

بررسی اثر توپوگرافی بر دامنه امواج لرزه‌ای با استفاده از شبیه‌سازی سه‌بعدی امواج لرزه‌ای در شهر تهران

احسان کرکوتی^{۱*}، ظاهر حسین شمالی^۲ و مهرداد پاکزاد^۳

^۱دانشجوی دکتری ژئوفیزیک، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، تهران، ایران
^۲دانشیار، گروه فیزیک فضا، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، تهران، ایران
^۳استادیار، گروه فیزیک فضا، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۹۴/۰۹/۲۲، تاریخ پذیرش: ۹۵/۰۷/۰۷)

چکیده

شهر تهران یکی از مراکز پرجمعیت جهان با خطرپذیری بسیار زیاد زمین‌لرزه است. این شهر با جمعیتی بالغ بر ۱۲ میلیون نفر، مرکز سیاسی اقتصادی ایران نیز به شمار می‌رود. ساخت و سازهای غیر اصولی و بافت‌های فرسوده در این شهر، موجب افزایش نگرانی‌ها در صورت رخداد یک زمین‌لرزه است و اهمیت مطالعات مختلف در مورد زمین‌لرزه‌های احتمالی آینده را در این شهر دوچندان می‌کند. در این مطالعه، با استفاده از روش المان طیفی شبیه‌سازی گسل محدود برای چند سناریو مختلف زمین‌لرزه در گسل‌های اطراف تهران در بازه بسامدی ۰/۱ تا ۱/۰ هرتز، به منظور بررسی اثر توپوگرافی انجام شد. مدل‌سازی‌ها با استفاده از نرم‌افزار SPECFEM3D، که از روش المان طیفی برای انجام محاسبات استفاده می‌کند، انجام شده است. محاسبات نشان داد که بزرگنمایی امواج در سطح شهر تهران وابسته به سناریو زمین‌لرزه است؛ ولی به‌طور میانگین این میزان در قسمت‌های کم ارتفاع شهر بین ± ۱۰ درصد و در کوه‌ها و دره‌های شمال تهران بین ± ۳۰ درصد می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: شبیه‌سازی امواج لرزه‌ای، اثر توپوگرافی، تهران، روش المان‌های طیفی

۱ مقدمه

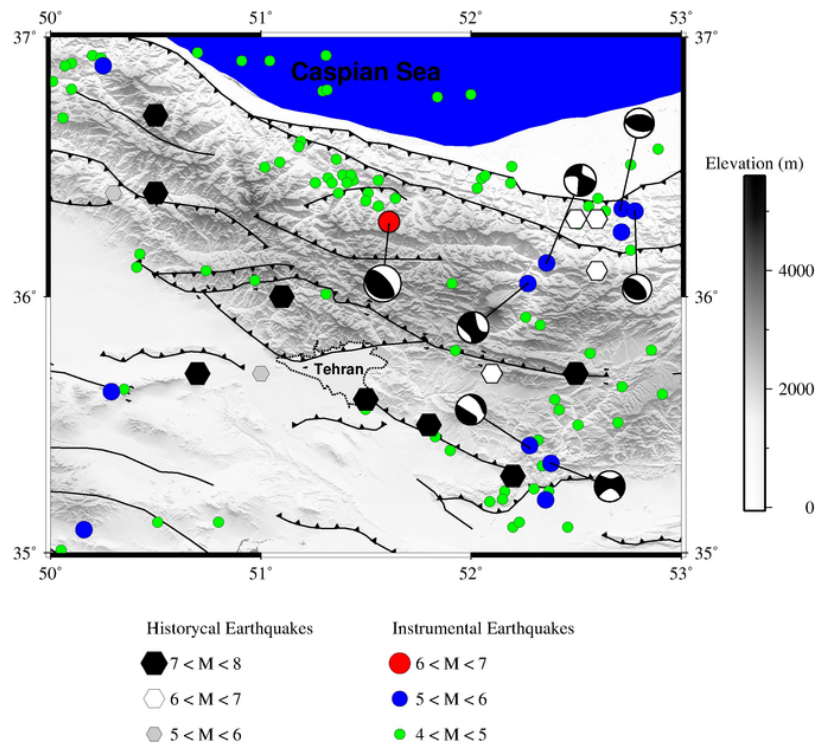
کوه‌های اطراف آن متمرکز است. تهران از جهات شمال، شرق و غرب توسط کوه‌ها احاطه شده است. تغییرات ارتفاعی از سمت شمال به جنوب نیز به گونه‌ای است که در فاصله کمتر از ۱۰ کیلومتر تغییرات ارتفاع بیش از ۲۵۰۰ متر مشاهده می‌شود.

شهر تهران در دامنه کوه‌های البرز در ناحیه‌ای بسیار لرزه‌خیز قرار گرفته و توسط چندین گسل کواترنری جنبا با پتانسیل زمین‌لرزه‌هایی به بزرگای ۷ و بیشتر احاطه شده است (بربریان و همکاران، ۱۳۶۴). در تاریخچه دوهزار ساله این منطقه ۸ زمین‌لرزه ویرانگر (آمبرسیز و ملویل، ۱۹۸۵) روی داده است (جدول ۱). لرزه‌خیزی دستگاهی به همراه زمین‌لرزه‌های تاریخی منطقه البرز مرکزی در شکل ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱. زمین‌لرزه‌های تاریخی محدوده البرز مرکزی برگرفته از آمبرسیز و ملویل (۱۹۸۲).

سال	گسل	ناحیه	بزرگای (Mw)
۳۰۰ ق.م.	پارچین	ری	۶/۷
۷۴۳	گرمسار	گرمسار	۲/۷
۸۵۵	کهریزک	ری	۱/۷
۹۵۸	مشاء	طالقان	۷/۷
۱۱۱۷	شمال تهران	کرج	۲/۷
۱۶۶۵	مشاء	دماوند	۵/۶
۱۸۱۵	مشاء	دماوند	نامشخص
۱۸۳۰	مشاء	دماوند	۱/۷

جمعیت تهران و وجود بافت‌های فرسوده در مناطق مختلف، این شهر را به یکی از نقاط جهان با بیشترین خطرپذیری زمین‌لرزه تبدیل کرده است. این نکات، محاسبه خطر زمین‌لرزه و مقادیر انتظاری جنبش زمین در زمین‌لرزه‌های احتمالی آینده، از مهمترین اولویت‌های پژوهشی زلزله‌شناسان ایران است. این مطالعه بر اثر توپوگرافی حاصل از امواج لرزه‌ای در شهر تهران و



شکل ۱. زمین‌لرزه‌های تاریخی و دستگاهی منطقه البرز مرکزی به همراه گسل‌های اصلی این منطقه. برای زمین‌لرزه‌های تاریخی از کاتالوگ آمبرسیز و ملویل (۱۹۸۲) و برای زمین‌لرزه‌های دستگاهی از کاتالوگ ISC استفاده شده است.

بکارگیری برای مدل‌سازی امواج لرزه‌ای در مطالعات مختلف به‌شمار می‌رود (کوماتیچ، ۲۰۱۰). کوماتیچ و ویولت (۱۹۹۸) و کوماتیچ و ترامپ (۱۹۹۹) به تفصیل در مورد بکارگیری روش المان طیفی در مدل‌سازی امواج لرزه‌ای، بحث کرده‌اند و جزئیات نظری این روش را توضیح داده‌اند.

