

## تحلیل خطر زمین‌لرزه و طیف طراحی مصلی امام خمینی (ره) تهران

سید علیرضا آشفته<sup>۱</sup>، احمد ادیب<sup>۲</sup>، مجید ملکی<sup>۳</sup>، غلامرضا طاهریان<sup>۴</sup>

۱- دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب- شرکت مهندسی مشاور راهوار

دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب ۲-

۳و ۴- بنیاد مسکن انقلاب اسلامی سمنان

### چکیده :

مصلی امام خمینی تهران حد فاصل کوهپایه های البرز و دشت تهران قرار گرفته است. این گستره از نقطه نظر زمین‌ساختی مرز دو پهنه البرز در شمال و ایران مرکزی در جنوب می‌باشد. گسل‌های فعالی نظیر مشا، شمال تهران، جنوب و شمال ری، کهریزک، پارچین و گرمسار در فواصل کمی از ساختمان قرار گرفته‌اند که دارای توان لرزه‌زایی بالایی بوده و طی دوره تاریخی شاهد زمین‌لرزه‌های متعددی بوده است. شواهد زمین‌ساختی نیز حاکی از فعالیت این پهنه و جنبش‌های قائم و راست‌الغز در راستای گسل‌های اصلی منطقه، نظیر مشا می‌باشد. بر اساس آخرین یافته‌ها، جنبش و فرازگیری البرز در راستای گسل‌های گستره سبب کوتاه‌شدگی پوسته به میزان ۵ میلیمتر در سال می‌گردد. داده‌های لرزه‌خیزی تاریخی و دستگاهی مبین خطر بالای زمین‌لرزه در گستره مورد مطالعه بوده و بر این اساس دوره بازگشت زمین‌لرزه‌های با بزرگای ۷/۰ و ۷/۵، در گستره‌ای به شعاع ۲۰۰ کیلومتری ساختمان، به ترتیب حدود ۱۱۷ و ۵۰۷ سال به دست آمده است. برآورد خطر لرزه‌ای ساختمان با دو رهیافت تعینی و احتمالاتی و با استفاده از چهار رابطه کاهندگی مناسب به انجام رسیده است. چشمه‌های لرزه‌زا به صورت خطی و منطبق بر گسل‌های اصلی گستره طرح در نظر گرفته شده است. در روش تعینی، بیشینه شتاب زمین‌لرزه ۰/۳۸g و مربوط به گسل شمال تهران می‌باشد. در روش احتمالاتی، بیشینه شتاب زمین‌لرزه مبنای طراحی ۰/۳۵g و برای زمین‌لرزه بیشینه طراحی ۰/۵۵g به دست آمده است. بر اساس نتایج حاصل از تفکیک خطر لرزه‌ای، گسل شمال تهران با فاصله حدود ۱۰ کیلومتر تا محل ساختمان، یکی از مهمترین سرچشمه‌های لرزه‌زای گستره است که سهم عمده‌ای در خطر لرزه‌ای ساختمان دارد. طیف‌های پاسخ ویژه ساختمان برای سطوح مختلف طراحی بر اساس طیف‌های حاصل از روش تجربی، تحلیل پاسخ ساختمان، خطر یکنواخت و روش نیومارک - حال ارائه گردیده است. طیف طراحی سطح زمین‌لرزه مبنای طراحی با طیف‌های طراحی لرزه‌ای ویرایش سوم آیین‌نامه ۲۸۰۰ ایران مقایسه شده است

**کلمات کلیدی:** تحلیل خطر زمین‌لرزه، طیف طراحی، مصلی، شتاب زمین لرزه

### مقدمه

گستره تهران که بخشی از زون البرز به شمار می‌رود، به تبع ویژگی‌های پهنه لرزه‌خیز آلپ-همالیا، گستره‌ای لرزه‌خیز محسوب می‌شود. در طی سده بیستم و دوره ثبت دستگاهی زمین‌لرزه‌های متعددی نظیر زمین‌لرزه بزرگ ۱۹۹۰ رودبار و بسیاری دیگر از زمین‌لرزه‌های کوچک و بزرگ در زون البرز اتفاق افتاده است. آخرین نمونه از زمین‌لرزه‌های مهم این گستره، زمین‌لرزه ۲۰۰۴ فیروزآباد کجور می‌باشد. این زمین‌لرزه سبب ترس و نگرانی مردم در شهر تهران و آسیب‌های جزئی در برخی از ساختمان‌ها در بخش‌های شمال غربی تهران گردید. مطالعه حاضر به منظور محاسبه خطر لرزه‌ای و تفکیک خطر برای دو سطح خطر زمین‌لرزه مبنای طراحی (دوره بازگشت ۴۷۵ سال) و زمین‌لرزه بیشینه طراحی (دوره بازگشت ۲۴۷۵ سال) صورت گرفته است. از سوی دیگر توسعه روابط کاهندگی در قالب نسل جدید روابط کاهندگی ارائه شده توسط محققین مرکز تحقیقات زمین‌لرزه دانشگاه برکلی در سال ۲۰۰۸ و نیز سایر روابط تدقیق شده مناسب برای فلات ایران زمینه‌ای را برای بازبینی و تدقیق مطالعات انجام شده فراهم نموده است. مقاله حاضر به مطالعات تکمیلی تحلیل خطر زمین‌لرزه و تهیه طیف طراحی پروژه «مصلی امام خمینی (ره) تهران» اختصاص دارد. هدف اصلی از این مقاله ارائه پارامترها و ویژگی‌های بارگذاری لرزه‌ای در ساختمان مصلی امام خمینی (ره) تهران است؛ به گونه‌ای که نتایج آن پارامترهای ورودی تحلیل دینامیکی را در اختیار طراح قرار دهد. به طور ساده روش‌های تحلیل دینامیکی سازه‌ها به سه روش شبه استاتیکی، طیفی و حوزه زمان تقسیم می‌شود. در روش‌های شبه استاتیکی و طیفی پارامترهای بیشینه شتاب زمین‌لرزه و طیف پاسخ ساختمان، بارگذاری لرزه‌ای را معرفی می‌نمایند. در روش سوم علاوه بر این نداشت‌های زمین‌لرزه متناسب با شرایط ساختمان مورد نیاز خواهد بود. مطالعات حاضر در بردارنده نتایجی است بارگذاری لرزه‌ای برای هر سه روش تحلیل فوق‌الذکر را معرفی می‌نماید.

مجموعه مصلای امام خمینی (ره) تهران حد فاصل خیابان‌های شهید بهشتی، شهید قنبرزاده و بزرگراه‌های رسالت و مدرس قرار گرفته است. شکل (۱) موقعیت مصلی امام خمینی را در نقشه مناطق ۲۲گانه شهرداری و نقشه شهری تهران به مقیاس ۱:۵۰۰۰۰ نشان داده است.

مختصات محدود مورد مطالعه به طور میانگین به صورت زیر می‌باشد:

