

ریز پهنه بندی لرزه ای شهر تهران بر اساس تحلیل خطر قطعی و شاخص های لرزه ای مناطق همجوار گسل

حمید صفاری^{۱*}، محمد حسین پولادوند^۲

۱- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
 ۲- کارشناس ارشد مهندسی زلزله، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

چکیده

شهر تهران در مجاورت چندین گسل فعال از جمله گسل های مشا، گسل شمال تهران، گسل ری شمالی و جنوبی با پتانسیل بالای خطر لرزه ای قرار گرفته و در سده های گذشته زلزله های قدرتمندی را تجربه کرده است. امکان اینکه در هر لحظه یا در آینده ای نزدیک زلزله مشابهی رخ دهد و خسارات مالی و جانی زیادی به بار آورد دور از انتظار نیست. در این مقاله تحلیل خطر زلزله دقیق شهر تهران به روش قطعی با در نظر گرفتن مشخصات گسل های سناریوی تهران، خاک ساختگاه گستره شهر تهران و ارزیابی متوسط سرعت موج برشی زمین بر اساس تلفیقی از آخرین مطالعات انجام یافته در تهران انجام گرفته است. در این راستا از یک رابطه کاهندگی معتبر که اثرات حوزه نزدیک را به خوبی در نظر بگیرد و همخوانی بالایی با داده های لرزه ای تجربی ایران داشته باشد استفاده شده است. در ادامه تحلیل خطر قطعی با فرض رخداد زلزله در نزدیکترین فاصله هر گسل تا مرکز هر مش انجام گرفت و خروجی لرزه ای شامل بیشینه شتاب سطح زمین، بیشینه سرعت سطح زمین، بیشینه تغییر مکان سطح زمین و شتاب طیفی برای همه مش های شهر تهران با توجه به خاک ساختگاه هر مش از گسل های سناریوی مشخص شده انجام گرفت. سپس ماکزیمم شاخص لرزه ای به ازای همه سناریوها بصورت جداگانه و نیز تجمیعی در محیط GIS طبقه بندی و مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. از عمده نتایج این مقاله می توان به برآورد شاخص های لرزه ای رو گسلی اشاره نمود، بطوریکه مقادیر شتاب طیفی روی گسل شمال تهران یا ری در خاک تیپ I، II و III به ترتیب مقادیری بیش از ۱، ۱، ۲، ۱ و ۲، ۶ g در پیوند متناظر با پیوند غالب ساختمان های کوتاه را در بر داشته و مبین اوج خسارت در نواحی روی گسلی خواهد بود.

کلمات کلیدی: تحلیل خطر قطعی، بیشینه شتاب سطح زمین، بیشینه سرعت سطح زمین، بیشینه تغییر مکان سطح زمین، شتاب طیفی.

* نویسنده مسئول: حمید صفاری

پست الکترونیکی: h_saffari@sbu.ac.ir

DOI: 10.22065/jsce.2017.79793.1112

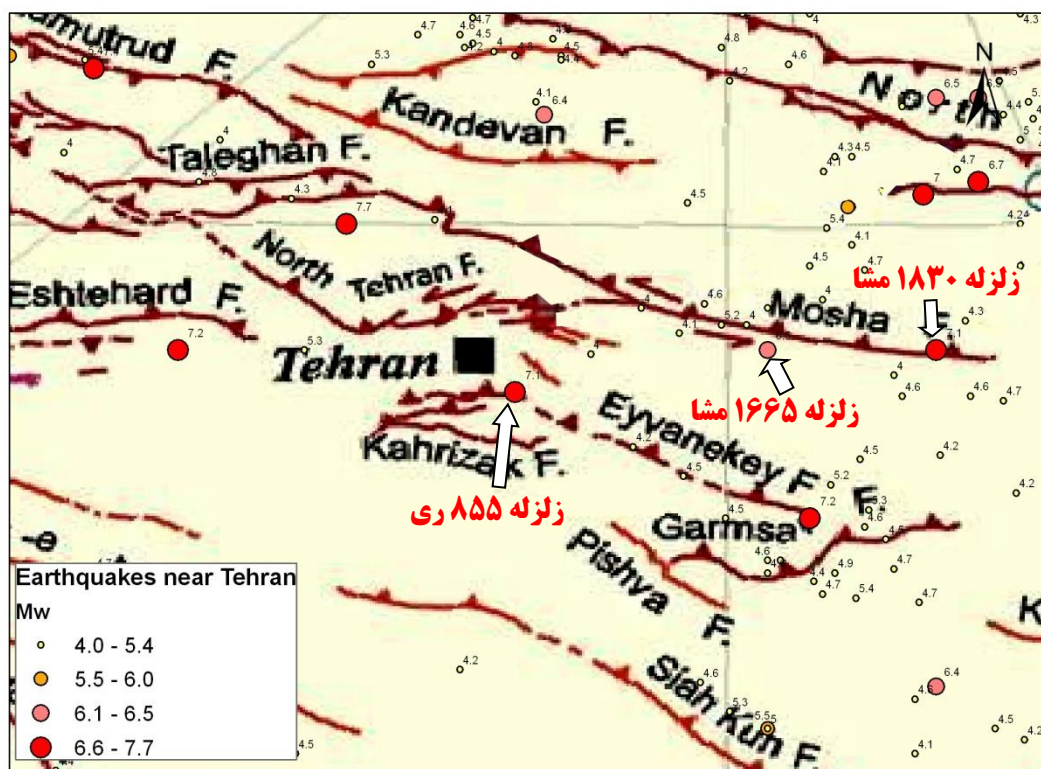
شناسه دیجیتال

<http://dx.doi.org/10.22065/jsce.2017.79793.1112>

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۱۱/۱۸، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۲/۲۴

۱- مقدمه

ایران در کمربند لرزه ای آلپ-همالیا واقع شده است و بخشهای وسیعی از شمال، مرکز و جنوب ایران متأثر از زلزله‌های کوچک تا بزرگ می‌باشد. شهر تهران در دامنه شیب‌های جنوبی رشته کوه‌های البرز قرار داشته و در مجاورت چندین گسل فعال با پتانسیل خطر بالای لرزه ای نظیر گسل مشا، گسل شمال تهران، گسل ری شمالی و جنوبی می‌باشد. مطابق با اطلاعات و سوابق لرزه ای که از شهر تهران در دسترس است این ناحیه در گذشته زلزله‌های قدرتمندی را تجربه کرده است. به عنوان نمونه می‌توان به زلزله‌های سالهای ۱۶۶۵ و ۱۸۳۰ میلادی گسل مشا با بزرگای گشتاوری به ترتیب ۶٫۵ و ۷٫۱ و به فاصله‌های به ترتیب ۷۷ و ۱۲۰ کیلومتری شمال شرق تهران اشاره نمود (شکل ۱). این دو زلزله به فاصله زمانی ۱۶۵ سال از یکدیگر رخ دادند و زلزله سال ۱۸۳۰ خسارات زیادی در تهران پدید آورد. باید افزود گسل مشا دارای طول تقریبی ۲۰۰ کیلومتر می‌باشد و کمترین فاصله این گسل تا حاشیه شمالی تهران ۲۵ کیلومتر می‌باشد. از نمونه زلزله‌های جنوب تهران نیز می‌توان به زلزله سال ۸۵۵ میلادی گسل ری با بزرگای گشتاور ۷٫۱ اشاره نمود [۱]. از آخرین زلزله مخربی که در حوالی تهران اتفاق افتاده است ۱۸۷ سال می‌گذرد و فاصله این زلزله با بزرگترین زلزله قبل از خود روی گسل مشا ۱۶۵ سال می‌باشد. بنابراین امکان اینکه در هر لحظه یا در آینده ای نزدیک زلزله مشابهی رخ دهد با توجه به آمار فوق محتمل می‌باشد. بدیهی است با توجه به تراکم زیاد جمعیت در شهر تهران و نیز وجود بافت‌های فرسوده متعدد، این زلزله خسارات و تلفات گسترده ای به بار خواهد آورد.



شکل ۱: رویهم گذاری زلزله‌های تاریخی و دستگاهی گستره تهران بر نقشه گسل‌های فعال ایران [۲].

گستره جغرافیایی بزرگ تهران علاوه بر همجواری با گسل‌های مختلف بر روی بافت‌های رسوبی با ضخامت آبرفت متغیر واقع شده است و شامل ساختگاه‌های مختلف می‌باشد که اثرات ناشی از زلزله نظیر شتاب را تشدید می‌نمایند. شرایط محلی ساختگاه و توپوگرافی منطقه تاثیر قابل توجهی بر کلیه خصوصیات مهم حرکت نیرومند زمین شامل دامنه، محتوی فرکانس و مدت زلزله خواهند داشت. با توجه به شدت خسارات و آسیب‌های وارده در اثر زلزله ضروری است که مطالعات پهنه بندی خطر زلزله در نواحی مختلف شهری انجام گیرد و شاخص‌های مهم ارزیابی خسارت نظیر بیشینه شتاب سطح زمین، بیشینه سرعت سطح زمین، بیشینه تغییر مکان سطح زمین و شتاب طیفی

تعیین گردند. با توجه به اهمیت این مسئله امروزه مطالعات پهنه بندی خطر زلزله و ریزپهنه بندی ژئوتکنیک لرزه ای در اکثر کشورهای لرزه خیز دنیا امری مهم تلقی شده و در برنامه جامع مدیریت خطرپذیری و کاهش آسیب‌ها و خسارات احتمالی ناشی از زلزله به صورت گسترده مورد توجه واقع شده است. پهنه بندی خطر لرزه ای شهر تهران پیشتر در پژوهش‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. آنچه که در این تحقیق مد نظر است روش تعیینی می‌باشد که بیشترین خطر واقعی (قطعی) زلزله را بر اساس آخرین اطلاعات ساختگاه با استفاده از روابط میرایی اخیر که شرایط ساختگاه و مکانیزم گسلش را همزمان در نظر می‌گیرند ارائه می‌دهند. بدیهی است این اطلاعات بدلیل دقت بالا میتواند در طراحی یا ارزیابی خسارت و مقاوم سازی سازه‌ها بویژه سازه‌های با اهمیت بالا بکار رود.