مطالعات مختلفی برای شبیه‌سازی جنبش نیرومند زمین در شهر تهران صورت گرفته است. از جمله در سال ۲۰۰۰ توسط آژانس همکاری‌های بین‌المللی کشور ژاپن با همکاری مدیریت بحران شهرداری تهران طرحی تحقیقاتی انجام شد. در این مطالعه، با استفاده از روش توابع تجربی گرین (ایریکورا، ۱۹۸۶؛ ایریکورا و کامایی، ۱۹۹۲)، سناریوهای زمین‌لرزه بر روی گسل‌های شمال‌تهران، ری و مشاء شبیه‌سازی شد. معین‌فر و همکاران در سال ۲۰۰۲ با استفاده از روش توابع تجربی گرین (ایریکورا، ۱۹۸۶) سناریوهایی را بر روی گسل‌های شمال تهران، ری و مشاء شبیه‌سازی کردند. حق‌شناس و بارد (۲۰۰۷) با استفاده از روش توابع تجربی گرین جنبش نیرومند زمین را برای چهار سناریو متفاوت زمین‌لرزه بر روی گسل‌های شمال تهران، ری، گرمسار و مشاء محاسبه کردند. حمزه‌لو و همکاران (۲۰۰۷) با استفاده از روش ترکیبی (Hybrid)، جنبش زمین را بر روی یک پروفیل دوبعدی شمالی-جنوبی در شهر تهران محاسبه کردند. آنها ابتدا با استفاده از روش تجمیع مدهای نرمال با استفاده از مدل پوسته یک‌بعدی، جنبش زمین را بر روی سنگ بستر محاسبه و سپس با استفاده از روش تفاضل‌های محدود، انتشار امواج در پروفیل دوبعدی با تغییرات جانبی را محاسبه نمودند و سائیزموگرام‌های شبیه‌سازی شده را برای نقاط مختلف در امتداد این پروفیل ایجاد کردند. زعفرانی (۲۰۰۹) با استفاده از روش گسل محدود اتفاقی (برزنف و اتکینسون، ۱۹۹۷) سناریوهایی را برای گسل‌های اطراف تهران شبیه‌سازی کرد. زعفرانی (۲۰۱۲) با شبیه‌سازی

روش‌های نظری و شبیه‌سازی رایانه‌ای سناریوهای مختلف زمین‌لرزه، یکی از بهترین روش‌ها برای شناخت بیشتر خطر زمین‌لرزه در مناطقی مانند تهران و مناطق اطراف آن است، که فاقد داده‌های ثبت شده کافی در دوره زلزله‌شناسی دستگاهی‌اند.

در سال‌های اخیر با افزایش امکانات محاسباتی هم از نظر توان پردازش و هم میزان حافظه تصادفی (RAM) در دسترس محاسبات، که نقشی حیاتی بویژه در شبیه‌سازی با روش اجزای محدود ایفا می‌کند، شبیه‌سازی‌های عددی برای شبیه‌سازی امواج لرزه‌ای بسیار مورد توجه قرار گرفته است. تا کنون روش‌های مختلفی از قبیل روش تفاضل‌های محدود (Finite Difference Method)، روش اجزای محدود (Finite Element Method) و غیره برای شبیه‌سازی امواج لرزه‌ای در محیط‌های مختلف اعم از دو و سه‌بعدی، به کار گرفته شده‌اند (اولسن و همکاران، ۱۹۹۵؛ گریوز، ۱۹۹۶؛ اولسن، ۲۰۰۰). بین این روش‌ها، روش تفاضل‌های محدود از سایر روش‌ها بیشتر مورد توجه قرار گرفته است؛ ولی این روش برای مدل‌سازی هنگامی که توپوگرافی سطحی به مدل اضافه شود کارایی ندارد.

روش المان طیفی، روشی بسیار کارا برای مدل‌سازی امواج لرزه‌ای در محیط‌هایی که پیچیدگی هندسی دارند (توپوگرافی سطحی و لایه‌های پیچیده زیر سطحی)، به شمار می‌رود. این روش اولین بار توسط پترا (۱۹۸۴) در زمینه مکانیک سیالات به کار گرفته شد. این روش که قابلیت تطبیق‌پذیری روش اجزای محدود را با دقت بسیار روش‌های شبه‌طیفی (Pseudo Spectral) ترکیب کرده، روشی قدرتمند برای شبیه‌سازی امواج لرزه‌ای در محیط‌هایی که پیچیدگی هندسی دارند، ارائه می‌دهد (ترامپ و همکاران، ۲۰۰۸). در سال‌های اخیر روش المان طیفی طرفداران بسیاری پیدا کرده است و بعد از روش تفاضل‌های محدود دومین روش از نظر تعداد دفعات

البرز را تشکیل می‌دهد، زمین لرزه‌های مخرب زیادی ثبت شده است. به دلیل قرارگیری شهر تهران در این منطقه و با توجه به موقعیت اقتصادی، سیاسی و جمعیتی این شهر، این منطقه مورد توجه گروه‌های تحقیقاتی زیادی بوده و مطالعات گسترده‌ای بر روی لرزه‌خیزی، ساختار و تحول این منطقه صورت گرفته است.

ورنات و همکاران در سال ۲۰۰۴ با تحلیل داده‌های سیستم موقعیت یاب جهانی (GPS) کوتاه‌شدگی 2 ± 5 میلیمتر در سال و حرکت امتدادلغز 2 ± 4 میلیمتر در سال را برای ناحیه البرز مرکزی محاسبه کردند که این عدد معادل یک چهارم کل کوتاه‌شدگی حاصل از برخورد صفحه عربستان و اوراسیاست.

در اکثر نقاط ایران مکانیسم‌های راندگی و امتدادلغز، عامل لرزه‌خیزی می‌باشند (جکسون و مکنزی، ۱۹۸۴؛ جکسون و همکاران، ۲۰۰۲). این روند در رشته‌کوه‌های البرز نیز دیده شده است و داده‌های زمین‌شناسی و لرزه‌خیزی، گسله‌های امتدادلغز و معکوس را عامل کوتاه‌شدگی شمال-شمال‌غرب، جنوب-جنوب غرب مشاهده شده در این رشته‌کوه‌ها نشان داده‌اند. گسل‌های راندگی در دامنه جنوبی کوه‌های البرز شیبی به سمت شمال دارند و گسل‌های دامنه شمالی این رشته‌کوه‌ها شیبی به سمت جنوب.

تهران در یک منطقه آبرفتی در دامنه جنوبی کوه‌های البرز واقع شده که از شمال، شرق و غرب توسط کوه‌های البرز احاطه و توسط چندین گسل فعال با پتانسیل زیاد از جمله گسل‌های شمال تهران، مشاء، کهریزک، پارچین و ری، احاطه شده است (چلنکو، ۱۹۷۵؛ بربریان، ۱۹۸۳؛ بربریان و ایتس، ۲۰۰۱؛ آلن و همکاران، ۲۰۰۳).

گسل مشاء یکی از مهمترین گسل‌های البرز مرکزی به حساب می‌آید. این گسل فشاری فعال با طول ۴۰۰ کیلومتر (بربریان و همکاران ۱۹۹۳) و راستای غرب-شمال غرب، شرق-جنوب شرق از روستای مشاء نزدیکی

سناریوهای مختلف بر روی گسل شمال تهران با استفاده از یک روش هیبرید (سینماتیک-استوکستیک)، حساسیت جنبش زمین به پارامترهای مختلف چشمه را که از این سناریوها به دست آمده، بررسی کرد.

