

تحلیل خطر لرزه‌ای شهر جدید پردیس با روش احتمالاتی

علی بیت‌اللهی^{۱*}، نگار سودمند^۲، فاطمه دهقان فاروجی^۱ و غزاله رزاقیان^۳

^۱ استادیار، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران، ایران

^۲ دانشجوی دکتری دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال، تهران، ایران

^۳ استادیار، گروه زمین‌شناسی، واحد دماوند، دانشگاه آزاد اسلامی، دماوند ایران، مرکز تحقیقات زلزله و بلایای طبیعی، واحد دماوند، دانشگاه آزاد اسلامی، دماوند، ایران

(دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۰۳، پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۲۳)

چکیده

شهر جدید پردیس که در ۱۷ کیلومتری تهران واقع شده است، از شمال به رشته‌کوه‌های البرز، از غرب به منطقه جاجرد، از جنوب به روستاهای کرشت، سیاه‌سنگ و طاهرآباد و از شرق به بومهن محدود است. این شهر که در حوضه آبریز رودخانه جاجرد قرار گرفته است، حدود ۳۶۰۰ هکتار وسعت دارد و شامل نه فاز است که شش فاز آن مسکونی و سه فاز دیگر تحقیقاتی، صنعتی و گردشگری است. با توجه به واقع شدن شهر جدید پردیس در استان تهران و همچنین نزدیک بودن آن به گسل‌های مشا و شمال تهران که سابقه لرزه‌خیزی دارند، در این مقاله لرزه‌خیزی و تحلیل خطر لرزه‌ای شهر جدید پردیس با روش احتمالاتی مطالعه می‌شود. پس از برآورد پارامترهای هر چشمه که شامل مقادیر β ، λ و بیشینه بزرگای چشمداشتی است، بیشینه شتاب جنبش زمین حاصل از فعالیت چشمه‌ها برای دوره بازگشت ۴۷۵ سال در سنگ کف برابر با $g/۰.۳۴$ به دست آمد. با اعمال اثر خاک با استفاده از گمانه‌های موجود که بیانگر خصوصیات ژئوتکنیکی نوع خاک ساختمانی است، بیشترین شتاب در منطقه شرقی شهر و برابر با $g/۰.۳۷$ به دست آمد.

واژه‌های کلیدی: تحلیل خطر لرزه‌ای، روش احتمالاتی، شهر جدید پردیس، دوره بازگشت، چشمه زمین‌لرزه

۱ مقدمه

به دلیل قرارگیری ایران در کمربند لرزه خیز آلپ- هیمالیا، اغلب شهرهای ایران لرزه خیزی زیادی دارند؛ بنابراین نمادهای شهری آسیب پذیر هستند و خطرپذیری لرزه‌ای آنها نیز زیاد است. برای تخمین کمی خطرهای ناشی از وقوع زمین لرزه در یک منطقه، از روش تحلیل خطر لرزه‌ای استفاده می‌شود. معمولاً روش‌های گوناگونی برای تحلیل خطر زمین لرزه به کار می‌روند که مهم‌ترین آنها دو روش تعینی و احتمالاتی است. در روش تعینی از مطالعات و تحقیقات تجربی و برای بیان خطر زمین لرزه از رخدادهای زمین لرزه و چشمه‌های لرزه‌ای مجزا استفاده می‌شود. در این روش بزرگ‌ترین رخداد زلزله بر اساس گسل مسبب و همچنین فاصله از ساختگاه با اهمیت زیاد انتخاب می‌شود و با استفاده از یک یا چند رابطه کاهندگی، پارامترهای جنبش زمین برآورد می‌شود (کمپل و بزرگ‌نیا، ۲۰۰۳). در روش احتمالاتی در یک یا چندین مکان، مدل‌های محتمل مکان رخداد، بزرگ‌ا، زمان رخداد و همچنین اثر زلزله‌ها را با هم ترکیب می‌کنند و احتمال وقوع جنبش شدید زمین در یک مکان در بازه زمانی خاص محاسبه می‌شود. یکی از دلایل استفاده از روش احتمالاتی، محاسبه مجموعه رویدادهای محتمل برای احتمال فزونی با در نظر گرفتن عدم قطعیت پارامترهای لرزه‌خیزی برای یک سطح خاص است که در نتیجه آن، پاسخ‌ها به واقعیت نزدیک تر است. پس از رخداد زمین لرزه لانگ‌بیچ کالیفرنیا در سال ۱۹۳۳ که خرابی‌های زیادی به بار آورد، مهندسان آمریکایی برای اولین بار تحلیل خطر لرزه‌ای را برای کدهای ساختمانی معرفی کردند. در سال‌های ۱۹۴۰ و ۱۹۵۰ این مهم را مهندسان زلزله گسترش دادند (زارع، ۱۳۸۴) و نقشه‌های خطر لرزه‌ای احتمالاتی معرفی شدند. در سال ۱۹۷۰ برای اولین بار نقشه‌های ملی خطرپذیری احتمالاتی در کانادا طراحی شدند. فرانکل (۱۹۹۵) روشی را ارائه داد که در آن محاسبه لرزه‌خیزی چشمه‌ها نسبت به روش مرسوم، متفاوت و به صورت

هموار شده مکانی بود. البته در این روش از اطلاعات لرزه‌زمین‌ساختی، زمین‌شناسی، دیرینه‌شناسی و اطلاعات مربوط به گسل‌های فعال در محاسبات خطر زمین لرزه استفاده نمی‌شد. شی و همکاران (۱۹۹۲) روش دیگری را برای برآورد خطر زمین لرزه به روش احتمالاتی پیشنهاد کردند که در آن استفاده از اطلاعات فوق امکان پذیر بود.

۲ روش تحقیق

استفاده از مفاهیم احتمالاتی، امکان تعیین عدم قطعیت در بزرگ‌ا، موقعیت و میزان رویدادهای زمین لرزه و همچنین تغییرات در ویژگی‌های جنبش زمین را فراهم می‌کند. در این روش با استفاده از اطلاعات زمین‌شناسی، لرزه‌خیزی و روابط کاهندگی مناسب، بیشینه جنبش زمین برای دوره‌های زمانی متفاوت تعیین می‌شود. این روش شناسی بر پایه تحلیل خطر کرنل (کرنل، ۱۹۶۸) بیان شده است.

اولین گام در تحلیل خطر لرزه‌ای به روش احتمالاتی، تعیین چشمه‌های لرزه‌زا در اطراف ساختگاهی است که احتمال وقوع زلزله مخرب در آن وجود دارد. در تحلیل خطر احتمالاتی فرض می‌شود احتمال وقوع در تمام نقاط هر چشمه لرزه‌زا در نزدیک‌ترین فاصله با ساختگاه، یک و در سایر نقاط صفر است (زارع، ۱۳۸۴).

