



پهنه بندی سطوح عملکرد ساختمان‌های میان مرتبه با در نظر گرفتن اثرات زلزله‌های میدان نزدیک در گستره شهر تهران

علیرضا کاظمی^{۱*}، سهیل مجید زمانی^۲

۱- کارشناس ارشد، مهندسی عمران-زلزله، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران

۲- استادیار، مهندسی عمران، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران

* تهران، صندوق پستی ۱۶۸۷۶۳۸۴۶۶، alirkaz@gmail.com

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۰/۰۹، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۱۲/۰۶)

چکیده

دو زلزله بم و طبرس از جمله زلزله‌های ویرانگری بوده‌اند که ماهیت اثر جهت‌پذیری پیشرونده (Forward directivity effect) که یکی از اثرات زلزله‌های میدان نزدیک است، در آنها کاملاً مشهود می‌باشد. شهر تهران با قرار گرفتن در منطقه‌ای با گسل‌های فراوان پتانسیل مواجهه با این پدیده را در صورت فعال شدن هر یک از گسل‌های پیرامون این شهر دارا می‌باشد. با توجه به تغییر رویکرد آیین‌نامه‌های ساختمانی از طراحی بر اساس نیرو به سمت طراحی بر اساس عملکرد و همچنین توجه کمتر آیین‌نامه‌های ساختمانی به بحث زلزله‌های میدان نزدیک، در این مقاله سعی شده است با در نظر گرفتن اثرات زلزله‌های میدان نزدیک و همچنین اثرات ساختگاه در مناطق مختلف تهران، به بررسی سطوح عملکرد یک ساختمان قاب خمشی شش طبقه فولادی متداول در شهر تهران که به صورت بهینه و با توجه به ضوابط استاندارد ۲۸۰۰ طراحی شده، پرداخته شود. در انتها میزان آسیب پذیری ساختمان فولادی رایج در تهران ناشی از زلزله در چهار سطح Life safety, Immediate occupancy, Collapse prevention و سطح E که معرف تخریب کلی ساختمان می‌باشد با رویکردی نوین به صورت نقشه‌های پهنه‌بندی با توجه به ضوابط FEMA356 و تحلیل‌های پوش‌آور ارائه شده است.

واژگان کلیدی

زلزله میدان نزدیک، آیین‌نامه ۲۸۰۰، طراحی بر اساس عملکرد، پوش‌آور، FEMA356

Mapping the Seismic Performance of Mid-Rise Steel Frames under Near Field Earthquakes in Tehran Region

A. Kazemi, S. Majid Zamani

Abstract

One of the most damaging effect of near fault earthquakes is Forward directivity effect which can be witnessed in two Iran's most catastrophic earthquakes, destroyed Tabas and Bam cities. The same effect is predictable for Tehran metropolis which is surrounded by numerous faults. Regarding the general trend in seismic design codes to accommodate seismic performance concepts in their design methodologies and the lack of regulations considering near field earthquake effects, this study attempts to envelop these topics. A six story steel frame building is designed according to the Iranian Seismic Cod, 2800, and is subjected to near field ground motions by dynamic analyses. The performance of steel frame is categorized to Immediate Occupancy, Life Safety, Collapse Prevention and Destruction level based on FEMA356 performance parameters. Distribution of underlying soil conditions in Tehran and location of seismic faults had great influence on seismic performance of the typical building considered.

Keywords

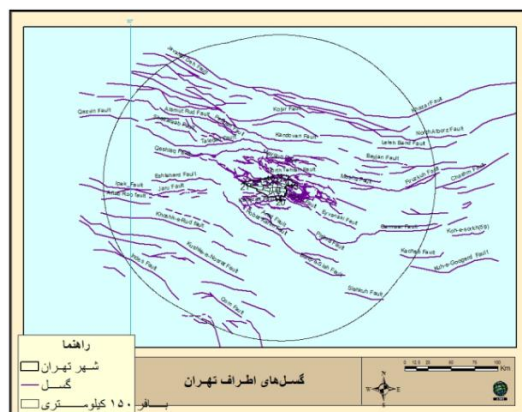
Near fault earthquake, 2800 seismic code, Performance based design



از جمله مسائل مهمی که همواره جامعه مهندسی را به خود مشغول کرده است بدست آوردن یک دیدگاه و برآورد کلی از شدت وقوع بلايا و میزان آسیب‌پذیری سازه‌ها در یک منطقه است.

