

طیف خطر یکسان برای مناطق مختلف جنوب شهر تهران

غلامرضا قدرتی امیری (استاد)

سیدعلی رضویان اهرونی (دکتری)

سیده محمد میرهاشمی (کارشناس ارشد)

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

ارزیابی احتمال بروز زلزله در تهران، پایتخت ایران - که جمعیتی بالغ بر ۱۰ میلیون نفر و نیز مراکز مهم سیاسی، اقتصادی، اجتماعی و فرهنگی در آن حاضرند - از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. برای انجام مطالعه‌ی حاضر که به جنوب شهر تهران اختصاص دارد، مجموعه‌ی از داده‌های لرزه‌خیزی تاریخی و دستگاهی با پوشش زمانی از ۴ قرن پیش از میلاد تاکنون را به کار گرفته‌ایم و منابع لرزه‌زا تا شعاع ۲۰۰ کیلومتری تهران مدل شده‌اند. برای برآورد پارامترهای لرزه‌خیزی از روش کیکو و نیز از رابطه‌ی کاهندگی طیفی امبرسین، سیمپسون و بومر استفاده شده است. ارزیابی احتمال خطر بروز زلزله برای یک شبکه‌ی ۹ × ۱۶ در جنوب شهر تهران با استفاده از نرم‌افزار SEISRISKIII انجام شده و نتایج این ارزیابی به وسیله‌ی نقشه‌های شتاب طیفی و طیف خطر یکسان برای حالت میانگین و بیشینه با ۲٪ و ۱۰٪ احتمال رویداد در ۵۰ سال نشان داده شده است.

واژگان کلیدی: تحلیل خطر زلزله، پارامترهای لرزه‌خیزی، طیف خطر یکسان افقی، جنوب شهر تهران.

۱. مقدمه

محدوده شهری تهران شامل شادآباد، یافت‌آباد و ماهشهر محدود می‌شود. برای به دست آوردن برآوردی از خسارات احتمالی زلزله، ضروری است ابتدا تخمینی از زلزله‌های محتمل در منطقه داشته باشیم؛ برای رسیدن به این هدف تحلیل طیفی خطر زلزله در منطقه ضرورت می‌یابد که در این مطالعه به این مهم پرداخته شده است. «تحلیل طیفی خطر زلزله» در اصل روشی است که با اتکا به آن و با توجه به شرایط زمین‌شناسی و تکتونیکی منطقه و زلزله‌های ثبت‌شده‌ی گذشته می‌توان زلزله‌های آینده در نقاط مختلف پهنه را تخمین زد و سپس برای پررود و هر سطح خطر، نقشه‌ی پهنه‌بندی لرزه‌خیزی (نقشه‌ی نقاط هم‌شتاب) را تهیه کرد؛ این امر را می‌توان ابزاری مناسب برای طیف‌های خطر یکنواخت به شمار آورد.

۲. لرزه‌ی زمین ساخت تهران

منطقه‌ی تهران به واسطه‌ی وجود گسل‌های جوان در اطراف آن به لحاظ لرزه‌خیزی فعال محسوب می‌شود؛ از این رو در ابتدای این تحقیق ضمن مرور کلیات زمین‌شناسی و زمین‌ساختی منطقه، پارامترهایی که از این نظر مهم تشخیص داده شده استخراج می‌شوند.

شهر تهران در حاشیه‌ی جنوبی رشته‌کوه البرز و در کناره‌ی شمالی کویر مرکزی بر روی نهشته‌های آبرفتی بنا شده است. استقرار دشت تهران در حاشیه‌ی جنوبی کوه‌های البرز این ناحیه را به لحاظ اشکال زمین‌ریختی بسیار متنوع ساخته است. ارتفاعات واقع در شمال تهران که بخشی از ارتفاعات البرز است و دشت تهران (با میانگین ارتفاعی ۱۲۵۰ متر) از ویژگی‌های پستی و بلندی (توپوگرافی) گسترده است.

با توجه به تاریخچه‌ی زمین‌لرزه‌های بزرگ گذشته و وجود گسل‌های مهم در گستره‌ی تهران بزرگ، احتمال رویداد زمین‌لرزه‌ی ویران‌گر با بزرگی ۷ ریشتر نکته‌ی بسیار جدی است. علاوه بر وجود رانندگی شمال تهران و چند گسل جوان و فعال دیگر در شمال و جنوب شهر، نهشته‌های آبرفتی دشت تهران و شهر ری شکستگی‌های کوچک فراوانی دارند که ممکن است به هنگام جنبیدن گسل‌های بزرگ در زمین‌لرزه دچار لغزش، جنبش و جابه‌جایی شوند.

منطقه‌ی مورد مطالعه در جنوب شهر تهران که وسعتی معادل ۴۵۰ کیلومتر مربع را شامل می‌شود از شمال به خیابان‌های انقلاب، آزادی و دماوند و از جنوب به منطقه بهشت زهرا و شهرری، از شرق به کوه‌های شرق تهران و از غرب به منتهی‌الیه

جدول ۱. گسل‌های فعال اصلی تهران و اطراف آن.

ردیف	نام گسل	طول گسل (Km)	حداکثر بزرگای متحمل (M_s)
۱	مشاء	۲۰۰	۷٫۵
۲	شمال تهران	۷۵	۶٫۹
۳	گرمسار	۷۰	۶٫۹
۴	کهریزک	۴۰	۶٫۹
۵	پیشوا	۳۴	۶٫۹
۶	جنوب ری	۱۸٫۵	۶٫۲
۷	شمال ری	۱۷	۶٫۱
۸	نیاوران	۱۳	۶

۴. پارامترهای لرزه‌خیزی تهران

برآورد پارامترهای لرزه‌خیزی بر مبنای داده‌های لرزه‌ی اتفاق افتاده در منطقه‌ی مورد نظر و به‌کارگیری روش‌های احتمالاتی انجام می‌شود.

فرض اساسی در برآورد پارامترهای لرزه‌خیزی این است که رویداد زمین‌لرزه‌ها مستقل از یکدیگر باشند و از توزیع پواسونی پیروی کنند. فهرست کامل رویداد زمین‌لرزه‌های هر گستره معمولاً دارای توزیع پواسونی نمی‌باشند. بنابراین حذف پیش‌لرزه‌ها و پس‌لرزه‌ها برای هر یک از زمین‌لرزه‌های اصلی از فهرست رویداد زمین‌لرزه‌ها ضروری است. روشی که در اینجا برای حذف پیش‌لرزه‌ها و پس‌لرزه‌ها به‌کار گرفته شده، روش پنجره زمانی و مکانی است.^[۷]

۱.۴. فهرست لرزه‌خیزی

در این مطالعه فهرستی از مراکز زمین‌لرزه‌های بزرگ که از دقت مکان‌یابی نسبتاً بهتری برخوردارند تا شعاع ۲۰۰ کیلومتری تهران گردآوری شده است. کاربرد روش احتمالاتی و مزیت استفاده از آن نسبت به سایر موارد، به‌دلیل ناقص بودن داده‌های لرزه‌ی گستره‌ی طرح در خصوص بزرگا و عمق کانونی زمین‌لرزه‌ها است. با این فرض که زلزله‌ها از توزیع پواسون پیروی می‌کنند فهرستی از زمین‌لرزه‌هایی که در شعاع ۲۰۰ کیلومتری تهران واقع شده جمع‌آوری، و نسبت به محاسبه‌ی پارامترهای لرزه‌خیزی، نرخ وقوع و احتمال رویداد زلزله با استفاده از روش کیکو^[۸] اقدام شده است.