در هیچ یک از این مطالعات اثرهای توپوگرافی اطراف تهران بر روی امواج لرزه‌ای بررسی نشده است. در این مطالعه این موضوع بررسی شده است. برای شبیه‌سازی‌ها، ابتدا سناریوهایی برای هر یک از گسل‌های اطراف تهران (گسل شمال تهران، ری، پارچین، کهریزک و مشاء) تعریف و سپس انتشار امواج لرزه‌ای در شهر تهران شبیه‌سازی شده است. سپس با مقایسه نتایج شبیه‌سازی‌ها با و بدون در نظر گرفتن توپوگرافی سطحی در مدل، اثری که توپوگرافی اطراف تهران روی امواج ثبت شده در شهر تهران می‌گذارند بررسی شده است. در این مطالعه از بسته نرم‌افزاری SPECFEM3D، که توسط کوماتیچ و همکاران در سال ۲۰۰۴ نوشته شده و با استفاده از روش المان‌های طیفی انتشار امواج لرزه‌ای را شبیه‌سازی می‌کند، استفاده شده است.

۲ ساختار زمین‌شناسی و زمین‌ساختی

شهر تهران در دامنه‌های جنوبی رشته‌کوه‌های البرز قرار گرفته است. این رشته‌کوه‌ها، که بخشی از نوار آلپ-همالیا را تشکیل می‌دهند، از شمال به فرونشست دریای خزر و از جنوب به فلات ایران منتهی می‌گردند. رشته‌کوه‌های البرز حاصل دو دوره کوهزایی اصلی‌اند که اولی در برخورد بلوک ایران با اوراسیا در اواخر دوره تریاس صورت گرفته و دوره دوم کوهزایی بر اثر همگرایی صفحه‌های عربستان و اوراسیا در دوره پست نیو تیس است (سنگور و همکاران، ۱۹۹۳؛ زانچی و همکاران، ۲۰۰۶).

در تاریخچه منطقه البرز مرکزی، که نواری به طول ۶۰۰ کیلومتر و عرض ۱۰۰ کیلومتر در مرکز رشته‌کوه‌های

شکستگی به صورت شعاعی از کانون به سایر نقاط صفحه گسل انجام شده‌اند. همچنین فرض شده که انتشار شکستگی در صفحه گسل با سرعت ثابت انجام می‌شود که در سناریوهای مختلف این سرعت متفاوت است. سرعت انتشار شکستگی، بزرگای زمین‌لرزه فرضی و نقطه شروع شکستگی روی صفحه گسل وابسته به سناریو است. سناریوهای زمین‌لرزه روی گسل‌های مختلف بر مبنای زمین‌لرزه‌های تاریخی بزرگی مانند زمین‌لرزه بخش شرقی گسل مشاء (۱۸۳۰ میلادی با بزرگای ۷/۱)، زمین‌لرزه گسل شمال تهران (سال ۱۱۱۹ با بزرگای ۷/۲)، زمین‌لرزه گسل پارچین (سال ۳۰۰ قبل از میلاد با بزرگای ۷/۶) و زمین‌لرزه گسل‌های ری و کهریزک (سال ۸۵۵ میلادی با بزرگای ۷/۱) انتخاب شده‌اند. این زمین‌لرزه‌ها توسط آمبرسیز و ملویل (۱۹۸۲) به این گسل‌ها نسبت داده شده‌اند. یک سناریوی زمین‌لرزه با بزرگای نزدیک به هر یک از این زمین‌لرزه‌های تاریخی، روی گسل منتسب به این زمین‌لرزه‌ها برای انجام شبیه‌سازی‌ها در نظر گرفته شد. در سناریوی انتخابی روی گسل شمال تهران (NT) در شکل ۲)، زمین‌لرزه‌ای با بزرگای گشتاوری ۷/۲ با مکانیسم معکوس در نظر گرفته شد. در این سناریو صفحه گسل با طول ۵۵ کیلومتر، عرض ۳۰ کیلومتر، آزیموت ۲۶۰ درجه و زاویه شیب ۷۵ درجه، فرض شده است. تصویر صفحه گسل مفروض روی سطح زمین در شکل ۲ نشان داده شده و ستاره سیاه‌رنگ تصویر مکان شروع شکستگی در این سناریو است. در این سناریو فرض شد که شکستگی از سمت شرق گسل شروع شده و با سرعت انتشار گسیختگی ۲/۸ کیلومتر بر ثانیه به سمت غرب گسترش یابد. سناریوی بعدی، زمین‌لرزه‌ای فرضی با بزرگای گشتاوری ۷/۰ روی گسل مشاء (MO) است. در این سناریو فرض شد که نقطه شروع گسیختگی از سمت جنوب شرق صفحه گسل شروع و به سمت شمال غرب صفحه گسل منتشر شود. فرض شده که صفحه گسیختگی

فیروزکوه شروع می‌شود و تا روستای فشم امتداد دارد. بسیاری از زمین‌لرزه‌های بزرگ این منطقه به این گسل نسبت داده شده‌اند. شیب گسل به سمت شمال بوده و زاویه شیب بین ۳۵ تا ۷۰ درجه در طول این گسل متغیر است. گسل مشاء در دوره فعالیت خود حدود ۴ کیلومتر جابه‌جایی قائم ایجاد کرده است (آلنباخ، ۱۹۶۶؛ چلنکو و همکاران، ۱۹۷۴).

گسل شمال تهران مهمترین ساختار تکتونیکی در نزدیکی شهر تهران است که دامنه جنوبی کوه‌های البرز را حدود ۲ کیلومتر به بالای نهشته‌های آبرفتی تهران رانده است (چلنکو، ۱۹۷۵). این گسل یک گسل جنبای فشارشی با مؤلفه امتدادلغز و با شیب به سمت شمال است (آلن و همکاران، ۲۰۰۳). گسل شمال تهران با طول ۳۵ کیلومتر از سمت شرق به گسل مشاء-فشم می‌پیوندد.

گسل کهریزک واقع در جنوب شهر تهران، ساختاری قابل ملاحظه در جنوب تهران را تشکیل داده و پتانسیل لرزه‌خیزی زیادی دارد. این گسل با رخنمون سطحی بسیار مشخص، طولی معادل ۳۵ کیلومتر دارد و نهشته‌های آبرفتی دوره هولوسن را ۱۵ متر به صورت قائم جابه‌جا کرده است. این گسل فشاری با مؤلفه امتدادلغز، شیبی با زاویه ۷۰ تا ۸۰ درجه به سمت شمال دارد (دیمارتینی و همکاران، ۱۹۹۸).

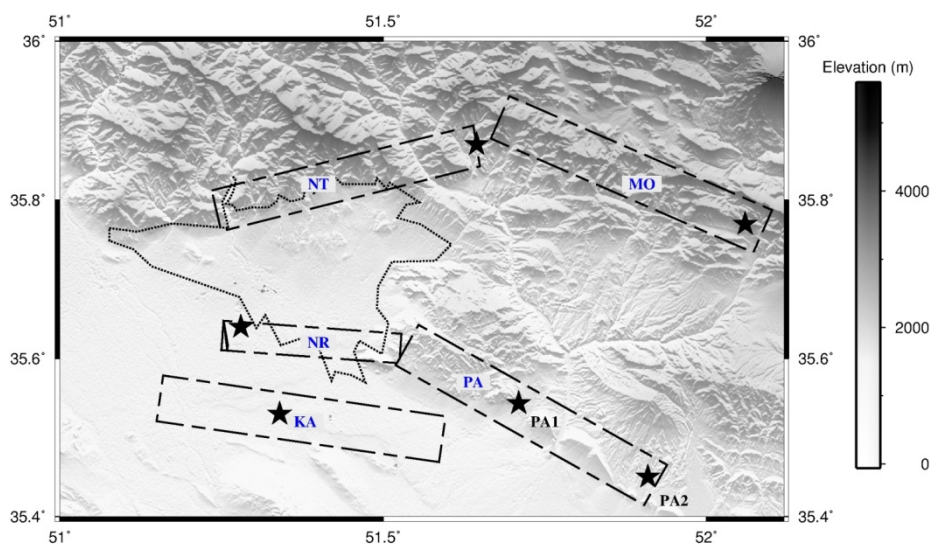
گسل پارچین واقع در جنوب شرقی تهران، یک گسل معکوس با طول ۷۰ کیلومتر است (بربریان و کینگ، ۱۹۸۱). این گسل در راستای غرب-شمال غرب، شرق-جنوب شرق با آزیموت ۳۰۷ درجه شمالی، شیبی بین ۱۹ تا ۵۳ درجه در جهت شمال شرق دارد (بربریان و همکاران، ۱۹۸۵).