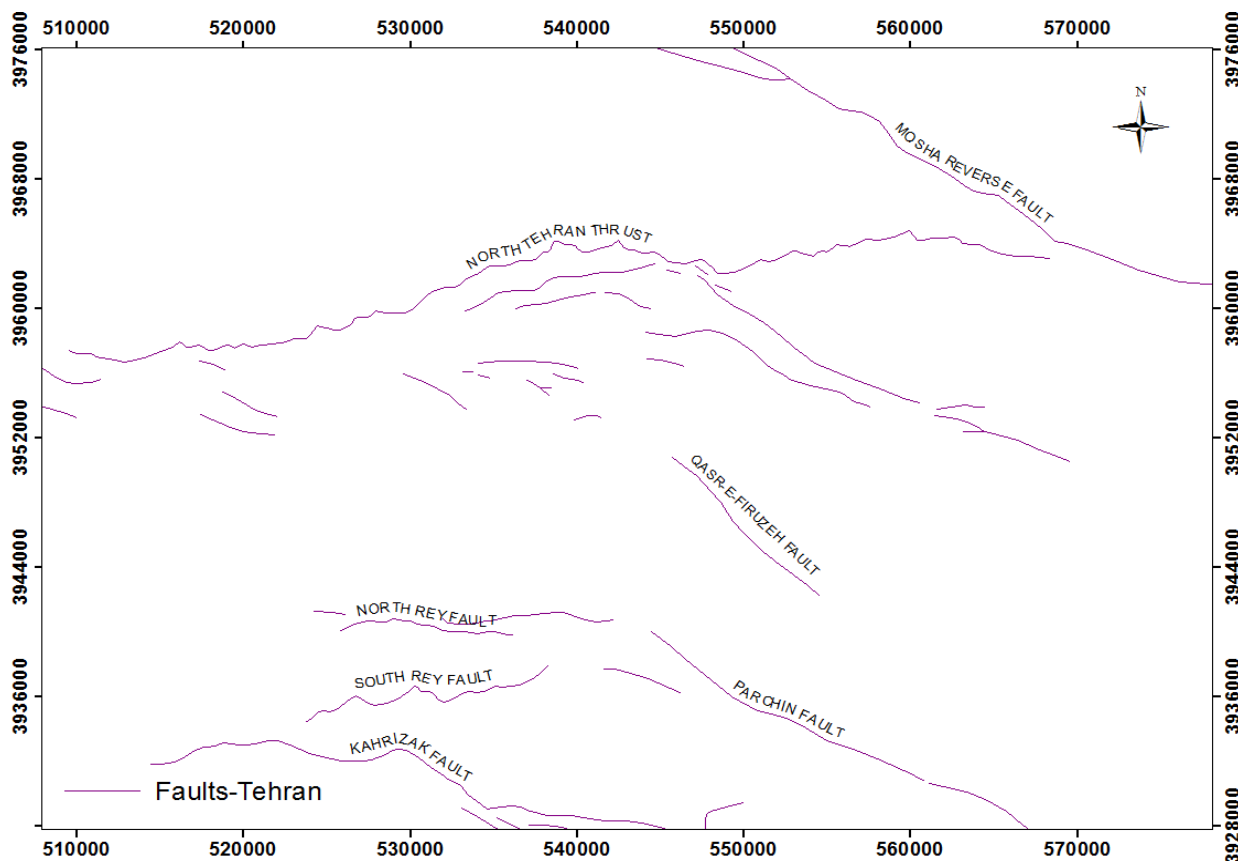
۲- سابقه تحقیق

مطالعه و بررسی خطرات و خسارات احتمالی ناشی از زلزله در شهر تهران از اهمیت ویژه ای برخوردار می‌باشد. به همین منظور مطالعات گسترده ای توسط سازمان‌ها، دانشگاه‌ها و یا موسسات مختلف انجام شده است که از برجسته ترین آنها می‌توان به تحقیقات انجام شده توسط آژانس همکاری‌های بین المللی ژاپن [۳] و پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله [۴ و ۵] اشاره نمود.

گزارش پروژه ریز پهنه‌بندی لرزه‌ای تهران بزرگ توسط آژانس همکاری‌های بین‌المللی ژاپن (جایکا) و مرکز مطالعات زلزله و زیست محیطی تهران بزرگ در فاصله زمانی فروردین ۱۳۷۸ تا شهریور ۱۳۷۹ به انجام رسید. در گزارش نهایی شرایط فیزیکی و اجتماعی گستره مورد مطالعه ارزیابی گردیده و تحلیل خسارت زلزله بر اساس توان بالقوه گسل‌های سناریو نیز انجام شده است. بر اساس مطالعات آژانس همکاری‌های بین‌المللی ژاپن بیشترین خسارتی که در اثر زلزله به تهران بزرگ وارد خواهد شد ناشی از گسل فعال ری می‌باشد و منجر به تخریب حدود ۵۰۰،۰۰۰ ساختمان یا ۵۵ درصد کل ساختمان‌ها و تلفات تقریباً ۴۰۰،۰۰۰ نفر خواهد شد. اگر خسارت، عملاً در مقیاس یاد شده روی دهد، ضرر و زیان احتمالی اقتصادی، به طور مستقیم یا غیر مستقیم، هزینه‌ای تقریباً معادل با کل تولید ناخالص ملی را در بر خواهد داشت [۳].

۳- گسل‌های سناریو شهر تهران

بهره گیری از زلزله سناریو برای برنامه ریزی و مدیریت بحران زلزله، برای یک شهر بسیار مفید می‌باشد. در این راستا گسل‌هایی که زلزله‌هایی با بیشترین پتانسیل لرزه ی را ایجاد کرده و خسارات زیادی را به تهران وارد می‌نمایند بعنوان گسل سناریو انتخاب شده اند. پیش بینی می‌شود زلزله ای که گستره تهران را متاثر خواهد کرد در اثر فعالیت گسلی با پتانسیل بالا در نزدیکی شهر رخ خواهد داد. وسعت منطقه‌ای که به شدت خسارت دیده است، در مقایسه با مورد ناشی از زلزله‌های بزرگ از نوع بین صفحه‌ای مکنده، محدود خواهد بود [۳]. وسعت تهران به اندازه ای زیاد است که ممکن است در اثر زلزله یک منطقه متحمل خسارت شدیدی شود ولی منطقه ای دیگر آسیب چندانی نبیند. بسیار ضروری است که مطالعات و برنامه ریزی‌ها متناسب با چنین وضعیتی انجام گردد به همین منظور سناریوهای مختلفی برای گستره تهران بزرگ در نظر گرفته شده است. در شکل ۲ نقشه گسل‌های محدوده تهران بزرگ نشان داده شده است.



شکل ۲: نقشه گسل‌های اصلی شهر تهران (برگرفته شده از نقشه گسل‌های فعال ایران [۲]).

۳-۱- گسل مشا

گسل مشا یکی از گسل‌های فعال و خطرناک شمال تهران می‌باشد که به چند بخش تقسیم شده است. مجموع طول کل گسل بیش از ۲۰۰ کیلومتر می‌باشد. این گسل به سمت شمال خاوری تحدب داشته و در حاشیه رشته کوه البرز از غرب به شرق امتداد می‌یابد. مسیر این گسل دارای الگوی سینوسی با راستای خاوری - باختری در باختر و راستای باختر شمال باختری - خاور جنوب خاوری در بخش مرکزی است و در خاور به تدریج در جهت خاوری - باختری خم می‌شود [۳]. شیب این گسل در همه نقاط به سمت شمال بوده و بین ۳۵ تا ۷۰ درجه متغیر است. زلزله تاریخی بزرگی که در سال ۱۸۳۰ میلادی تهران بزرگ را تحت تاثیر قرار داده است ناشی از فعالیت بخش خاوری گسل مشا بوده و بزرگایی در حدود $Mw7.7$ برای آن تخمین زده شده است. مرکز این زلزله در حدود ۵۰ کیلومتری محدوده شرقی شهر تهران قرار داشته است و خسارات متعددی را به شهر وارد ساخته است.

۳-۲- گسل شمال تهران

گسل شمال تهران گسلی است به طول بیش از ۹۰ کیلومتر که در دامنه جنوبی رشته کوه‌های البرز و در مرز بین بخش کوهستانی و شهری تهران واقع شده است. این گسل به جز ناحیه شمال خاوری آن به طور کامل در شهر تهران قرار دارد. مسیر و جهت این گسل به صورت شمال خاوری - جنوب باختری می‌باشد و به صورتی ملایم به طرف جنوب متمایل است. در باختر کن، گسل‌های متعدد شمال خاوری - جنوب باختری و خاوری - باختری، تداوم آن را قطع می‌کنند. در خاور لشگرک، این گسل وارد یک ناحیه پیچیده زمین ساختی می‌شود و به گسل مشا - فشم می‌پیوندد، گسل شمال تهران در بخش مرکزی بین کن و لشگرک، بین صخره‌های سازند کرج در چینه‌های مرزی و ذخایر رسوبی دشت آبرفتی مرز چین‌داری را تشکیل می‌دهد که بر روی لایه‌های جنوبی فرومی‌نشینند [۳]. در صورتی که گسل شمال

تهران فعال شود خسارات ناشی از آن به دلیل موقعیت و فاصله آن از شهر نسبت به گسل مشا سنگین تر خواهد بود. بنابراین، برای زلزله سناریو، باید توجه خاصی به گسل شمال تهران شود و آمادگی های لازم برای پیشگیری از اثرات سوء این گسل، در نهادهای مربوطه صورت گیرد.

۳-۳ گسل ری

از دیگر گسل های مهم تهران می توان به گسل ری اشاره نمود که با توجه با مقاوم نبودن بافت مرکزی و جنوبی شهر تهران در صورت فعالیت این گسل، تلفات زیادی را در بر خواهد گرفت. گسل ری در منطقه جنوبی شهر تهران واقع شده است. این گسل به دو بخش جنوبی و شمالی تقسیم شده است که به نظر می رسد منشأ هر دو گسل یکی باشد و هر دوی این گسل ها شاخه هایی از یک گسل مرجع باشند. هندسه گسل ری مشخص می کند که شیب این گسل به سمت شمال شهر و در حدود ۷۵ درجه می باشد [۶]. این دیواره گسلی به سمت باختر تا آبادی صالح آباد پیگیری می شود. به طرف خاور و باختر ادامه گسل شمال ری، زیر رسوبات جوان رودخانه ای و دشتی ناپدید می گردد. به سمت باختر آبادی چهاردانگه، دو خطواره، یکی در نصیرآباد نوروزی و دیگری در جنوب حسن آباد دیده می شود که ممکن است ادامه باختری گسل شمال ری محسوب شوند [۳]. گسل جنوب ری در حدود ۳ تا ۵ کیلومتری گسل شمال ری واقع شده است و طول آن در حدود ۲۰ کیلومتر می باشد. هر دو گسل جنوبی و شمالی ری به صورت موازی در جنوب و شمال فرونشست ری ادامه مسیر می دهند.

۳-۴ سایر گسل ها

از سایر گسل های تهران می توان به گسل معکوس آهار، راندگی شمال تهران، گسل معکوس امامزاده داود، راندگی نیوران، گسل کهریزک، گسل پارچین، گسل قصر فیروزه، گسل محمودیه و ... اشاره نمود. که این گسل ها با توجه به طول کم و توانایی لرزه خیزی پایینی که دارند از اهمیت کمتری برخوردار هستند .

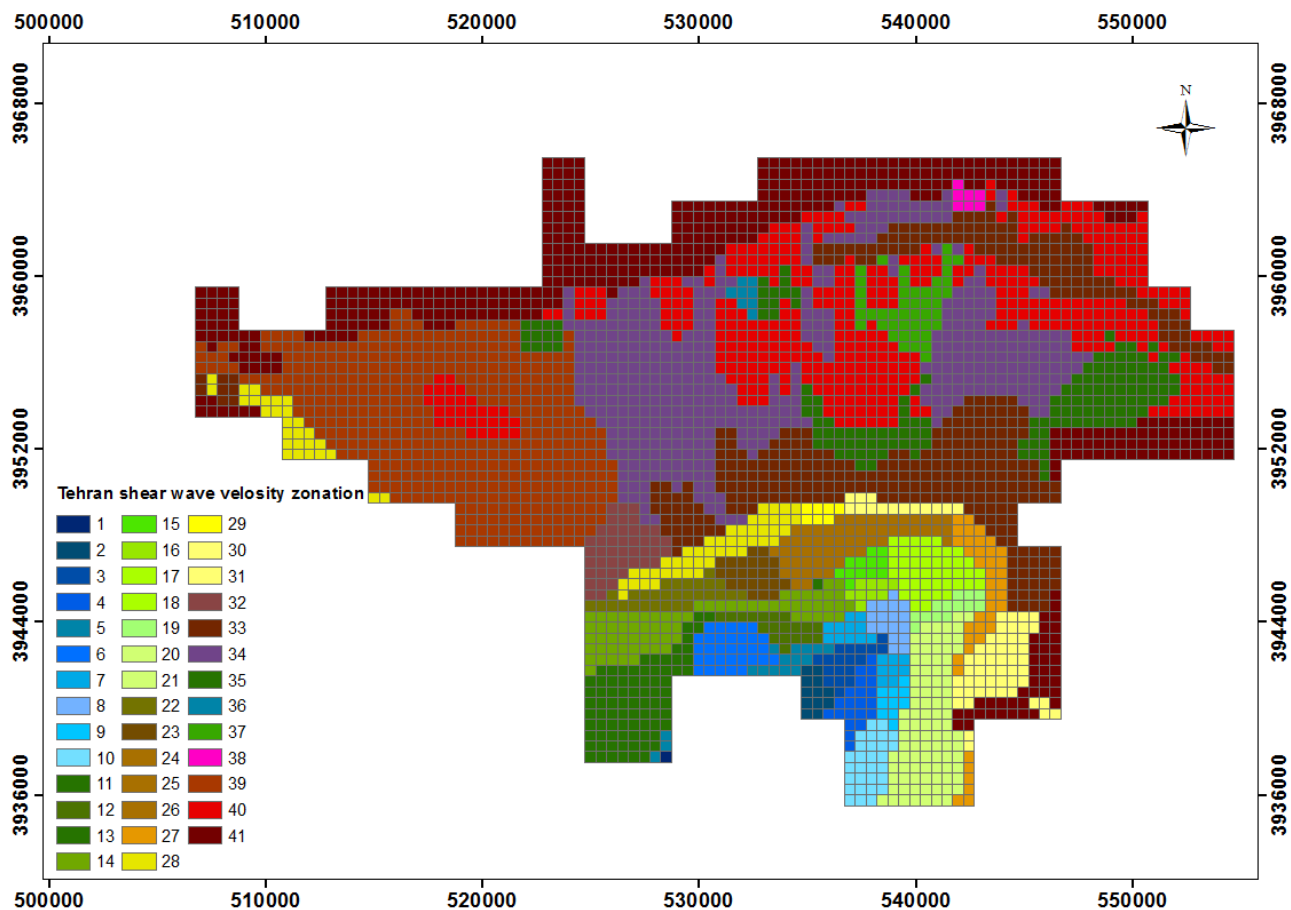
مشخصات هندسی از جمله طول، شیب، پهنا، فاصله گسیختگی سطحی گسل تا سطح زمین و همچنین بزرگای گسل های سناریو که در رابطه کاهندگی مورد استفاده مقاله (کمپل- بزرگ نیا، ۲۰۰۸) [۷] استفاده شده اند در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱: مشخصات هندسی و بزرگای هر گسل [۶]