۱.۱.۴. بزرگای زمین‌لرزه

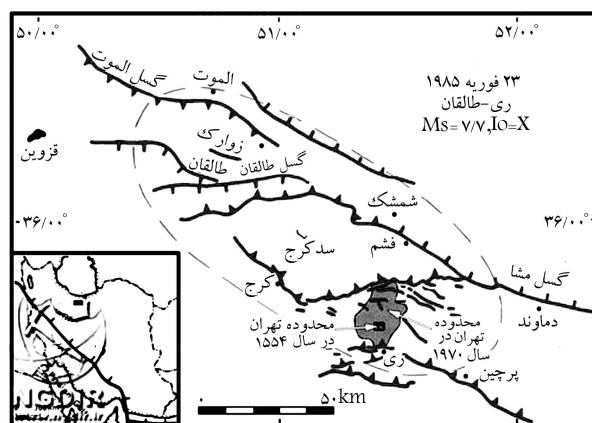
معمولاً هنگام محاسبات مربوط به تحلیل خطر زمین‌لرزه‌ها از نوعی بزرگا مثل M_s (مربوط به امواج سطحی) یا m_b (بزرگای امواج حجمی) استفاده می‌شود. اما به‌دلیل کامل نبودن مقادیر بزرگا در فهرست زمین‌لرزه‌ها، لازم است تا به طریقی این کمبود جبران شود. مناسب‌ترین روش آماری که تاکنون در این زمینه معرفی شده، روش آماری کم‌ترین مربعات و یافتن معادله‌ی بهترین خط از میان داده‌هایی است که برای آن‌ها هر دو بزرگا - M_s و m_b - گزارش شده باشد.

با توجه به کمبود تعداد زمین‌لرزه‌هایی که هر دو مقدار M_s و m_b گزارش شده باشد، از رابطه‌ی کمیته‌ی ملی سدهای بزرگ که برای کل ایران معرفی شده (رابطه‌ی ۱) استفاده شده است.^[۹]

$$M_s = 1,21 m_b - 1,29 \quad (1)$$

۲.۴. برآورد پارامترهای لرزه‌خیزی

محاسبات مربوط به برآورد پارامترهای لرزه‌خیزی بر پایه‌ی رویداد زمین‌لرزه‌ها و روابط بزرگا - فراوانی آن‌ها صورت می‌گیرد. نظر به اهمیت بسیار زیاد این پارامترها در تعیین

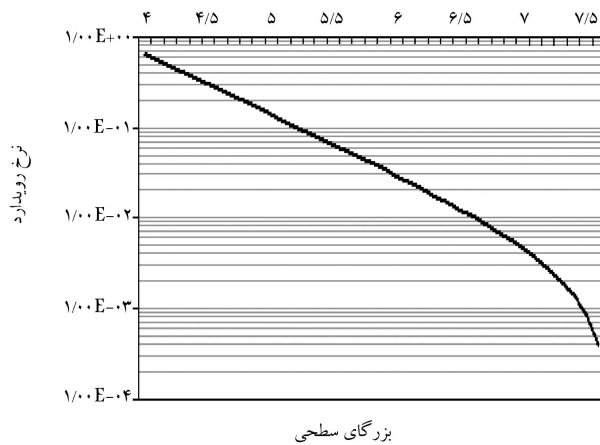


شکل ۱. نقشه‌ی گسل‌های تهران و اطراف آن.^[۳]

گستره‌ی مورد مطالعه و شهر تهران، در البرز مرکزی مابین سواحل جنوبی دریای خزر و بخش شمالی ایران مرکزی واقع شده است. اختلاف توپوگرافی شدیدی در شهر تهران خصوصاً در بخش شمالی آن وجود دارد که برای مطالعات لرزه‌ی زمین‌ساختی گستره‌ی مورد مطالعه حائز اهمیت است. به‌منظور ارزیابی خطرات لرزه‌ی برای یک محل یا یک منطقه، باید تمامی منابع لرزه‌ی شناسایی شوند و قابلیت آن‌ها در تولید حرکت نیرومند زمین در آینده ارزیابی شود. از گسل‌های مهم و قابل توجه منطقه‌ی تهران و اطراف آن می‌توان از گسل‌های شمال تهران، مشاء، نیاوران، شمال ری، جنوب ری، کهریزک، گرمسار و پیشوا نام برد (جدول ۱).^[۱] خاطرنشان می‌شود که M_s در این جدول از رابطه‌ی نوروزی^[۲] استفاده شده است. موقعیت این گسل‌ها نسبت به تهران در شکل ۱ نشان داده شده است.

۳. لرزه‌خیزی تهران

تاریخچه‌ی زمین‌لرزه‌های گذشته‌ی هر پهنه نشان‌گر وضعیت لرزه‌خیزی آن گستره است و برای دست‌یابی به ویژگی‌های لرزه‌ی زمین‌ساختی باید فهرست کاملی از زمین‌لرزه‌های هر پهنه را گردآوری و مورد پژوهش قرار داد. زمین‌لرزه‌های رخ داده در تهران را می‌توان در دو گروه دسته‌بندی کرد: ۱. زمین‌لرزه‌های تاریخی (زمین‌لرزه‌هایی که قبل از ۱۹۰۰ اتفاق افتاده‌اند)، ۲. زمین‌لرزه‌های دستگاهی (زمین‌لرزه‌های پس از ۱۹۰۰ تا به امروز).



شکل ۲. نرخ رویداد سالیانه برای زمین لرزه‌های بزرگ‌تر از $M_s = 4$.

بزرگ‌ترین مقادیر) و دستگاهی (با تابع توزیع دو کراندار) به کار گرفته شد. مقادیر β و λ ناشی از سه دسته در جدول ۲ نشان داده شده است. بر اساس این بررسی‌ها و محاسبات انجام شده با روش کیکو، نرخ رویداد سالیانه‌ی زمین لرزه برحسب بزرگای برای زمین لرزه‌های بزرگ‌تر از $M_s = 4$ در شعاع 200 کیلومتری تهران در شکل ۲ ارائه شده است.

از آنجا که استفاده از فهرست زمین لرزه‌های تاریخی و دستگاهی اعتبار نتایج را بهبود می‌بخشد، در این مطالعه تکیه‌ی اصلی بر استفاده‌ی همزمان از این زمین لرزه‌ها بوده و همه‌ی محاسبات بر اساس پارامترهای لرزه‌خیزی (λ و β) به دست آمده از دسته‌ی سوم است (شکل ۲).

۵. برآورد خطر لرزه‌خیزی

به منظور برآورد پارامترهای لرزه‌ی نیرومند زمین که در این بخش بیشینه‌ی شتاب طیفی افقی مورد نظر است از روش تحلیل خطر لرزه‌ی احتمالی^۲ استفاده شده است. برای برآورد صحیح پارامتر مورد نظر (شتاب) و انجام تحلیل خطر زمین لرزه توجه به این موارد ضرورت دارد:^{۱۰-۱۲} ۱. انتخاب رابطه‌ی کاهندگی مناسب؛ ۲. مدل کردن

جدول ۲. مقایسه‌ی پارامترهای لرزه‌خیزی در حالت‌های مختلف در گستره‌ی 200 کیلومتری تهران، با استفاده از روش کیکو 200 .