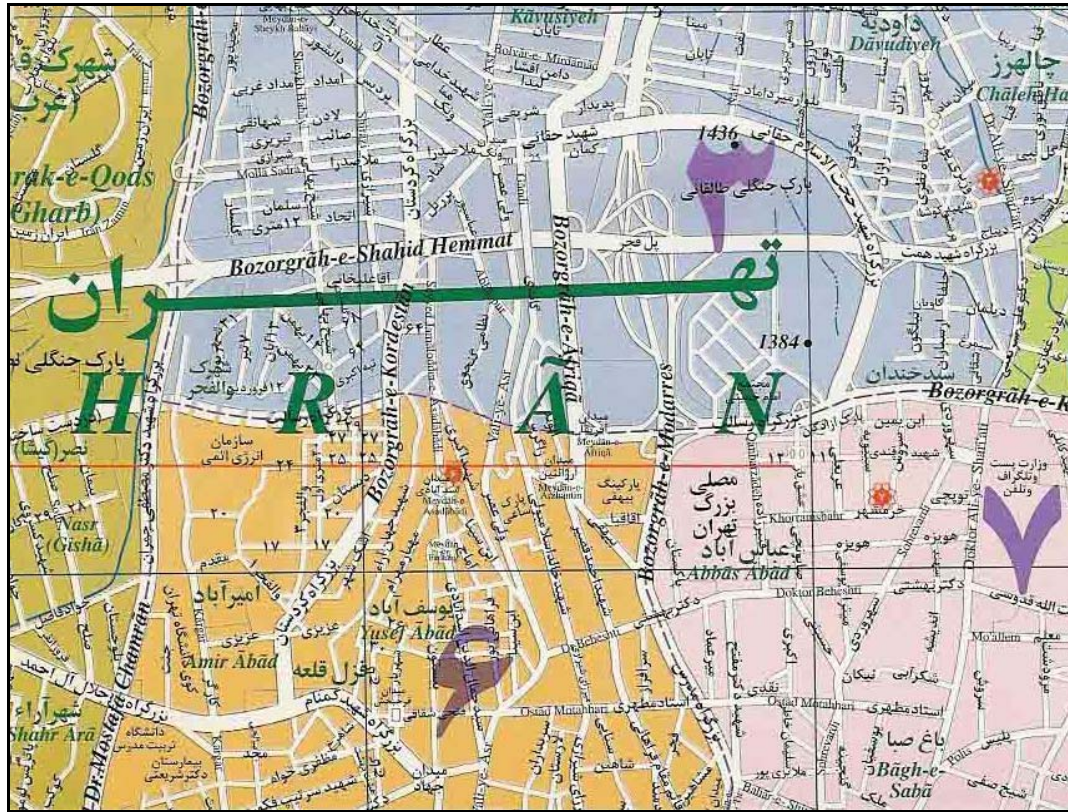
$51^{\circ} 25' 32.8'' E$

طول جغرافیایی

$35^{\circ} 44' 17.7'' N$

عرض جغرافیایی

گستره مورد مطالعه در محدوده مرکزی شهر تهران و بر روی کوهپایه‌های البرز قرار گرفته است. در شمال این گستره ارتفاعات البرز و به سمت جنوب آن دشت تهران قرار دارد.



شکل (۱): موقعیت طرح بر روی نقشه تهران به مقیاس ۱:۵۰/۰۰۰

بر اساس این مطالعات بیشینه شتاب زمین در گستره ساختگاه برای دوره‌های بازگشت ۵۰ سال بین ۲۵ تا ۳۰ درصد شتاب ثقل زمین و برای دوره بازگشت ۴۷۵ سال بین ۳۵ تا ۴۵ درصد شتاب ثقل زمین برآورد گردیده است. پس از آن بربریان و همکاران (۱۳۶۴) در مقیاس ناحیه‌ای مطالعات جامعی برای شناسایی و معرفی گسل‌های گستره تهران به انجام رساندند. این مطالعه منجر به تهیه نقشه گسل‌های چهار گوش تهران در مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰ و همچنین نقشه گسل‌های محدوده شهر تهران با مقیاس منطقه‌ای گردید. همچنین در طی این مطالعات تحلیل خطر زمین‌لرزه در چهار گوش تهران، با رویکرد احتمالاتی برای سه دوره بازگشت ۲۰، ۵۰ و ۱۰۰ سال به انجام رسید. بر اساس این مطالعات بیشینه شتاب زمین در گستره ساختگاه به ترتیب برای دوره‌های بازگشت ۲۰، ۵۰ و ۱۰۰ سال حدود ۰/۱۵، ۰/۲۳ و ۰/۲۸ شتاب ثقل زمین برآورد گردیده است. در راستای مطالعات طرح کالبدی ملی ایران (۱۳۷۶) مرکز مطالعات و تحقیقات شهرسازی و معماری ایران نقشه‌های پهنه‌بندی خطر نسبی زمین‌لرزه در ایران را ارائه نموده است. بر اساس این مطالعات گستره مورد مطالعه در پهنه با خطر «سبنا بالا» قرار گرفته است. توکلی و غفوری آشتیانی (Tavakoli and Ghafory-Ashtiany, 1999) با استفاده از رویکرد احتمالاتی، نقشه‌های خطر زمین‌لرزه برای دو دوره بازگشت ۷۵ و ۴۷۵ سال را برای گستره ایران تهیه کرده‌اند. بر اساس این مطالعات بیشینه شتاب زمین‌لرزه در گستره ساختگاه، برای دوره‌های بازگشت ۷۵ و ۴۷۵ سال به ترتیب حدود ۰/۳۵ و ۰/۴۵ شتاب ثقل زمین برآورد گردیده است. همچنین گستره مورد مطالعه بر اساس ویرایش دوم آیین‌نامه طرح ساختمان‌ها در برابر زلزله در پهنه با خطر بسیار بالا و شتاب مبنای طراحی ۰/۳۵ شتاب ثقل زمین قرار گرفته است. بر اساس ویرایش سوم آیین‌نامه ۲۸۰۰ ایران نیز گستره مورد مطالعه در پهنه با خطر نسبی بسیار بالا و شتاب مبنای طراحی ۰/۳۵ شتاب ثقل زمین قرار گرفته است.

## لرزه‌خیزی گستره

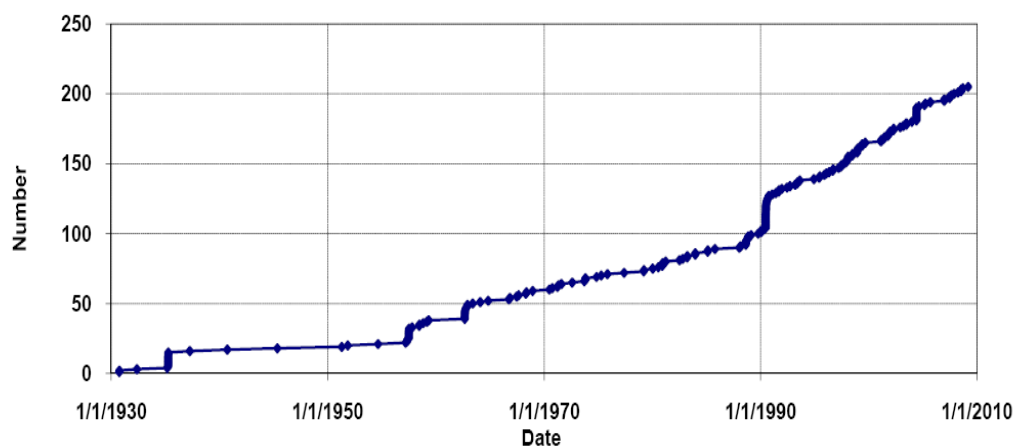
گستره طرح با توجه به موقعیت ساختاری و وضعیت تنش‌های حاکم بر آن منطقه‌های لرزه‌خیز و پرتکاپو است. نگاهی به نقشه لرزه‌خیزی ایران به خوبی فعالیت و جنبایی این پهنه از کشور را نمایان می‌سازد. علاوه بر زلزله‌های دستگاهی ثبت شده سوابق بسیاری از تخریب مناطق گستره طرح در اثر وقوع زمین‌لرزه‌های متعدد در دست می‌باشد. شناسایی لرزه‌خیزی دراز مدت منطقه جهت برآورد پارامترهای لرزه‌خیزی آن گامی اساسی و مهم به شمار می‌رود. صرف نظر از دقت داده‌های به دست آمده در بررسی لرزه‌خیزی هر گونه نشانه‌ای از فعالیت لرزه‌ای در منطقه می‌تواند نقشی اساسی در تبیین لرزه‌خیزی و شناسایی چشمه‌های

لرزه‌ها ایفا نماید. در کاتالوگ زمین‌لرزه‌ها، بزرگای زمین‌لرزه‌ها ( $M$ ) بر حسب مقیاس‌های متفاوتی بیان می‌شود. جهت یکنواختی بزرگای مختلف،  $M$  برای زمین‌لرزه‌های دارای بزرگای گشتاوری برابر  $M_w$ ، درغیر اینصورت برای زمین‌لرزه‌های با بزرگای بیش از ۶ برابر با  $M_s$  و برای زمین‌لرزه‌های با بزرگای کمتر یا مساوی ۶ برابر با  $m_b$  در نظر گرفته شده است.