عوامل مختلفی در میزان آسیب‌پذیری لرزه‌ای یک سازه در یک منطقه نقش دارند از جمله مهمترین این عوامل می‌توان به موقعیت و فعالیت چشمه‌های لرزه‌زا، نوع شتاب‌نگاشت‌های منطقه، ویژگی‌های خاک و ویژگی‌های سازه‌های مستقر در سایت مورد نظر اشاره کرد.

در چند دهه گذشته کشور ایران شاهد چندین زلزله ویرانگر با اثرات میدان نزدیک^۱ بوده است (بم و طبس و...). شهر تهران با قرار گرفتن در منطقه‌ای با گسل‌های فراوان پتانسیل مواجهه با این پدیده را در صورت فعال شدن هر یک از این گسل‌ها دارا می‌باشد. بنابراین لازم است وضعیت سازه‌های شهر تهران در صورت مواجهه با این پدیده به دقت مورد ارزیابی قرار گیرد. در شکل (۱) پراکندگی گسل‌ها در شعاع ۱۵۰ کیلومتری تهران مشاهده می‌شود.



شکل ۱- گسل‌های موجود در شعاع ۱۵۰ کیلومتری تهران

برای رسیدن به یک دیدگاه دقیق‌تر نسبت به میزان آسیب‌پذیری سازه‌های در معرض این نوع زلزله نیاز به رعایت روندی می‌باشد که در روش طراحی بر اساس عملکرد مطرح شده است. از این رو سعی شده است با بدست آوردن طیف‌های پاسخ لرزه‌ای در مناطق مختلف تهران و انجام تحلیل‌های پوش آور به بررسی سطوح عملکرد ساختمان‌های شهر تهران در مناطق مختلف و بر اساس ضوابط FEMA356 پرداخته شود.

۲- پیشینه مطالعات بر روی زلزله‌های میدان نزدیک

تجربه زلزله‌های گذشته به خصوص زلزله‌های اخیر نشان می‌دهد که جنبش زمین در نزدیک گسل دارای خصوصیات ویژه‌ای می‌باشد که با حرکات زمین در مناطق دور از گسل متفاوت است. در مناطق نزدیک گسل، حرکات زمین شدیداً تحت تاثیر مکانیزم شکست، جهت گسترش گسلش نسبت به ساختگاه و تغییر مکان ماندگار زمین قرار دارد. این عوامل در مجموع سبب ایجاد دو پدیده جهت‌پذیری و تغییر مکان ماندگار (گام جهشی تغییر مکان) شده که برای تخمین حرکت زمین در نزدیکی گسل‌های فعال مورد استفاده قرار می‌گیرد.

انتشار شکست گسل به سمت یک سایت با سرعتی نزدیک به سرعت انتشار امواج برشی سبب می‌شود که بیشتر انرژی لرزه‌ای شکست گسل به صورت یک پالس بزرگ حرکتی که در ابتدای رکورد رخ می‌دهد به سایت وارد شود (Somerville) (۱۹۹۷) [۱].

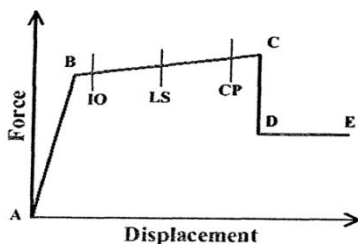
اثر جهت‌پذیری شکست رو به جلو زمانی روی می‌دهد که دو شرط موجود باشد [۱]:

- ۱- جبهه گسلش به سمت سایت مورد نظر باشد.
- ۲- جهت شیب گسل با سایت مورد نظر در یک ردیف باشد.