کاتالوگ	پارامتر	مقدار	درصد مشارکت بازه‌های زمانی (%)		
			تاریخی	۱۹۶۳-۱۹۰۰	۱۹۶۴ تاکنون
داده‌های لرزه‌ی تاریخی	Beta	۱٫۵۱	۱۰۰		
	Lambda (for $M_s=4$)	۰٫۵۹	۱۰۰		
داده‌های لرزه‌ی دستگاهی	Beta	۱٫۳۶		۲۸٫۳	۴۹٫۸
	Lambda (for $M_s=4$)	۰٫۶۶		۱۶٫۲	۸۳٫۸
داده‌های لرزه‌ی تاریخی و دستگاهی	Beta	۱٫۴۹۵	۶۳٫۵	۱۳٫۵	۲۳
	Lambda (for $M_s=4$)	۰٫۷۳	۲۴٫۶	۱۲٫۲	۶۳٫۲

میزان خطر زمین لرزه در این پروژه از روش کیکو^[۸] استفاده شده است، که بر مبنای تابع توزیع دو کران دار گوتنبرگ - ریشتر و روش آماری بیشینه‌ی احتمال^۱ بنا شده است. فرضیاتی که می‌بایست در انجام این پروژه مورد توجه قرار گیرند عبارت‌اند از:

- تبعیت زمین لرزه از فرایند پواسونی به معنای مستقل بودن رویداد زمین لرزه به لحاظ زمان و مکان؛

- همگن بودن لرزه‌خیزی گستره‌ی مورد نظر و برخورداری از خصوصیات مشخص لرزه‌ی در گستره‌ی 200 کیلومتری پیرامون تهران.

۱.۲.۴. برآورد پارامترهای لرزه‌خیزی به روش کیکو

با توجه به یکسان نبودن میزان خطای داده‌های زمین لرزه‌های گستره‌ی مورد مطالعه در زمان‌های مختلف، روش تخمین احتمال بیشینه مدل مناسبی برای برآورد پارامترهای لرزه‌خیزی ایران است. با توجه به نبود داده‌های لرزه‌ی مناسب و دقت کم اطلاعات موجود، نسبت دادن زمین لرزه‌ها به منابع مسبب آن بسیار دشوار است، بدین منظور در این مطالعه، پارامترهای لرزه‌خیزی برای شهر تهران در شعاع 200 کیلومتری به دست آمده است. در روش تخمین احتمال بیشینه، استفاده‌ی همزمان از داده‌های تاریخی و دستگاهی امکان پذیر است. اساس کار بر استفاده‌ی همزمان از داده‌های تاریخی با دقت کم و بزرگای زیاد و تابع دو کراندار گوتنبرگ - ریشتر برای زلزله‌های دستگاهی و روش تخمین احتمال بیشینه استوار است. به طور کلی در این روش سه دسته زمین لرزه در نظر گرفته شده است (جدول ۲):

۱. زمین لرزه‌های تاریخی که در آن خطای بزرگای برای زمین لرزه‌های با کیفیت خوب، متوسط و بد به ترتیب 0.3 ، 0.4 و 0.5 واحد بزرگای در نظر گرفته شده است.

۲. زمین لرزه‌های پیش از نصب شبکه‌ی لرزه‌نگاری جهانی (از سال 1900 تا 1963 میلادی)، که خطای بزرگای برای آن‌ها 0.2 واحد بزرگای و بزرگای آستانه $M_s = 4$ در نظر گرفته شده است.

۳. زمین لرزه‌های دستگاهی (از سال 1964 تاکنون) که با دقت مناسب ثبت شده‌اند و خطای کم‌تری دارند. برای این زمین لرزه‌ها خطای بزرگای 0.1 واحد بزرگای و بزرگای آستانه $M_s = 4$ در نظر گرفته شده است.

در دسته‌ی اول فقط زمین لرزه‌های دستگاهی، در دسته‌ی دوم زمین لرزه‌های تاریخی، و در دسته‌ی سوم ترکیب زمین لرزه‌های گزارش شده‌ی تاریخی (با توزیع

منابع لرزه‌زا؛ ۳. برآورد توان لرزه‌زایی هریک از چشمه‌ها؛ ۴. مشخص کردن نوع خاک ساختگاه.

۱.۵. رابطه‌ی کاهندگی

رابطه کاهندگی بیان‌گر ارتباط بین پارامترهای مختلف حرکت زمین از جمله بزرگای، فاصله و... است و تابع پارامترهای فراوان دیگری است که مهم‌ترین آن‌ها عبارت‌اند از: [۱۲]

الف) خصوصیات چشمه، بزرگای، نوع گسل و فاصله از چشمه‌ی لرزه‌زا؛

ب) مسیر عبور موج، انعکاس، انکسار و جذب انرژی به دلیل خصوصیت موادی که امواج از آن‌ها عبور می‌کنند؛

ج) زمین‌شناسی ساختگاه و توپوگرافی آن.

انتخاب رابطه‌ی کاهندگی مناسب از اهمیت به‌سزائی در چگونگی و قابلیت اعتماد به نتایج برخوردار است. این رابطه باید به‌شکل طیفی، و حتی‌الامکان مربوط به منطقه‌ی مورد نظر یا مشابه با آن باشد. شرایط محدودی بزرگای در آن رعایت شده باشد و از نظر فاصله محدودی ۲۰۰ کیلومتری را پوشش دهد. از نظر تقسیم‌بندی و نوع خاک نیز، طبقه‌بندی خاک‌های منطقه را به‌نحو مناسبی پوشش دهد.

با توجه به نکات فوق و روابط کاهندگی طیفی موجود، در این خصوص مشخصاً دو رابطه مورد بررسی قرار گرفت. [۱۳] رابطه‌ی اول صرفاً برای دو دسته خاک - یک دسته با سرعت موج برشی بالای ۸۰۰ و یک دسته با سرعت موج برشی زیر ۸۰۰ - ارائه شده است. [۱۴] علی‌رغم تنوع خاک در منطقه‌ی جنوب تهران، این منطقه به‌طور کامل در دسته‌ی دوم این رابطه قرار داشته و نمی‌تواند اثر تشدید تنوع خاک را در تهیه‌ی طیف ویژه‌ی ساختگاه منعکس کند، لذا در ادامه‌ی محاسبات فقط از رابطه‌ی دوم استفاده شده است. [۱۳]

این رابطه براساس مجموعه‌ی بزرگای از اطلاعات ثبت‌شده از زمین‌لرزه‌ها برای محاسبه‌ی بیشینه شتاب طیفی برای مؤلفه‌ی افقی در ناحیه‌ی اروپا و نواحی مجاور آن (خارومیانه) برحسب بزرگای، فاصله از چشمه‌ی لرزه‌زا، و نوع خاک ساختگاه ارائه شده است. به‌منظور به دست آوردن این رابطه برای مؤلفه‌ی افقی شتاب از ۰.۲۲ رکورد مربوط به ۱۵۷ زلزله، از جمله رکوردهای مربوط به ناغان، طیس و منجیل، استفاده شده که از مزایای این رابطه است.

بازه بزرگای لحاظ‌شده در این رابطه $4.7 < Ms < 7.0$ است. عمق کانونی کم‌تر از ۳۰ کیلومتر در نظر گرفته شده، و ۸۱ درصد رکوردهای به کار گرفته شده در این رابطه عمق کانونی‌شان بین ۵ تا ۱۵ کیلومتر است. شکل کلی این رابطه چنین است:

$$\log Y = C_1(T) + C_2(T)Ms + C_3(T)\log(r) + C_4SA + C_5Ss + \sigma P \quad (2)$$

که در آن Y شتاب طیفی افقی حاصل از لرزه‌ی نیرومند زمین است. همچنین Ms بزرگای برحسب مقیاس سطحی زمین و r طبق رابطه‌ی $r = \sqrt{d^2 + h_0^2}$ تعریف می‌شود، که در آن d نزدیک‌ترین فاصله‌ی افقی از سایت تا تصویر سطح گسیختگی گسل است h_0 ؛ نیز ضریب ثابتی است که از حل معادله‌ی لرزه‌ی زمین به دست آمده و براساس پریود انتخابی (T) متغیر است. اثر ساختگاه به‌واسطه‌ی ضرایب SA و Ss در رابطه وارد می‌شود، به‌طوری که در ساختگاه سنگی SA و Ss صفر، در ساختگاه خاک سفت $SA = 1$ و $Ss = 0$ و در ساختگاه خاک نرم $SA = 1$ و $Ss = 1$ و در $SA = 0$ در نظر گرفته می‌شود. σ انحراف معیار محاسبه است و برای لحاظ‌شدن آن ضریب ثابت P دارای مقادیر صفر و ۱ است.