Fault	Mw	dip	Length(Km)	Width(Km)	Depth to top of fault (Km)
Mosha	7.4	75°	75	27	1
Ray	6.7	75°	29	14	6
North Tehran	7.2	75°	58	22	2

۴- طبقه بندی جنس خاک گستره شهر تهران

طبق مطالعات انجام گرفته توسط آژانس همکاری های بین المللی ژاپن (JICA) خاک ها به چهار گروه خاک رسی، ماسه ای، ماسه و رس و خاک شنی طبقه بندی شده اند. همچنین هر گروه از این خاک ها بر اساس مقدار عدد نفوذ استاندارد (N) خود به چهار گروه تقسیم می شوند. در نهایت با توجه به عمق سنگ بستر لرزه ای و شرایط خاک بالای آن خاک های گستره شهر تهران در ۴۱ رده مطابق شکل ۳ رده بندی شده اند.



شکل ۳: دسته بندی خاک شهر تهران.

۵- طبقه بندی خاک تهران بر اساس سرعت موج برشی

خصوصیات ژئوتکنیکی مصالح تشکیل دهنده یک ساختگاه تاثیر عمده ای بر مشخصات زمین لرزه خواهد داشت. زمین لرزه‌های گذشته نشان داده اند که اغلب خسارت وارده بر سازه‌هایی که بر خاک‌های نرم ساخته شده اند به مراتب بیشتر از سازه‌های ساخته شده بر خاک‌های سخت است. مطالعات بر روی جنبش نیرومند زمین به خوبی نشان دهنده تغییر دامنه و محتوای فرکانسی امواج لرزه ای به وسیله آبرفت می‌باشند. در این ارتباط سرعت موج برشی (V_s) مصالح پارامتر مهمی در تحلیل‌های اثرات ساختگاهی می‌باشد. از این رو به منظور محاسبه بزرگنمایی ناشی از اثرات خاک بر روی شاخص لرزه ای لازم است پهنه بندی متوسط سرعت موج برشی در لایه‌های سطحی (۳۰ متر اول) انجام گیرد.

با توجه به اینکه روابط مدون و یکپارچه ای در مورد محاسبه سرعت موج برشی با استفاده از عدد نفوذ استاندارد برای کل گستره تهران بزرگ وجود نداشت به ناچار از دو پژوهش انجام گرفته بر سطح شهر تهران استفاده شد. یکی مطالعات انجام شده توسط پژوهشگاه بین المللی زلزله در سال ۱۳۸۲ که بر روی آبرفت‌های تهران صورت گرفته است [۸]. دیگری مطالعاتی است که با همکاری پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری وزارت جهاد کشاورزی و دانشگاه تربیت مدرس در سال ۱۳۸۲ برای محدوده مرکزی تهران انجام شده است [۹]. به همین منظور برای محاسبه سرعت موج برشی در شن و ماسه از رابطه ارائه شده توسط دانشگاه تربیت مدرس، برای خاک رس از رابطه پژوهشگاه زلزله و در مواردی که خاک رس و ماسه مخلوط باشند بین رابطه خاک رس پژوهشگاه و رابطه ماسه دانشگاه تربیت مدرس میانگین گیری شده است. باید افزود سرعت موج برشی از خاک غیرچسبنده به چسبنده افزایش می‌یابد که این مورد نیز با داده‌های ارائه شده همخوانی دارد. در این روابط مقدار N ، معادل با ۳۰ سانتیمتر نفوذ یا N_{eq} ، در محاسبات در نظر گرفته شده است و V_s سرعت موج برشی می‌باشد.

$$V_{s1} = 27N^{0.73} \quad \text{برای خاک رس} \quad (1)$$

$$V_{s2} = 97.6N^{0.25} \quad \text{برای ماسه} \quad (2)$$

$$V_{s3} = 108.5N^{0.22} \quad \text{برای شن} \quad (3)$$

$$V_{s4} = \frac{V_{s1} + V_{s2}}{2} \quad \text{برای ماسه و رس} \quad (4)$$

پس از محاسبه سرعت موج برشی در هر لایه توسط روابط فوق با استفاده از رابطه متوسط سرعت موج برشی در استاندارد ۲۸۰۰ [۱۰] (رابطه ۵)، متوسط سرعت در ۳۰ متر اول لایه سطح بدست آمده و در ادامه خاک تهران با توجه به سرعت‌های محاسبه شده به تیپ‌های یک، دو و سه طبقه بندی گردید. خاطر نشان می‌گردد بر اساس طبقه بندی خاک ارائه شده توسط استاندارد ۲۸۰۰ ایران (ویرایش چهارم) و نیز سرعت‌های برشی بدست آمده، هیچ ناحیه ای از تهران در دسته خاک خیلی نرم (تیپ IV آئین نامه) قرار نگرفت.

$$V_s = \frac{\sum d_i}{\sum \left(\frac{d_i}{V_{si}}\right)} \quad (5)$$

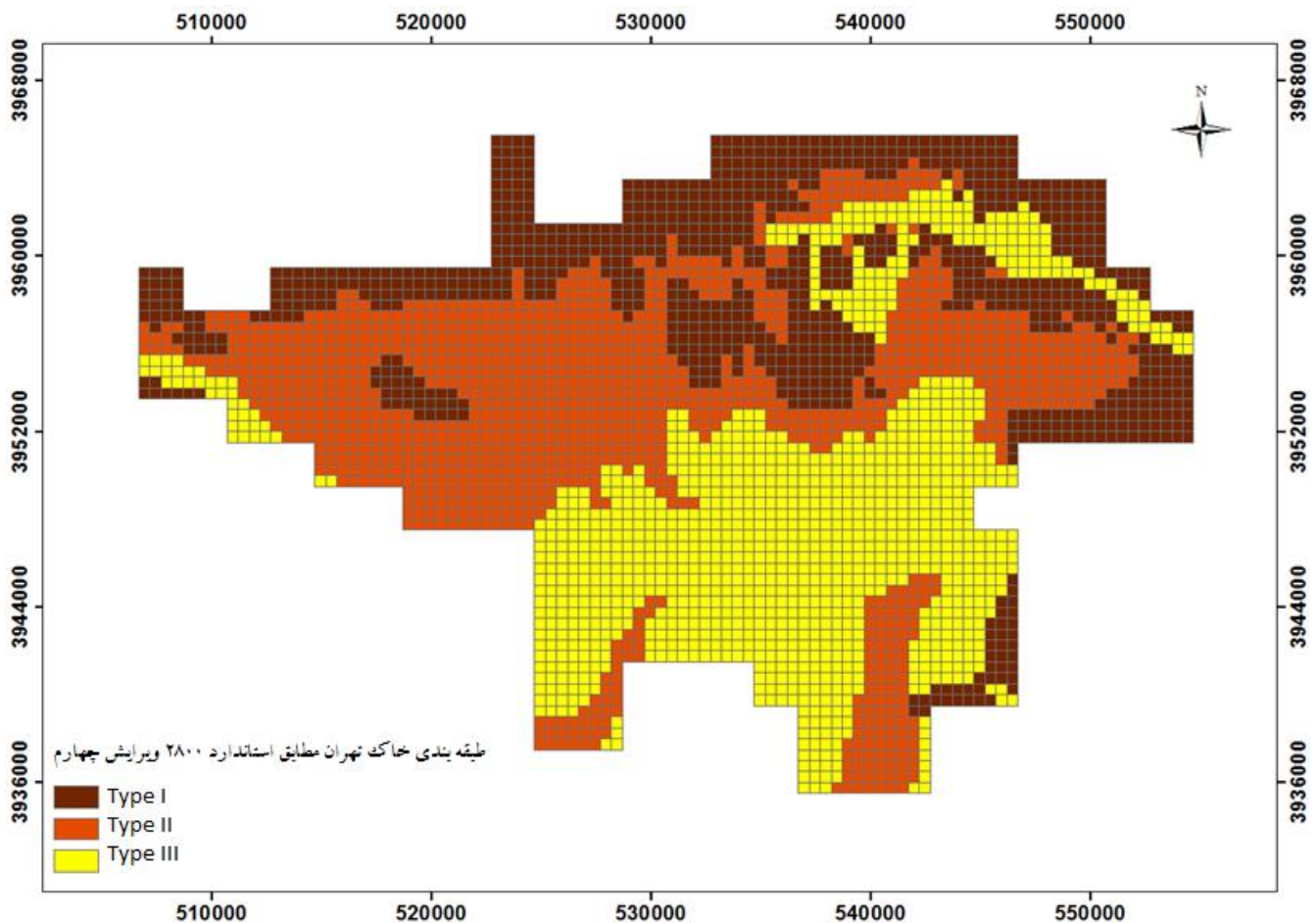
رابطه ارائه شده توسط موسسه جایکا (رابطه ۶) در زیر ارائه شده است. این رابطه یک رابطه کلی برای انواع خاک‌ها بوده و تفکیکی برای جنس خاک قائل نمی‌باشد و همچنین مقادیر بزرگتری را در محاسبه سرعت موج برشی نسبت به مطالعات دقیق تر انجام گرفته روی خاک‌های ایران نشان می‌دهد. از این رو از آن برای منطقه تهران بزرگ استفاده نشده و سرعت موج برشی متوسط از مجموع مطالعاتی که گستره مختلفی از خاک‌ها را برای ایران در نظر گرفته اند محاسبه شد.

$$(Neq < 200) V_s = 161 N_{eq}^{0.277} \quad (6)$$

نتایج طبقه بندی متوسط سرعت موج برشی در گستره شهر تهران بر اساس طبقه بندی خاک ارائه شده در استاندارد ۲۸۰۰ ویرایش چهارم (بر اساس ۴ نوع خاک معرفی شده) مطابق شکل ۴ ترسیم شده است. خاطر نشان می‌سازد این خروجی فقط برای طبقه بندی خاک تهران با دقتی برابر با مش‌هایی با ابعاد ۵۰۰ متر بوده است و مبنای محاسبات لرزه ای این مقاله نمی‌باشد. در این مقاله برای محاسبه پارامترهای جنبش زمین از عدد دقیق متوسط سرعت موج برشی هر مش (جمعا ۴۱ تیپ خاک و متعاقبا ۴۱ سرعت متوسط برشی) که در جدول ۲ نشان داده شده در محاسبات خطر لرزه ای استفاده شده است.