۳ سناریوهای زمین‌لرزه

در این مطالعه تمام شبیه‌سازی‌ها با فرض وجود پراکندگی یکنواخت لغزش در تمام نقاط سطح گسل و انتشار

صفحه گسل برابر با ۵۰ کیلومتر و عرض آن برابر با ۲۰ کیلومتر در نظر گرفته شد. نقطه شروع گسیختگی در وسط صفحه گسل و انتشار گسیختگی از مرکز به دو انتهای گسل با سرعت ۲/۸ کیلومتر بر ساعت فرض شده است. بر روی گسل پارچین دو سناریو مختلف زمین‌لرزه شبیه‌سازی شد که در این سناریوها صفحه گسلش با آزمون ۲۹۰ درجه و شیب ۴۰ درجه به سمت شمال در نظر گرفته شد. در این سناریوها صفحه گسلش و بزرگای گشتاوری برابر ۷/۵ ثابت است؛ ولی نقطه شروع شکستگی و جهت انتشار آن تغییر می‌کند. در اولین سناریو بر روی گسل پارچین (PA1) نقطه شروع شکستگی در مرکز این گسل قرار داده شد و فرض شد که شکستگی با سرعت ۳/۰ کیلومتر بر ثانیه به دو انتهای گسل منتشر شود. در سناریوی دیگر (PA2) نقطه شروع شکستگی در انتها الیه جنوب شرق صفحه گسلش در نظر گرفته شد و فرض شد که شکستگی یک طرفه به سمت شمال غرب گسترش یابد. مشخصات این سناریوها در جدول ۲ آمده است.

طولی برابر ۵۰ کیلومتر و عرضی برابر ۳۰ کیلومتر داشته باشد و سرعت انتشار گسیختگی ۲/۸ کیلومتر بر ثانیه در نظر گرفته شد. سناریوی بعدی بر روی گسل شمال ری است که زمین‌لرزه‌ای با بزرگای گشتاوری ۶/۵ با مکانیسم راندگی روی این گسل شبیه‌سازی شد. با وجود اینکه زمین‌لرزه تاریخی منسوب به این گسل بزرگایی برابر با ۷/۱ دارد، به دلیل طول کم این گسل، سناریوی زمین‌لرزه‌ای با بزرگای کمتر روی این گسل در شبیه‌سازی‌ها به کار گرفته شد. در این سناریو فرض شد که گسیختگی از سمت غرب به سمت شرق گسترش یابد و سرعت انتشار گسیختگی در آن ۲/۸ کیلومتر بر ثانیه فرض شد. ابعاد صفحه شکستگی در این سناریو به طول ۲۵ کیلومتر، عرض ۱۵ کیلومتر، آزمون ۲۶۳ درجه و زاویه شیب ۷۵ درجه، در نظر گرفته شد. در سناریو گسل کهریزک (KA) زمین‌لرزه‌ای با بزرگای گشتاوری ۷/۰ با صفحه گسلی با آزمون ۲۷۰ درجه و زاویه شیب ۷۰ درجه به سمت شمال، شبیه‌سازی شد. در این سناریو طول



NT: North Tehran Fault scenario NR: North Rey Fault scenario
 KA: Kahrizak Fault scenario MO: Mosha Fault scenario
 PA: Parchin Fault scenario

شکل ۲. رومرکز و تصویر سطحی گسل‌ها در سناریوهای زمین‌لرزه مورد استفاده در شبیه‌سازی‌ها. در این شکل مستطیل‌های سیاه‌رنگ نشان‌دهنده تصویر سطحی گسل مورد استفاده در سناریوهای با گسل محدود و ستاره‌های سیاه‌رنگ مکان شروع شکستگی در هر سناریو را نشان می‌دهد.

بی‌دقت منجر شود. در تمام حجم ناحیه شبکه‌بندی شده لازم است که تعداد نقاط شبکه در طول موج ثابت باشد این نکته به دقت محاسباتی یکسان در تمام نقاط شبکه منجر می‌شود (کوماتیچ و ترامپ، ۱۹۹).

برای استفاده از روش المان‌های طیفی لازم است شبکه‌هایی بدون ساختار، همگراهدرال و منطبق ایجاد شود. شبکه‌های منطقه مورد نظر در این مطالعه با استفاده از نرم‌افزار CUBIT ساخته شده‌اند. رابطه بین حداکثر طول المان‌ها با بیشترین بسامد در مدل‌سازی با رابطه (۱) بیان می‌شود:

$$\Delta h = v_{min} T_0 \frac{n+1}{f(n)}, \quad (1)$$

که v_{min} کمینه سرعت موج در المان مورد نظر، T_0 کوتاه‌ترین پریودی است که در شبیه‌سازی با دقت محاسبه می‌شود و $f(n)$ یک تابع تجربی وابسته به تعداد نقاط در طول موج و درجه چندجمله‌ای n است. برای $n = 4$ خواهیم داشت: $f(n) = 5$.

در این مطالعه، ابعاد ناحیه مدل‌سازی‌ها، ۱۰۰ کیلومتر در ۶۰ کیلومتر، از ارتفاع ۶/۵ کیلومتر تا عمق ۶۰ کیلومتر، حدود این ناحیه عرض جغرافیایی ۶/۳۵ تا ۵/۳۶ و طول جغرافیایی ۵۱ تا ۵۲ درجه است. اطلاعاتی که در ساخت شبکه‌های منطقه در این مطالعه استفاده شده، عبارتند از:

۱- مدل پوسته به‌دست آمده توسط عباسی و

همکاران (۲۰۱۰) (جدول ۳)؛

۲- ملحوظ نمودن سرعت لایه زیر موهو با استفاده

از رابطه PREM با مقادیر ۱/۸ کیلومتر بر ثانیه

برای امواج طولی و ۶/۴ کیلومتر بر ثانیه برای

امواج برشی (دزینوسکی و همکاران، ۱۹۸۱)؛

۳- در نظر گرفتن چگالی مورد استفاده برای کل

ناحیه با توجه به مقادیر مدل PREM؛

۴- فاکتور ضریب کیفیت (Q) محاسبه شده توسط

جدول ۲. مدل پوسته یک بعدی بکار رفته در شبیه‌سازی‌ها.

عمق لایه (km)	سرعت موج P (km/s)	سرعت موج S (km/s)
۰	۵/۴	۳/۱
۳/۰	۵/۸	۳/۳
۷/۰	۶/۱	۳/۵
۱۶/۰	۶/۲۵	۳/۶
۲۴/۰	۶/۴	۳/۷

۴ داده‌ها و روش‌ها

یکی از مهمترین روش‌های عددی برای تحلیل خطر زمین‌لرزه‌ها انجام شبیه‌سازی‌های دقیق و با کیفیت امواج لرزه‌ای حاصل از زمین‌لرزه‌ها است. در این مطالعه، با استفاده از داده‌های موجود زمین‌شناسی منطقه و توپوگرافی سطحی، سناریوهای فرضی مختلف زمین‌لرزه بر روی گسل‌های مشاء، شمال تهران، کهریزک، ری و پارچین در بازه بسامدی ۰/۱ تا ۱ هرتز، شبیه‌سازی و اثر توپوگرافی روی امواج لرزه‌ای حاصل از این رویدادهای فرضی زمین‌لرزه در اطراف شهر تهران محاسبه شد.