۲.۵. تابع بیشینه بزرگای زمین لرزه و طول گسیختگی گسل

روابط تجربی زیادی برای بیان ارتباط میان گسیختگی گسل و بزرگای زمین لرزه توسط تعدادی از محققین بیان شده است. یکی از محققین ایرانی پس از مطالعه‌ی ۱۰ زمین لرزه‌ی بزرگ در ایران [۱۵] و بررسی گسیختگی‌های گسل‌های فعالی چون گسل زاگرس، گسل شمال البرز، گسل تبریز، گسل شمال تبریز، گسل زفره در اصفهان، گسل ده شیر در جنوب شرقی اصفهان، گسل شهر بابک در کرمان و گسل‌های درونه دشت بیاض در منطقه‌ی مکران، رابطه تجربی ۳ را ارائه کرده است.

$$Ms = 1.244 \log L + 1.259 \quad (3)$$

که در آن Ms بزرگای سطحی زمین لرزه و L طول گسیختگی برحسب متر است.

۳.۵. نوع خاک ساختگاه

برای مشخص کردن نوع خاک منطقه‌ی تهران از پروژه‌ی مطالعات تکمیلی ریزپهنه‌بندی لرزه‌ی جنوب تهران [۱۵] براساس نقشه‌ی توزیع سرعت متوسط در عمق صفر تا ۳۰ متر مطابق با استاندارد ۲۸۰۰ استفاده شده است. [۱۶]

۴.۵. تحلیل خطر زمین لرزه به‌روش احتمالات

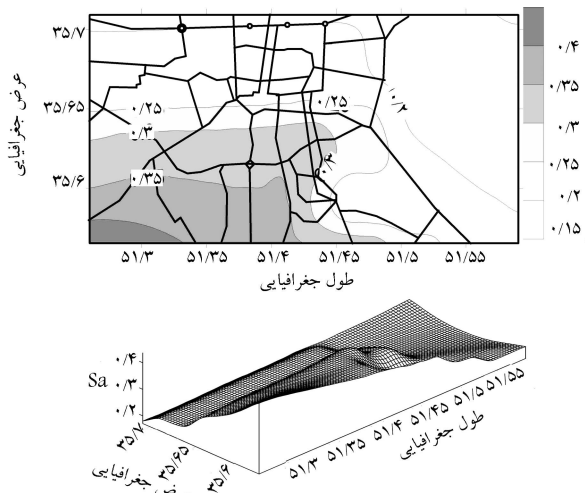
در این بخش براساس چشمه‌های لرزه‌زا که مدل شده‌اند، و با استفاده از پارامترهای لرزه‌خیزی حاصله، و نیز با توجه به ناقص بودن و دقت کم داده‌های لرزه‌ی (مبنی بر نبود شبکه‌ی لرزه‌ی مترکم و دقیق)، از نرم‌افزار SEISRISK III برای تهیه‌ی بیشینه شتاب طیفی افقی در طول عمر مفید سازه استفاده شده است. [۱۷] مقادیر محاسبه‌شده توسط نرم‌افزار به‌صورت خطوط هم‌شتاب (نقشه‌های شتاب طیفی) برای هر پریود با سطح خطر مشخص در طول عمر مفید سازه ارائه شده‌اند. در تجزیه و تحلیل خطر زمین لرزه به روش احتمالات معمولاً مقادیر لرزه‌ی نیرومند زمین برای سطوح مختلف احتمال خطر رویداد (احتمالات تجاوز مختلف) در نظر گرفته می‌شود. در این پروژه با توجه به دستورالعمل بهینه‌سازی لرزه‌ی ساختمان‌های موجود [۱۸] دو سطح خطر در نظر گرفته شده است:

- سطح خطر ۱. براساس ۱٪ احتمال رویداد در ۵۰ سال معادل دوره‌ی بازگشت ۴۷۵ سال تعیین می‌شود. سطح خطر ۱ در استاندارد ۲۸۰۰ ایران «زلزله‌ی طرح» (DBE) نامیده شده است.

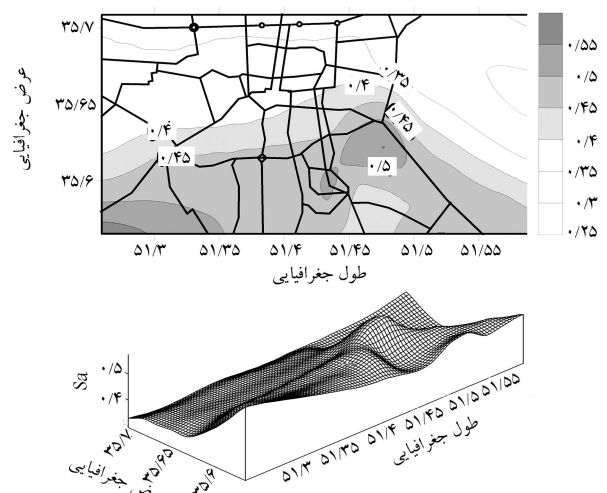
- سطح خطر ۲. براساس ۲٪ احتمال رویداد در ۵۰ سال معادل دوره‌ی بازگشت ۲۴۷۵ سال تعیین می‌شود. سطح خطر ۲ را «بیشینه زلزله محتمل» (MPE) نامیده‌اند.

قبل از محاسبات، محدوده‌ی مورد نظر باید شبکه‌بندی شود. لذا یک شبکه‌ی ۹ × ۱۶ شامل ۱۴۴ نقطه که جنوب شهر تهران را پوشش می‌دهد در نظر گرفته شده است. فاصله‌ی افقی و عمودی این نقاط از یکدیگر به ترتیب ۲٫۲ و ۱٫۸ کیلومتر است. در این مطالعه ۱۶ پریود برای محاسبات استفاده شده است.

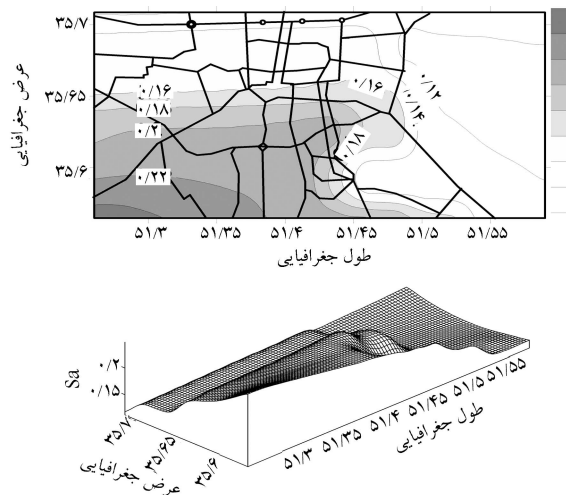
در شکل‌های ۳ تا ۹ نقشه شتاب طیفی در سطح خطر یک و در شکل‌های ۱۰ الی ۱۶ نقشه شتاب طیفی در سطح خطر دو برای دوره‌های مختلف نشان داده شده است. در این اشکال محور افقی طول جغرافیایی و محور عمودی عرض جغرافیایی بوده و خیابان‌های اصلی جنوب تهران نیز نشان داده شده است.