در این صورت به دلیل نزدیک بودن سرعت گسیختگی گسل به سرعت امواج برشی زلزله (سرعت گسیختگی کمی کمتر از سرعت امواج برشی)، هنگامی که جبهه گسیختگی از کانون به سمت ساختگاه انتشار می‌یابد امواج آزاد شده در اثر لغزش‌های متوالی نواحی مختلف گسل در نزدیکی جبهه گسلش (قسمت جلوی مسیر گسیختگی در گسل) جمع می‌شوند. در نتیجه در پدیده جهت‌پذیری پیش‌رونده جبهه موج دفعتاً و به صورت یک شوک قوی به ساختگاه می‌رسد، که این شوک به صورت یک پالس قوی حرکت در جهت عمود بر لغزش و در ابتدای نگاشت زلزله قابل تشخیص است. بنابراین شرایط جهت‌پذیری پیش‌رونده از روی مدت دوام کم و پالس‌هایی با دامنه بزرگ و پریودهای متوسط تا بلند قابل شناسایی است.

اگر ساختگاه در موقعیتی باشد که گسترش گسیختگی موجب دور شدن جبهه گسلش از ساختگاه شود، امواج زلزله به آرامی و به صورت توزیع شده در طول زمان به ساختگاه می‌رسند به این شرایط اصطلاحاً جهت‌پذیری پس‌رونده گفته می‌شود که مشخصه آن نگاشت‌هایی با دامنه کم و مدت دوام طولانی می‌باشد.

در شکل (۳) موقعیت شماتیک این ترازهای عملکرد بر روی منحنی نیرو-تغییر مکان نشان داده شده است.



شکل ۳- موقعیت شماتیک ترازهای عملکرد بر روی منحنی بار-تغییر شکل [۳]

۴- تراز عملکرد اسکان فوری (IO)

در این تراز عملکرد، آسیب‌های وارده در زمان وقوع زلزله بسیار جزئی است، بطوریکه سیستم‌های باربر قائم و جانبی تمام خصوصیات قبل از زلزله خود را حفظ می‌کنند. از این رو احتمال صدمات جانی ناشی از آسیب‌های سازه‌ای و غیرسازه‌ای ناچیز می‌باشد. در این تراز بلافاصله بعد از وقوع زلزله، سازه قابل اسکان و بهره‌برداری است و در صورت نیاز به تعمیرات، بدلیل جزئی بودن آسیب‌ها، هیچ اختلالی در بهره‌برداری از سازه ایجاد نمی‌شود.

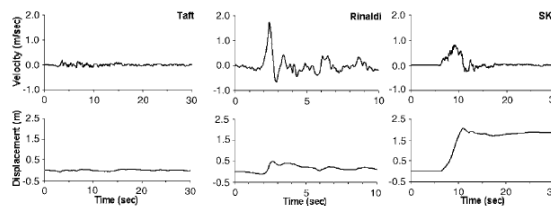
۵- تراز عملکرد ایمنی جانی (LS)

در این تراز عملکرد، آسیب‌های قابل توجهی به سازه وارد می‌شود. با وجود این، علاوه بر این که هنوز یک حاشیه ایمنی تا ناپایداری سازه باقی مانده است، اعضای سازه‌ای و غیر سازه‌ای فرو نمی‌ریزند. لذا هیچ صدمه جانی چه در داخل و چه در خارج ساختمان رخ نمی‌دهد. البته برای اسکان و بهره‌برداری مجدد از ساختمان نیاز به تعمیرات اساسی خواهد بود که انجام این تعمیرات می‌تواند اختلالاتی را در بهره‌برداری ساختمان ایجاد نماید.

۶- تراز عملکرد آستانه فروریزش (CP)

در این تراز عملکرد، آسیب‌های سازه‌ای به حدی است که دیگر سازه فاصله چندانی با فروریزی کامل ندارد، ولی با این حال هنوز پایداری قائم خود را حفظ کرده است. همچنین احتمال صدمات جانی ناشی از سقوط اعضای سازه‌ای و غیرسازه‌ای در داخل و خارج ساختمان و نیز خرابی ناشی از تکان‌های بعدی وجود دارد. در این تراز عملکرد، تعمیرات اساسی قبل از بهره‌برداری مجدد اجتناب ناپذیر است [۳].