در دومین گام تحلیل خطر لرزه‌ای، لرزه‌خیزی یا توزیع زمانی رویداد زمین لرزه‌ها بررسی می‌شود. در این مرحله میانگین رخداد یک زمین لرزه برای هر پهنه لرزه‌زا به دست می‌آید.

گام سوم در تحلیل خطر احتمالاتی، انتخاب رابطه کاهندگی مناسب برای محدوده مورد مطالعه است. در استفاده از روابط کاهندگی، عدم قطعیت‌های موجود لحاظ می‌شود.

در گام آخر، عدم قطعیت‌ها در موقعیت زمین لرزه و بزرگ‌ای آن در هنگام تعیین پارامترهای جنبش نیرومند زمین با هم ترکیب می‌شوند تا پارامترهای جنبش نیرومند

زمین در یک دوره زمانی خاص تعیین شود.

استفاده شد (شکل ۱).

بر پایه اطلاعات موجود، در شعاع ۱۰۰ کیلومتری شهر پردیس گسل‌های زیادی قرار گرفته که اطلاعات کامل این گسل‌ها در فایل GIS آورده شده است. گسل‌های مشا، شمال تهران، فیروزکوه و البرز (خزر) مهم‌ترین گسل‌ها به لحاظ زمین‌ساختی و پیشینه لرزه‌خیزی هستند. **گسل مشا:** این گسل با طول حدود ۲۰۰ تا ۲۲۰ کیلومتر در دامنه جنوبی البرز واقع شده است. قطعه شرقی این گسل با زلزله سال ۱۶۶۵ میلادی با بزرگای ۶ تا ۷ در مقیاس ریشتر و زلزله سال ۱۸۳۰ میلادی با بزرگای ۷ در مقیاس ریشتر جابه‌جا شده است.

گسل شمال تهران: این گسل در نواحی مختلف شیب متغیری دارد که از ۱۰ درجه تا ۸۰ درجه اندازه‌گیری شده است. برای طول گسل شمال تهران در منابع مختلف اعداد متفاوتی ذکر شده است، ولی آنچه مسلم است این پهنه گسلی از شرق دره لشگرک (ده سبو) در شمال شرق تهران تا نزدیکی روستای کلاک کرج در شمال غرب امتداد و بیش از ۹۰ کیلومتر طول دارد.

گسل فیروزکوه: این گسل به طول حدود ۷۰ کیلومتر از پایانه شرقی گسل مشا در غرب روستای امین‌آباد تا گردنه گدوک ادامه دارد. سازوکار گسل فیروزکوه امتدادلغز چپگرد با مؤلفه شیب‌لغز است. پژوهش‌های پارینه‌لرزه‌شناسی نشان‌دهنده رخداد زمین‌لرزه‌های پارینه با بزرگای حدود ۷ بر اثر جنبایی گسل فیروزکوه است.

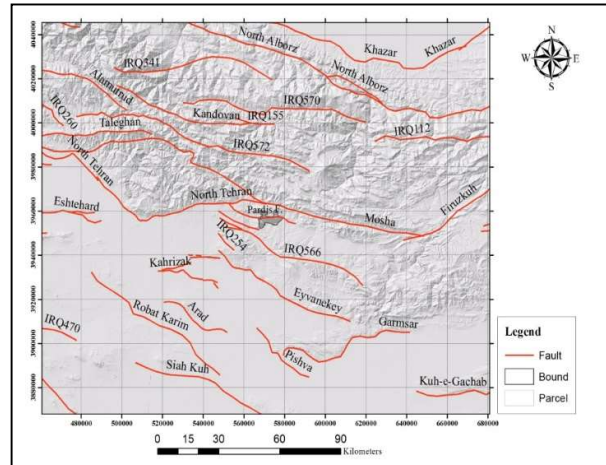
گسل البرز (گسل خزر): در دامنه شمالی البرز و در مرز بین منطقه البرز و حوضه ترشیر خزر جنوبی، گسل البرز واقع شده است. این گسل با راستای کلی شرقی- غربی و طول حدود ۵۵۰ کیلومتر به احتمال زیاد نشان‌دهنده محل زمین‌درز پالئوتتیس در شمال ایران است. شیب این گسل به سمت شمال و سازوکار اصلی آن از نوع رانندگی است. بسیاری از زمین‌لرزه‌های نوار شمالی ایران مربوط به جنبایی

۳ زمین‌شناسی شهر جدید پردیس

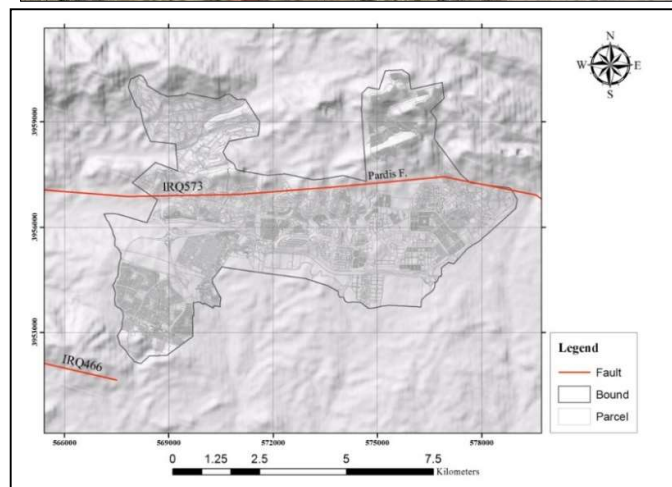
شهر پردیس در دامنه جنوبی رشته‌کوه‌های البرز مرکزی و در حوضه آبریز رودخانه جاجرود واقع شده است. واحدهای سنگی دوران سنوزوئیک، شامل توف‌های ضخیم‌لایه، شیل‌های توفی، آگلومراها و سنگ‌های آذرآواری و همچنین گدازه‌های آندزیتی و بازالتی متعلق به سازند کرج با سن ائوسن میانی، همراه با توده‌های آذرین با سن اولیگومیوسن و رسوبات سازند هزاردره با سن پلیوکواترنری، سنگ بستر اصلی این منطقه و شهر پردیس را تشکیل می‌دهد. به‌طور کلی ریخت‌شناسی در منطقه مورد مطالعه ناشی از حرکت و فعالیت گسل‌های بزرگ و به‌صورت شکننده (ماسون و همکاران، ۲۰۰۷) است. این گسل‌ها با حرکات معکوس و امتدادلغز از زمان میوسن تاکنون تغییر شکل و ریخت‌شناسی منطقه را کنترل کرده‌اند (اکسن و همکاران، ۲۰۰۱؛ جکسون و همکاران، ۲۰۰۲؛ آلن و همکاران، ۲۰۰۳؛ ریتز و همکاران، ۲۰۰۶ و سلیمانی آزاد، ۲۰۰۹). در واقع نوزمین‌ساخت منطقه پردیس در شرق استان تهران تحت تأثیر گسل‌های بزرگ و کوچک منطقه قرار دارد (احتشامی معین‌آبادی، ۱۳۹۵).