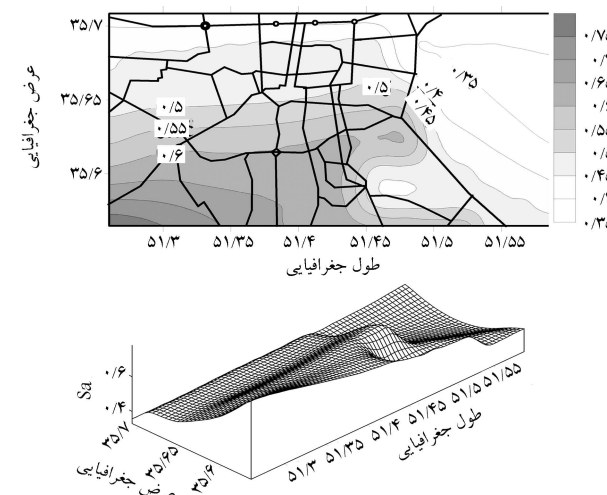
شکل ۲. نقشه‌ی شتاب طیفی ۰٫۲ ثانیه با ۱۰٪ احتمال رویداد در ۵۰ سال برای مؤلفه افقی.



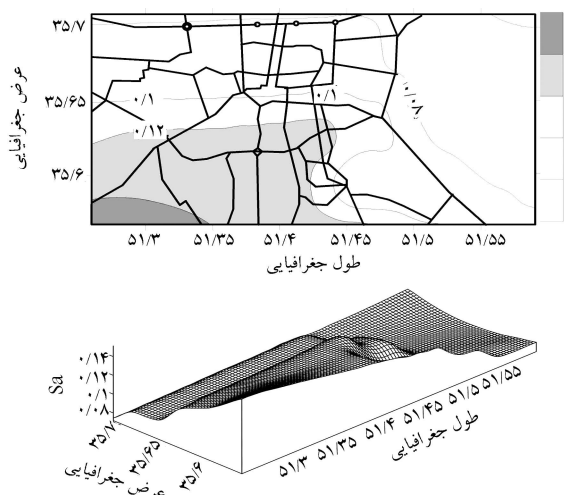
شکل ۳. نقشه‌ی شتاب طیفی ۰٫۱ ثانیه با ۱۰٪ احتمال رویداد در ۵۰ سال برای مؤلفه افقی.



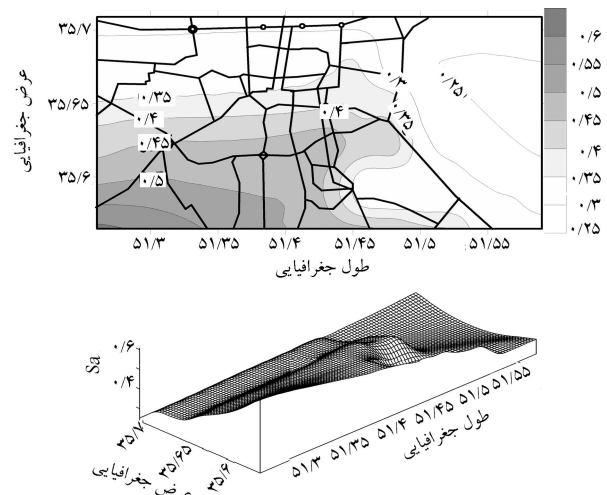
شکل ۴. نقشه‌ی شتاب طیفی ۱ ثانیه با ۱۰٪ احتمال رویداد در ۵۰ سال برای مؤلفه افقی.



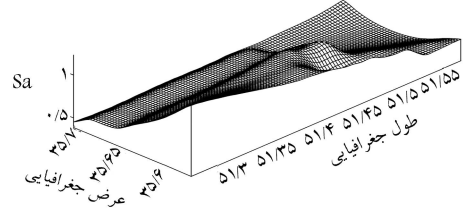
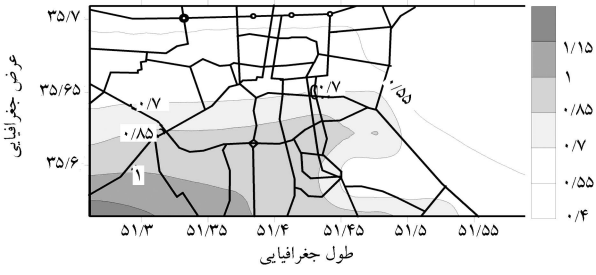
شکل ۵. نقشه‌ی شتاب طیفی ۰٫۳ ثانیه با ۱۰٪ احتمال رویداد در ۵۰ سال برای مؤلفه افقی.



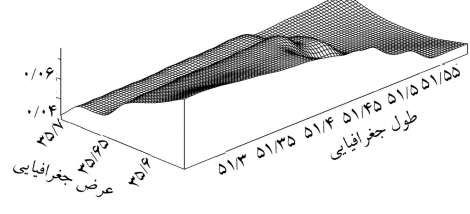
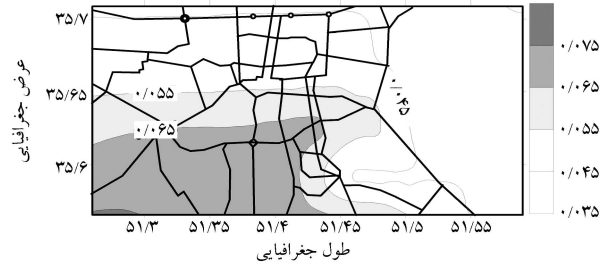
شکل ۶. نقشه‌ی شتاب طیفی ۱٫۴ ثانیه با ۱۰٪ احتمال رویداد در ۵۰ سال برای مؤلفه افقی.



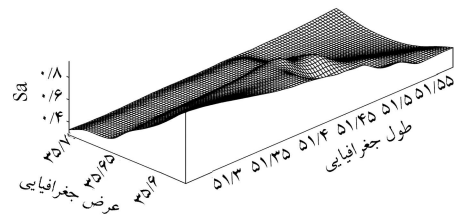
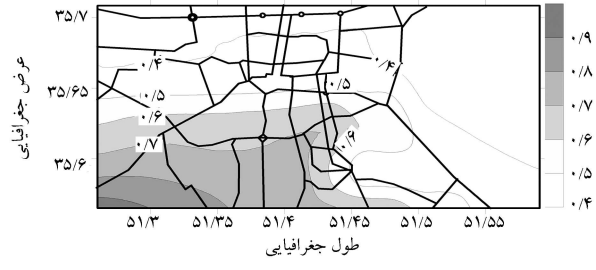
شکل ۷. نقشه‌ی شتاب طیفی ۰٫۵ ثانیه با ۱۰٪ احتمال رویداد در ۵۰ سال برای مؤلفه افقی.



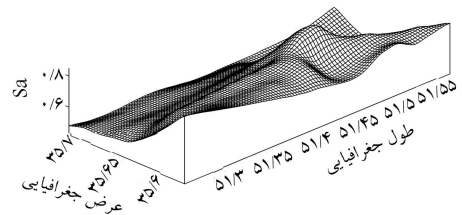
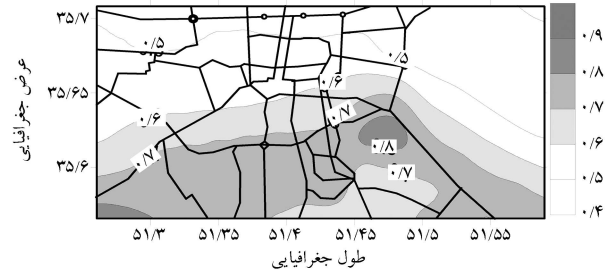
شکل ۸. نقشه‌ی شتاب طیفی ۰٫۸۵ ثانیه با ۲٪ احتمال رویداد در ۵۰ سال برای مؤلفه‌ی افقی.