جدول ۲: سرعت موج برشی متوسط ۳۰ متر اول پروفیل‌های خاک گستره تهران

Type	Vave(m/s)	Type	Vave(m/s)	Type	Vave(m/s)	Type	Vave(m/s)
1	194.94	12	361.85	23	361.85	34	427.31
2	281.51	13	361.85	24	299.62	35	435.06
3	193.99	14	361.85	25	254.14	36	607.33
4	281.51	15	280.51	26	315.02	37	320.25
5	194.94	16	361.85	27	269.61	38	515.60
6	361.85	17	229.03	28	306.62	39	572.72
7	281.51	18	206.17	29	289.09	40	1000.00
8	281.51	19	631.19	30	326.15	41	1000.00
9	317.84	20	505.72	31	283.40		
10	254.14	21	389.97	32	317.33		
11	505.72	22	194.94	33	340.79		



شکل ۴: دسته بندی خاک شهر تهران مطابق با استاندارد ۲۸۰۰ (ویرایش چهارم)

۶- روابط کاهندگی استفاده شده در تحلیل لرزه ای تعیینی

دو نوع تحلیل خطر لرزه ای شامل تحلیل خطر احتمالاتی و تحلیل خطر تعیینی (قطعی) وجود دارد. تحلیل خطر احتمالاتی تمامی منابع لرزه ای اطراف ساختگاه را با احتمالات مختلف فاصله، شتاب، دوره بازگشت و عدم قطعیت‌های مربوطه در نظر می‌گیرد. اما در روش تعیینی بدترین و بیشترین خطر ممکن فارغ از روابط احتمالاتی و دوره بازگشت بدست آورده می‌شود. این روش شاید برای همه ساختمان‌ها اقتصادی نباشد اما برای ساختمان‌ها و ابنیه مهم نظیر بیمارستان‌ها، مراکز آتش نشانی، ابنیه و تاسیسات شریان‌های حیاتی، تاسیسات نظامی و انتظامی و بطور کلی تمامی ساختمان‌هایی که در نجات و امداد موثر و یا خطر زا باشند توصیه می‌گردد.

بمنظور محاسبه شاخص خطر لرزه ای اعم از بیشینه شتاب سطح زمین، بیشینه سرعت سطح زمین، بیشینه تغییر مکان سطح زمین یا شتاب طیفی از منحنی‌های کاهندگی استفاده می‌شود. این روابط در دهه‌های اخیر توسعه فراوانی یافته اند. رابطه‌های اولیه نخست برای یک یا دو نوع خاک ساختگاه (سنگ و آبرفت) ارائه گردیده بودند. با گسترش شتابنگارها و نیز تکمیل بررسی‌های خاک ساختگاه شتابنگارها، روابط کاهندگی افزون بر فاصله ساختگاه تا منبع لرزه ای، انواع مختلفی از خاکها، مکانیزم گسلش و حتی اثرات زون های لرزه‌ای را نیز شامل می‌شدند. از نمونه های جهانی این روابط می توان به روابط کاهندگی نسل جدید (NGA) نظیر روابطی که توسط Boore-Atkinson, Campbell-Bozorgnia, Chiou-Youngs معرفی شده اند اشاره نمود. این روابط از رکوردهای مشابهی که از سراسر جهان به طور یکسان در اختیارشان قرار گرفته است برای تخمین پارامترهای PGA, PGV, PGD استفاده نموده اند. از آنجا که در رابطه سازی روابط کاهندگی هر یک تفاوت‌هایی وجود دارد که ممکن است متأثر از تجربیات گروهی و نحوه استفاده از داده ها و اعمال فرضیات متفاوت و نظائر آنها باشد، انتظار می رود نتایج بررسی آنها، بر حسب میزان تاکید هر کدام بر برخی جزئیات مربوط به پارامترهای خروجی مورد نظرشان با

یکدیگر تفاوت‌هایی داشته باشند. باید افزود روابطی که صرفاً بر رکوردهای ایران مبتنی هستند نمی‌توانند برآورد دقیقی از شتاب یا سایر شاخص‌های لرزه‌ای نزدیک گسل ارائه نمایند. زیرا تعداد معدودی رکورد نزدیک گسل در ایران وجود دارد و اگر این رکوردها نیز به خاک‌های مختلفی دسته بندی گردد تعداد کافی برای انجام یک رگرسیون غیر خطی وجود نخواهد داشت. از این رو در حال حاضر برای کلانشهر تهران که در مجاورت چندین گسل فعال قرار دارد چاره ای جز استفاده از روابط NGA نیست. شجاع طاهری و همکاران [۱۱] نشان دادند که به طور کلی روابط کمپل-بزرگ نیا و بور-آتکینسون [۱۲] همخوانی بیشتری با داده‌های ایران دارند. نتایج نشان می‌دهد که در پیوندهای کوتاه، طیف شتاب بدست آمده از رابطه کمپل - بزرگ نیا نسبت به رابطه بور _آتکینسون ارجحیت بیشتری دارد. در تحقیق دیگری صفاری و همکاران [۱۳] ضمن ارائه رابطه کاهندگی بر اساس رکوردهای ایران و تطبیق روابط مختلف NGA با آن نشان دادند که در پیوندهای ۰/۱ تا ۱ ثانیه رابطه کمپل - بزرگ نیا هم برای زلزله‌های حوزه نزدیک و هم برای زلزله‌های حوزه دور تطبیق بیشتری با داده‌های ایران بخصوص در زون لرزه‌ای ایران مرکزی دارند. از این رو برای تحلیل خطر لرزه‌ای تهران از مدل کمپل- بزرگ نیا (۲۰۰۸) مطابق رابطه ۷ استفاده گردید.

$$\hat{Ln} Y = f_{mag} + f_{dis} + f_{flt} + f_{hng} + f_{site} + f_{sed} \quad (7)$$

$$f_{mag} = \begin{cases} C_0 + C_1 M; & M \leq 5.5 \\ C_0 + C_1 M + C_2 (M - 5.5); & 5.5 < M \leq 6.5 \\ C_0 + C_1 M + C_2 (M - 5.5) + C_3 (M - 6.5); & M > 6.5 \end{cases} \quad (7-1)$$

$$f_{dis} = (C_4 + C_5 M) \ln \left(\sqrt{R_{RUP}^2 + C_6^2} \right) \quad (7-2)$$

$$f_{flt} = C_7 F_{RV} f_{flt,z} + C_8 F_{NM} \quad (7-3)$$

$$f_{flt,z} = \begin{cases} Z_{TOR}; & Z_{TOR} < 1 \\ 1; & Z_{TOR} \geq 1 \end{cases} \quad (7-4)$$

$$f_{hng} = C_9 f_{hng,R} f_{hng,M} f_{hng,Z} f_{hng,\delta} \quad (7-5)$$

$$f_{hng,R} = \begin{cases} 1; & R_{JB} = 1 \\ \frac{[\max(R_{RUP}, \sqrt{R_{JB}^2 + 1}) - R_{JB}]}{\max(R_{RUP}, \sqrt{R_{JB}^2 + 1})}; & R_{JB} > 0, Z_{TOR} < 1 \\ \frac{R_{RUP} - R_{JB}}{R_{RUP}}; & R_{JB} > 0, Z_{TOR} \geq 1 \end{cases} \quad (7-6)$$

$$f_{hng,M} = \begin{cases} 0; & M \leq 6.0 \\ 2(M - 6.0); & 6.0 < M < 6.5 \\ 1; & M \geq 6.5 \end{cases} \quad (7-7)$$

$$f_{hng,Z} = \begin{cases} 0; & Z_{TOR} \geq 20 \\ \frac{20 - Z_{TOR}}{20}; & 0 \leq Z_{TOR} < 20 \end{cases} \quad (7-8)$$

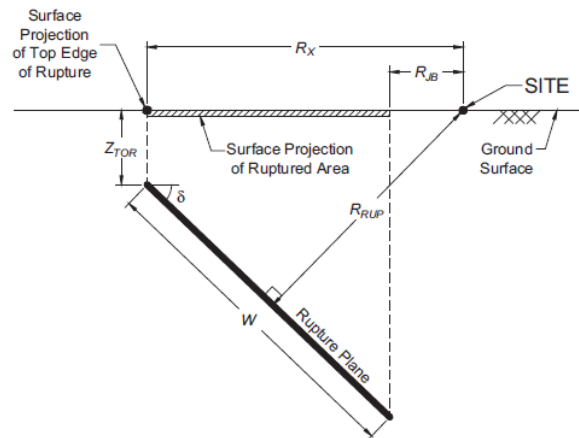
$$f_{hng,\delta} = \begin{cases} 1; & \delta \leq 70 \\ \frac{90 - \delta}{20}; & \delta > 70 \end{cases} \quad (7-9)$$

$$f_{site} = \begin{cases} C_{10} \ln \left(\frac{V_{s30}}{K_1} \right) + K_2 \left\{ \ln \left[A_{1100} + c \left(\frac{V_{s30}}{K_1} \right)^n \right] - \ln [A_{1100} + c] \right\}; & V_{s30} < K_1 \\ (C_{10} + K_2 n) \ln \left(\frac{V_{s30}}{K_1} \right); & K_1 \leq V_{s30} < 1100 \\ (C_{10} + K_2 n) \ln \left(\frac{1100}{K_1} \right); & V_{s30} \geq 1100 \end{cases} \quad (7-10)$$

$$f_{sed} = \begin{cases} C_{11} (Z_{2.5} - 1); & Z_{2.5} < 1 \\ 0; & 1 \leq Z_{2.5} \leq 3 \\ C_{12} K_3 e^{-0.75} [1 - e^{-0.25(Z_{2.5}-3)}]; & Z_{2.5} > 3 \end{cases} \quad (7-11)$$

در رابطه (۷)، متغیر Y نشانگر شاخص لرزه‌ای نظیر PGA، PGV، PGD و یا SA (شتاب طیفی) می‌باشد. M معرف بزرگای گشتاور لرزه‌ای، r_{rup} کمترین فاصله از سطح گسیختگی گسل، r_{jb} جهت ارزیابی اثر فرا دیواره (در فواصل نزدیک به گسل)، R_x فاصله افقی سایت از شگستگی لبه فوقانی گسل و δ بیانگر زاویه شیب گسل می‌باشد (شکل ۵). از سرعت میانگین امواج برشی در ۳۰ متر فوقانی لایه زیر ساختگاه V_{s30} به عنوان مشخص کننده اثر ساختگاه استفاده می‌گردد. ساز و کار کانونی زلزله‌ها توسط زاویه لغزش دسته بندی می‌شوند. همچنین Z_{TOR} به عنوان فاصله گسیختگی سطحی تا سطح زمین و $Z_{2.5}$ معرف عمقی که سرعت موج برشی به ۲/۵ km/s می‌رسد می‌باشد. اثر فرادیواره

در هر دو سازوکار معکوس و نرمال در نظر گرفته می‌شود. متغیر F_{NM} و F_{RV} جهت تعیین مکانیزم گسلش معکوس و نرمال تعریف شده اند که برای تعیین آنها مراجعه به مقاله مذکور توصیه می‌گردد [۷]. باید افزود این رابطه کاهندگی بر مبنای سرعت ساختگاه مرجع $V_{ref}=1100$ m/s، بر حسب بزرگا و فاصله برای سازوکارهای مختلف و برای پارامترهای PGA, PGV, PGD در پریودهای ۰/۰۱ و ۰/۰۲ و ۰/۰۳ و ۰/۰۵ و ۰/۰۷۵ و ۰/۱ و ۰/۱۵ و ۰/۲ و ۰/۲۵ و ۰/۳ و ۰/۴ و ۰/۵ و ۰/۷۵ و ۱ و ۱/۵ و ۲ و ۳ و ۴ و ۵ ثانیه ارزیابی شده اند که می‌توان با استفاده از ضرایب بدست آمده در این مدل پارامترهای شتابنگاری را بر حسب بزرگی، فاصله و برای سازه و کارها و شرایط ساختگاهی مختلف تعیین نمود.