۳-۱ لرزه‌زمین‌ساخت و لرزه‌خیزی شهر جدید پردیس
گسل‌ها یکی از ساختارهای زمین‌ساختی اصلی در پوسته زمین هستند. گسل‌های فعال در هر ناحیه، مهم‌ترین چشمه‌های لرزه‌ای آن ناحیه محسوب می‌شوند. در محاسبات خطر زمین‌لرزه لازم است گسل‌های منطقه مورد نظر شناسایی و معرفی شوند؛ بنابراین گسل‌های فعال واقع در شعاع ۱۰۰ کیلومتری شهر پردیس بررسی شدند. برای این کار از نقشه ۱:۱۰۰۰,۰۰۰ گسل‌های ایران (سازمان زمین‌شناسی کشور) و نقشه ۱:۱۰۰۰,۰۰۰ گسل‌های فعال ایران (پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله)

گسل البرز هستند. گسل‌های رباط کریم، شمال و جنوب ری و کوشک از دیگر گسل‌های محدوده مورد مطالعه می‌توان به نصرت اشاره کرد (شکل ۱).



شکل ۱. نقشه گسل‌های شعاع ۱۰۰ کیلومتری شهر پردیس.



شکل ۲. نقشه گسل‌های محدوده شهری پردیس و گستره پیرامون آن از نمای نزدیک‌تر.

۳-۲ گسل‌های عبوری از شهر جدید پردیس

افزون بر گسل‌های زیادی که در شعاع ۱۰۰ کیلومتری شهر پردیس دیده می‌شوند، گسل‌هایی که از محدوده شهری این شهر عبور می‌کنند هم اهمیت زیادی دارند. گسل‌هایی مثل گسل مشا، گسل لتیان و گسل تلو پایین از نزدیکی شهر پردیس عبور می‌کنند، ولی در نقشه گسل‌های فعال ایران که پژوهشگاه زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله آن را تهیه کرده است، عبور گسلی از داخل شهر پردیس دیده می‌شود که بسیار مهم است. گسل مذکور که در نقشه مذکور با نام IRQ 573 نام‌گذاری شده است، در این تحقیق با نام **گسل پردیس** معرفی می‌شود (شکل ۲). بدیهی است شناسایی و تدقیق محل این گسل‌ها در تحلیل خطر لرزه‌ای شهر پردیس اهمیت بسیاری دارد و با تهیه نقشه حریم این گسل‌ها می‌توان تمهیدات مهندسی ویژه‌ای برای توسعه شهری پردیس ارائه کرد.

۳-۳ بررسی میدانی گسل‌ها

خطواره زمین‌ساختی IRQ 573 یا گسل پردیس بی‌شک یکی از مهم‌ترین گسل‌های داخل این شهر است. در بررسی‌های میدانی تلاش شد رخنمون‌های این گسل شناسایی شود. در مناطق غربی پردیس و در امتداد بلوار شهید صیاد شیرازی به‌وضوح می‌توان شاخه‌های متعدد گسلی مرتبط با گسل پردیس را مشاهده کرد (شکل‌های ۳ تا ۵). بریدگی واحدهای سنگی نشان‌دهنده فعالیت این گسل است که متأسفانه در حریم آن ساخت‌وسازهای متعددی دیده می‌شود. همچنین در بخش‌هایی از فاز ۱۱ نشانه‌هایی از عملکرد شاخه‌های گسلی شامل قرارگیری واحدهای مختلف سنگی در کنار یکدیگر دیده شده است (شکل ۶). شناسایی دقیق این گسل‌ها و بررسی توان لرزه‌خیزی آنها مستلزم برداشت‌های دقیق میدانی است.



شکل ۳. شاخه‌های گسلی در پهنه گسل پردیس، امتداد بلوار شهید صیاد شیرازی (دید به سمت شمال).



شکل ۴. شاخه‌های گسلی در پهنه گسل پردیس، امتداد بلوار شهید صیاد شیرازی (دید به سمت شمال غرب).



شکل ۵. شاخه‌های گسلی در پهنه گسل پردیس، امتداد بلوار شهید صیاد شیرازی (دید به سمت غرب).

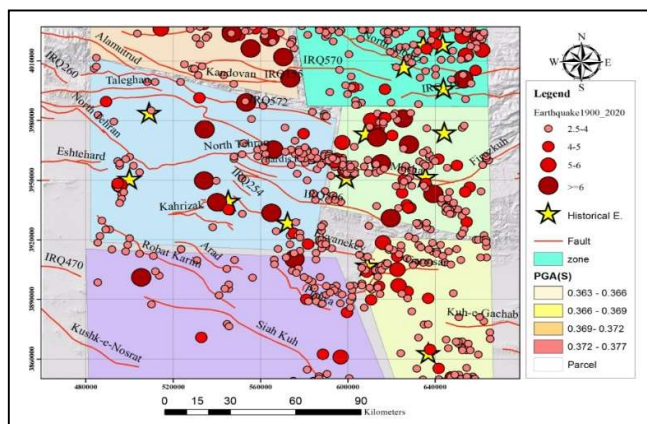


شکل ۶. احداث برج‌های فاز ۱۱ روی واحدهای سنگی گسلیده (دید به سمت شمال غرب).

۴ تعیین چشمه‌های لرزه‌زا

اولین گام در تحلیل خطر لرزه‌ای، تعیین چشمه یا چشمه‌هایی است که مستعد وقوع زلزله هستند. در شکل ۷ نقشه محدوده مورد بررسی به همراه رومرکز زلزله‌های رخ داده شامل زلزله‌های تاریخی و زلزله‌های دستگاهی از

سال ۱۹۰۰ تا ۲۰۲۰ به همراه گسل‌های موجود نشان داده شده است. در این نقشه شش چشمه لرزه‌زا از نوع ناحیه‌ای بر اساس روند گسلش و تجمع زلزله‌ها تشخیص داده شده است.



شکل ۷. چشمه‌های لرزه‌زا در گستره مطالعه‌شده.

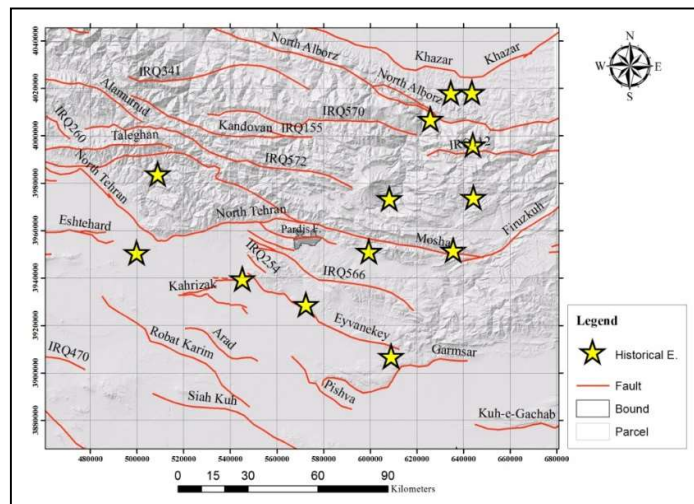
۱-۴ زمین‌لرزه‌های تاریخی

به دلیل موقعیت خاص گستره، زمین‌لرزه‌های تاریخی متعددی در منابع مختلف ثبت شده‌اند. مهم‌ترین منبع استفاده‌شده در این نوشتار، آمبرسیز و ملویل (۱۹۸۲) است (جدول ۱). با استناد به داده‌های به‌دست‌آمده، نقشه توزیع زمین‌لرزه‌های تاریخی تهیه شده است (شکل ۸).