شبیه‌سازی‌ها با استفاده از نرم‌افزار SPEC3D، که از روش المان‌های طیفی برای حل حالت ضعیف معادله موج در محیط زمین استفاده می‌کند، انجام شده است.

اولین گام در استفاده از روش المان طیفی ساختن شبکه‌هایی با کیفیت مناسب در منطقه مورد مطالعه است. در هنگام ساخت شبکه‌ها لازم است توجه شود که با انتخاب مناسب ابعاد و شکل آنها تعداد نقاط شبکه در کوتاه‌ترین طول موج مورد نظر به گونه‌ای باشد که تعادلی مناسب بین هزینه محاسبات و امکانات محاسباتی موجود برقرار و علاوه بر این، شرایط پایداری عددی محاسبات تضمین شود. شبکه‌بندی منطقه با المان‌های بد فرم و کیفیت ضعیف می‌تواند علاوه بر تضعیف کیفیت محاسبات، به ایجاد مشکلات مختلف از قبیل هزینه زیاد محاسباتی غیر ضروری، عدم همگرایی نتایج و نتایج

متفاوت داشته باشند و به این صورت می‌توان چشمه‌های بسیار متنوعی که در آن جزئیات لغزش در سطح گسل در نظر گرفته شود را لحاظ کرد. چشمه‌لرزه‌ای در نرم افزار Specfem3D با مکان، زمان، مدت دوام و پارامترهای مکانیسم کانونی چشمه به نرم‌افزار معرفی می‌شود و چشمه گسل محدود به صورت توالی از چشمه‌های نقطه‌ای با فواصل زمانی مشخص می‌شود.

در نبود داده‌های ثبت شده زمین‌لرزه بزرگ روی گسل‌های اطراف تهران برای شبیه‌سازی‌های گسل محدود توزیع فرضی از جنبش در روی صفحه گسل، فرض شد که در همه جای صفحه گسل جنبش، یکنواخت است و ناحیه شکستگی روی گسل با سرعت ثابت و به صورت شعاعی منتشر می‌شود. صفحه گسل در هر یک از سناریوها به قسمت‌هایی با ابعاد ۱×۱ کیلومتر تقسیم و در هر یک از سناریوها فرض شد که سرعت شکستگی ثابت باشد. در نرم‌افزار Specfem3D تابع زمانی چشمه به صورت یک تابع گاوسی در نظر گرفته می‌شود. در تمامی شبیه‌سازی‌ها، فضای مدل به ۶۴ قسمت تقسیم و محاسبات توسط ۶۴ پردازشگر به صورت موازی انجام و مدت زمان هر یک از شبیه‌سازی‌ها ۴۰ ثانیه در نظر گرفته شده است.

نقوی و همکاران (۲۰۱۲) برای البرز مرکزی $Q(f) = 267 f^{0.7}$ ؛

۵- مدل توپوگرافی SRTM90 (جارویس و همکاران، ۲۰۰۸) قابل دریافت از اینترنت به صورت رایگان.

در مدل‌سازی زمین‌لرزه با استفاده از روش المان‌های طیفی نیز می‌توان از روش گسل‌های محدود بهره برد. برای این کار لازم است که صفحه گسل به تعداد محدودی عناصر مستطیل شکل تقسیم شود که هر کدام از این عناصر به عنوان یک چشمه نقطه‌ای در نظر گرفته می‌شوند. نقطه شروع گسیختگی در مرکز یکی از این عناصر انتخاب شده و هنگامی که گسیختگی به مرکز هر یک از عناصر برسد، آن نقطه، شروع به تابش انرژی می‌کند در نتیجه، امواج منتشر شده از این عناصر با تأخیر زمانی مختلف به نقطه مشاهده می‌رسند و با توجه به فاصله و هندسه محیط می‌توانند اثری برهم افزایش دهند و یا کاهش داده باشند. تعداد زیرچشمه‌ها به گونه‌ای در نظر گرفته می‌شود که گشتاور لرزه‌ای کل برای زمین‌لرزه مورد نظر ثابت باشد. زیرچشمه‌ها می‌توانند به گونه‌ای انتخاب شوند که عناصر مختلف، گشتاور لرزه‌ای و مشخصات کانونی

جدول ۳. سناریوهای زمین‌لرزه بکار گرفته شده در شبیه‌سازی‌ها. این سناریوها در شکل ۲ نشان داده شده‌اند.

نام گسل	شمال ری	شمال تهران	کهریزک	مشاء	پارچین	پارچین
نام سناریو	NR	NT	KA	MO	PA1	PA2
بزرگا (Mw)	۶/۵	۷/۲	۷/۰	۷/۰	۷/۵	۷/۵
عرض جغرافیایی (درجه)	۳۵/۶۴	۳۵/۸۷	۳۵/۵۳	۳۵/۷۶	۳۵/۶۱	۳۵/۴۲
مبداء طول جغرافیایی (درجه)	۵۱/۲۸	۵۱/۶۴	۵۱/۳۴	۵۲/۱۵	۵۵/۵۵	۵۱/۹۵
عمق	۲۲	۲۲	۲۲	۲۲	۲۴	۲۴
جهت شکستگی	غرب	غرب	دو طرفه	شمال غرب	جنوب شرق	شمال غرب
طول گسل (km)	۲۵	۵۵	۵۰	۵۰	۶۰	۶۰
آزیموت	۲۶۳	۲۶۰	۲۷۰	۲۸۵	۲۹۰	۲۹۰
زاویه شیب	۷۵	۷۵	۷۰	۵۰	۴۰	۴۰
زاویه لغزش	۹۰	۹۰	۹۰	۹۰	۹۰	۹۰
سرعت شکستگی	۲۸۰۰	۲۸۰۰	۲۸۰۰	۲۸۰۰	۳۰۰۰	۳۰۰۰

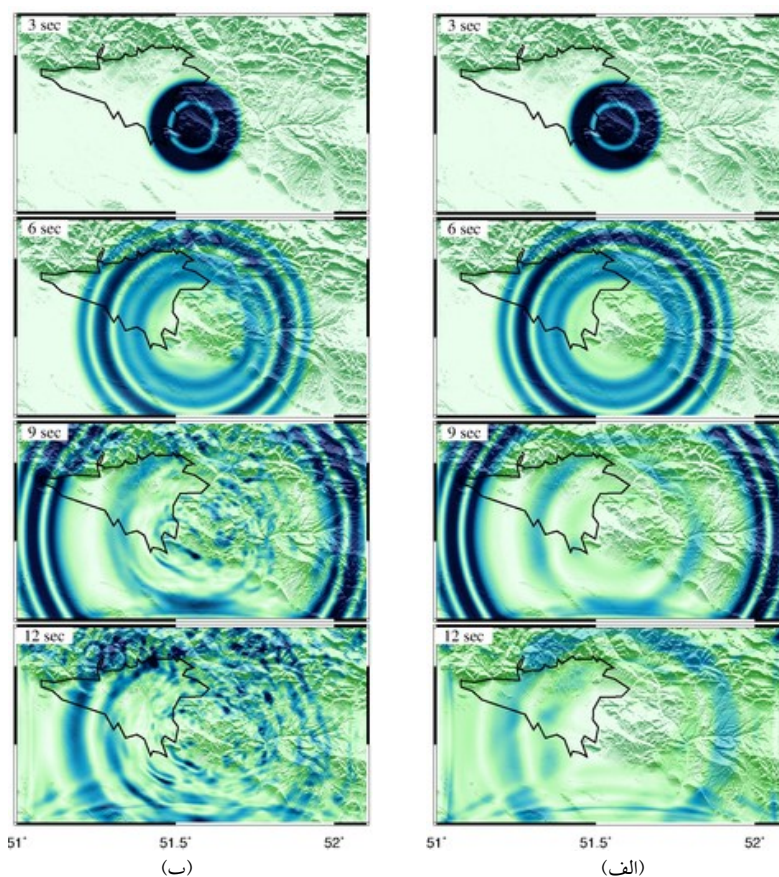
۵ نتایج و بحث

جنبش زمین حاصل از زمین‌لرزه‌ها علاوه بر مشخصات چشمه زمین‌لرزه به محیط انتشار و اثرهای ساختگاه وابسته است. معمولاً اثرهای ساختگاه، بویژه اثر توپوگرافی در مدل‌های ناحیه‌ای جنبش زمین لحاظ نمی‌شوند؛ در حالی که می‌توانند گاهی اوقات اثرهای قابل توجهی بر روی دامنه زمین‌لرزه‌های ثبت شده ایجاد کنند.