شکل ۵: پارامترهای رابطه کمپل-بزرگ نیا.

جدول ۳: ضرایب رابطه کاهندگی کمپل-بزرگ نیا

T (s)	c_0	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6	c_7	c_8	c_9	c_{10}	c_{11}	c_{12}	k_1	k_2	k_3
0.010	-1.715	0.500	-0.530	-0.262	-2.118	0.170	5.60	0.280	-0.120	0.490	1.058	0.040	0.610	865	-1.186	1.839
0.020	-1.680	0.500	-0.530	-0.262	-2.123	0.170	5.60	0.280	-0.120	0.490	1.102	0.040	0.610	865	-1.219	1.840
0.030	-1.552	0.500	-0.530	-0.262	-2.145	0.170	5.60	0.280	-0.120	0.490	1.174	0.040	0.610	908	-1.273	1.841
0.050	-1.209	0.500	-0.530	-0.267	-2.199	0.170	5.74	0.280	-0.120	0.490	1.272	0.040	0.610	1054	-1.346	1.843
0.075	-0.657	0.500	-0.530	-0.302	-2.277	0.170	7.09	0.280	-0.120	0.490	1.438	0.040	0.610	1086	-1.471	1.845
0.10	-0.314	0.500	-0.530	-0.324	-2.318	0.170	8.05	0.280	-0.099	0.490	1.604	0.040	0.610	1032	-1.624	1.847
0.15	-0.133	0.500	-0.530	-0.339	-2.309	0.170	8.79	0.280	-0.048	0.490	1.928	0.040	0.610	878	-1.931	1.852
0.20	-0.486	0.500	-0.446	-0.398	-2.220	0.170	7.60	0.280	-0.012	0.490	2.194	0.040	0.610	748	-2.188	1.856
0.25	-0.890	0.500	-0.362	-0.458	-2.146	0.170	6.58	0.280	0.000	0.490	2.351	0.040	0.700	654	-2.381	1.861
0.30	-1.171	0.500	-0.294	-0.511	-2.095	0.170	6.04	0.280	0.000	0.490	2.460	0.040	0.750	587	-2.518	1.865
0.40	-1.466	0.500	-0.186	-0.592	-2.066	0.170	5.30	0.280	0.000	0.490	2.587	0.040	0.850	503	-2.657	1.874
0.50	-2.569	0.656	-0.304	-0.536	-2.041	0.170	4.73	0.280	0.000	0.490	2.544	0.040	0.883	457	-2.669	1.883
0.75	-4.844	0.972	-0.578	-0.406	-2.000	0.170	4.00	0.280	0.000	0.490	2.133	0.077	1.000	410	-2.401	1.906
1.0	-6.406	1.196	-0.772	-0.314	-2.000	0.170	4.00	0.255	0.000	0.490	1.571	0.150	1.000	400	-1.955	1.929
1.5	-8.692	1.513	-1.046	-0.185	-2.000	0.170	4.00	0.161	0.000	0.490	0.406	0.253	1.000	400	-1.025	1.974
2.0	-9.701	1.600	-0.978	-0.236	-2.000	0.170	4.00	0.094	0.000	0.371	-0.456	0.300	1.000	400	-0.299	2.019
3.0	-10.556	1.600	-0.638	-0.491	-2.000	0.170	4.00	0.000	0.000	0.154	-0.820	0.300	1.000	400	0.000	2.110
4.0	-11.212	1.600	-0.316	-0.770	-2.000	0.170	4.00	0.000	0.000	0.000	-0.820	0.300	1.000	400	0.000	2.200
5.0	-11.684	1.600	-0.070	-0.986	-2.000	0.170	4.00	0.000	0.000	0.000	-0.820	0.300	1.000	400	0.000	2.291
7.5	-12.505	1.600	-0.070	-0.656	-2.000	0.170	4.00	0.000	0.000	0.000	-0.820	0.300	1.000	400	0.000	2.517
10.0	-13.087	1.600	-0.070	-0.422	-2.000	0.170	4.00	0.000	0.000	0.000	-0.820	0.300	1.000	400	0.000	2.744
PGA	-1.715	0.500	-0.530	-0.262	-2.118	0.170	5.60	0.280	-0.120	0.490	1.058	0.040	0.610	865	-1.186	1.839
PGV	0.954	0.696	-0.309	-0.019	-2.016	0.170	4.00	0.245	0.000	0.358	1.694	0.092	1.000	400	-1.955	1.929
PGD	-5.270	1.600	-0.070	0.000	-2.000	0.170	4.00	0.000	0.000	0.000	-0.820	0.300	1.000	400	0.000	2.744

۷- نتایج شاخص‌های لرزه ای شهر تهران

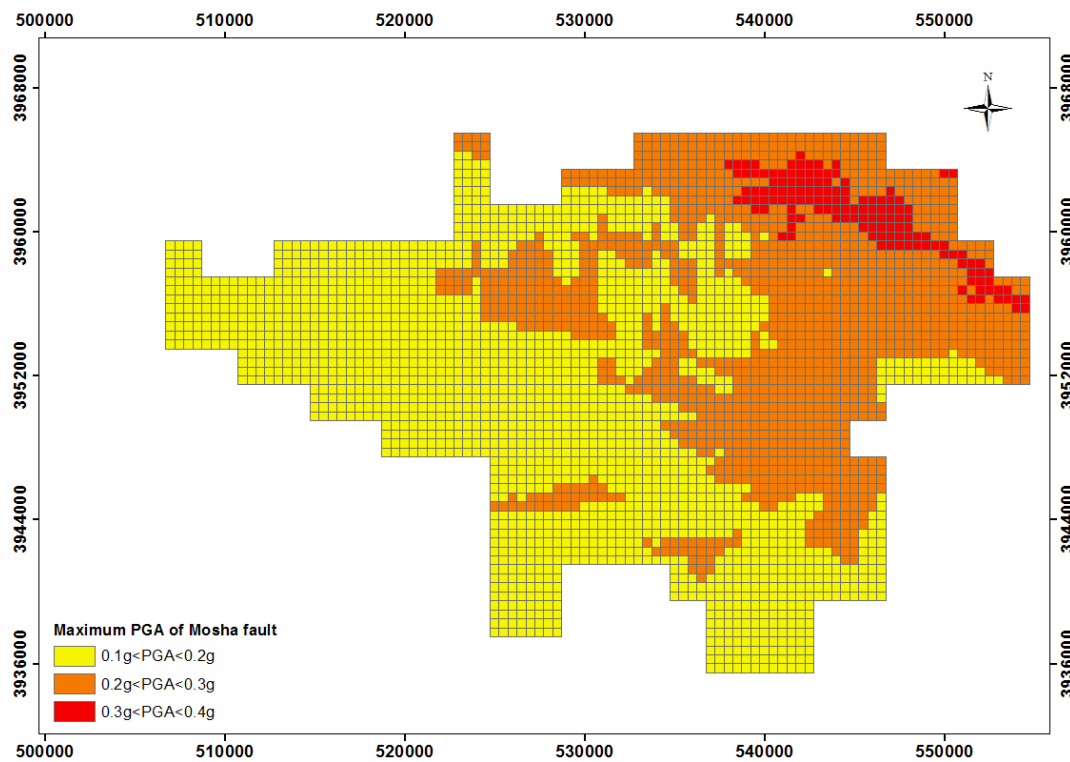
با استفاده از رابطه کاهندگی اشاره شده در رابطه ۷، بیشینه شتاب، سرعت، تغییر مکان سطح زمین و شتاب طیفی برای همه مش‌های شهر تهران با توجه به شرایط خاک ساختگاه و فاصله هر مش از گسل‌های سناریوی مشخص شده و نهایتاً ماکزیمم شاخص لرزه ای به ازای همه سناریوها در ادامه آورده شده است. خاطر نشان می‌گردد از آنجا که در استفاده از رابطه میرایی کمپل- بزرگنیا (۲۰۰۸) مشخصات

هندسی گسلها و پارامترهای R_{JB} , R_{Rup} , Z_{Tor} متوسط سرعت موج برشی ساختگاه و ... برای تمامی مشهای تهران (از جمله مناطق همجوار گسل) با دقت محاسبه شده اند، در خروجی های ارائه شده شاخص لرزه ای برای تمامی مناطق از جمله دور و همجوار گسل بهترین مقدار را ارائه می نماید.

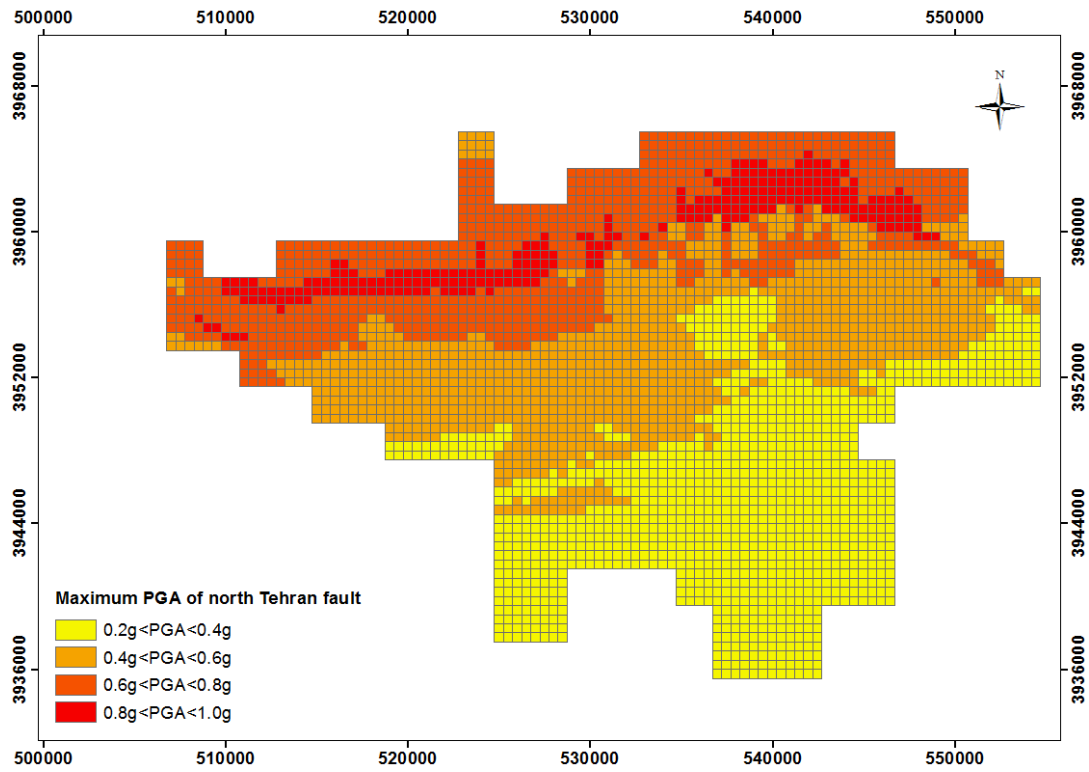
۷-۱- بیشینه شتاب سطح زمین

بیشینه شتاب جنبش زمین به منزله یکی از پارامترهای جنبش نیرومند زمین در تحلیل رفتار لرزه ای سازه های رو زمینی و خرابی های ناشی از زمین لرزه مورد توجه است. معمولا میزان خرابی ها با افزایش شتاب جنبش زمین در زمین لرزه، افزایش می یابد.