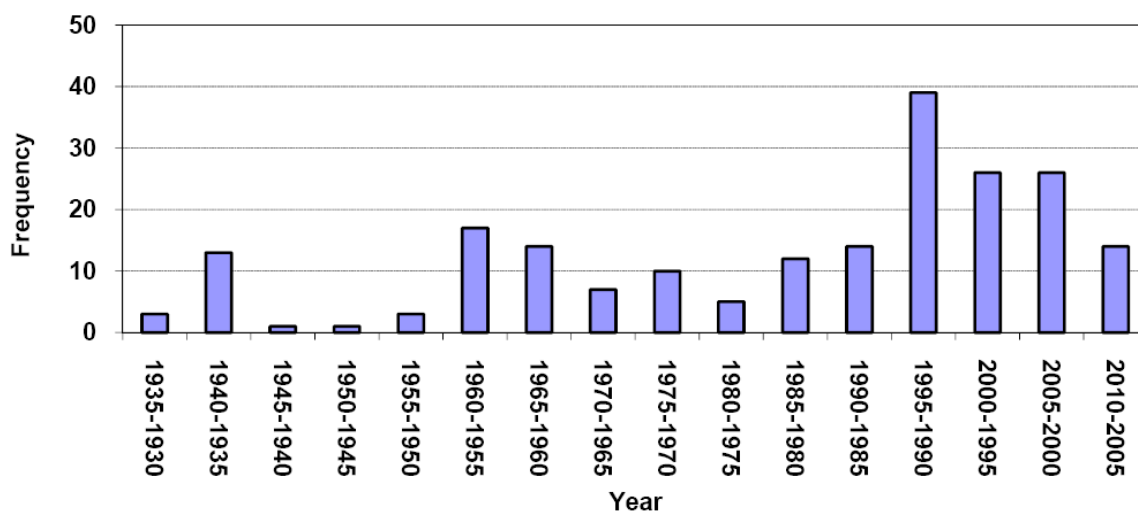
## توزیع زمین‌لرزه‌ها

توزیع مکانی زمین‌لرزه‌های دستگاهی گستره ساختگاه چنان که مشاهده می‌شود توزیع زمین‌لرزه‌ها یکنواخت نبوده و در یک نگاه کلی از ساختارهای زمین ساختی اصلی منطقه تبعیت می‌کند. به گونه‌ای که در بخش‌های شمالی ساختگاه که زون فعال البرز قرار دارد، فعالیت لرزه‌خیزی به مراتب از بخش‌های جنوبی که به لحاظ ساختاری لبه شمالی ایران مرکزی محسوب می‌شود، بیشتر است. شکل (۲) توزیع تجمعی زمین‌لرزه‌های با بزرگای بیش از ۴/۰ در گستره‌ای به شعاع ۲۰۰ کیلومتر از محل ساختگاه را نشان می‌دهد. چنان که مشاهده می‌شود نرخ رویداد زمین‌لرزه‌ها (شیب منحنی فراوانی تجمعی در برابر زمان) ثابت نبوده و با گذشت زمان افزایش می‌یابد. این مسئله به علت پیشرفت‌های صورت گرفته در زلزله‌شناسی جهانی و ثبت زمین‌لرزه‌های بیشتر و با بزرگای کوچکتر می‌باشد. همچنین در طول زمان علاوه بر تغییر نرخ رویداد زمین‌لرزه‌ها پرش‌های ناگهانی در تعداد زمین‌لرزه‌های رویداده در گستره مشاهده می‌شود که به وقوع زمین‌لرزه‌های بزرگ و تعداد قابل توجهی از پس‌لرزه‌های متعاقب آن مربوط می‌شود. در شکل (۳) نیز توزیع زمانی زمین‌لرزه‌های دستگاهی با بزرگای بیش از ۴، در بازه‌های زمانی پنج ساله نشان داده شده است. افزایش قابل ملاحظه تعداد زمین‌لرزه‌ها از سال ۱۹۶۰ به بعد، به توسعه شبکه جهانی لرزه‌نگاری و ثبت زمین‌لرزه‌های با بزرگای متوسط و افزایش نسبتاً شدید تعداد رویداد زمین‌لرزه‌ها در سال‌های اخیر به توسعه شبکه لرزه‌نگاری ملی و ثبت زمین‌لرزه‌های متوسط و کوچک مربوط است.

Cumulative Number of Eartquakes

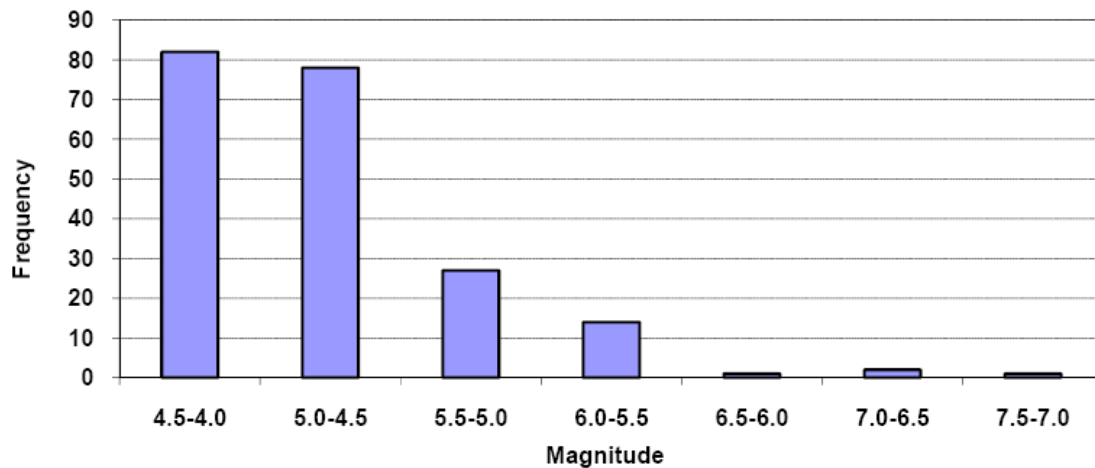


شکل (۲): توزیع تجمعی زمین‌لرزه‌های دستگاهی گستره‌ای به شعاع ۲۰۰ کیلومتر از ساختگاه



شکل (۳): فراوانی رویدادهای لرزه‌ای در گستره‌ای به شعاع ۲۰۰ کیلومتر برای بازه‌های زمانی پنج سال

شکل (۴) توزیع تعداد رویداد زمین‌لرزه‌ها را در بازه بزرگ‌ا نشان می‌دهد. با توجه به شکل ملاحظه می‌گردد اگرچه تعداد رویداد زمین‌لرزه‌ها در بازه بین ۴/۰ تا ۴/۵ بیشترین مقدار را دارد. اما نسبت فراوانی مورد انتظار کمتر از مقدار مشاهده شده است؛ دلیل این کاهش در فراوانی زمین‌لرزه‌های کوچک، کاستی‌های کاتالوگ و دستگاهی لرزه‌نگاری است که در بازه وسیعی از دوره زمانی قادر به ثبت زمین‌لرزه‌های کوچک نبوده است.



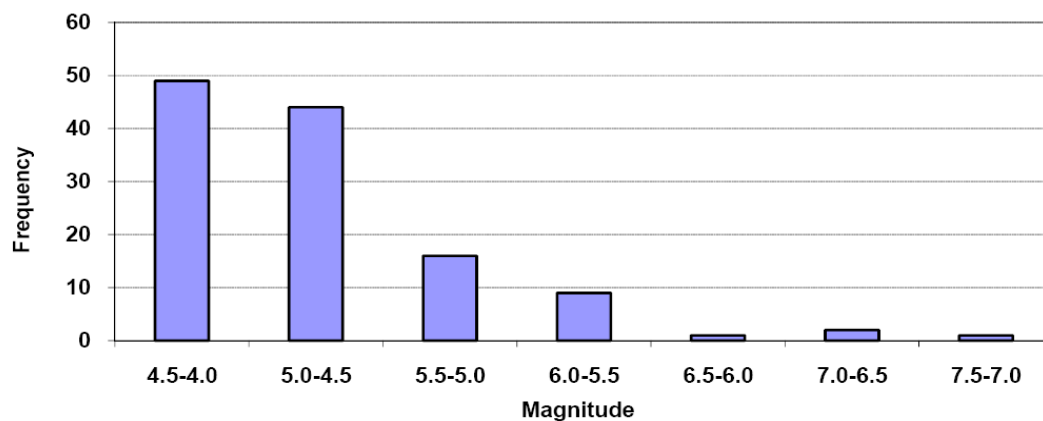
شکل (۴): فراوانی زمین‌لرزه‌ها در بازه‌های بزرگ در گستره‌ای به شعاع ۲۰۰ کیلومتر