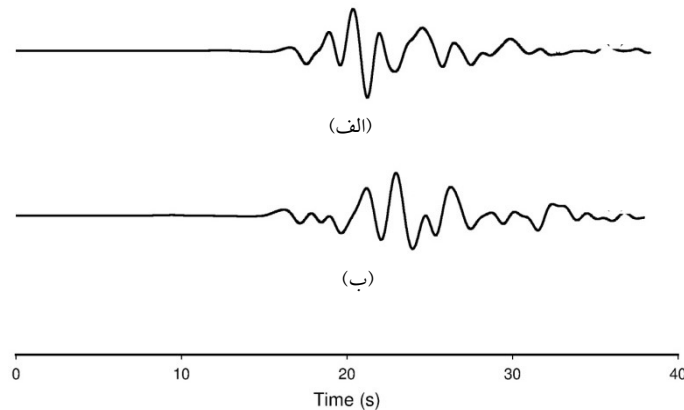
در این مطالعه با استفاده از شبیه‌سازی سه‌بعدی امواج لرزه‌ای حاصل از شش سناریو فرضی زمین‌لرزه در اطراف تهران، شامل سه چشمه نقطه‌ای روی گسل‌های مشاء، شمال تهران و پارچین و سه سناریو با گسل‌های محدود روی گسل‌های ری، پارچین و کهریزک، اثر توپوگرافی بر روی امواج لرزه‌ای ثبت شده در محدوده تهران بررسی

شد. این سناریوها در جدول ۳ خلاصه شده‌اند. تصویر سطحی صفحه گسل برای سناریوهای چشمه محدود و مکان رومرکز برای چشمه‌های نقطه‌ای در شکل ۲ نشان داده شده‌اند.

شکل ۳ تصویرهایی از لحظه‌های مختلف انتشار مؤلفه قائم میدان موج برای چشمه نقطه‌ای بر روی گسل پارچین را نشان می‌دهد. در این شکل انتشار جبهه موج با فواصل زمانی سه ثانیه نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که توپوگرافی باعث پراکندگی امواج شده و در بعضی نقاط دامنه را افزایش داده است. نمونه‌ای از شکل موج‌های شبیه‌سازی شده برای مؤلفه قائم در یک ایستگاه با و بدون لحاظ کردن اثر توپوگرافی در شکل ۴ مشاهده می‌شود.



شکل ۳. لحظه‌های مختلف انتشار جبهه موج در (الف) شبیه‌سازی‌ها با و (ب) بدون لحاظ کردن اثر توپوگرافی.



شکل ۴. نمونه‌هایی از شتابنگارهای شبیه‌سازی شده برای حالت یک‌بعدی و با لحاظ کردن توپوگرافی.

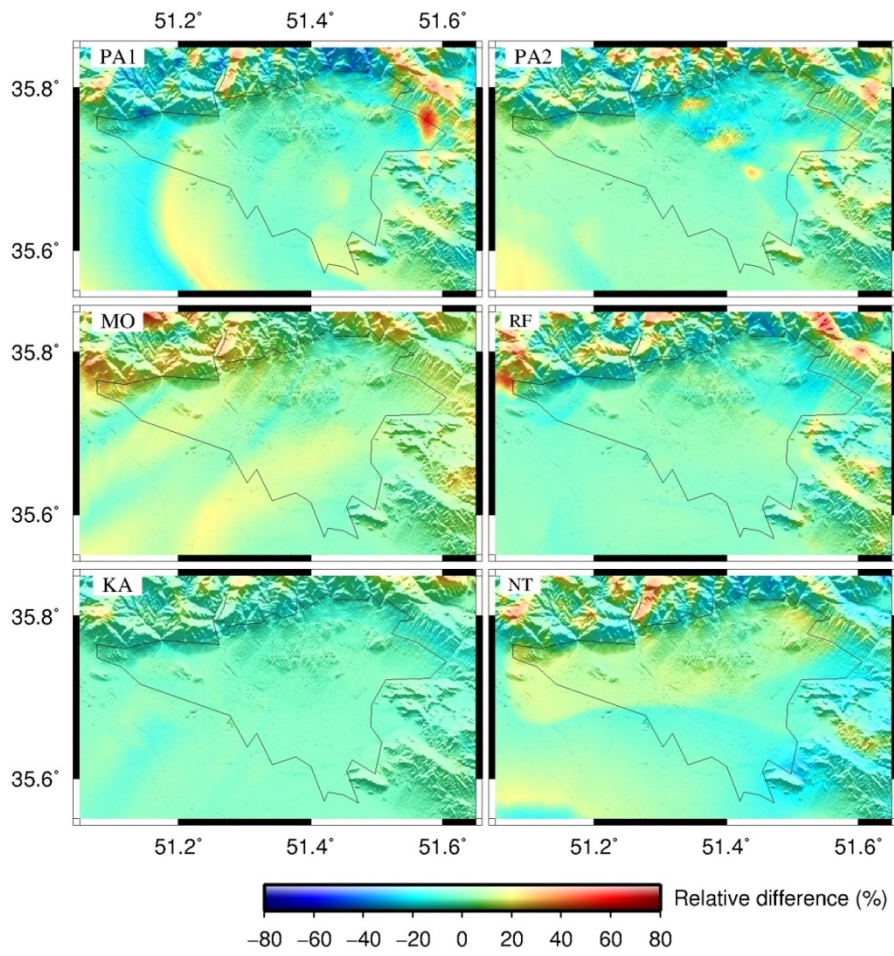
سناریو گسل پارچین (PA2) این عدد در نقاطی از سطح شهر تا $\pm 30\%$ درصد می‌رسد.

می‌توان با محاسبه متوسط بزرگنمایی حاصل از سناریوهای مختلف ایده‌ای از مکان‌هایی که به‌طور متوسط بزرگنمایی بیشتری در آنها روی می‌دهد به‌دست آورد. شکل ۶ با میانگین‌گیری روی نتایج شش سناریو عنوان شده، به‌دست آمده است. مشاهده می‌شود که در سطح شهر تهران میزان بزرگنمایی ناچیز، قابل صرف‌نظر و بین $\pm 10\%$ درصد است و در کوه‌ها و دره‌های اطراف تهران، توپوگرافی تأثیر بیشتری دارد و تا 30% درصد تغییرات ایجاد می‌کند.