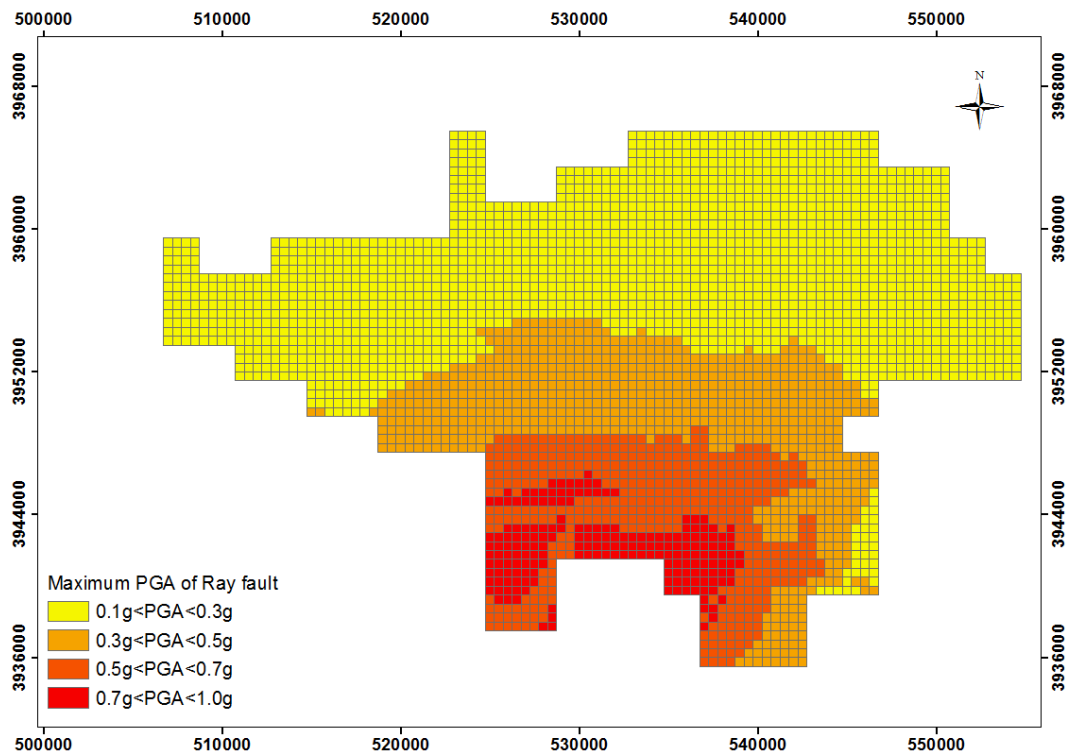
اشکال ۶ و ۷ و ۸ میزان شتاب در نقاط مختلف شهر تهران ناشی از فعالیت گسل های مشا، شمال تهران و ری را نشان می دهند، همچنین در شکل ۹ بیشینه شتاب سطح زمین ناشی از سه گسل سناریو آورده شده است.



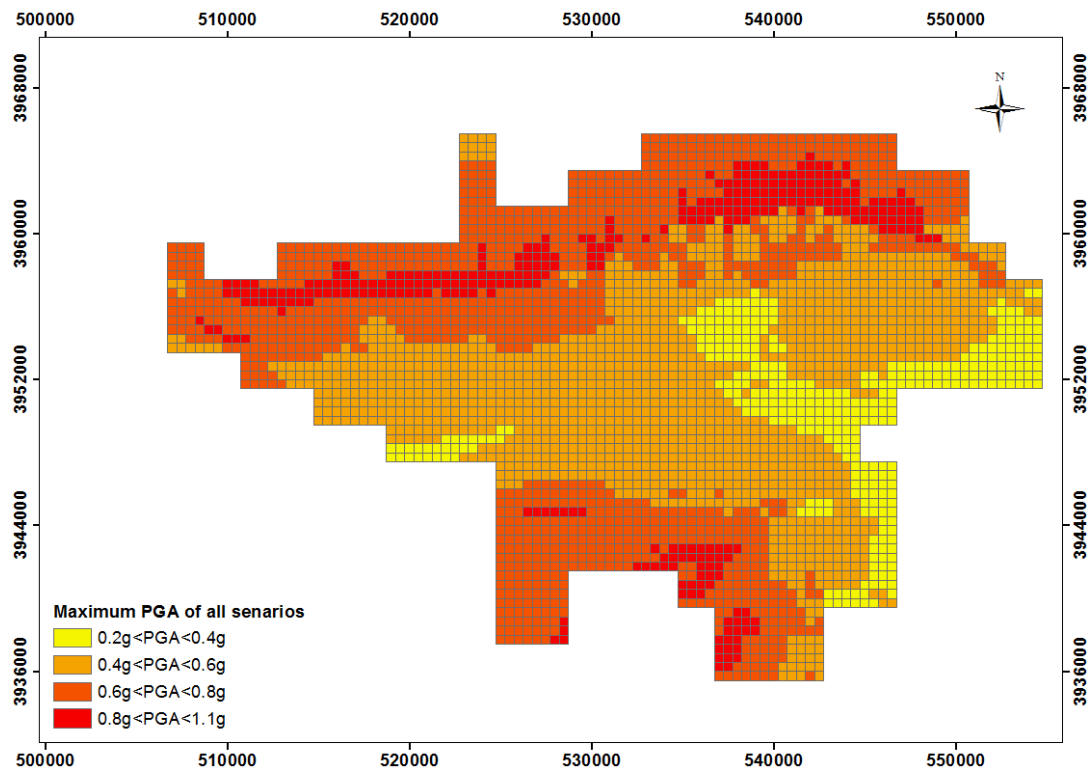
شکل ۶: بیشینه شتاب سطح زمین بر اساس گسل مشا.



شکل ۷: بیشینه شتاب سطح زمین بر اساس گسل شمال تهران.



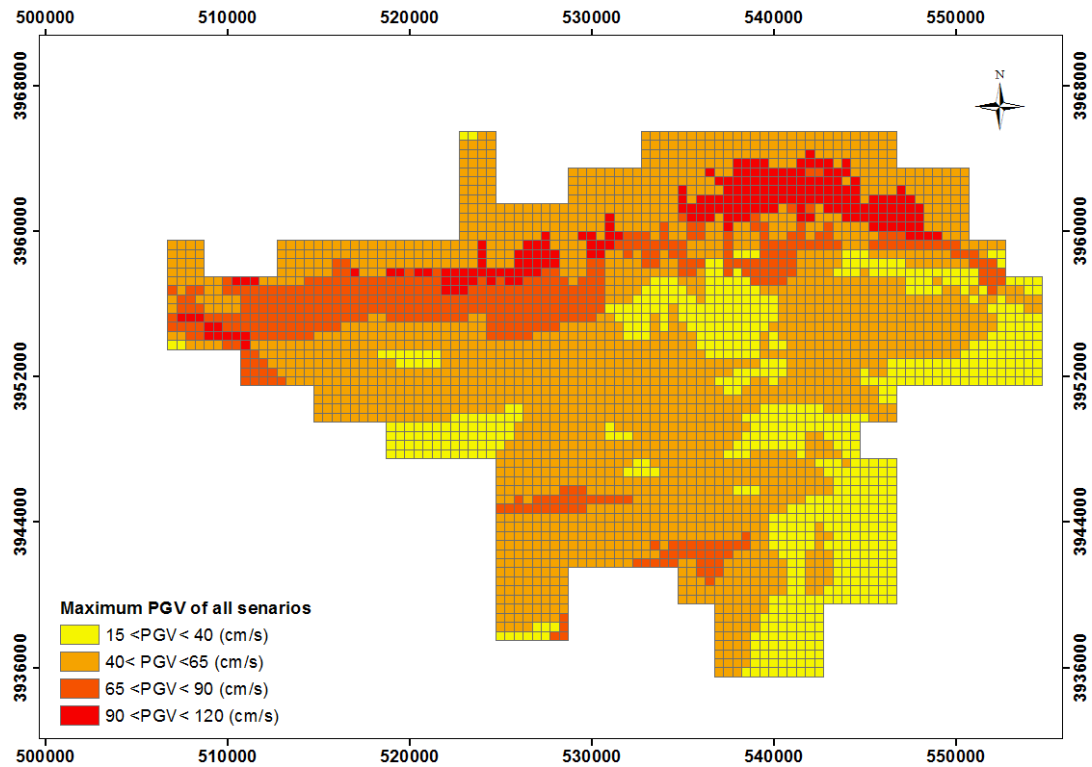
شکل ۸: بیشینه شتاب سطح زمین بر اساس گسل ری.



شکل ۹: بیشینه شتاب سطح زمین با در نظر گیری همه گسل‌های سناریو.

۷-۲- بیشینه سرعت سطح زمین

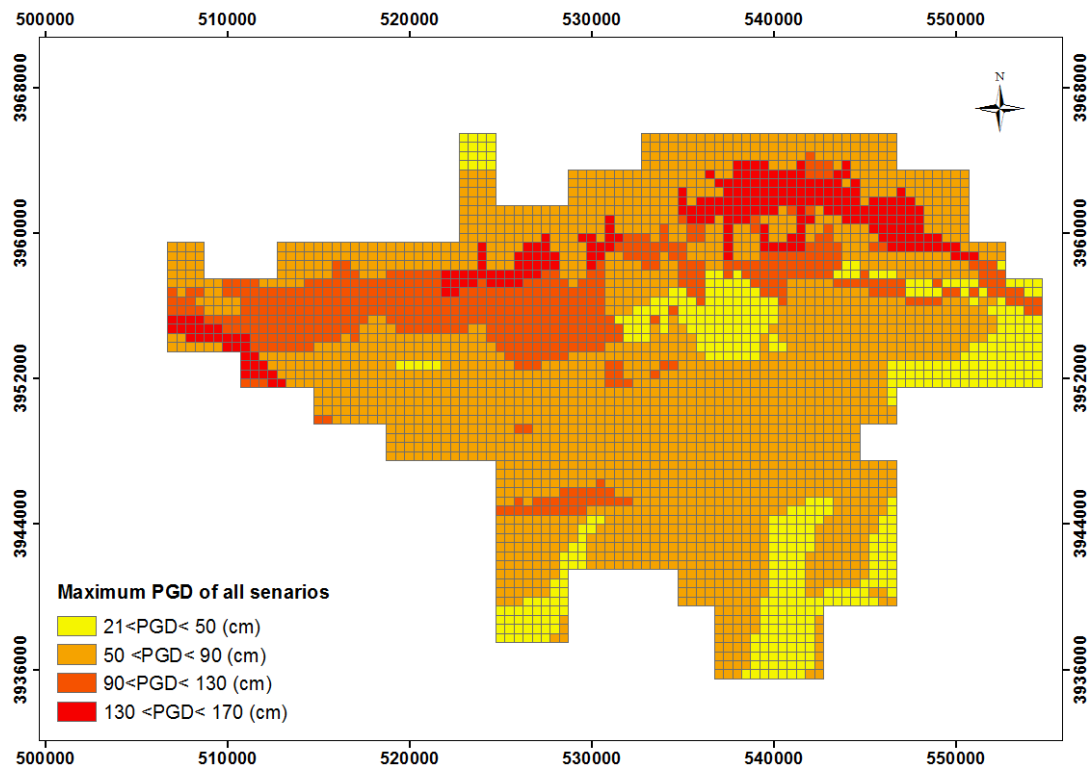
بیشینه سرعت سطح زمین نیز یکی دیگر از شاخص‌های ارزیابی خسارات ناشی از زلزله است که در برآورد آسیب شریان‌های حیاتی مدفون کاربرد فراوان دارد. رفتار لوله‌ها در زلزله‌های گذشته نشان داده است که پارامتر سرعت ارتعاشات زمین بیش از پارامتر شتاب بر عملکرد لرزه ای لوله مدفون اثر دارد. این امر ناشی از مکانیزم رفتار لرزه ای خطوط لوله در هنگام زلزله می‌باشد. چگونگی جابجایی زمین در طول خط لوله در واحد زمان که همان سرعت ارتعاش زمین می‌باشد با میزان کرنش زمین در طول خط لوله در زمان زلزله تناسب بیشتری دارد. اثر فوق بر لوله‌ها در بخش وسیعی از منطقه زلزله زده می‌تواند موجب آسیب‌های عمده ای بر لوله‌ها گشته و کنترل یا مرمت آن را بسیار سخت و پیچیده نماید. در شکل ۱۰ مقدار بیشینه سرعت سطح زمین در محدوده‌های مختلف شهر تهران نشان داده شده است که می‌تواند مبنای محاسبات ارزیابی آسیب پذیری شریان‌های حیاتی مدفون قرار گیرد.