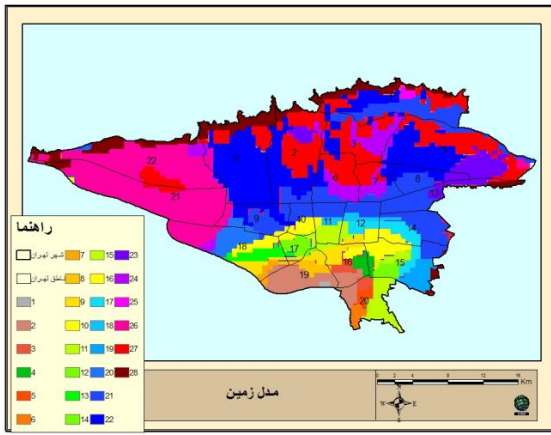
در شکل (۲) اثرات جهت‌پذیری و پدیده Fling Step در سه زلزله میدان دور و میدان نزدیک مقایسه شده است.



شکل ۲- مولفه سرعت و جابجایی سه رکورد مختلف زلزله، چپ: میدان دور، وسط: میدان نزدیک دارای جهت‌پذیری پیشرونده، راست: میدان نزدیک و دارای اثر Fling Step [۲]

۳- مروری بر طراحی بر اساس عملکرد و آیین‌نامه‌های مربوطه

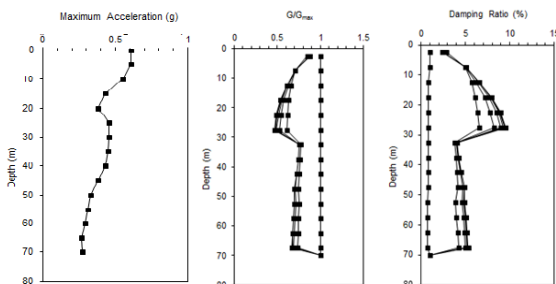
در زمینه طراحی بر اساس عملکرد تحقیقات بسیاری صورت گرفته است، از جمله موسساتی که در هدایت این تحقیقات نقش عمده‌ای داشته‌اند می‌توان به انجمن تکنولوژی کاربردی^۱، جامعه مهندسان عمران آمریکا^۲ و انجمن ایمنی لرزه‌ای ساختمان‌ها^۳ اشاره کرد که در اولین گام در سال ۱۹۹۶ مطالعات خود را در قالب نشریه‌ی FEMA273 و ATC40 ارائه کردند. به مرور زمان بحث طراحی سازه‌ها بر اساس عملکرد تکامل بیشتری پیدا کرد، به گونه‌ای که گزارش‌های FEMA^۴ به عنوان معیارهای ارزیابی عملکرد ساختمان‌ها به طور رسمی به عنوان پیش استاندارد معرفی شدند. در ایران در زمینه‌ی بهسازی لرزه‌ای سازه‌ها در خرداد ۱۳۸۱ دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌های موجود توسط دفتر امور فنی و تدوین معیارهای سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور در اختیار مهندسان قرار گرفت و در سال ۱۳۸۵ ویرایش دوم آن با عنوان نشریه شماره ۳۶۰ ابلاغ گردید. با بررسی این دستورالعمل مشخص می‌شود که چارچوب این دستورالعمل نیز گزارش‌های FEMA بخصوص FEMA273، FEMA274، FEMA356 و FEMA357 می‌باشد. در این پژوهش نشریه FEMA356 ملاک عمل می‌باشد. جهت تعریف تراز عملکرد برای سازه‌ای معین، ابتدا باید میزان آسیب‌های قابل قبول سازه‌ای و غیرسازه‌ای ناشی از تراز زلزله مورد نظر مشخص گردد. بر اساس دستورالعمل ATC40 و FEMA273، سه تراز عملکرد شامل تراز عملکرد اسکان فوری، تراز عملکرد ایمنی جانی و تراز عملکرد پایداری سازه‌ای یا جلوگیری از فروریزی برای سازه‌ها تعریف می‌شود [۳] و [۴].