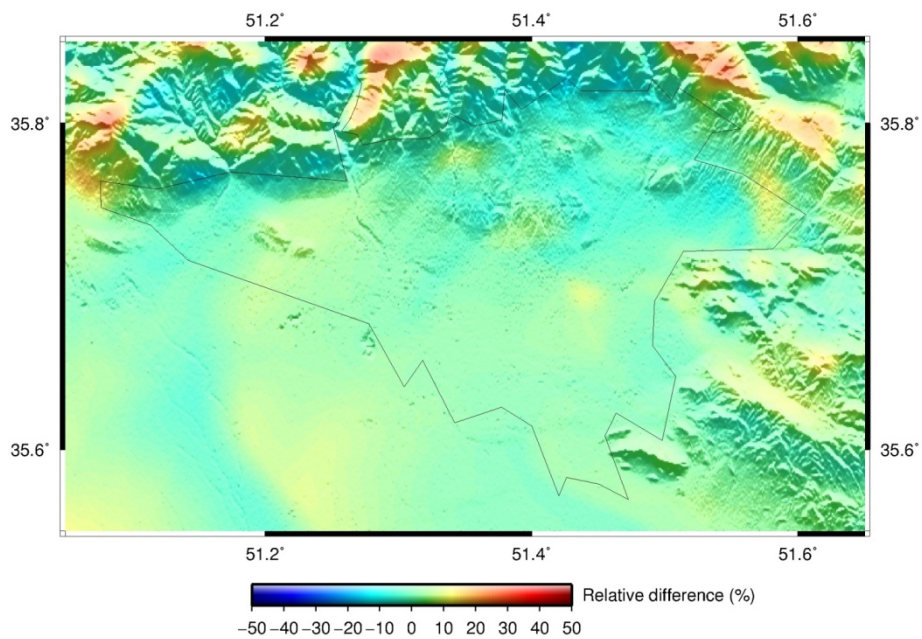
نتایج این شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که اثر توپوگرافی وابسته به سناریو است و برای سناریوهای مختلف روندهای متفاوتی در سطح شهر و کوه‌های اطراف مشاهده می‌شود. با توجه به اینکه در این مطالعه از داده‌های توپوگرافی با دقت کم، که به صورت رایگان در اینترنت موجودند، استفاده شده و امکان تفکیک پستی و بلندی‌های کوچکتر در سطح شهر مانند تپه‌ها را ندارد، لازم است که این مطالعات با دقت بیشتر و داده‌های با کیفیت‌تر انجام شوند تا جزئیات اثر توپوگرافی در شهر تهران حاصل از پستی بلندی‌های تپه‌های شمال شهر نیز در نظر گرفته شوند.

برای مقایسه نتایج مدل‌سازی و محاسبه میزان بزرگنمایی در هر سناریو زمین‌لرزه فرضی، اختلاف نسبی بین شبیه‌سازی با و بدون اثر توپوگرافی را که از تفاضل شتاب بیشینه به‌دست آمده با در نظر گرفتن اثر توپوگرافی و بدون آن، تقسیم بر میانگین این دو عدد ضرب در 100% برای محاسبه درصد، به‌دست آورده و به‌صورت یک نقشه در محدوده مورد نظر رسم می‌شود.

نقشه توزیع بزرگنمایی حاصل از اثر توپوگرافی برای سناریوهای مختلف شبیه‌سازی شده در این مطالعه در شکل ۵ مشاهده می‌شود. در این شکل رنگ‌های آبی نشان‌دهنده کاهش دامنه و قرمز نشان‌دهنده افزایش دامنه است. اثر توپوگرافی در همه سناریوها، اکثراً در قله کوه‌ها و دره‌های شمال شهر بیشترین مقدار خود را دارد. در قله کوه‌ها اکثراً افزایش دامنه کمتر از 50% درصد و در دره‌ها کاهش دامنه‌ای تا منفی 50% درصد مشاهده می‌شود. این مشاهده با مشاهدات و نتایج مطالعات مختلف که اثر توپوگرافی را بر روی قله‌های کوه‌ها تا عدد 50% درصد و در درون دره‌ها تا عدد منفی 50% درصد، نشان داده‌اند، تطابق دارد (لی و همکاران، ۲۰۰۹؛ لی و همکاران، ۲۰۰۸). در سطح شهر تهران میزان این اثر وابسته به سناریوهای مختلف است و در اکثر سناریوها عددی بین $\pm 10\%$ درصد مشاهده می‌شود؛ ولی به عنوان مثال، برای



شکل ۵. اختلاف نسبی بین نتایج شبیه‌سازی با و بدون در نظر گرفتن اثر توپوگرافی در سناریوهای مختلف زمین‌لرزه در اطراف تهران.



شکل ۶. میانگین اثر توپوگرافی حاصل از شش سناریو مختلف در شهر تهران.

- Abbasi, A., Nasrabadi, A., Tatar, M., Yaminifard, F., Abbassi, M. R., Hatzfeld, D. and Priestley, K., 2010, Crustal velocity structure in the southern edge of the Central Alborz (Iran): *Journal of Geodynamics*, **49**, 68-78.
- Allen, M. B., Ghassemi, M. R., Sharabi, M. and Qoraishi, M., 2003, Accomodation of late Cenozoic oblique shortening in the Alborz range, northern Iran: *Journal of Structural Geology*, **25**, 659 – 672.
- Allenbach, P., 1966, *Geologie und Petrographie des Damavand und seiner umgebung (central Alborz)*, Iran: Geol. Mitt. Geol. Inst. Eth univ. Zurich, n. s., **63**, 144 pp.
- Ambraseys, N. N. and Melville, C. P., 1982, *A History of Persian Earthquakes*: Cambridge University Press, London. 219 p.
- Berberian, M., Qorashi, B., Arzhang-ravesh, A. and Mohajer-Ashjai, A., 1985, Recent tectonics, seismotectonics and earthquake fault hazard investigations in the greater Tehran region: contribution to the seismotectonics of Iran: Part V, Geological Survey of Iran, report 56, 316 pp, 1985.
- Berberian, M. and King, G. C., 1981, Towards a paleogeography and tectonic evolution of Iran: *Canadian Journal of Earth Science*, **18**, 210-265.
- Berberian, M., 1983, The southern Caspian: A compressional depression floored by a trapped, modified oceanic crust: *Canadian Journal of Earth Science*, **20**, 163-183.
- Berberian, M., Qorashi, M., Arzhang-ravesh, B. and Mohajer-Ashjai, A., 1993, Recent tectonics, seismotectonics and earthquake fault hazard investigations in the Greater Tehran region: contribution to the seismotectonics of Iran: part V., Geological Survey of Iran, Report 56, 316 pp.
- Berberian, M., and Yeats, R. S., 2001, Contribution of archeological data to studies of earthquake history in the Iranian plateau: *Journal of Structural Geology*, **23**, 563 – 584.
- De Martini, P. M., Hessami, K., Pantosi, D., Addezio, G., Alinaghi, H. and Ghafuri Ashtiani, M., 1998, A geologic contribution to the evaluation of the seismic potential of the Kahrizak fault (Tehran, Iran): *Tectonophysics*, **287**, 187 – 199.
- Dziewonski, A. M. and Anderson, D. L., 1981b, Preliminary Reference Earth Model (PREM): *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, **25**, 297-356.

۶ نتیجه‌گیری

در این مطالعه با استفاده از شبیه‌سازی عددی چند سناریوی فرضی زمین‌لرزه در اطراف شهر تهران با استفاده از روش المان طیفی، اثر توپوگرافی حاصل از انتشار امواج این زمین‌لرزه‌ها بررسی شد. به این منظور، نقشه‌های بزرگنمایی در بازه بسامدی ۰/۱ تا ۱ هرتز، برای بیشینه شتاب به‌دست آمده در شش سناریو مختلف بر روی گسل‌های اطراف تهران، با مقایسه شبیه‌سازی‌هایی با و بدون در نظر گرفتن اثر توپوگرافی، محاسبه شد.