## حذف پس‌لرزه‌ها و پیش‌لرزه‌ها

در تحلیل خطر زمین‌لرزه از یک مدل آماری جهت پیش‌بینی رخداد زمین‌لرزه استفاده می‌شود. در حال حاضر بیش از همه از مدل پواسون که دارای توزیعی به صورت زیر می‌باشد استفاده می‌شود:

$$P = \frac{(vt)^n \text{EXP}(-vt)}{n!} \quad (۱-۳)$$

در رابطه فوق  $P$  احتمال وقوع  $n$  زمین‌لرزه در مدت  $t$  سال را نشان می‌دهد.  $V$  نیز نرخ متوسط سالانه رویداد زمین‌لرزه است که بر اساس لرزه‌خیزی منطقه به دست می‌آید. در مدل پواسون فرض بر این است رخداد فرایند در بازه زمان کاتوره‌ای و فاقد حافظه است. به عبارت دیگر رخداد زمین‌لرزه مستقل از زمان سپری شده از آخرین رویداد و بزرگی آن مستقل از سایر فرایندهای رویداده است. با توجه به این مسئله لازم است پس‌لرزه‌ها و پیش‌لرزه‌ها که فرایندهای وابسته محسوب می‌شوند، از فهرست زمین‌لرزه‌ها حذف شوند. متداولترین روش برای حذف پیش‌لرزه‌ها و پس‌لرزه‌ها استفاده از پنجره‌های زمانی و مکانی می‌باشد (Gardner and Knopoff, 1974). در پروژه حاضر از میان ۲۰۵ زمین‌لرزه ثبت شده با بزرگای بیش از ۴/۰ در گستره به شعاع ۲۰۰ کیلومتر از ساختگاه ۸۳ رویداد وابسته استخراج و حذف گردید. شکل (۵) توزیع تعداد رویداد زمین‌لرزه‌ها در بازه بزرگ، پس از حذف پیش‌لرزه‌ها و پس‌لرزه‌ها را نشان می‌دهد.

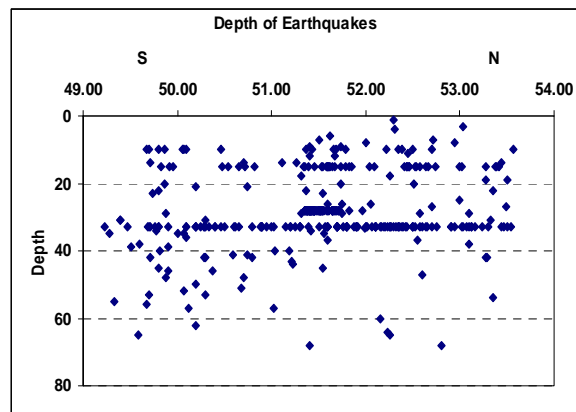


شکل (۵): فراوانی زمین‌لرزه‌ها در بازه‌های بزرگ پس از حذف پیش‌لرزه‌ها و پس‌لرزه‌ها

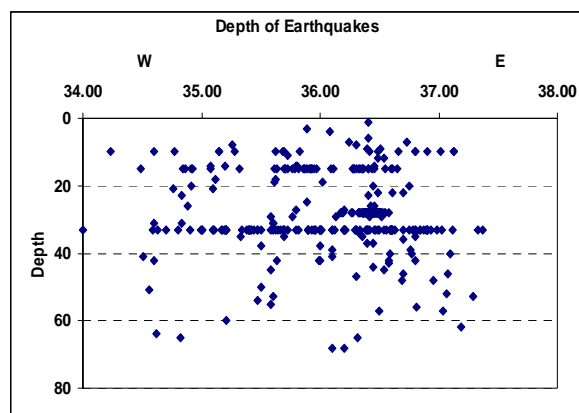
## عمق کانونی زمین‌لرزه‌ها

شکل‌های (۶) و (۷) به ترتیب توزیع زمین‌لرزه‌ها در دو مقطع شمالی-جنوبی و شرقی-غربی را نشان می‌دهد چنان که دیده می‌شود عمق زمین‌لرزه‌ها دارای پراکندگی نسبتاً زیادی می‌باشد. شکل (۸) فراوانی نسبی زمین‌لرزه‌ها را در برابر بازه‌های عمق کانونی نشان می‌دهد. این نمودار نشان می‌دهد که حدود ۳۵ درصد از زمین‌لرزه‌های گستره دارای عمق کانونی کمتر از ۳۰ کیلومتر هستند. برای نزدیک به ۴۵ درصد زمین‌لرزه‌ها نیز عمق بین ۳۰ تا ۴۰ کیلومتر ثبت شده است. عمق ۳۳ کیلومتر (ضخامت متوسط پوسته) برای اکثر این زمین‌لرزه‌ها، به علت عدم امکان تعیین عمق به ثبت رسیده است. برای کمی بیش از ۲۰ درصد زمین‌لرزه‌ها نیز عمق کانونی بیش از ۴۰ کیلومتر محاسبه شده است. لازم به ذکر است، این نتایج بر اساس داده‌های زمین‌لرزه در کاتالوگ‌های جهانی است که به ویژه برای عمق دقت مناسبی ندارند. نتایج بررسی‌های اخیر محققین و ارزیابی مجدد عمق زمین‌لرزه‌ها در ایران (Maggi et al., 2000) نشان می‌دهد که عمق زمین‌لرزه‌ها در داخل فلات ایران همواره کمتر از ۲۰ کیلومتر و به طور متوسط ۱۰ کیلومتر می‌باشد. بررسی‌های اخیر عمق پوسته در منطقه البرز (Javan Doloei and Roland Roberts, 2003) عمق موهو و نتیجتاً لایه لرزه‌زا را به ۴۵ کیلومتر محدود می‌نماید. این نتایج با نتایج مطالعات دهقانی و

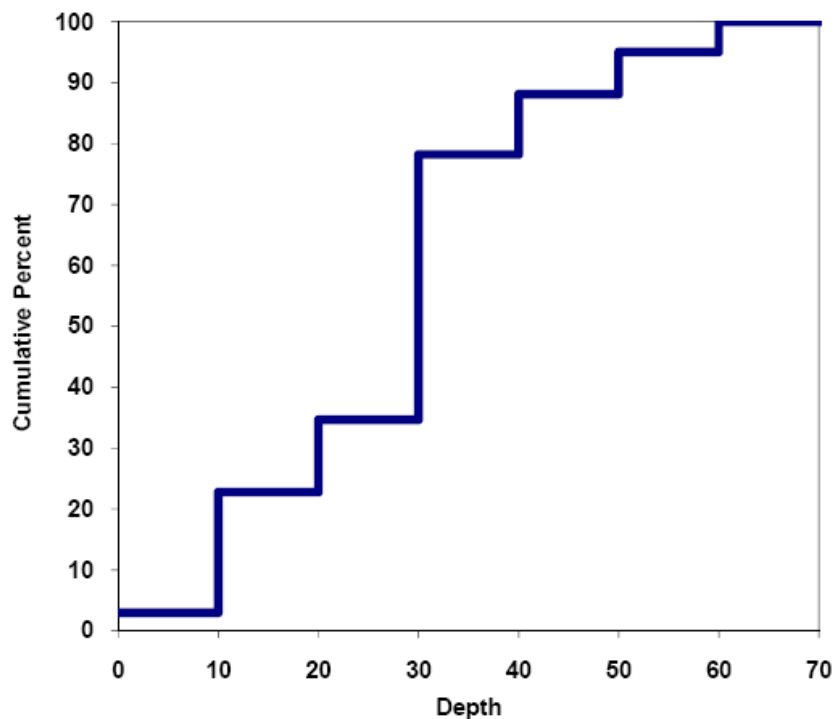
ماکریس (Dehghani and Makris, 1983, 1984) بر اساس گرانی‌سنجی همخوانی دارد. با توجه به این مسئله عمق کانونی زمین‌لرزه‌ها به منظور استفاده در تحلیل خطر زمین‌لرزه در گستره طرح کمتر از ۲۰ کیلومتر در نظر گرفته شده است.



شکل (۶): توزیع زمین‌لرزه‌ها در مقطع شمالی-جنوبی



شکل (۷): توزیع زمین‌لرزه‌ها در مقطع شرقی-غربی



شکل (۸): درصد فراوانی تجمعی زمین‌لرزه‌ها به ازاء عمق کانونی

## دوره بازگشت زمین لرزه‌ها

در این بخش جهت برآورد دوره بازگشت زمین لرزه‌ها در گستره ساختمانها از هر سه روش توزیع نمایی گوتنبرگ - ریشتر، توابع برازش مقادیر نهایی I، III و S و همچنین روش کیکو و سلوول استفاده شده است. در نهایت با در نظر گرفتن نتایج به دست آمده از روش‌های مختلف دوره بازگشت زمین لرزه‌ها در گستره طرح ارائه شده است.