همان‌طور که ملاحظه می‌شود شانزده زمین‌لرزه تاریخی در گستره مورد مطالعه به وقوع پیوسته است که نزدیک‌ترین آنها به شهر، زمین‌لرزه‌هایی با بزرگای ۷/۱، ۷/۶ و ۶/۵ به ترتیب در چهار سال قبل از میلاد مسیح، سال ۸۵۵ و سال ۱۶۶۵ میلادی بوده است.

جدول ۱. زمین‌لرزه‌های تاریخی گستره مورد مطالعه.

بزرگا	سال	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی
۵/۳	۸۶۴	۳۵/۷۰	۵۱/۰۰
۶/۲	۱۸۱۵	۳۵/۹۰	۵۲/۲۰
۶/۲	۱۸۳۰	۳۵/۹۰	۵۲/۶۰
۶/۳	۱۳۸۴	۳۵/۳۰	۵۲/۲۰
۶/۴	۱۸۶۸	۳۴/۹۰	۵۲/۵۰
۶/۵	۱۶۶۵	۳۵/۷۰	۵۲/۱۰
۶/۵	۱۶۷۸	۳۶/۳۰	۵۲/۶۰
۶/۵	۱۸۰۵	۳۶/۲۰	۵۲/۴۰
۶/۵	۱۸۰۸	۳۶/۲۰	۵۲/۴۰
۶/۵	۱۸۰۹	۳۶/۳۰	۵۲/۵۰
۶/۷	۱۸۲۵	۳۶/۱۰	۵۲/۶۰
۷/۱	۸۵۵	۳۵/۶۰	۵۱/۵۰
۷/۱	۱۸۳۰	۳۵/۷۰	۵۲/۵۰
۷/۲	۷۴۳	۳۵/۳۰	۵۲/۲۰
۷/۶	-۴	۳۵/۵۰	۵۱/۸۰
۷/۷	۹۵۸	۳۶/۰۰	۵۱/۱۰

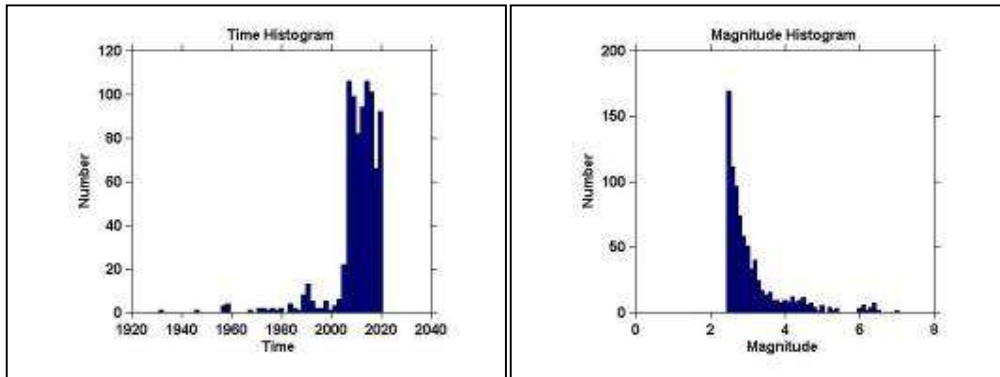


شکل ۸. زمین‌لرزه‌های تاریخی در گستره مطالعه‌شده برگرفته از آمبرسیز و ملویل (۱۹۸۲).

۴-۵ توزیع زمین‌لرزه‌ها برحسب عمق

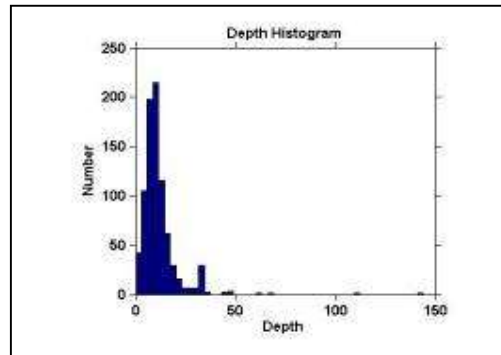
همان‌طور که در شکل ۱۰-ج مشاهده می‌شود، عمق بیشتر رویدادها بین ۱۰ تا ۳۰ کیلومتر است. در کارنمای مورد مطالعه تعدادی از زمین‌لرزه‌های رخ داده در سال‌های قبل از

۲۰۰۰ میلادی، عمقی بیش از ۳۰ کیلومتر دارند که به دلیل کمبود دستگاه در آن زمان و همچنین عدم قطعیت عمق است و نیازمند مطالعات زمین‌شناسی در محدوده مورد مطالعه است تا بتوان اصلاحات لازم را اعمال کرد.



(ب)

(الف)



(ج)

شکل ۱۰. نمودار تعداد زمین‌لرزه‌های رخ داده در گستره برحسب (الف) زمان (ب) بزرگای عمق.

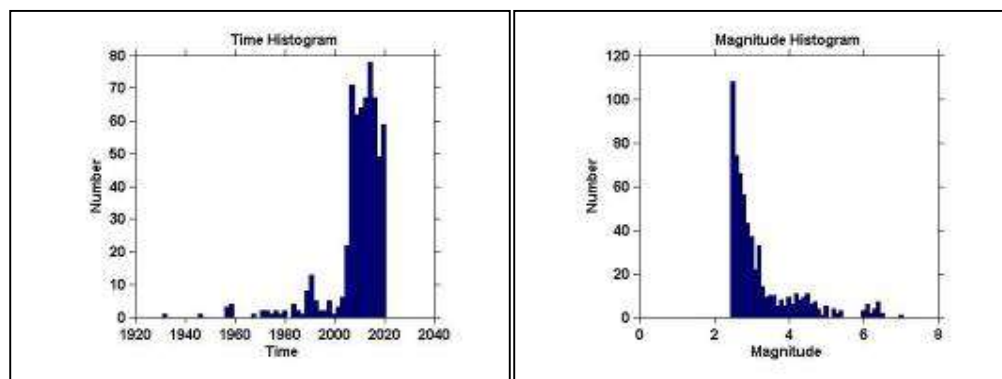
۴-۶ حذف پس‌لرزه‌ها

پس‌لرزه‌ها مجموعه‌ای از زمین‌لرزه‌های کوچک هستند که پس از زمین‌لرزه‌های بزرگ رخ می‌دهند و مربوط به جابه‌جایی سطح گسل‌ها روی زمین هستند. زمین‌لرزه بزرگ که لرزه اصلی نامیده می‌شود، با جابه‌جایی لحظه‌ای خود باعث ایجاد تغییر در یک سامانه پیچیده می‌شود. در مناطق درون ناحیه شکستگی یا اطراف آن، ممکن است