شکل ۱۰: ماکزیمم سرعت موج برشی با در نظر گیری همه گسل‌های سناریو

۷-۳- بیشینه جابجایی سطح زمین

جابجایی بیشینه سطح زمین در آسیب پذیری برخی از شریان‌های حیاتی نظیر راه‌ها یا مطالعه اثر زلزله بر سازه‌های خیلی نرم ضرورت دارد. جابجایی بیشینه معمولاً با مؤلفه‌های حرکت یک زلزله در فرکانس‌های پایین تر اتفاق می‌افتد. در شکل ۱۱ بیشینه جابجایی سطح زمین در گستره شهر تهران به ازای تمامی گسل‌های سناریو آورده شده است. بر اساس این تحلیل در صورت رخ دادن بدترین زلزله مورد انتظار، بیشینه تغییر مکان سطحی زمین در نیمه شمالی تهران تا ۱۷۰ سانتی متر خواهد بود که به بسیاری از جاده‌ها و پل‌ها آسیب وارد خواهد کرد.



شکل ۱۱: ماکزیمم تغییر مکان سطح زمین با در نظر گیری همه گسل های سناریو

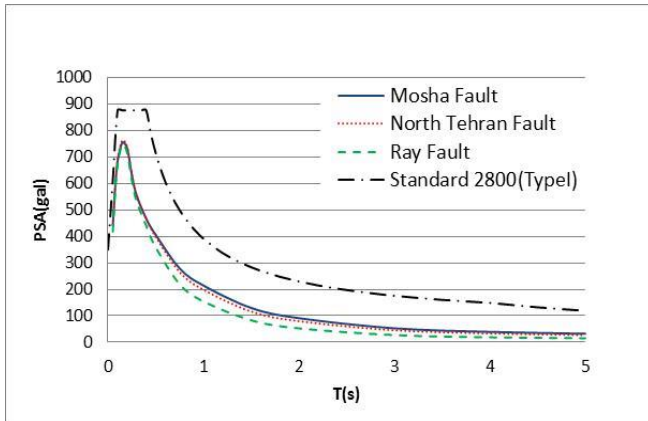
۴-۷- منحنی های شتاب طیفی گستره تهران

طیف طرح ساختمانی در گستره شهر تهران با استفاده از رابطه کاهندگی طیفی عنوان شده و در نظر گرفتن فاصله از گسل های سناریوی شهر تهران در هر سه تپ خاک و با در نظر گرفتن نسبت میرائی ۵ درصد در ادامه ترسیم شده است. شکل ۱۲، ۱۳ و ۱۴ به ترتیب طیف ساختمانی را برای فواصل روی گسل، ۱۰ و ۲۰ کیلومتر دور از گسل های سناریو در تپ خاک I، II و III نشان می دهند. همچنین بمنظور مقایسه خطر قطعی با خطر احتمالاتی آئین نامه ۲۸۰۰، طیف آئین نامه نیز متناظر با منطقه با خطر بسیار زیاد لرزه ای (نظیر تهران) برای هر تپ خاک در نمودارها نشان داده شده است.

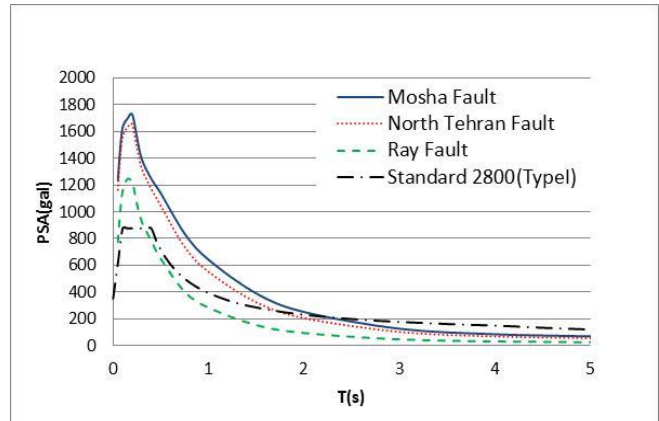
باید افزود با استفاده از رابطه کاهندگی (رابطه ۷) و ضرایب مربوطه (جدول ۳) می توان طیف ساختمانی را در هر فاصله دلخواه و با هر تپ خاک (با استفاده از سرعت موج برشی متوسط ۳۰ متر اول مطابق جدول ۲) تعیین نمود. مطابق این خروجی ها مقادیر شتاب طیفی روی گسل شمال تهران در خاک تپ I، II و III به ترتیب به بیش از ۱،۶، ۲،۱ و ۲،۶ g در دوره تناوب کوتاه (متناظر با ساختمان های کوتاه مرتبه) می رسد و مبین اوج خسارت در نواحی روی گسلی می باشد. این مقادیر به مراتب بیشتر از شتاب اوج آئین نامه ۲۸۰۰ (ویرایش چهارم) برای خاک تپ I، II و III که به ترتیب ۰،۸۷۵، ۰،۸۷۵ و ۰،۹۶۲ g در دوره تناوب ۰،۲ ثانیه می باشند. بعبارت دیگر ساختمان هایی که با آئین نامه ۲۸۰۰ طراحی می شوند به هیچ وجه تاب تحمل شتاب های روی ناحیه گسلش را ندارند و تخریب خواهند شد. شتاب های ارائه شده توسط استاندارد ۲۸۰۰ ایران نزدیک به شتاب های طیفی حدود ۱۰ کیلومتر تا ناحیه گسلش و روی خاک تپ II می باشند و در شرایط خاک تپ III نیز از مقدار واقعی (به روش قطعی) کمتراند.

۷-۵- خلاصه بررسی شاخص‌های لرزه ای

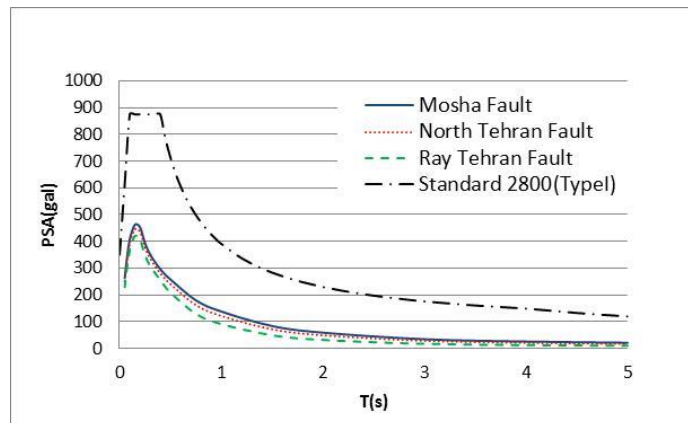
با استفاده از رابطه کاهندگی انتخاب شده در مقاله که بهترین تطابق را با مشاهدات لرزه ای ایران دارد، شاخص‌های اصلی لرزه ای شهر تهران به ازای گسل‌های سناریوی مشا، شمال تهران و ری به ازای خاک‌ها و فواصل مختلف مطابق جداول ۴ تا ۶ خلاصه گردیده اند. همانطور که در جداول ۴ و ۵ مشاهده می‌شود بیشینه شتاب، سرعت و تغییر مکان زمین از خاک سخت به خاک نرم و با کاهش فاصله نسبت به منبع لرزه ای افزایش می‌یابند.



ب- در فاصله ۱۰ کیلومتری از گسل

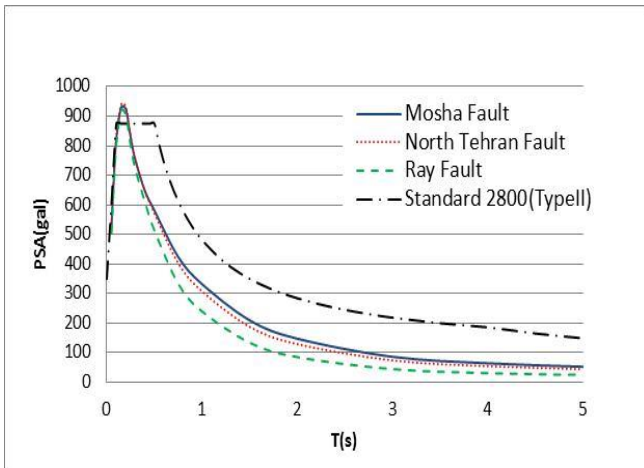


الف- روی گسل

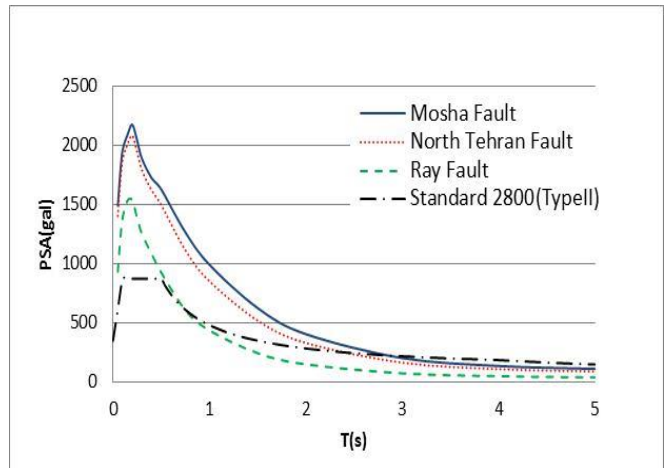


ج- در فاصله ۲۰ کیلومتری از گسل

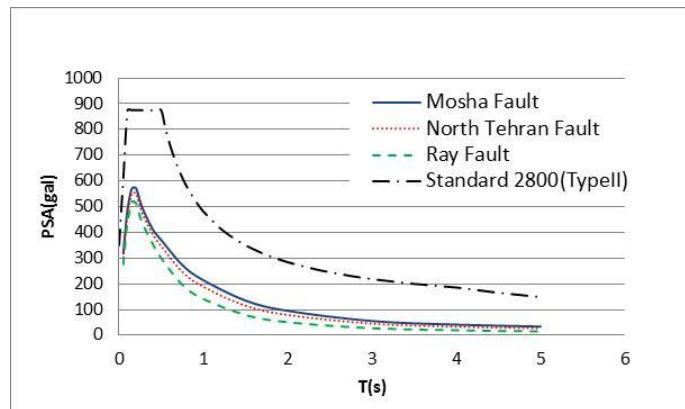
شکل ۱۲: شتاب طیفی روی خاک تیپ ۱ در فواصل مختلف ساختگاه تا گسل.