شکل ۵- پراکنده‌گی پروفیل‌های خاک در تهران (تهیه شده براساس اطلاعات گمانه‌های گروه جایکا) [۵]

یک زلزله میدان نزدیک در واقع یک در رفتگی برشی است که در نقطه‌ای در یک گسل آغاز و با یک سرعت مشخص که تقریباً برابر سرعت موج برشی می‌باشد توسعه می‌یابد. انتشار شکست گسل به سمت یک سایت با سرعتی نزدیک به سرعت انتشار امواج برشی سبب می‌شود که بیشتر انرژی لرزه‌ای شکست گسل به صورت یک پالس بزرگ حرکتی که در ابتدای رکورد رخ می‌دهد به سایت وارد شود [۱ و ۸].

برای در نظر گرفتن این اثر ۴ رکورد میدان نزدیک بم، طبس، لوماپریتا و کپک مندینو که بر روی خاک سخت ثبت شده و دارای اثرات جهت‌پذیری رو به جلو می‌باشند، انتخاب شده و این رکوردها با توجه به شتاب سنگ بستر مهندسی در مناطق مختلف تهران مقیاس و با استفاده از تحلیل‌های خطی معادل طیف‌های پاسخ لرزه‌ای برای مناطق مختلف تهران به دست آمد. شکل (۶) نمونه‌ای از روند تغییرات پارامترهای خاک در تحلیل‌های خطی معادل را نشان می‌دهد.



شکل ۶- نمونه‌ای از روند تغییرات پارامترهای خاک در تحلیل‌های خطی معادل - راست: نسبت میرایی، وسط: مدول کاهش، چپ: بیشینه شتاب

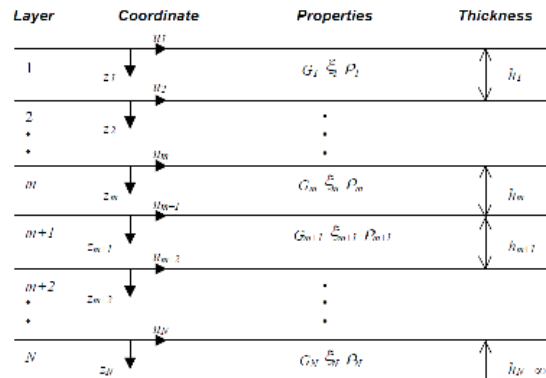
معادله یک بعدی حرکت برای موج برشی با راستای انتشار عمود بر لایه‌ها به صورت زیر می‌باشد [۵].

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial \tau}{\partial z} \quad (1)$$

که در آن ρ جرم مخصوص در هر یک از لایه‌ها می‌باشد. با فرض پیروی خاک در تمام لایه‌ها از مدل کلین-ویگن داریم:

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = G \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \eta \frac{\partial^3 u}{\partial z^2 \partial t} \quad (2)$$

شکل (۴) وضعیت شماتیک لایه‌های خاک در تحلیل خطی معادل را نشان می‌دهد.



شکل ۴- وضعیت لایه‌های خاک در تحلیل خطی معادل

در این تحقیق برای تاثیر اثر خاک از مدل یک بعدی خطی معادل استفاده شد. برای این منظور از اطلاعات گمانه‌های ۴۵۰ پروفیل خاک گستره تهران در پروژه جایکا و همچنین منحنی‌های مدول کاهش و میرایی استوک و منحنی‌های سید و ادریس استفاده شده است [۶ و ۷].

بر اساس عمق سنگ بستر لرزه‌ای و شرایط خاک بالای آن، خاک‌ها در ۲۸ گروه، طبق شکل (۵) طبقه‌بندی می‌شود.

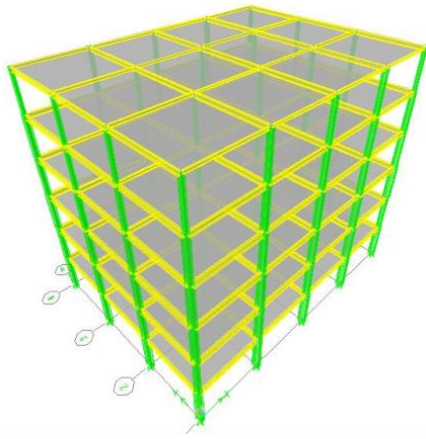
بسیاری از انواع خاک‌ها مانند شن، ماسه، لای و رس در گستره مورد مطالعه پراکنده‌اند و اکثراً به‌طور فوق‌العاده به هم چسبیده‌اند. خصوصیات مهندسی این نوع خاک‌ها به یکدیگر بسیار شبیه‌اند. ساختار زمین شناسی ساده و خواص خاک نسبتاً همگن است.