### روش گوتنبرگ - ریشتر

بررسی فراوانی زمین لرزه‌ها در ارتباط با بزرگای آنها در بازه‌های مختلف زمانی و مکانی رابطه‌ای لگاریتمی بین بزرگا و فراوانی را پیشنهاد می‌نماید. چنین رابطه‌ای توسط گوتنبرگ و ریشتر (Gutenberg and Richter, 1954) به صورت زیر بیان شده است:

$$\text{Log}(N_c) = a - bM$$

در این رابطه  $N_c$  فراوانی تجمعی زمین لرزه‌ها در یک بازه‌ای از زمان و مکان،  $a$  ضریب لرزه‌خیزی متناسب با آهنگ کلی رویداد و  $b$  ضریب لرزه‌خیزی نسبی هستند. ضرایب  $a$  و  $b$  به راحتی با برازش رابطه خطی بین لگاریتم فراوانی تجمعی و بزرگا قابل محاسبه هستند. در عمل با توجه به کاربرد وسیع این رابطه در توابع آماری و احتمالاتی از لگاریتم طبیعی برای بیان این رابطه استفاده می‌شود:

$$N_c = e^{\alpha - \beta M}$$

$$\alpha = 10^a$$

$$\beta = b \ln 10$$

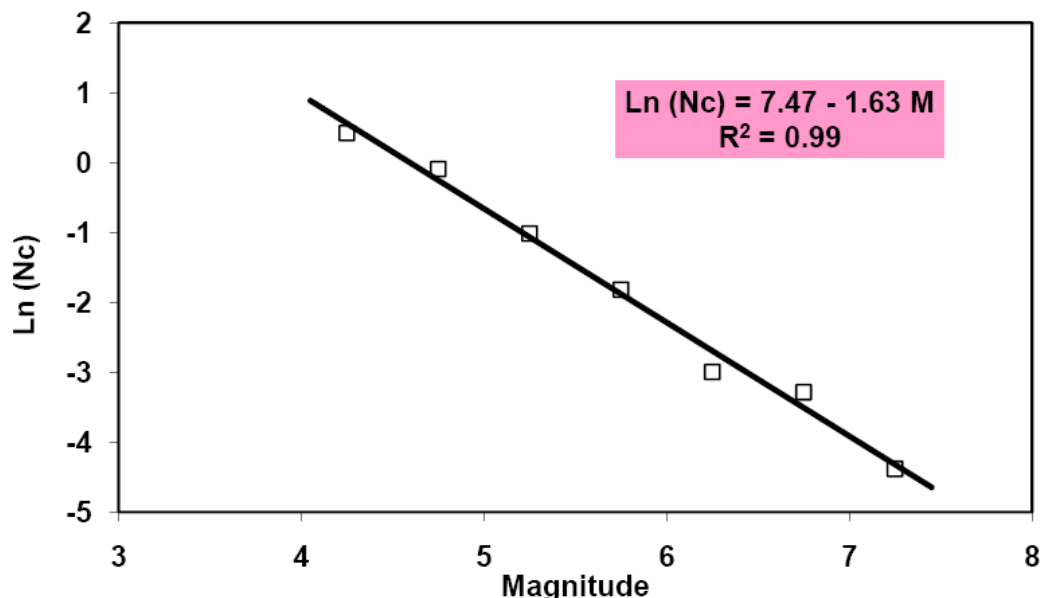
منحنی توزیع احتمال برای رابطه گوتنبرگ - ریشتر به صورت زیر خواهد بود:

$$P(M < M_i) = 1 - \text{Exp}[-\beta(M_i - m_0)]$$

در رابطه فوق  $m_0$  بزرگای آستانه می‌باشد. ضرایب  $\alpha$  و  $\beta$  برای یک چشمه، یک زون لرزه‌زمین‌ساختی و یا هر بازه مکانی دیگر و همچنین برای بازه‌های زمانی مختلف قابل محاسبه است. اگرچه مشخص است که افزایش طول دوره بررسی نتایج واقع‌بینانه‌تری در بر خواهد داشت. شکل (۹) برازش رابطه خطی بین لگاریتم فراوانی تجمعی زمین لرزه‌ها و بزرگا را برای گستره‌ای به شعاع ۲۰۰ کیلومتر از ساختمان نشان می‌دهد. رابطه خطی گوتنبرگ - ریشتر برای گستره مذکور به صورت زیر به دست آمده است:

$$\text{Ln}(N_c) = 7.47 - 1.63M$$

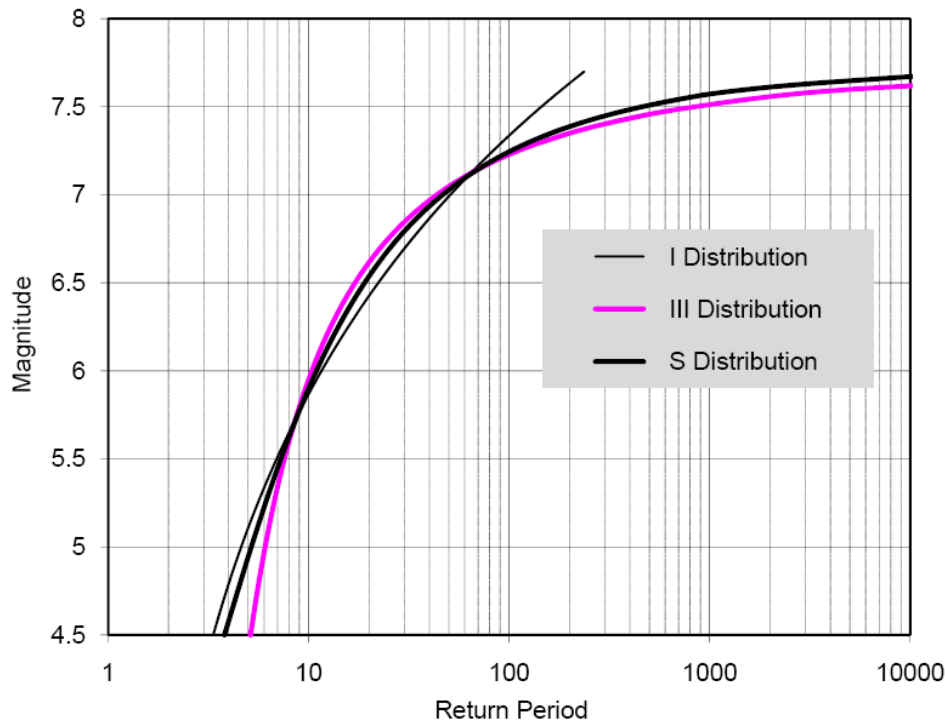
در این روابط  $N_c$  فراوانی زمین لرزه‌های با بزرگای بیشتر یا مساوی  $M$  در یک سال است. چنان که ضرایب لرزه‌خیزی نشان می‌دهد گستره مورد مطالعه، دارای لرزه‌خیزی بالایی است. بر این اساس دوره بازگشت زمین لرزه‌های با بزرگای ۷ و بیش از آن در گستره‌ای به شعاع ۲۰۰ کیلومتر از ساختمان با فرض بیشینه بزرگای ۷/۸، ۷۰ سال می‌باشد.



شکل (۹): رابطه خطی گوتنبرگ - ریشتر در گستره ساختمان

### روش برازش مقادیر نهایی

شکل (۱۰) دوره بازگشت زمین لرزه‌ها با استفاده از توابع توزیع I، III و S را در گستره‌ای به شعاع ۲۰۰ کیلومتر از محل ساختمان نشان می‌دهد. چنان که دیده می‌شود این توابع برای زمین لرزه‌های با بزرگای حدود ۷ دوره بازگشتی نزدیک به ۵۰ سال و برای زمین لرزه‌های با بزرگای ۷/۵ دوره بازگشتی حدود ۵۰۰ سال را نشان می‌دهند.