ب- در فاصله ۱۰ کیلومتری از گسل

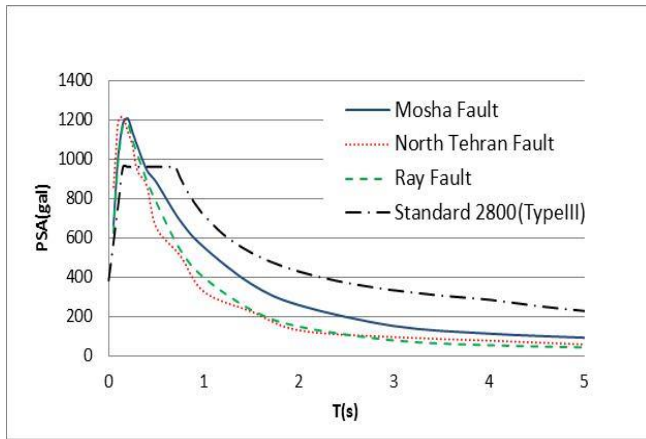


الف- روی گسل

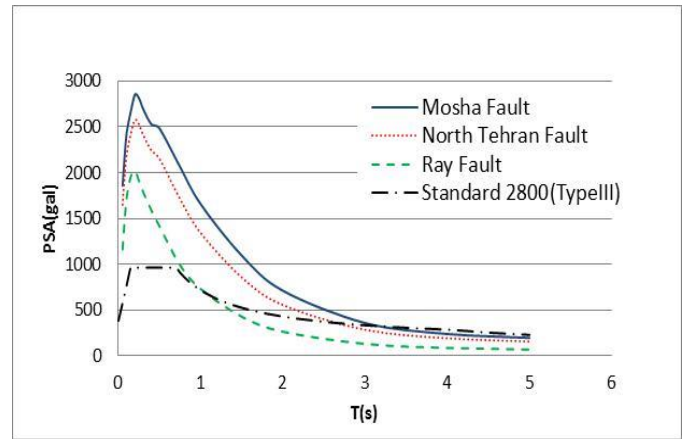


ج- در فاصله ۲۰ کیلومتری از گسل

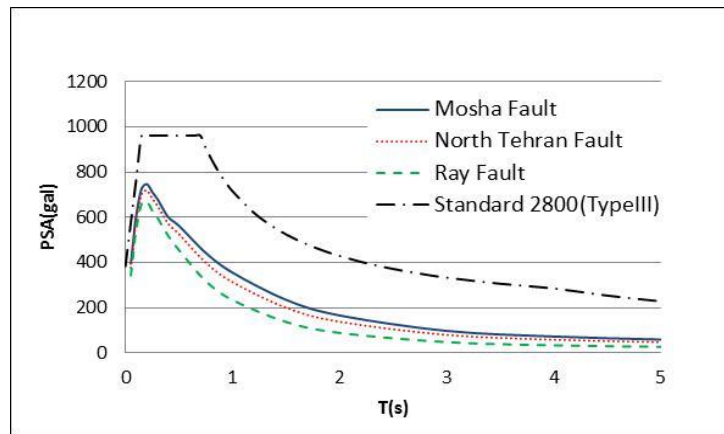
شکل ۱۳: شتاب طیفی روی خاک تیپ ۲ در فواصل مختلف ساختگاه تا گسل.



ب- در فاصله ۱۰ کیلومتری از گسل



الف- روی گسل



ج- در فاصله ۲۰ کیلومتری از گسل

شکل ۱۴: شتاب طیفی روی خاک تیپ ۳ در فواصل مختلف ساختگاه تا گسل.

جدول ۴: مقادیر PGA, PGV, PGD در فواصل مختلف از گسل مشا

گسل مشا	فاصله از گسل	PGA(gal)			PGV(cm/s)			PGD(cm)		
		0km	10km	20km	0km	10km	20km	0km	10km	20km
گسل مشا	خاک نوع ۱	825	308	191	79	28	18	103	49	31
	خاک نوع ۲	1011	378	234	113	41	26	168	80	51
	خاک نوع ۳	1282	478	296	173	63	40	297	140	91

جدول ۵: مقادیر PGA, PGV, PGD در فواصل مختلف از گسل شمال تهران

گسل شمال تهران	فاصله از گسل	PGA(gal)			PGV(cm/s)			PGD(cm)		
		0km	10km	20km	0km	10km	20km	0km	10km	20km
گسل شمال تهران	خاک نوع ۱	778	308	181	64	25	15	68	34	21
	خاک نوع ۲	955	379	224	93	36	22	111	55	34
	خاک نوع ۳	1140	487	284	142	55	33	196	97	60

جدول ۶: مقادیر PGA,PGV,PGD در فواصل مختلف از گسل ری

فاصله از گسل (km)	PGA(gal)			PGV(cm/s)			PGD(cm)		
	0km	10km	20km	0km	10km	20km	0km	10km	20km
خاک نوع ۱	524	291	166	29	17	10	18	12	7
خاک نوع ۲	644	358	204	42	24	14	30	19	12
خاک نوع ۳	815	453	258	65	37	22	53	33	21

۸- نتیجه گیری

گستره شهر تهران همجوار با گسل‌های فعال مختلفی می‌باشد که در طول تاریخ بارها تجربه زلزله‌های مخرب را داشته‌اند. همچنین ضخامت آبرفت از نواحی کوهستانی و کوهپایه‌ای شهر تا شیب‌ها و ترازهای ارتفاعی کمتر رو به افزایش بوده و این مساله نیز تشدید و بزرگنمایی شاخص‌های لرزه‌ای را سبب می‌شود. در این مقاله تحلیل خطر زلزله شهر تهران به روش قطعی با در نظر گرفتن بدترین سناریوها انجام گرفت. در این راستا مدل کاهندگی کمپل-بزرگ نیا (۲۰۰۸) که سازگار با زلزله‌های ایران می‌باشد و در نواحی نزدیک به گسل معتبر است استفاده گردید. در ادامه مشخصات گسل‌های اطراف تهران از مطالعات پیشین استخراج شد و نیز پروفیل‌های خاک هر مش به ابعاد ۵۰۰ متر و سرعت متوسط برشی ۳۰ متر اول سطح زمین در گستره تهران بدست آمد. با استفاده از داده‌های اشاره شده، تحلیل خطر قطعی با فرض رخداد زلزله در نزدیکترین فاصله هر گسل تا مرکز هر مش انجام گرفت و خروجی لرزه‌ای مربوطه، به ازای هر گسل سناریو و سپس به ازای همه سناریوها محاسبه گردید. از مجموع تحلیل‌های انجام یافته می‌توان نتایج زیر را عنوان نمود:

- در صورت رخداد بیشترین زلزله محتمل در گسل شمال تهران بدلیل نزدیکی این گسل به شهر و نیز قرارگیری بخش قابل توجهی از شمال غرب تهران روی این گسل، مناطق همجوار آن متاثر از شتاب بیش از $0.8g$ خواهند شد و آسیب زیادی خواهند دید. شتاب از نواحی شمالی به جنوبی کاهش خواهد یافت، لکن مناطق جنوبی شهر نیز شتاب $0.2g$ را تجربه خواهند نمود و ساختمان‌های ضعیف جنوب شهر نیز دچار آسیب خواهند شد.
- در صورت رخداد بیشترین زلزله محتمل در گسل مشا بدلیل فاصله داشتن این گسل از تهران مناطق شمال شرق تهران تحت حداکثر شتاب $0.4g$ قرار خواهند گرفت و با دور شدن از مرکز زلزله شتاب در دورترین نواحی شهر به $0.1g$ تقلیل پیدا خواهد کرد.
- چنانچه گسل ری حرکت شدیدی نماید و بیشترین زلزله منتسب به آن رخ دهد مناطق جنوب شهر تحت شتاب افقی بین $0.5g$ تا $1g$ قرار خواهند گرفت و ساختمان‌های کوتاه مرتبه دچار آسیب شدید خواهند شد. به دلیل اینکه بخش عمده‌ای از بافت مناطق جنوبی همجوار گسل ری دارای خاک تیپ III و فرسوده می‌باشند بیشترین خسارت در اثر زلزله گسل ری متوجه شهر تهران خواهد شد.
- مقادیر شتاب طیفی روی گسل شمال تهران در خاک تیپ I، II و III به ترتیب مقادیری بیش از $1.6g$ ، $2.1g$ و $2.6g$ در پیوند متناظر با ساختمان‌های کوتاه را ارائه می‌دهند و مبین اوج خسارت در نواحی روی گسلی و بطور مشابه در مناطق قرار گرفته بر روی گسل ری (با مختصری کاهش نسبت به گسل شمال تهران) می‌باشند. این مقادیر بمراتب بیشتر از شتاب اوج آئین نامه ۲۸۰۰ می‌باشند و ساختمان‌های همجوار گسل‌ها تخریب خواهند شد. از این رو موکدا توصیه می‌گردد از ساخت و ساز مجاور گسل خودداری گردد و در صورت ضرورت در طراحی از شتاب‌های واقعی تولید شده به روش قطعی استفاده گردد.
- توصیه می‌گردد ساختمان‌های با اهمیت خیلی زیاد و زیاد از دیدگاه استاندارد ۲۸۰۰ ایران در شهر تهران به هنگام طراحی برای شتاب‌های پیشینه و طیفی ارائه شده در این مقاله با توجه به محل قرارگیری کنترل شوند و در صورت لزوم سطح شتاب آنها به مقادیر ارائه شده افزایش یابد.

مراجع

- [1] Harvard University, 2009. Seismology department Web page, <http://www.seismology.harvard.edu/>, accessed 20 April 2009
- [2] International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES), 2003. Major Active faults of Iran.
- [3] Japan International Cooperation Agency. (2000). The Study on Seismic Microzoning of the Greater Tehran Area in the Islamic Republic of Iran. Tehran
- [4] جعفری، محمد کاظم (۱۳۸۱). مطالعات تکمیلی ریز پهنه بندی لرزه ای جنوب تهران، پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله.
- [5] جعفری، محمد کاظم (۱۳۸۱). ریز پهنه بندی لرزه ای شمال تهران از دیدگاه شرایط ساختگاهی، پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله.
- [6] Zafarani, H., Noorzad, A., Ansari, A., and Bargi, K. (2008). Stochastic modeling of Iranian earthquakes and estimation of ground motion for future earthquakes in Greater Tehran. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 29 (2009) 722-741
- [7] 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*, Volume 24, pages 139-171
- [8] جعفری، محمد کاظم؛ رزمخواه، آرش؛ کشاورز بخشایش، محمد، (۱۳۸۲). پهنه بندی سرعت موج برشی آبرفتی گستره تهران. نشریه دانشکده فنی، جلد ۳۷، شماره ۲، شهریور ماه ۱۳۸۲، از صفحه ۲۱۳ تا ۲۲۵
- [9] غیومیان، جعفر؛ خامه چیان، ما شا الله؛ موحدی، احمد علی (۱۳۸۲). ارائه روابط تخمین سرعت موج برشی نهشته های کواترن در محدوده مرکزی تهران. مجموعه مقالات هفتمین همایش انجمن زمین شناسی ایران، دانشگاه اصفهان، ۱۳۸۲
- [۱۰] مجموعه استانداردها و آیین نامه های ساختمانی ایران؛ (۱۳۹۳)؛ " آیین نامه طراحی ساختمان ها در برابر زلزله (استاندارد ۲۸۰۰)؛" ویرایش چهارم، نشر مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی
- [11] Shoja-Taheri, J., Naserieh, S., and Hadi, G. (2008). A test of the applicability of NGA models to the strong ground-motion data in the Iranian plateau. *Journal of Earthquake Engineering* 14, 278-292.
- [12] Boore, D. M., and Atkinson, G. M. (2008). Ground-motion prediction equations for the average horizontal 99 component of PGA, PGV, and 5%-damped PSA at spectral periods between 0.01 s and 10.0 s, *Earthquake Spectra* 24, 99-138.
- [13] Saffari, H., Kuwata, Y., Takada, S., and Mahdavian, A. (2012). Updated PGA, PGV, and Spectral Acceleration Attenuation Relations for Iran. *Earthquake Spectra*, Volume 28, pages 257-276