لایه‌های نزدیک سطح زمین (عمق صفر تا سی متر) از جنس رس نرم، لای و ماسه کم تراکم در دشت آبرفتی پراکنده‌اند.

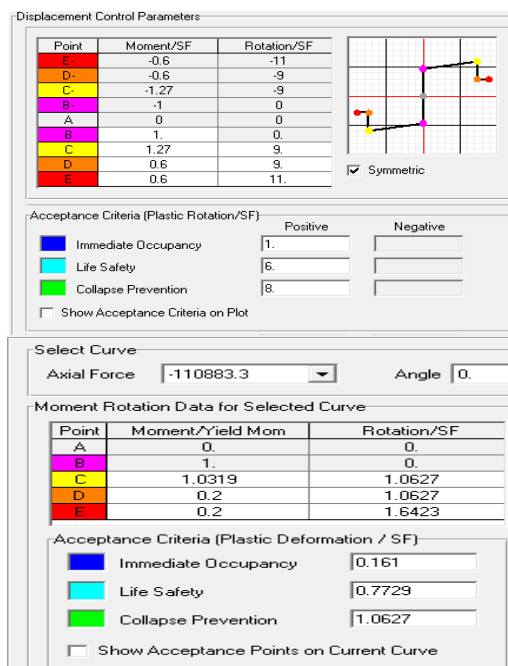
لایه بسیار ضخیمی از رس در دشت خاوری گستره مورد مطالعه انباشته شده است. گمانه‌هایی با عمق ۲۰۰ متر به کف این سازند نرسیده‌اند.

در شکل (۵) تقسیم بندی پروفیل‌های خاک تهران مشاهده می‌شود.





شکل ۸- سازه ۶ طبقه قاب خمشی فولادی، طراحی شده بر اساس ضوابط ۲۸۰۰

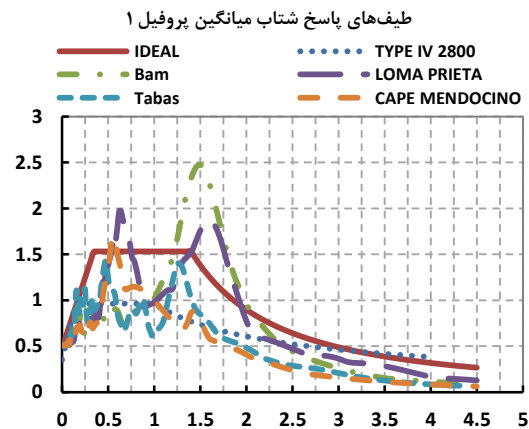


شکل ۹- نمونه‌ای از مشخصات مفاصل پلاستیک (معیارهای پذیرش FEMA356) تعریف شده در سازه-بالا: تیر-پایین: ستون

۷- الگوهای اعمال بار جانبی

برای ارزیابی عملکرد سازه، احتمالاً انتخاب الگوی بار جانبی مناسب، حساس‌تر از تعیین دقیق تغییر مکان هدف می‌باشد. الگوهای جانبی، نشان دهنده نحوه توزیع نیروهای اینرسی در زلزله بر روی سازه می‌باشند. وضعیت توزیع، به شدت تکان‌های زلزله (درجه پاسخ غیر خطی)، مشخصات فرکانسی سازه و حرکت زمین و بعضی موارد بستگی خواهد داشت. در ادامه به چند الگوی معمول اشاره می‌شود.