شکل (۱۰): دوره بازگشت زمین‌لرزه‌ها در گستره ۲۰۰ کیلومتری از ساختمان با استفاده از توابع توزیع I, III و S

### خلاصه نتایج تحلیل خطر زمین‌لرزه

برای ساختمان مصلی امام خمینی تهران به دو روش تعینی و احتمالاتی تحلیل خطر زمین‌لرزه به انجام رسید. در هر دو روش تعینی و احتمالاتی از مدل چشمه‌های لرزه‌زای خطی و منطبق بر گسل‌های اصلی منطقه استفاده شد. با استفاده از الگوریتم ذکر شده برای تحلیل خطر زمین‌لرزه، خطر لرزه‌ای به دست آمده نسبت به فاصله، بزرگا و عدم قطعیت برای سه دوره بازگشت، ۱۰ سال، ۴۷۵ سال (۱۰٪ احتمال وقوع در ۵۰ سال) و ۲۴۷۵ سال (۲٪ احتمال وقوع در ۵۰ سال) تفکیک گردید. همچنین بر اساس تفکیک خطر لرزه‌ای برای هر دو دوره بازگشت ۴۷۵ و ۲۴۷۵ سال زمین‌لرزه‌های با فواصل کمتر از ۲۵ کیلومتر عمده ترین خطر لرزه‌ای ساختمان را ایجاد می‌کنند. در بین سرچشمه‌های لرزه‌زاه، گسل شمال تهران با فاصله کمتر از ۱۰ کیلومتر مهمترین سرچشمه لرزه‌زای ساختمان به شمار می‌رود. زمین‌لرزه‌های با فواصل متوسط تا ۲۰ کیلومتر که عمدتاً ناشی از گسل مشا در شمال و گسل‌های ری، کهریزک و پارچین در جنوب گستره هستند بخش دیگری از خطر لرزه‌ای ساختمان را موجب می‌شوند.

### شرایط ساختمانی

منطقه مورد مطالعه در دامنه‌های جنوبی رشته‌کوه البرز و بر روی نهشته‌های جوان دوران چهارم قرار دارد. بر اساس گزارش مطالعات ژئوتکنیک و ژئوفیزیک مصلی امام خمینی (ره) تهران، محل ساختمان عمدتاً توسط آبرفت‌های پلیوکواترن سازند هزاردره (سری A) و در برخی از نقاط سازندهای جوان‌تر شامل آبرفت‌های ناهمگن شمال تهران (سری Bn) پوشیده شده است.

بطور کلی سازند هزار دره شامل کنگلومرای نسبتاً همگن با قلوه سنگ، شن و ریگ می‌باشد که در یک محیط سیلابی تشکیل یافته و فضاهای میان دانه‌ها را ماسه و سیلت پر کرده است. ضخامت زیاد و همگنی، لایه‌بندی منظم، سیمان سخت و رنگ عمومی خاکستری از ویژگیهای بارز سازند A می‌باشد. قلوه‌های نیمه گرد شده با حداکثر اندازه ۲۵-۱۰ سانتی‌متر که اکثراً از سازند کرج منشاء گرفته‌اند مواد اصلی تشکیل دهنده این سازند هستند. شیب لایه‌ها غالباً ۴۵ درجه می‌باشد ولی گاهی ۹۰ درجه و حتی لایه‌های واژگون نیز مشاهده می‌شود. این سازند شدیداً چین‌خورده و توسط گسل‌های جوان تحت تاثیر قرار گرفته است. نهشته‌های سازند Bn مخلوطی از شن، ریگ، قلوه سنگ، ماسه و رس و گاهی حتی بلوکهای درشت می‌باشد که بطور نامتجانس دیده می‌شود. این سازند بطور دگرشیب بر روی قسمت فرسایش یافته سازند هزار دره قرار گرفته و امروزه به همان صورت اولیه در فرونشست اصلی خود برجا بوده و بشکل تپه‌های بلند در کوهپایه‌های تهران رخنمون دارد. این سازند با مشخصاتی نظیر وضعیت تقریباً افقی لایه‌ها، سیمان سست، عدم جورشدگی مواد سازنده، عدم تجانس ژنتیکی ذرات تشکیل دهنده و رنگ تیره‌تر نسبت به سازند هزاردره از آن قابل تمیز است (بربریان و همکاران، ۱۳۶۴).

به منظور دستیابی به ویژگیهای ژئومکانیکی لایه‌های خاک در محل ساختمان از مطالعات ژئوفیزیکی انجام شده در ساختمان استفاده شده است. بر اساس این مطالعات که شامل پنج برداشت لرزه‌نگاری درون چاهی است، سرعت امواج برشی و طولی در لایه‌های خاک در اعماق مختلف به دست آمده است. نتایج مطالعات ژئوفیزیک در محل ساختمان نشان می‌دهد که لایه‌های خاک از اعماق بیش از ۵ متر بسیار متراکم و سرعت سیر امواج در آنها بسیار بالاست. طوری که در اکثر برداشتهای لرزه‌ای سرعت سیر امواج برشی در این اعماق به بیش از ۷۰۰ متر بر ثانیه می‌رسد. همچنین در برخی گمانه که در سطحی پایتزر از سایر گمانه‌ها و در محل گودبرداری شده حفر گردیده است، لایه‌های ضعیف سطحی مشاهده نمی‌شوند.

به طور خلاصه و بر اساس اطلاعات زمین‌شناسی مهندسی و مطالعات ژئوتکنیکی، لایه‌های تحت‌الارضی منطقه دارای بافت غالب درشت دانه هستند که پارامترهای مقاومتی آنها عموماً با عمق افزایش می‌یابد. با توجه به روابط تجربی بین عدد نفوذ استاندارد و سرعت موج برشی و همچنین برداشتهای

ژئوفیزیکی درون چاهی، متوسط سرعت موج برشی لایه‌های خاک حدود ۷۵۰ متر بر ثانیه است که بر اساس آئین‌نامه‌های UBC 1997، NEHRP 2003 و IBC 2003، در مرز رده‌های B و C و بر اساس ویرایش سوم آیین‌نامه ۲۸۰۰ ایران (۱۳۸۴) در مرز رده‌های I و II قرار می‌گیرد.

## شرایط لرزه‌زمین‌ساختی

ساختمان‌های مورد مطالعه در منطقه‌ای نسبتاً فعال از نظر لرزه‌خیزی قرار گرفته و گسل‌های ساختاری مهمی در اطراف آن واقع شده‌اند. مهمترین گسل‌های واقع در گستره ساختمان شامل گسل‌های شمال تهران، شمال و جنوب ری، کهریزک، مشاء، پارچین و گرمسار است. روند اصلی گسل‌های واقع در محدوده ساختمان عمدتاً شمال غربی - جنوب شرقی و شرقی - غربی است؛ سازوکار غالب گسل‌های منطقه فشاری همراه با مولفه امتداد لغز می‌باشد. چشمه‌های لرزه‌ای واقع در گستره ساختمان دارای توان لرزه‌زایی بالایی بوده و قادر به ایجاد زمین‌لرزه‌هایی با بزرگای ۷/۵ و بیشتر می‌باشند، وقوع زمین‌لرزه‌های تاریخی با بزرگای مشابه موید توان لرزه زایی بالای گسل‌های منطقه است. چنان که نتایج تفکیک خطر لرزه‌نشان می‌دهد محدوده نسبتاً وسیعی از زمین‌لرزه‌های با بزرگای قوی تا بسیار قوی (بزرگای حدود ۶/۰ تا ۷/۵) خطر لرزه ای ساختمان را ایجاد می‌نمایند.

## طیف پاسخ تجربی

جدول (۱-۵) مشخصات شتاب‌نگاشت‌های انتخاب شده متناسب با شرایط ساختمانی مصلی را نشان می‌دهد. میانگین بیشینه شتاب شتاب‌نگاشت‌های انتخاب شده برای ساختمان‌های سخت و سنگی ۳۵۶ سانتیمتر بر مجذور ثانیه و برای ساختمان‌های آبرفتی متراکم ۵۴۳ سانتیمتر بر مجذور ثانیه است. چنان که مشاهده می‌شود میانگین بیشینه شتاب شتاب‌نگاشت‌های گروه دوم که در ساختمان‌های آبرفتی ثبت گردیده‌اند حدود ۱/۵ برابر شتاب‌نگاشت‌های ثبت شده در ساختمان‌های سخت و سنگی است که با توجه به تجربیات به دست آمده از زمین‌لرزه‌های گذشته قابل انتظار است. شکل‌های (۱-۵) و (۲-۵) میانگین، میانگین باضافه انحراف معیار و میانگین منهای انحراف معیار طیف‌های پاسخ شتاب نرمالیزه شده شتاب‌نگاشت‌های منتخب را به ازاء میرایی ۵ درصد نشان داده است.