حجم چشمه به علت وضعیت جدید تنش تغییر داشته باشد و در نتیجه، پس‌لرزه‌ها ایجاد شوند. معمولاً پس‌لرزه‌ها بلافاصله پس از زمین‌لرزه اصلی شروع می‌شوند و در کل حجم چشمه پخش هستند. فراوانی پس‌لرزه‌ها به سرعت کاهش می‌یابد (زارع، ۱۳۸۴). حذف پس‌لرزه‌ها با استفاده از روش گاردنر-نوپوف (گاردنر و نوپوف، ۱۹۷۴) و بر اساس الگوریتم پنجره‌های زمانی-مکانی صورت گرفت و

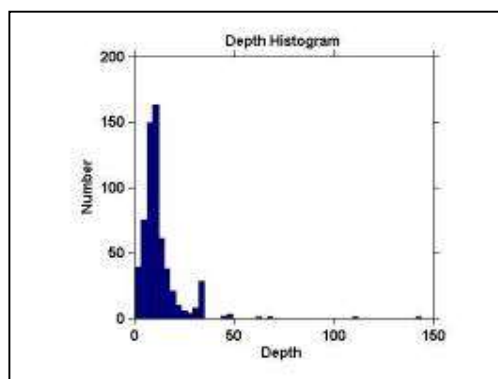
زمان پس از حذف پس لرزه‌ها نشان داده شده است.

از حدود ۸۴۰ زمین لرزه، ۶۱۱ زمین لرزه باقی ماند. در شکل ۱۱ زمین لرزه‌های رخ داده در گستره نسبت به عمق، بزرگا و



(ب)

(الف)



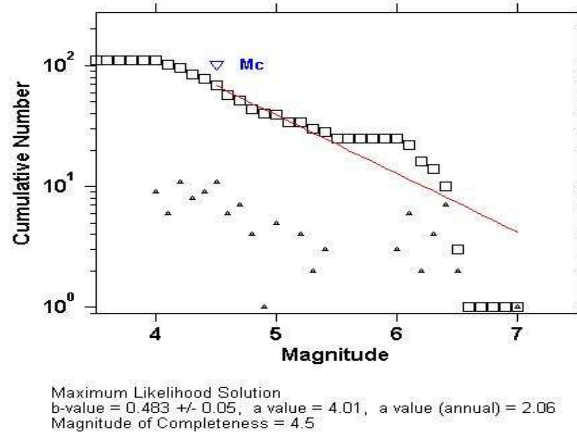
(ج)

شکل ۱۱. نمودار تعداد زمین لرزه‌های رخ داده در گستره نسبت به (الف) زمان (ب) بزرگا (ج) عمق پس از حذف پس لرزه‌ها.

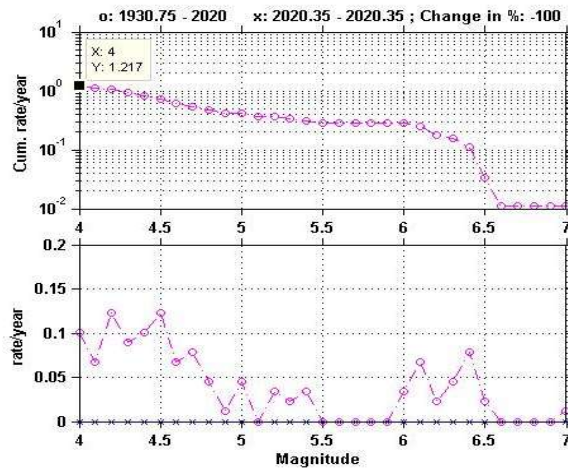
شده است. ضریب لرزه‌خیزی b-value عددی است ثابت و بر اساس توان لرزه‌زایی عوارض زمین‌ساختی هر منطقه متفاوت است. ضریب a-value که یکی از ضرایب مهم لرزه‌خیزی است، بیانگر میزان کل نرخ لرزه‌خیزی در منطقه است (گوتنبرگ و ریشتر، ۱۹۵۴). طبق رابطه گوتنبرگ-ریشتر که نمودار آن در شکل ۱۲ دیده می‌شود، برای محدوده شهر پردیس $b=0/48$ و $a=4/01$ برآورد شده است. نرخ لرزه‌خیزی در محدوده مورد مطالعه برای بزرگای ۴ و بیشتر، ۱/۲۱ است.

۵ تعیین ضرایب لرزه‌خیزی

ضرایب لرزه‌خیزی a-value و b-value برای برآورد خطر زمین لرزه با اهمیت هستند. برای تعیین لرزه‌خیزی هر منطقه به سه پارامتر بیشینه زمین لرزه محتمل، ضرایب لرزه‌خیزی و نرخ وقوع زمین لرزه‌ها نیاز است. تاکنون برای تعیین ضرایب لرزه‌خیزی در یک منطقه چندین روش متداول شامل روش‌های کمپل-بزرگ‌نیا (کمپل و بزرگ‌نیا، ۲۰۰۳)، S، I، III روش گوتنبرگ-ریشتر (گوتنبرگ و ریشتر، ۱۹۵۴) و کیکو-سلفول (کیکو و سلفول، ۱۹۹۲) پیشنهاد



(الف)



(ب)

شکل ۱۲. (الف) ضرایب لرزه‌خیزی a و b (ب) نرخ لرزه‌خیزی برای زلزله‌های با بزرگای ۴ و بیشتر در شعاع ۱۰۰ کیلومتری.

۶ تحلیل خطر زلزله

سناریو است که توان ایجاد جنبش نیرومندی نظیر مقادیر شتاب نقشه خطر زلزله را دارد و از این نظر مهم است. نتایج تحلیل خطر به صورت نقشه‌های پهنه‌بندی خطر ارائه می‌شود که هر کدام از این نقشه‌ها در اصل بیان‌کننده توزیع مقادیر بیشینه شتاب در دوره تناوب‌های مختلف هستند. در این مطالعه برآورد خطر زمین‌لرزه در این شهر به روش احتمالاتی و با روش کمپل-بزرگ‌نیا برای دوره بازگشت ۴۷۵ سال محاسبه شده است.