پس از به دست آوردن طیف‌های پاسخ شتاب در سطح زمین برای پروفیل‌های مختلف و به ازای شتابنگاشت‌های ذکر شده، طیف‌های پاسخ به حداکثر شتاب هر شتاب نگاشت مقیاس شد، سپس یک طیف پاسخ هموار شده برای هر منطقه ارائه شد. این طیف هموار شده دارای یک ناحیه خطی در ابتدا، یک ناحیه شتاب ثابت و یک منحنی در انتها می‌باشد که با پیروی از الگوی آیین نامه ۲۸۰۰ بدست آمده است. در شکل (۷) نمونه‌ای از طیف‌های پاسخ نرمال شده به همراه طیف ایده‌آل شده آن دیده می‌شود.



شکل ۷- طیف‌های رکوردهای مختلف در سطح زمین مربوط به پروفیل ۱ و طیف ایده‌آل شده

در ادامه یک ساختمان شش طبقه فولادی با سیستم قاب خمشی با شکل‌پذیری متوسط مطابق ضوابط ویرایش سوم استاندارد ۲۸۰۰ (R=۷) به صورت بهینه طراحی شده و در مفاصل پلاستیک با توجه به ضوابط FEMA356 طراحی و در سازه مورد نظر قرار داده شده است.

نمایی از سازه مورد بررسی در شکل (۸) مشاهده می‌شود. برای مدل‌سازی مفاصل خمشی طبق آیین‌نامه بهسازی لرزه‌ای و FEMA356، این مفاصل در فواصل ۰/۰۵ و ۰/۹۵ طول تیرها و ستون‌ها قرار گرفت. این مفاصل پلاستیک بر اساس آیین‌نامه FEMA356^۱ ساخته شده‌اند [۲].

در شکل (۹) نمونه‌ای از مشخصات مفاصل پلاستیک تعریف شده برای سازه مشاهده می‌شود.

۸- الگوهای بار ثابت (یکنواخت)

از جمله الگوهای بار پیشنهاد شده در راهنماهای طراحی می‌توان به الگوی بار ثابت یا یکنواخت اشاره نمود. چنانچه یک الگوی بار ثابت استفاده شود، فرضیات بر این اساس است که توزیع نیروهای اینرسی به طرز منطقی در حین زلزله ثابت بوده و حداکثر تغییر شکل‌های به دست آمده از این الگو قابل مقایسه با تغییر شکل‌های مورد انتظار در زلزله طرح می‌باشد. این فرض در صورتی درست است که:

- ۱- سازه فقط دارای یک مکانیزم تسلیم بار باشد بطوریکه امکان تشخیص آن با این الگو وجود داشته باشد.
- ۲- پاسخ سازه به نحو قابل توجهی تحت تأثیر مدهای بالاتر نباشد.

۹- الگوی بار استاتیکی خطی

در این الگو نیرو در هر تراز بر اساس قسمتی از برش پایه کل و با استفاده از ضریب C_V به دست می‌آید. برای استفاده از این الگو باید مشارکت بیش از ۷۵ درصد جرم نهایی در مورد اول سازه باشد. با توجه به ساختمان‌های متعارف، این الگوی بسیار ساده زیر بدست می‌آیند.

$$F = C_V V \quad (۳)$$

$$C_{VX} = \frac{W_x h_x^k}{\sum_{i=1}^n W_i h_i^k} g \quad \begin{matrix} T < 0.5 \text{ sec} & i = 1 \\ T > 0.5 \text{ sec} & i = 2 \end{matrix} \quad (۴)$$

در این الگو که در آن نیروی تراز متناسب جرم آن تراز می‌باشد، به نیاز در سطوح پایین تر در مقایسه با سطوح بالاتر و نیز اهمیت نسبی نیروهای برش تراز در برابر لنگر واژگونی بیشتری توجه می‌شود. این الگو هنگامی که یک مکانیزم موضعی شکل بگیرد و خصوصیات دینامیکی سازه بر اساس آن تغییر کند برای توزیع مجدد نیروهای اینرسی مناسب نیست. همچنین الگوی بار یکنواخت برای سازه‌های با پیوند بلند که مدهای بالاتر تأثیر قابل توجهی در رفتار سازه دارند نیز مناسب نمی‌باشد.

