouya Zahedi).

3. Results and discussion

There are a number of methods for the generation of synthetic seismograms. Deterministic and stochastic methods are the two main methods (Lam et al., 2000). Empirical Green's functions are also used as more sophisticated methods (Agrawal, 2004). Practical application, however, requires a simple and robust method. The method proposed recently by Halldorsson and Papageorgiou (2005) seems to be a practical method. It is also used in SeismoArtif (SeismoSoft Group, 2016a), which is known as the most famous software for generating seismograms.

The provincial uniform catalog of both historical and instrumental earthquakes occurred in Iran is provided (see appendix 1), and the city of Tabriz is determined as the most important city for the study of synthesizing historical earthquakes. This is because of that it is located in a high seismicity region of the East Azerbaijan province with the highest number of historical events (74% of all the earthquakes) compared to the instrumentally recorded earthquakes (26% of all the earthquakes).

A phenomenon-based map of Iranian faults (see appendix 2) was presented based on the reported epicenters of the earthquakes occurred in Iran, and it is used to calculate the Joyner-Boore distances, which are required for the generation of synthetic accelerograms based on the method used in this research.

Verification analyses are carried out based on the generation of synthetic accelerograms for the real ground motions of the component L of the Ahar station of the first 2012 Ahar-Varzeghan earthquake and the component 090 of the LA00 station of the 1994 Northridge earthquake, which is also compared to the synthetic accelerogram generated by Rezaeian and Kiureghian (2010). It is indicated that the method used in this research for the generation of synthetic accelerograms is reliable and can be applied in practice. Synthetic accelerograms are then generated for the historical earthquakes of Tabriz (see appendix 3).

Design spectra for the city of Tabriz are created based on the 36 accelerograms synthesized for the historical earthquakes occurred in this city. They are compared to the design spectra provided in Standard No. 2800 for this city, and it is shown that the accuracy of design spectra can be increased based on the generation of synthetic accelerograms.

4. Conclusions

Synthesizing accelerograms for historical earthquakes was evaluated to be reliable and practical by the method of Halldorsson and Papageorgiou (2005) through the application of SeismoArtif (2016a). These synthesized time histories can directly be used to simulate the effects of earthquakes on structures. They can also be used to create the design spectra with the accuracies increased compared to the creation of spectra based on modified real ground motions selected from other regions.

5. References

- Agrawal SK, "Generation of Synthetic Earthquake Accelerograms Using Engineering Earthquake Source Model", *International Journal of structural Stability and Dynamics*, 2004, 4 (4), 497-514.
- Halldorsson B, Papageorgiou AS, "Calibration of the Specific Barrier Model to Earthquakes of Different Tectonic Regions", *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2005, 95 (4), 1276-1300.
- Lam N, Wilson J, Hutchinson G, "Generation of Synthetic Earthquake Accelerograms Using Seismological Modeling: A Review", *Journal of Earthquake Engineering*, 2000, 4 (3), 321-354.
- PCRIC (Permanent Committee for Revising the Iranian Code of Practice for Seismic Design of Buildings at Road, Housing and Urban Development Research Center), "Iranian Code of Practice for Seismic Design of Buildings- Standard No. 2800 (4th Edition)", In Persian, Tehran, 2014.
- Rezaeian S, Kiureghian AD, "Simulation of Synthetic Ground Motions for Specified Earthquake and Site Characteristics", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2010, 39 (10), 1155-1180.
- SeismoSoft Group, "SeismoArtif Release 2016", SeismoSoft Company, Pavia, Italy, 2016a.
- SeismoSoft Group, "SeismoSpect Release 2016", SeismoSoft Company, Pavia, Italy, 2016b.
- Shahjoui A, Pezeshk S, "Synthetic Seismograms Using a Hybrid Broadband Ground-Motion Simulation Approach: Application to Central and Eastern United States", *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2015, 105 (2A), 686-705.