همان‌طور که در آیین‌نامه‌های طراحی لرزه‌ای و شیوه‌نامه‌های بررسی آسیب‌پذیری و مقاوم‌سازی آمده است، تحلیل خطر لرزه‌ای ابزاری بسیار ضروری برای محاسبه و برآورد پارامترهای جنبش نیرومند زمین برای زمین‌لرزه محتمل در آینده در ساختگاه مورد نظر است. در تدوین سناریوهای زلزله نیز نقشه پهنه‌بندی خطر زلزله برای دوره بازگشت ۴۷۵ سال مطرح است که یکی از زلزله‌های

(رنگ زرد کم‌رنگ) کمترین خطر را دارد. بخش مرکزی شهر در پهنه با خطر زیاد تا متوسط قرار گرفته است. همان‌گونه که در شکل مشاهده می‌شود، گسل پردیس به‌صورت عرضی از محدوده شهری عبور کرده است. این گسل در قسمت شمالی از محدوده گسل مشا و در قسمت شمال غرب از قطعاتی از گسل لثیان و در بخش جنوب غرب از محدوده گسل تلو پایین عبور کرده است.

در شکل ۱۳ نقشه پهنه‌بندی شتاب سنگ کف شهر پردیس نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، در این شهر چهار پهنه مشاهده می‌شود که عبارت‌اند از:

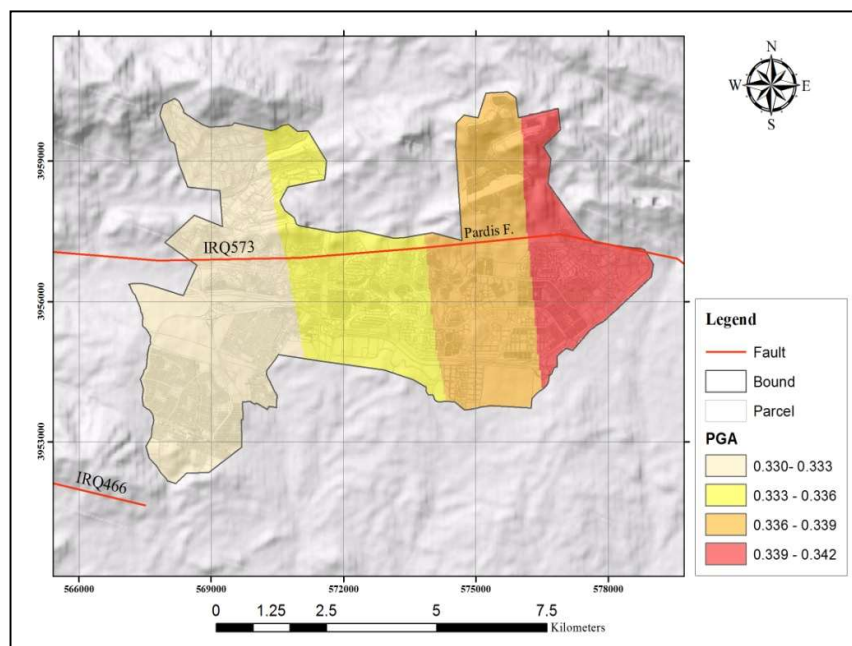
پهنه با شتاب (۰/۳۳۰-۰/۳۳۳)؛

پهنه با شتاب (۰/۳۳۳-۰/۳۳۶)؛

پهنه با شتاب (۰/۳۳۶-۰/۳۳۹)؛

پهنه با شتاب (۰/۳۳۹-۰/۳۴۲).

قسمت شرقی محدوده شهری پردیس (رنگ قرمز)، بیشترین خطر و قسمت جنوبی و غربی محدوده شهری



شکل ۱۳. نقشه پهنه‌بندی شتاب سنگ کف.

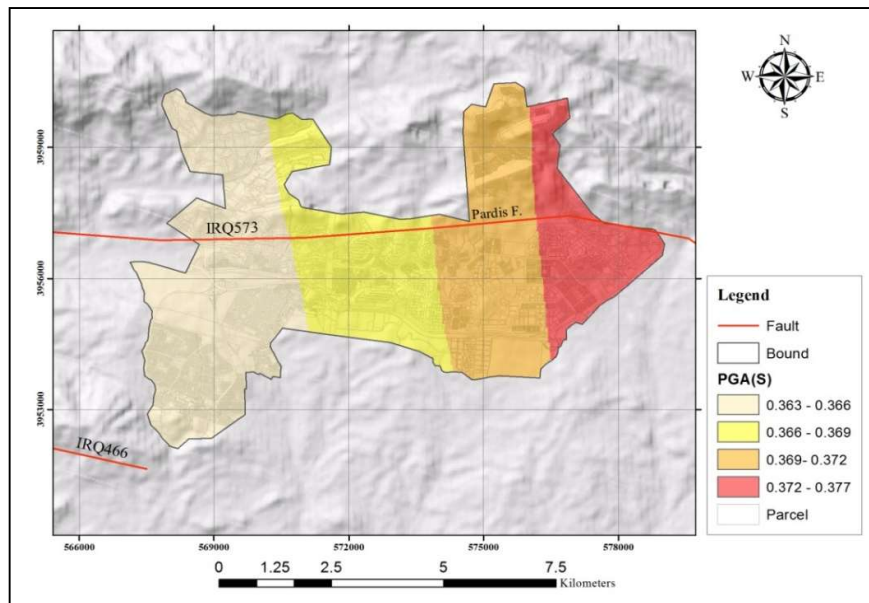
باشد. بسیاری از شهرهای بزرگ و مهم ایران نیز روی رسوبات آبرفتی بنا شده‌اند و مطالعاتی از این دست می‌توانند در تصمیم‌سازی‌های مدیریت شهری نقش مثبتی داشته باشند. خصوصیات خاک می‌تواند امواج لرزه‌ای را تشدید کند. نوع و رفتار خاک در مطالعات زلزله‌ها بسیار مهم است. در مطالعات فراوانی مشخص شده است که خاک‌های رسی

۷ بررسی داده‌های گمانه‌های موجود

گمانه‌های موجود بیانگر خصوصیات ژئوتکنیکی نوع خاک ساختمانی است که ارتباط تنگاتنگی با زلزله رخ داده دارد و رفتار خاک‌ها و رسوبات منطقه را در برابر امواج عبوری زلزله مشخص می‌کند. بررسی شرایط ژئوتکنیکی یا ساختمانی در بازسازی و طراحی سازه‌های مقاوم می‌تواند بسیار کارگشا

سخت و ضعیف، خاک رس متراکم و خاک رس به همراه شن و ماسه و سنگ ریزه است. با توجه به نوع خاک محدوده مورد مطالعه ضریب بزرگ‌نمایی ۱/۱ است. با تأثیر دادن این ضریب بر شتاب سنگ کف، بیشترین مقدار شتاب روی سطح زمین $0.37g$ برآورد می‌شود. این عدد در عملیات مهندسی اهمیت ویژه‌ای دارد.