شبیه‌سازی‌ها نشان داد که مقادیر بزرگنمایی مشاهده شده بر اثر توپوگرافی، وابسته به سناریوهای مختلف است و در سطح شهر تهران مقادیر بین $\pm 30\%$ درصد در سناریوهای مختلف و در کوه‌های شمال شهر مقادیر بین $\pm 50\%$ درصد مشاهده شد. با میانگین‌گیری از نتایج سناریوهای مختلف به‌طور متوسط اثر توپوگرافی به‌دست آمده در سطح شهر تهران ناچیز است و مقدار آن بین مثبت و منفی ۱۰ درصد در محدوده شهر تهران و بین مثبت و منفی ۳۰ درصد در کوه‌های اطراف شهر مشاهده شد.

تشکر و قدردانی

این پژوهش با حمایت مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران انجام شده که بدینوسیله از مسؤولین محترم مؤسسه سپاسگزاری می‌شود.

منابع

- بربریان، م.، قریشی، م.، ارژنگ‌گوش، ب. و مهاجرآشجعی، ا.، ۱۳۶۴، پژوهش و بررسی ژرف نوزمین‌ساخت، لرزه‌زمین‌ساخت و خطر گسلش زمین‌لرزه-گسلش در گستره تهران و پیرامون: سازمان زمین‌شناسی کشور، گزارش ۶۱، ۱۹۷ص.

- International Journal of Geophysics, Doi: 10.1155/2012/673506.
- Olsen, K. B., Archuleta, R. J., and Matarese, J. R., 1995, Three-dimensional simulation of a magnitude 7.75 earthquake on the San Andreas Fault: *Science*, **270**, 1628-1632.
- Olsen, K. B., 2000, Site Amplification in the Los Angeles Basin from Three Dimensional Modeling of Ground Motion: *Bulletin of the Seismological Society of America*, **90**(6B), S77-S94. doi:10.1785/0120000506
- Sengor, A. M. C., Cin, A., Rowley, D. B. and Nie, S. Y., 1993, Space-time patterns of magmatism along the Tethysides: a preliminary study: *Journal of Geology*, **101**, 51-84.
- Tchalenko, J. S., Berberian, M., Iranmanesh, H., Bailly, M. and Arsovsky, M., 1974, Tectonic framework of the Tehran region: *Geological Survey of Iran*, Report no 29.
- Tchalenko, J. S., 1975, Seismotectonics framework of the North Tehran fault: *Tectonophysics*, **29**, 411 – 420.
- Tromp, J., Komatitsch, D. and Liu, Q., 2008, Spectral-element and adjoint methods in seismology: *Communications In Computational Physics*, **3**(1), 1-32
- Vernant, P., Nilforoushan, F., Chry, J., Bayera, R., Djamour, Y., Masson, F., Nankali, H., Ritz, J. F., Sedighi, M. and Tavakoli, F., 2004, Deciphering oblique shortening of Central Alborz in Iran using geodetic data: *Earth and Planetary Science Letters*, **223**, 177-185.
- Zanchi, A., Berra, F., Mattei, M., Ghassemi, M. R., and Sabouri, J., 2006, Inversion tectonics in central Alborz, Iran: *Journal of Structural Geology*, **28**, 2023-2037.
- Jackson, J. and McKenzie, D., 1984, Active tectonics of the Alpine-Himalayan Belt between western Turkey and Pakistan: *The Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, **77**, 185 – 264.
- Jackson, J. A., Priestley, K., Allen, M. and Berberian, M., 2002, Active tectonics of the South Caspian Basin: *Geophysical Journal International*, **148**, 214-245.
- Jarvis, A., Reuter, H. I., Nelson, A. and Guevara, E., 2008, Hole-filled SRTM for the globe Version 4, available from the CGIAR-CSI SRTM 90m Database. (<http://srtm.csi.cgiar.org>).
- Komatitsch, D. and Vilotte, J. P., 1998, The spectral element method: an efficient tool to simulate the seismic response of 2D and 3D geological structures: *Bulletin of the Seismological Society of America*, **88**, 368-392.
- Komatitsch, D. and Tromp, J., 1999, Introduction to the spectral-element method for 3-D seismic wave propagation: *Geophysical Journal International*, **139**(3), 806-822.
- Komatitsch, D., Liu, Q., Tromp, J., Stidham, P. C., and Shaw, J. H., 2004, Simulations of ground motion in the Los Angeles basin based upon the spectral-element method: *Bulletin of the Seismological Society of America*, **94**, 187-206.
- Komatitsch, D., Erlebacher, G., Göddeke, D. and Michéaa, D., 2010, High-order finite-element seismic wave propagation modeling with MPI on a large GPU cluster: *Journal of Computational Physics*, **229**, 7692–7714.
- Naghavi, M., Shomali, Z. H. and Zare, M., 2012, Lg Coda Variations in North-Central Iran:

An investigation on the effect of topography on ground motion amplitudes, using 3D simulation of seismic waves in Tehran

Ehsan Karkooti^{*1}, Zaher Hossein Shomali² and Mehrdad Pakzad³

¹Ph. D. Student of Geophysics, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

²Associate Professor, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

³Assistant Professor, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

(Received: 13 December 2015, Accepted: 28 September 2016)

Summary

Tehran, the capital of Iran, is located in the foothills of Alborz Mountains in a very seismically active region and is surrounded by many active quaternary faults with the potential for devastating earthquakes. This city has a daytime population of 12 million people and is the political and economical capital of Iran as well. These facts together with the existence of neighborhoods with old buildings that are poorly constructed increases the importance of different studies to better characterize the nature of ground shaking from future probable earthquakes in the city.

With the increasing computational power in recent years, the seismic waveform simulation has become one of the preferred methods for studying the seismic hazard in regions like Tehran. The topography effect, in this regard, is one of the components of site effects that need to be included in hazard assessment studies. It is a known fact that the surface topography has significant effects on the earthquake ground motion, especially in mountainous areas with ridges and valleys. As has been observed in the annals of past earthquakes and numerical simulations, topography, in general, increases the ground shaking amplitude on mountain tops and reduces the ground motion amplitude in valleys.

The Spectral Element Method, combining the power of Pseudo Spectral methods with the geometrical flexibility of Finite Element Method, is one of the best methods for modeling the seismic wave propagation in regions such as Tehran, with notable surface topography.

In the present research, the Spectral Element Method was employed in order to simulate three point sources and three extended source earthquake scenarios both within and around Tehran city and to investigate the role of surface topography on the ground shaking inside the city. The topography effect was investigated by comparing the results of simulations with and without incorporating the surface topography in meshes; the resulting amplification was presented as color maps in the region.

Simulations were performed via SPECFEM3D software package which implements the Spectral Element Method to simulate the seismic wave propagation in the region. The first step in using the Spectral element Method was to create quality meshes in the study area; in this regard, CUBIT program is employed so as to create the hexahedral meshes in the model area. The extent of the model area was 100 x 60 kilometers horizontally and, vertically, from the ground surface to the depth of 60 kilometers with limits of latitude and longitude of 35.5 to 36.5 degrees and 51 to 52 degrees, respectively.

The peak ground acceleration amplification maps were presented for the topography effect in the frequency range of 0.01 to 1 Hz. The findings indicated that the topography effect inside Tehran city is dependent upon the earthquake scenario and the resulting amplification from topography effect inside the city is generally low and negligible. On average, the amplification resulting from the topography inside the city was between -10% to +10% which could reach as high as $\pm 30\%$ in certain earthquake scenarios at certain locations within the city. In mountainous areas near the city, we observed amplification on the peaks and de-amplification in the valleys; the amplification fell between -50% to +50 %.

Keywords: seismic waveform simulation, topography effect, Tehran, Spectral Element Method

*Corresponding author:

ekarkooti@ut.ac.ir