## تحلیل دینامیکی آبرفت

در روش تهیه طیف طراحی بر اساس تحلیل دینامیکی آبرفت از طیف پاسخ شتاب‌نگاشت‌های حاصل از تحلیل‌های دینامیکی استفاده می‌شود. چنین طیف‌هایی محدوده پریودهای متأثر از شرایط ساختمانی را به وضوح نمایان می‌سازد. در بررسی‌های تحلیل دینامیکی آبرفت و اثرات ساختمانی ناشی از لایه‌های آبرفتی تنها بخشی از لایه‌های تحت الارضی مد نظر هستند که سبب تقویت حرکت لرزه‌ای شوند. این بخش از لایه‌های تحت الارضی بر روی لایه‌های با ویژگی‌های مقاومتی بالا قرار دارند که امواج ناشی از زلزله در آن تقویت نمی‌گردند. این لایه سنگ بستر لرزه‌ای نامیده می‌شود. در عمل سنگ بستر لرزه‌ای بر اساس سرعت امواج برشی تعریف می‌شود. بر اساس راهنمای ریزپهنه بندی ژئوتکنیک لرزه‌ای (TC4)، سنگ بستر لرزه‌ای محیطی است که سرعت موج برشی آن بیش از ۶۰۰ متر بر ثانیه است. آئین‌نامه‌های شناخته شده‌ای نظیر UBC 1997، NEHRP 2003 و IBC 2003، همگی سنگ بستر لرزه‌ای را محیطی تعریف نموده است که سرعت موج برشی آن بیشتر از ۷۶۰ متر بر ثانیه است. توصیه ایشیهارا و آنسال (Ishihara and Ansal, 1982)، در ریزپهنه‌بندی ژئوتکنیک لرزه‌ای منطقه بالکان انتخاب سنگ بستر لرزه‌ای با سرعت موج برشی بین ۶۰۰ تا ۱۰۰۰ متر بر ثانیه است. در ویرایش دوم آیین‌نامه ۲۸۰۰ ایران (۱۳۷۸) و نیز ویرایش سوم آن (۱۳۸۴) محیطی به عنوان سنگ بستر لرزه‌ای معرفی شده است که سرعت موج برشی آن بیش از ۷۵۰ متر بر ثانیه باشد.

## طیف خطر یکنواخت

در پروژه حاضر از چهار رابطه کاهندگی طیفی قاسمی و همکاران (۲۰۰۸)، امبرسیز و همکاران (۲۰۰۵)، بور و اتکینسون (۲۰۰۸) و کمپل و بزرگنیا (۲۰۰۸) جهت تهیه طیف خطر یکنواخت استفاده شده است.

### طیف طرح به روش نیومارک-هال

در روش نیومارک و هال (Newmark and Hall, 1982) طیف طرح با استفاده از مقادیر بیشینه شتاب، سرعت و جابجایی و ضرایب بزرگنمایی آنها با توجه به شرایط ساختمان محاسبه می‌شود. بر اساس نتایج تحلیل خطر احتمالاتی مقدار بیشینه شتاب زمین برای دوره‌های بازگشت ۴۷۵ سال و ۲۴۷۵ سال به ترتیب ۰/۳۵ و ۰/۵۵ شتاب ثقل زمین به دست آمده است. مقادیر بیشینه سرعت و جابجایی زمین با روش‌های مختلفی قابل دستیابی است؛ محرز (Mohraz, 1976) روابط تجربی ساده‌ای برای محاسبه بیشینه سرعت و جابجایی زمین برای شرایط ساختمانی مختلف بر اساس بیشینه شتاب زمین ارائه نموده است:

$$PGV = PGA \left[ \frac{V}{A} \right]$$

$$PGD = \frac{PGV^2}{PGA} \left[ \frac{AD}{V^2} \right]$$

در روابط فوق  $\left[ \frac{V}{A} \right]$  و  $\left[ \frac{AD}{V^2} \right]$  ضرایب تجربی هستند که برای شرایط ساختمانی مختلف ارائه شده‌اند. در ساختمان‌های سخت این ضرایب برای

میانگین مولفه‌های افقی با احتمال ۵۰٪ به ترتیب  $\frac{cm}{s.g}$  ۶۵ و ۵/۳ و با احتمال ۸۴/۱٪ به ترتیب برابر  $\frac{cm}{s.g}$  ۱۰۴/۵ و ۱۱/۱ می‌باشد. بدین ترتیب مقادیر

بیشینه سرعت و تغییرمکان برای دوره‌های بازگشت ۴۷۵ و ۲۴۷۵ سال مطابق جدول به دست خواهد آمد.



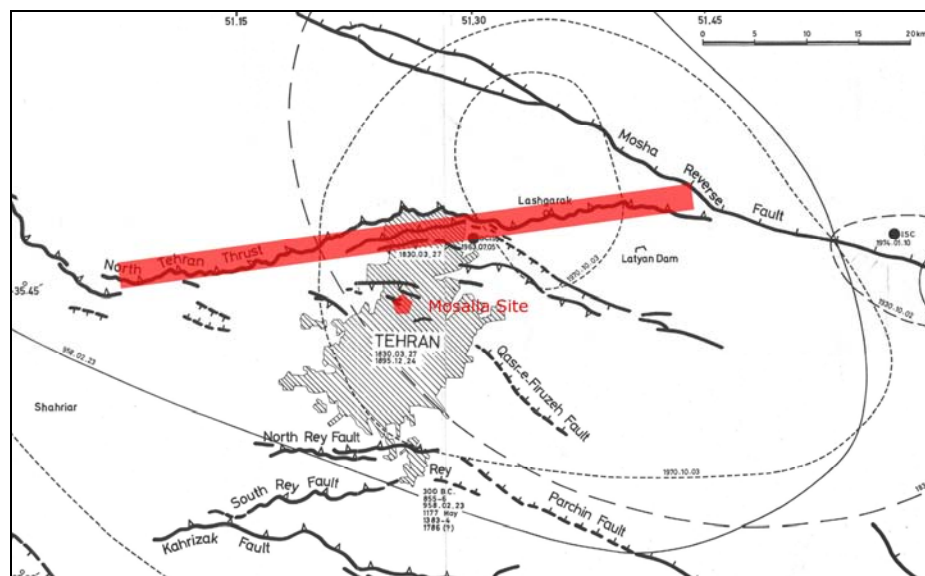
مقادیر بیشینه سرعت و تغییر مکان در ساختمان مصلی

Return Period	PGA(g)	PGV (cm/s)		PGD (cm)	
		84.1%	50%	84.1%	50%
475 Years	0.35	36.6	22.8	16.7	7.9
2475 Years	0.55	57.5	35.8	26.3	12.4

نیومارک و هال (Newmark and Hall, 1982) روابط و جداول ساده‌ای جهت محاسبه ضرایب بزرگنمایی مقادیر بیشینه پارامترهای جنبش زمین بر حسب ضریب میرایی ارائه نموده‌اند. برای میرایی ۵ درصد ضرایب بزرگنمایی شتاب، سرعت و تغییر مکان برای احتمال ۵۰٪، به ترتیب ۲/۱۲، ۱/۶۵ و ۱/۳۹ می‌باشد. این ضرایب برای احتمال ۸۴/۱٪، به ترتیب ۲/۷۱، ۲/۳۰ و ۲/۰۱ می‌باشند. با اعمال این ضرایب طیف طراحی برای دو دوره بازگشت ۴۷۵ و ۲۴۷۵ سال محاسبه شده‌اند.