سست و خاک دانه‌ای و برجا برحسب وضعیت ساختاری می‌توانند مشابه سنگ هوازده و ضعیف عمل کنند. از روی نوع رفتار خاک می‌توان به میزان تأثیر آن در تشدید امواج لرزه‌ای پی برد. معمولاً لایه‌های آبرفتی امواج زلزله را تقویت می‌کنند و بیشینه شتاب روی سطح زمین بیش از روی سنگ بستر است. نوع خاک منطقه با توجه به ۵۴ گمانه موجود و شکل ۱۴ از جنس شن و ماسه متراکم



شکل ۱۴. نقشه پهنه‌بندی شتاب بر اثر بزرگ‌نمایی خاک.

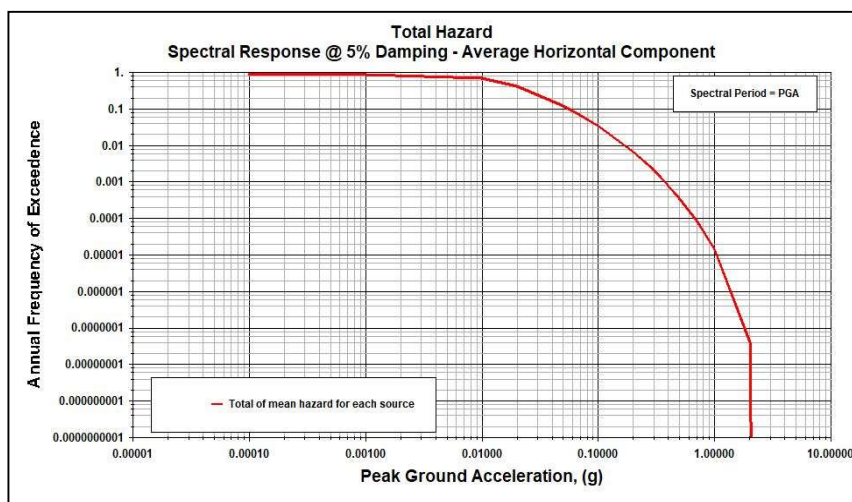
شکل ۱۵- الف وضعیت منحنی‌های طیفی در وسط شهر نشان داده شده است که بر این اساس شتاب مبنای طرح $0.35g$ است. این عامل اهمیت ویژه‌ای دارد و می‌تواند برای اولویت‌بندی مکانی جهت ساخت‌وساز و سامانه پاسخ سریع زلزله استفاده شود.

تأثیر‌گذارترین چشمه‌های لرزه‌ای در گستره مورد مطالعه Z1 و Z3 در بخش شرقی هستند (شکل ۱۵- ب). در شکل ۱۵- ج شتاب برای سه دوره بازگشت ۹۷۵، ۴۷۵ و ۲۴۷۵ سال به ازای دوره تناوب‌های صفر تا ۴ ثانیه نشان داده شده است.

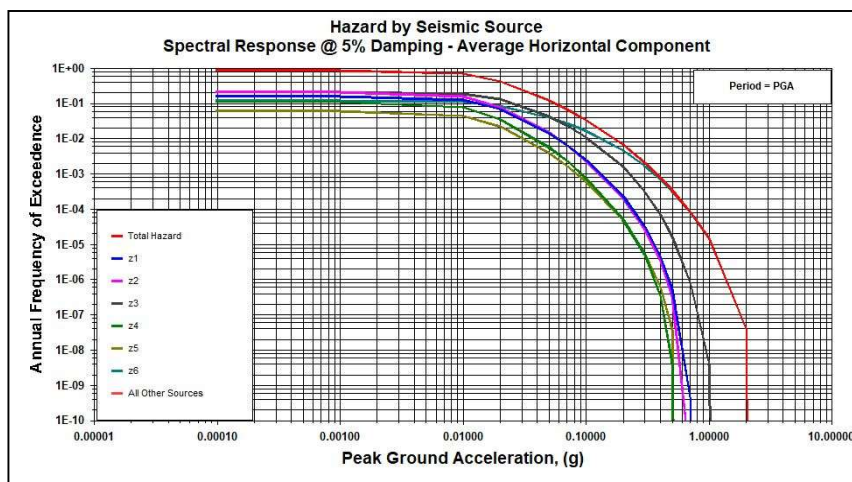
۸ برآورد شتاب در سطح زمین و منحنی‌های

طیفی در نقطه وسط شهر جدید پردیس

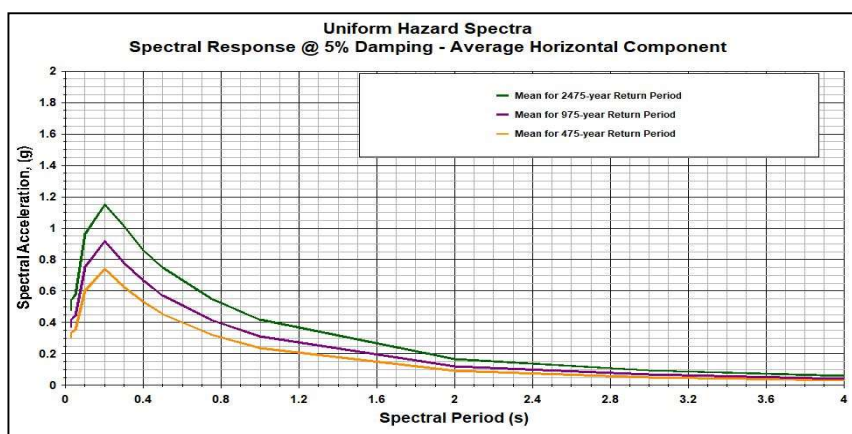
طیف خطر یکنواخت برای هر نقطه دلخواه در گستره مورد مطالعه را می‌توان با دانستن مقدار شتاب بیشینه هر زلزله و مقیاس کردن طیف تهیه شده به‌طور تقریبی و سریع تهیه کرد. اهمیت تهیه طیف‌های خطر در طراحی‌های لرزه‌ای سازه‌ها، به‌عنوان مبنایی‌ترین کار در برآورد طیف پاسخ، آشکار است. این طیف رفتار ساختمان‌ها را برحسب ارتفاع آنها کنترل خواهد کرد. به همین منظور شتاب و منحنی‌های طیفی در وسط شهر پردیس بررسی شد. در



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۱۵. منحنی‌های طیف خطر (الف) پاسخ طیفی (ب) چشمه‌های لرزه‌زا (ج) شتاب طیفی در دوره بازگشت‌های ۴۷۵ سال، ۹۷۵ سال و ۲۴۷۵ سال.