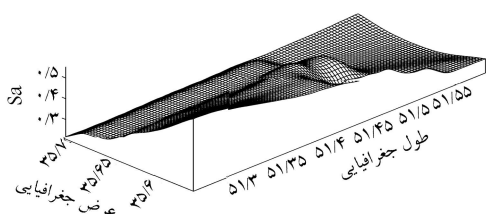
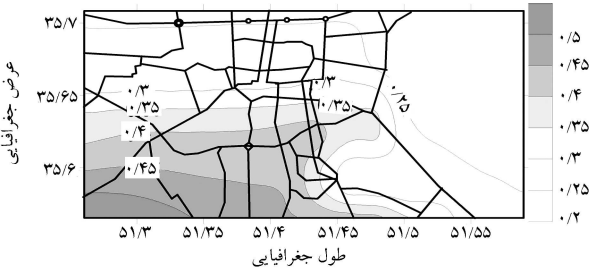
شکل ۹. نقشه‌ی شتاب طیفی ۲ ثانیه با ۱۰٪ احتمال رویداد در ۵۰ سال برای مؤلفه‌ی افقی.



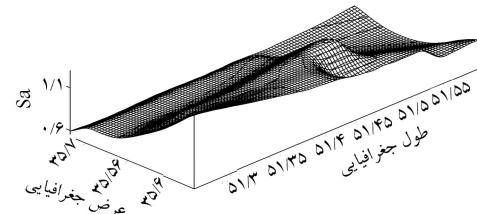
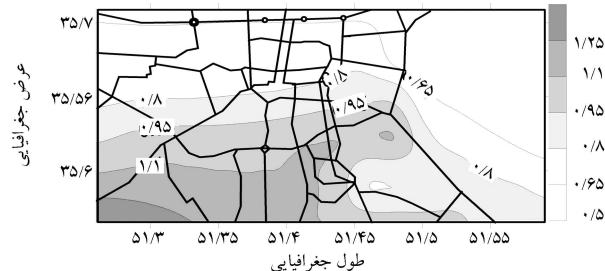
شکل ۱۲. نقشه‌ی شتاب طیفی ۰٫۷ ثانیه با ۲٪ احتمال رویداد در ۵۰ سال برای مؤلفه‌ی افقی.



شکل ۱۰. نقشه‌ی شتاب طیفی ۰٫۱ ثانیه با ۲٪ احتمال رویداد در ۵۰ سال برای مؤلفه‌ی افقی.

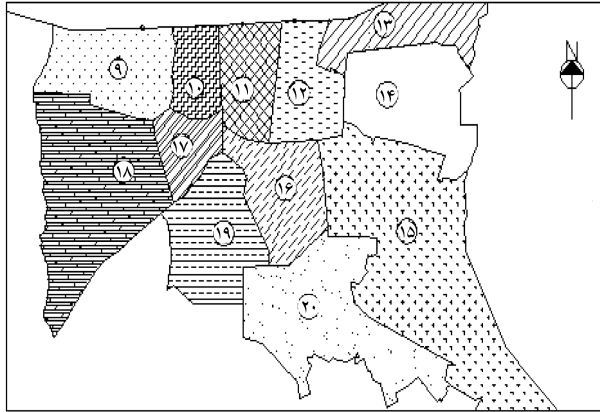


شکل ۱۴. نقشه‌ی شتاب طیفی ۱ ثانیه با ۲٪ احتمال رویداد در ۵۰ سال برای مؤلفه‌ی افقی.

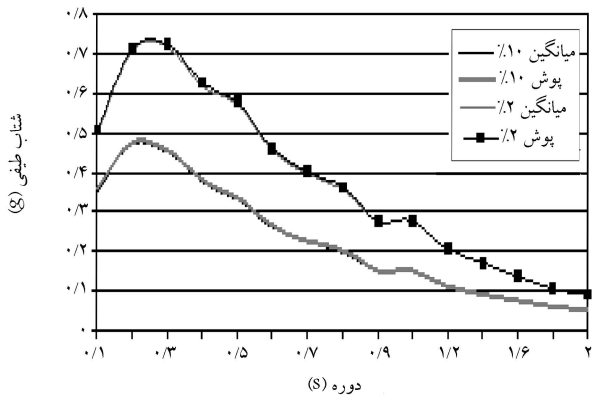


شکل ۱۱. نقشه‌ی شتاب طیفی ۰٫۳ ثانیه با ۲٪ احتمال رویداد در ۵۰ سال برای مؤلفه‌ی افقی.

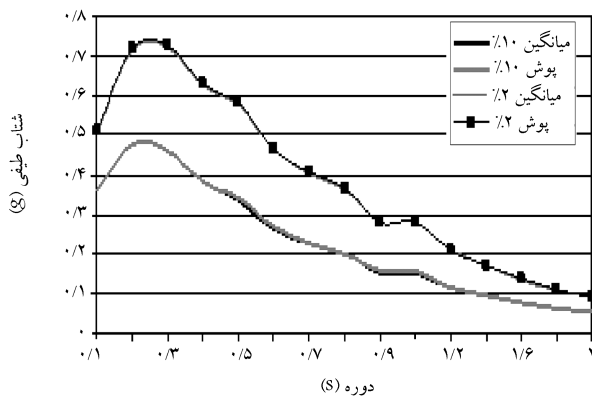
به منظور تهیه ی طیف های خطر یکسان، مناطق جنوب شهر به لحاظ تقسیمات شهرداری از یکدیگر تفکیک شده که موقعیت آنها در شکل ۱۷ نشان داده شده است. مقادیر شتاب طیفی نقاط مربوط به هر منطقه ی شهرداری محاسبه، و به صورت میانگین و بیشینه ارائه شده است. طیف خطر یکسان مناطق مختلف شهرداری جنوب شهر تهران برای دو سطح خطر، و حالت میانگین و بیشینه در شکل های ۱۸ تا ۲۸ نشان داده شده است.



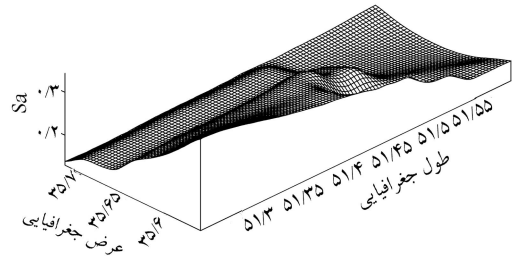
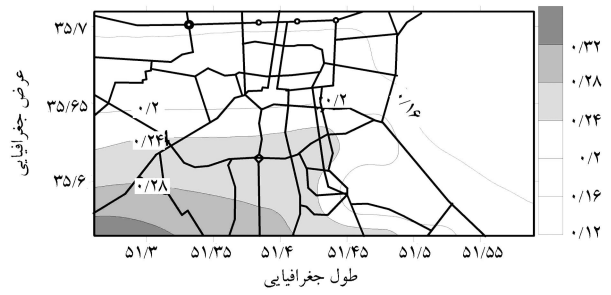
شکل ۱۷. مناطق مختلف شهرداری جنوب شهر تهران.



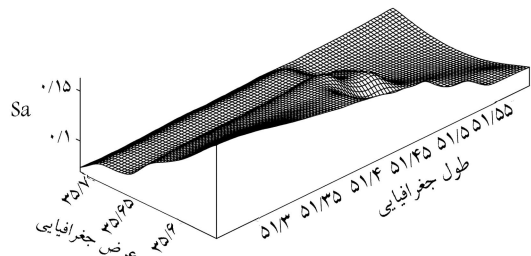
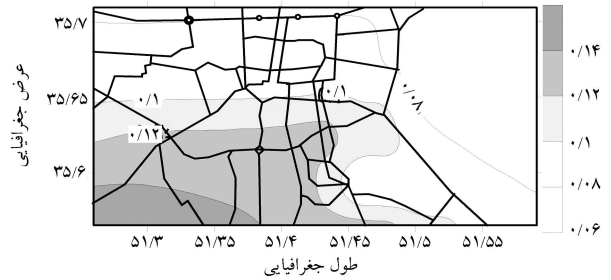
شکل ۱۸. طیف خطر یکسان افقی با ۲٪ و ۱۰٪ احتمال رویداد در ۵۰ سال عمر مفید مربوط به منطقه ی ۹ شهرداری.