## طیف‌های پاسخ نهایی

ساختمان مصلی تهران در فاصله کمی از گسل‌های مهم منطقه و به ویژه گسل شمال تهران قرار دارد. فاصله مستقیم ساختمان تا خط گسل شمال تهران بر سطح زمین کمتر از ۱۰ کیلومتر می‌باشد. این گسل با طول بیش از ۶۰ کیلومتر دارای شییبی متغیر و همواره به سمت شمال و شمال غرب می‌باشد. در صورتی که گسل شمال تهران دارای سازوکار معکوس باشد، ساختمان مصلی در فرودبواره گسل قرار داشته و عملاً مطابق روابط تجربی موجود فارغ از اثرات حوزه نزدیک گسل خواهد بود؛ اما در صورتی که گسلش داری مولفه امتداد لغز باشد، که با توجه به شرایط زمین ساختی دور از انتظار نیست، ساختمان متأثر از اثرات حوزه نزدیک گسل خواهد بود. شکل زیر موقعیت ساختمان مصلی را نسبت به گسل شمال تهران نشان می‌دهد. تحلیل دقیق اثرات حوزه نزدیک گسل مستلزم داده‌های دقیق از محل شروع گسیختگی، ابعاد گسیختگی و نیز نحوه انتشار آن می‌باشد. بدترین شرایط هنگامی است که کانون در انتهای گسل واقع شده و گسیختگی بر روی سطح گسل به سمت ساختمان منتشر شود. با توجه به موقعیت ساختمان در بخش‌های میانی گسل شمال تهران قرار گیری کانون در هر یک از دو انتهای گسل شرایط یکسانی را ایجاد خواهد نمود. با این فرض زاویه آزمون ساختمان نسبت به کانون بین ۱۰ تا ۱۵ درجه خواهد بود. همچنین با فرض گسیختگی کامل بر روی گسل مقدار طول بدون بعد حدود ۰/۵ خواهد بود. بدین ترتیب ساختمان تهران در صورت گسلش امتداد لغز بر روی گسل شمال تهران اگرچه در محدوده حوزه نزدیک گسل قرار دارد اما در منطقه جهت یافتگی پیشرو قرار نخواهد گرفت. با این حال انتظار می‌رود مولفه عمود بر گسل، تقریباً مولفه شمال-جنوب، دارای دامنه حرکت بیشتری در مقایسه با مولفه شرقی-غربی باشد. در صورتی که طول گسیختگی کمتر از طول کل گسل بوده و همچنان گسیختگی از یکی از دو انتهای گسل آغاز شده باشد علاوه بر قرار گیری ساختمان در حوزه نزدیک، با افزایش مقدار طول بدون بعد شرایط جهت یافتگی پیشرو نیز حاکم خواهد بود. لازم به ذکر است با فرض کاهش طول گسیختگی بزرگای زمین‌لرزه نیز کاهش می‌یابد.



موقعیت ساختمان نسبت به گسل‌های نزدیک، گسل‌ها بر گرفته از بربریان و همکاران (۱۳۶۴)

## نتایج :

- اغلب گسل‌های گستره، گسل‌های فعالی بوده و زمین‌لرزه‌های تاریخی و دستگاهی به آنها منتسب شده است. برای برخی از گسل‌ها نظیر گسل شمال تهران، اگر چه داده لرزه‌خیزی دقیقی در دست نیست ولی شواهد مورفوتکتونیک حاکمی از فعالیت آنهاست.
- بررسی‌های نوزمین‌ساختی در پهنه البرز مرکزی گویای فعالیت این پهنه و جنبش‌های قائم و راستالغز در راستای گسل‌های فعالی چون مشا می‌باشد. جنبش و فزادگیری البرز در راستای گسل‌های گستره سبب کوتاه‌شدگی پوسته به میزان ۵ میلیمتر در سال شده است.
- بررسی سازوکار زمین‌لرزه‌های رویداده در گستره مورد مطالعه بیانگر مکانیزم حاکم فشاری همراه با مولفه راستالغز چپگرد می‌باشد. چنین وضعیتی با راستای تنش نوزمین‌ساختی حاکم و راستای گسل‌های اصلی منطقه همخوانی کامل دارد.

- بر اساس داده‌های لرزه‌خیزی تاریخی و دستگاهی گستره و استفاده از مدل‌های متداول پیش‌بینی دوره بازگشت زمین‌لرزه ها، دوره بازگشت زمین‌لرزه‌ها در گستره ۲۰۰ کیلومتری ساختمان مصلی تهران به شرح زیر می‌باشد:

بزرگا	۵/۰	۵/۵	۶/۰	۶/۵	۷/۰	۷/۵
دوره بازگشت (سال)	۴	۸	۱۶	۳۸	۱۰۴	۶۰۶

- برپایه محاسبات انجام شده به روش تحلیلی، گسل‌های منطقه در صورت فعالیت، توانایی تولید زمین‌لرزه‌ای با بزرگای ۷/۵ را دارند که با توجه به سابقه لرزه‌خیزی تاریخی منطقه (زمین‌لرزه‌های سده سوم پیش از میلاد ری و ۹۵۸ میلادی ری-طالقان) دور از انتظار نیست. وقوع چنین زمین‌لرزه‌هایی در صورت گسیختگی‌های بزرگ در راستای گسل‌های بزرگی نظیر مشا قابل انتظار است.
- بیشینه شتاب سطح زمین حاصل از رهیافت تعینی با احتساب میانگین برابر ۰/۳۸ و با احتساب میانگین باضافه انحراف معیار برابر ۰/۶۴ می‌باشد. مقادیر مذکور مربوط به گسل شمال تهران با طول بیش از ۷۵ کیلومتر و فاصله کمتر از ۱۰ کیلومتر تا محل ساختمان است.
- برای برآورد خطر لرزه‌ای با رهیافت احتمالاتی از مدل چشمه‌های خطی با توزیع خطی گوتنبرگ ریشتر استفاده شده است. با استفاده از چهار رابطه کاهندگی و با وزن دهی مناسب به مدل‌های مختلف چشمه‌های لرزه‌زا، منحنی خطر نهایی ساختمان به دست آمده است. بر این اساس بیشینه شتاب برای دوره‌های بازگشت ۱۰ سال، ۴۷۵، سال و ۲۴۷۵ سال به صورت زیر به دست آمده است:

دوره بازگشت (سال)	۱۰	۴۷۵	۲۴۷۵
بیشینه شتاب سطح زمین (g)	۰/۰۶	۰/۳۵	۰/۵۵

- بر اساس تفکیک خطر لرزه‌ای گسل شمال تهران با فاصله کمتر از ۱۰ کیلومتر مهمترین سرچشمه لرزه‌زای ساختمان است، که سهم عمده‌ای در خطر لرزه‌ای ساختمان دارد. بخش دیگری از خطر لرزه‌ای ساختمان به زمین‌لرزه‌های با فواصل متوسط و حداکثر ۳۰ کیلومتر تا محل ساختمان اختصاص دارد که عمدتاً ناشی از گسل مشا در شمال، گسل‌های ری، کهریزک و پارچین در جنوب گستره است.
- نتایج حاصل از تفکیک خطر لرزه‌ای گسل شمال تهران را چشمه کنترل کننده خطر لرزه‌ای ساختمان معرفی می‌نماید. علاوه بر این گسل، چشمه‌های زمین‌لرزه‌ای با فاصله تا ۲۵ کیلومتر بیشترین سهم را در خطر لرزه‌ای ساختمان دارند.

## منابع :

- ۱- زمین شناسی ساختمانی، تالیف: دکتر احمد ادیب و دکتر محسن پورکرمانی، انتشارات دانشگاه پیام نور، ۱۳۸۰
- ۲- روش‌های اساسی زمین شناسی ساختمانی، ترجمه: دکتر محسن پورکرمانی و مهندس حسین معتمدی، انتشارات دانشگاه شهید بهشتی، ۱۳۸۱
- ۳- مطالعه تکتونیکی اقیولیت‌های نواحی تربت حیدریه و کاشمر براساس تصاویر ماهواره ای، دکتر محمود الماسیان، دکتر محسن پورکرمانی و مهندس شراره حاج علی اوغلی، پایان نامه کارشناسی ارشد دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال، ۱۳۹۰
- ۴- مطالعات طرح کالبدی ملی ایران، مرکز مطالعات و تحقیقات شهرسازی و معماری ایران، ۱۳۸۶
- ۵- نقشه‌های پهنه‌بندی خطر نسبی زمین‌لرزه در ایران، (آیین نامه ۲۸۰۰)
- ۶- گسل‌ها بر گرفته از بربریان و همکاران، ۱۳۶۴
- ۷- زمین شناسی ایران، تالیف: دکتر آقائباتی، انتشارات سازمان زمین شناسی کشور، ۱۳۸۰
- ۸- زلزله شناسی ایران، تالیف: دکتر مهدی زارع، انتشارات پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، ۱۳۸۱
- ۹- زمین شناسی ساختمانی و تکتونیک، تالیف: حسن مدنی، جهاد دانشگاهی امیرکبیر، ۱۳۸۳
- ۱۰- گزارش مطالعات ژئوتکنیک و لرزه خیزی مصلی تهران، شرکت مهندسی مشاور پژوهش عمران راهوار، تیرماه ۱۳۸۸