- Geology, **29**(6), 559–562, doi: 10.1130/0091-7613.
- Berberian, M., 1979, Evaluation of the instrumental and relocated epicentres of Iranian earthquakes: Royal Astronomical Society, **58**, 625-630.
- Campbell, K. W., and Bozorgnia, Y., 2003, Updated near-source ground-motion (attenuation) relations for the horizontal and vertical components of peak ground acceleration and acceleration response spectra: Bulletin of the Seismological Society of America, **93**, 314-331.
- Campbell, K. W., and Bozorgnia, Y., 2008, NGA ground motion model for the geometric mean horizontal component of PGA, PGV, PGD and 5% damped linear elastic response spectra for periods ranging from 0.01 to 10 s: Earthquake Spectra, **24**(1), 139-171.
- Cornell, C. A., 1968, Engineering seismic risk analysis: Bulletin of the Seismological Society of America, **58**, 1583-1606.
- Frankel, A., 1995, Mapping seismic hazard in the Central and Eastern United States: Seismological Research Letters, **66**, 8-21.
- Gardner, J. K., and Knopoff, L., 1974, Is the sequence of earthquakes in Southern California, with aftershocks removed, Poissonian?: Bulletin of the Seismological Society of America, **64**, 1363-1367.
- Gutenberg, B., and Richter, C. F., 1954, Seismicity of the Earth and Associated Phenomena: Princeton University Press, Princeton, New Jersey, USA.
- Jackson, J., Priestley, K., Allen, M., and Berberian, M., 2002, Active tectonics of the South Caspian Basin: Geophysical Journal International, **148**, 214–245.
- Kijko, A., and Sellevoll, M. A., 1992, Estimation of earthquake hazard parameters from incomplete data files, Part II: Incorporation of magnitude heterogeneity: Bulletin of the Seismological Society of America, **82**, 120–134.
- Masson, F., Anvari, M., Djamour, Y., Walpersdorf, A., Tavakoli, F., Daigni`eres, M., Nankali, H., and Van Gorp, S., 2007, Large-scale velocity field and strain tensor in Iran inferred from GPS measurements: new insight for the present-day deformation pattern within NE Iran: Geophysical Journal International, **170**(1), 436–440, doi: 10.1111/j.1365-246X.2007.03477.x.
- Ritz, J. F., Nazari, H., Ghassemi, A., Salamati, R., Shafei, A., Solaymani, S., and Vernant, P.,

۹ بحث و نتیجه‌گیری

از آنجا که شهر جدید پردیس در محدوده استان تهران قرار دارد و تراکم جمعیت و ساخت‌وسازهای شهری درخور توجهی دارد، توجه معماران و مهندسان به پارامترهای لرزه‌خیزی و همچنین مقادیر PGA در این شهر باعث افزایش کیفیت ساخت‌وساز می‌شود. در این مطالعه پس از برآورد پارامترهای لرزه‌خیزی هر چشمه لرزه‌زا، بیشینه شتاب جنبش زمین حاصل از فعالیت چشمه‌ها برای دوره بازگشت ۴۷۵ سال در سنگ کف برابر با $0.34g$ به دست آمد و با تأثیر دادن اثر خاک با استفاده از گمانه‌های موجود که بیانگر خصوصیات ژئوتکنیکی نوع خاک ساختگاه است، بیشترین شتاب در منطقه شرقی شهر و برابر با $0.37g$ برآورد شد. با توجه به مقادیر به دست آمده و همچنین مطالعه خاک گمانه‌های ژئوتکنیکی، ضریب بزرگ‌نمایی برابر $1/1$ و شتاب مبنای طرح در مرکز شهر $0.35g$ به دست آمد.

منابع

- احتشامی معین‌آبادی، م.، ۱۳۹۵، خطر گسیختگی سطحی در محدوده شهر پردیس، استان تهران: لزوم رعایت حریم گسل در توسعه شهری: مجله زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته، **۶**(۱)، ۴۲–۴۸.
- آمبرسیز، ن. ن.، ملویل، ج. پ.، ۱۹۸۲، تاریخ زمین‌لرزه‌های ایران، ترجمه ابوالحسن رده، ۱۳۷۰: انتشارات آگاه، تهران.
- زارع، م.، ۱۳۸۴، مقدمه‌ای بر زلزله‌شناسی کاربردی، چاپ اول: انتشارات پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله.
- Allen, M., Ghassemi, M. R., Shahrabi, M., and Qorashi, M., 2003, Accommodation of late Cenozoic oblique shortening in the Alborz range, northern Iran: Journal of Structural Geology, **25**, 659–672.
- Axen, G. J., Lam, P. S., Grove, M., Stockli, D. F., and Hassanzadeh, J., 2001, Exhumation of the West-Central Alborz Mountains, Iran, Caspian subsidence and collision-related tectonics:

- 2006, Active transtension inside Central Alborz: A new insight into northern Iran–Southern Caspian geodynamics: *Geology*, **34**(6), 477-480, doi: 10.1130/G22319.1.
- Shi, Z., Yan, J., and Gao, M., 1992, Research on the principle and methodology of seismic zonation - Results of the trial in North China: *Acta Seismologica Sinica*, **5**, 305-314.
- Solaymani Azad, S., 2009, Evaluation de l'aléa sismique pour les villes de Téhéran, Tabriz et Zandjan dans le NW de l'Iran, Approche morphotectonique et paléosismologique, PhD thesis, University of Montpellier (in French and English).

Probabilistic seismic risk analysis of Pardis New Town

Ali Beitollahi ^{1*}, Negar Soodmand ², Fateme Dehghan Farouji ¹ and Ghazaleh Razaghian ³

¹ Assistant Professor, Road Housing and Urban Development Research Center, Tehran, Iran

² M.Sc. Student, Basic Sciences, Geophysics, Islamic Azad University, North Tehran Branch, Tehran, Iran

³ Assistant Professor, Department of Geology, Damavand Branch, Islamic Azad University, Damavand, Iran; Earthquake and Natural Disaster Research Center, Damavand Branch, Islamic Azad University, Damavand, Iran

(Received: 24 December 2022, Accepted: 13 June 2023)

Summary

Pardis New Town located at a distance of 17 km from Tehran is bounded by the Alborz mountain range from the north, the Jajrud River from the west, Karasht, Siahsang and Taherabad villages from the south, and Bumehen from the east. It is located in the catchment area of the Jajrud River and has about 3600 hectares area. It includes 9 phases, 6 of which are residential regions and the other three are for research, industrial and tourism purposes.

Since Pardis New Town is located in Tehran province and in proximity to the Mosha and North Tehran faults which have historical earthquakes, this study investigates its seismicity and seismic risk analysis by probabilistic method.

After estimating the parameters of each seismic source, namely β , λ and the expected maximum magnitude, the peak ground acceleration of the sources was obtained for the return period of 475 years. For an earthquake with a return period of 475 years, the maximum value of ground acceleration in bedrock was equal to 0.34 g, and when we take into account the soil effect using the existing boreholes that indicate the geotechnical characteristics of the soil of the site, the maximum acceleration of 0.37 g in the eastern area of Pardis was obtained.

Keywords: Earthquake risk analysis, probabilistic method, Pardis New Town, return period, earthquake source

*Corresponding author:

ali.beitollahi@gmail.com