شکل ۱۹. طیف خطر یکسان افقی با ۲٪ و ۱۰٪ احتمال رویداد در ۵۰ سال عمر مفید مربوط به منطقه ی ۱۰ شهرداری.



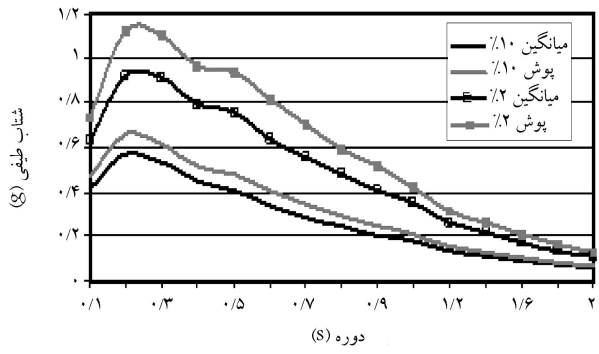
شکل ۱۵. نقشه ی شتاب طیفی ۱/۴ ثانیه با ۲٪ احتمال رویداد در ۵۰ سال برای مؤلفه افقی.



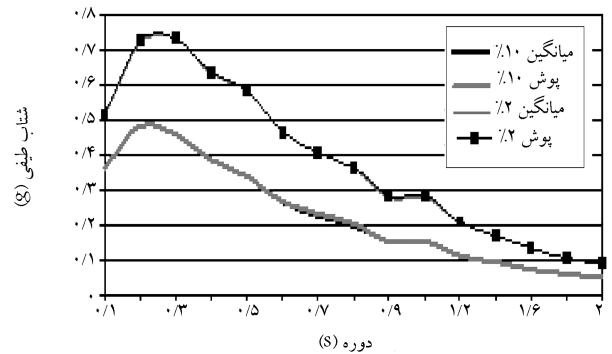
شکل ۱۶. نقشه ی شتاب طیفی ۲ ثانیه با ۲٪ احتمال رویداد در ۵۰ سال برای مؤلفه افقی.

۶. طیف خطر یکسان

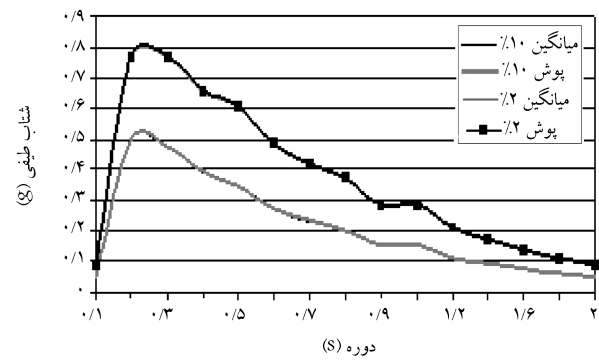
طیف خطر یکسان^۳ طیف پاسخی است که در تمام پریودها، احتمال وقوع زلزله در طول عمر سازه یکسان در نظر گرفته شده است. به عبارت دیگر، در تمامی پریودها دوره ی بازگشت شتاب طیفی برای طراحی یکسان است. برای این منظور در هر نقطه از شبکه در سطح خطر لرزه ی مشخص، برای پریودهای مختلف شتاب طیفی افقی حاصل شده که با درکنار هم قراردادن مقادیر شتاب پریودهای مختلف در هر نقطه این طیف حاصل می شود.



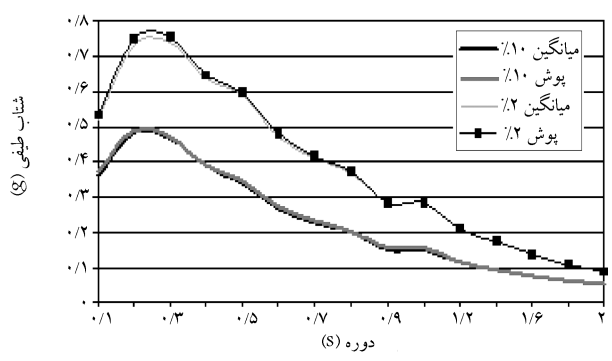
شکل ۲۴. طیف خطر یکسان افقی با ۲٪ و ۱۰٪ احتمال رویداد در ۵۰ سال عمر مفید مربوط به منطقه‌ی ۱۶ شهرداری.



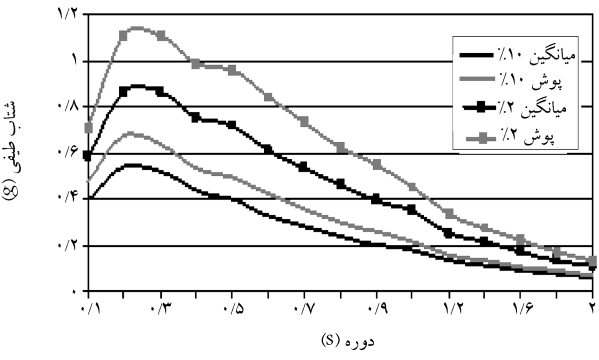
شکل ۲۵. طیف خطر یکسان افقی با ۲٪ و ۱۰٪ احتمال رویداد در ۵۰ سال عمر مفید مربوط به منطقه‌ی ۱۱ شهرداری.



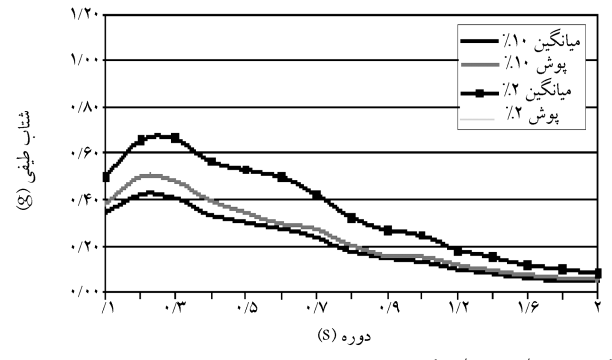
شکل ۲۶. طیف خطر یکسان افقی با ۲٪ و ۱۰٪ احتمال رویداد در ۵۰ سال عمر مفید مربوط به منطقه‌ی ۱۷ شهرداری.



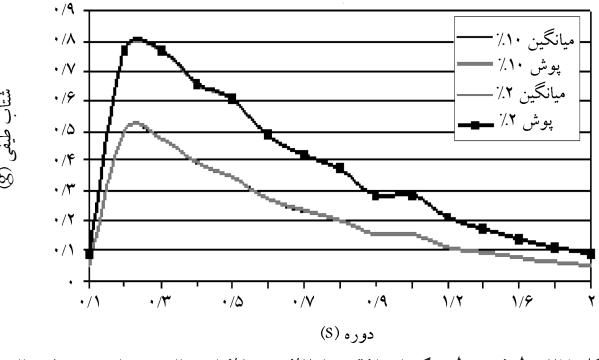
شکل ۲۷. طیف خطر یکسان افقی با ۲٪ و ۱۰٪ احتمال رویداد در ۵۰ سال عمر مفید مربوط به منطقه‌ی ۱۲ شهرداری.



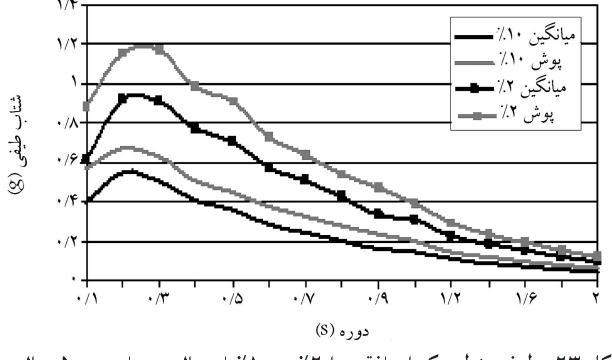
شکل ۲۸. طیف خطر یکسان افقی با ۲٪ و ۱۰٪ احتمال رویداد در ۵۰ سال عمر مفید مربوط به منطقه‌ی ۱۸ شهرداری.



شکل ۲۹. طیف خطر یکسان افقی با ۲٪ و ۱۰٪ احتمال رویداد در ۵۰ سال عمر مفید مربوط به منطقه‌ی ۱۴ شهرداری.



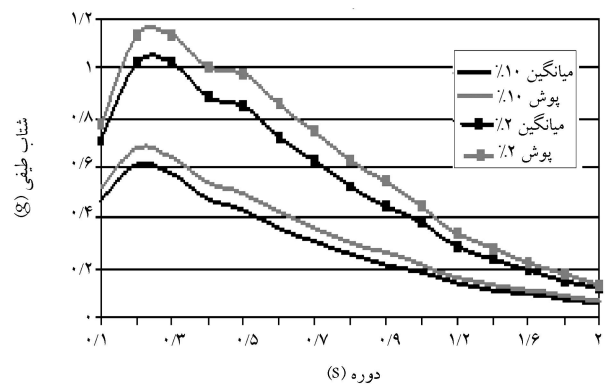
شکل ۳۰. طیف خطر یکسان افقی با ۲٪ و ۱۰٪ احتمال رویداد در ۵۰ سال عمر مفید مربوط به منطقه‌ی ۱۹ شهرداری.



شکل ۳۱. طیف خطر یکسان افقی با ۲٪ و ۱۰٪ احتمال رویداد در ۵۰ سال عمر مفید مربوط به منطقه‌ی ۱۵ شهرداری.

شده‌اند. برای برآورد پارامترهای لرزه‌خیزی از روش کیکو و نیز از رابطه‌ی کاهندگی طیفی امبرسیز، سیمپسون و بومر استفاده شده است. ارزیابی احتمالی خطر زلزله برای یک شبکه‌ی ۹ × ۱۶ در جنوب شهر تهران با استفاده از نرم‌افزار SEISRISKIII انجام شد و نتایج این ارزیابی به‌وسیله‌ی نقشه‌های شتاب طیفی افقی با ۲٪ و ۱۰٪ احتمال رویداد در ۵۰ سال نشان داده شد. در نهایت طیف خطر یکسان افقی با ۲٪ و ۱۰٪ احتمال رویداد برای مناطق مختلف شهرداری جنوب شهر تهران برای حالت میانگین و بیشینه تهیه شده است.

در مناطق جنوب غربی تهران به‌علت نزدیکی به گسل‌های شمال و جنوب ری و به‌علت تغییر نوع خاک، شتاب طیفی بیشتر از سایر نقاط خواهد بود. با حرکت از نوار جنوبی گستره به سمت شمال، شتاب طیفی با شیب نسبتاً زیادی کاهش می‌یابد. در نقشه‌های شتاب طیفی برای پروده‌های مختلف، هنگامی که نوع خاک با توجه به پروژه‌ی مطالعات تکمیلی ریزپهنه‌بندی لرزه‌ی جنوب تهران^[۱۵] از سنگی به نرم تغییر می‌کند، شتاب طیفی افزایش قابل ملاحظه‌ی می‌یابد. ضمناً در نقشه‌های هم‌شتاب طیفی، کانتورهای شتاب طیفی تقریباً برکانتورهای پهنه‌بندی خاک پروژه‌ی مطالعات تکمیلی ریزپهنه‌بندی لرزه‌ی جنوب تهران^[۱۵] منطبق است، به‌گونه‌ی که کانتورهایی که شتاب بیشتری دارند تقریباً برکانتورهایی که سرعت موج برشی کم‌تری دارند منطبق می‌شود.



شکل ۲۸. طیف خطر یکسان افقی با ۲٪ و ۱۰٪ احتمال رویداد در ۵۰ سال عمر مفید مربوط به منطقه‌ی ۲۰ شهرداری.

۷. نتیجه‌گیری

با به‌کارگیری مجموعه‌ی از داده‌های لرزه‌خیزی تاریخی و دستگاہی با پوشش زمانی از ۴ قرن پیش از میلاد تا امروز، منابع لرزه‌زا تا شعاع ۲۰۰ کیلومتری تهران مدل

پانویس

1. maximum likelihood estimation
2. probabilistic seismic hazard analysis
3. uniform hazard spectra

منابع

۱. پژوهش و بررسی ژرف نو زمین‌ساخت، لرزه زمین‌ساخت و خطر زمین‌لرزه - گسلش درگستره تهران و پیرامون، بربریان، قریشی، ارژنگ روش و مهاجر اشجعی، سازمان زمین‌شناسی کشور، گزارش شماره ۵۶، (۱۳۷۱).
2. Nowroozi, A. "Empirical relations between magnitude and fault parameters for earthquakes in Iran," *Bulletin of the Seismological Society of America*, **75**(5), pp. 1327-1338 (1985).
3. Iranian Geological Survey, <http://www.ngdir.com>.
4. Berberian, M. *Natural Hazards & the First Earthquake Catalogue of Iran, Vol. 1: Historical Hazards in Iran Prior to 1900*, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, (IIEES) (1994).
5. Nabavi, S.M. "Historical earthquakes in Iran", 300BC - 1900 AD, *Journal of Earth and Space Physics*, **7**, pp. 70-117 (1978).
6. Ambraseys, N.N. and Melville, C.P. *A History of Persian Earthquakes*, Cambridge University Press, Cambridge, Britain (1982).
7. Gardner, J.K. and Knopoff, L. "Is the sequence of earthquake in southern California, with aftershocks removed, Poissonian?" *Bulletin of the Seismological Society of America*, **64**(5), pp. 1363-1367 (1974).
8. Kijko, A., *Statistical Estimation of Maximum Regional Earthquake Magnitude Mmax*, Workshop of Seismicity Modeling in Seismic Hazard Mapping, Poljce, Slovenia, Geological Survey, pp. 1-10 (2000).
۹. گزارش داخلی کمیته ملی سدهای ایران، رابطه بین M_s و m_b (۱۳۷۰).
10. Cornell, C.A. "Engineering seismic risk analysis", *Bulletin of the Seismological Society of America*, **58**(5), pp. 1583-1606 (1968).
11. Green, A.R. and Hall, W.J., *An Overview of Selected Seismic Hazard Analysis Methodologies*, A Report on a Research Project, Department of Civil Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign (1994).
12. Douglas, J. "Earthquake ground motion estimation using strong-motion records: A review of equations for the estimation of peak ground acceleration and response spectral ordinates", *Earth-Science Reviews*, **61**(1-2), pp. 43-104 (2003).
13. Ambraseys, N.N.; Simpson, K.A. and Bommer, J.J. "Prediction of horizontal response spectra in Europe",

- Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **25**, pp. 371-400 (1996).
۱۴. Berge-Thierry, C.; Cotton, F.; Scotti, O.; Anne, D.; Pommera, G. and Fukushima, Y. "New empirical response spectral attenuation laws for moderate European earthquakes", *Journal of Earthquake Engineering*, **7**, pp. 193-222 (2003).
۱۵. مطالعات تکمیلی ریزپهنه‌بندی لرزه‌ی جنوب تهران، جعفری، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله (۱۳۸۱).
۱۶. آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله: استاندارد ۲۸۰۰ (ویرایش سوم)، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن (۱۳۸۴).
17. Bender, B. and Perkins, D.M. *SEISRISKIII: A Computer Program for Seismic Hazard Estimation*, U.S. Geological Survey, Bulletin 1772 (1987).
۱۸. دستورالعمل بهسازی لرزه‌ی ساختمان‌های موجود، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله (۱۳۸۱).