برای بقیه مقادیر پیوند سازه می‌توان از درون‌یابی مقادیر i داده شده استفاده کرد. این رابطه در واقع معادل رابطه توزیع قائم برش پایه در آیین‌نامه‌های UBC و ۲۸۰۰ می‌باشد.

۱۰- الگوی بار حاصل از ترکیب مودی

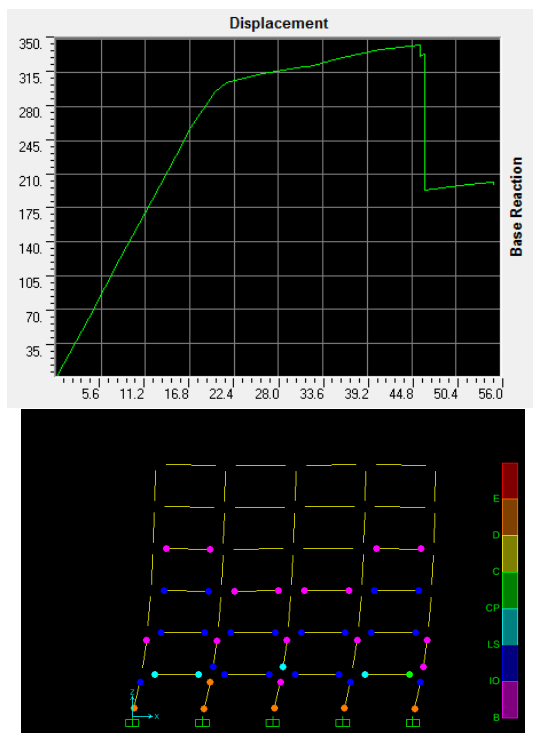
در این الگو می‌توان از ترکیب مودی بر اساس شکل‌های مودی

به دست آمده از سختی‌های سکانتی در هر گام بارگذاری به توزیع بار جانبی مورد نظر رسید. برش در این روش توسط طیف مناسب حرکت زمین و یا تحلیل طیف پاسخ ساختمان شامل مقداری از مودها که حداقل ۹۵ درصد جرم نهایی را در برگیرند، تعیین می‌شود [۱۰ و ۱۱].

با توجه به آیین‌نامه FEMA356 و دستورالعمل بهسازی سازه مورد نظر تحت سه الگوی بار UNIFORM, MODE1 و الگوی بار استخراج شده از معادله (۳-۱۲) FEMA356^y پوش داده شده و منحنی‌های پوش‌آور برای الگوهای بار جانبی مختلف بدست آمد.

شکل‌های (۱۰) و (۱۱) نمونه‌هایی از نمودارهای پوش‌آور و روند تشکیل مفاصل پلاستیک در سازه را نشان می‌دهد.

همچنین در جدول (۱) وضعیت عملکردی مفاصل سازه در مراحل مختلف تحلیل به صورت نمونه برای بارگذاری ارائه شده در FEMA آورده شده است، همانگونه که مشاهده می‌شود با افزایش بار جانبی به تعداد مفاصلی که وارد محدوده غیر خطی می‌شوند افزوده شده و این روند تا بعد از رسیدن سازه به نقطه عملکرد خود ادامه می‌یابد.



شکل ۱۰- نمونه‌ای نمودارهای پوش‌آور و تشکیل مفاصل پلاستیک در سازه تحت الگوی بار UNIFORM

برای محاسبه‌ی تغییر مکان هدف عیناً در دستور العمل بهسازی آورده شده است [۲].

در این روش ابتدا باید یک تحلیل استاتیکی غیر خطی انجام شود و منحنی برش پایه در مقابل جابجایی جانبی نقطه کنترل^۹ بدست آورده شود. از روی منحنی پوش آور و یک سری ضرایب دیگر می‌توان تغییر مکان هدف را بدست آورد.

بر اساس FEMA356 تغییر مکان هدف برابر است با:

$$\delta_t = C_0 C_1 C_2 C_3 S_a \frac{T_e^2}{4\pi^2} g \quad (5)$$

در این رابطه T_e زمان تناوب اصلی موثر ساختمان در جهت مورد بررسی می‌باشد.

$$T_e = T_i \sqrt{\frac{K_i}{K_e}} \quad (6)$$

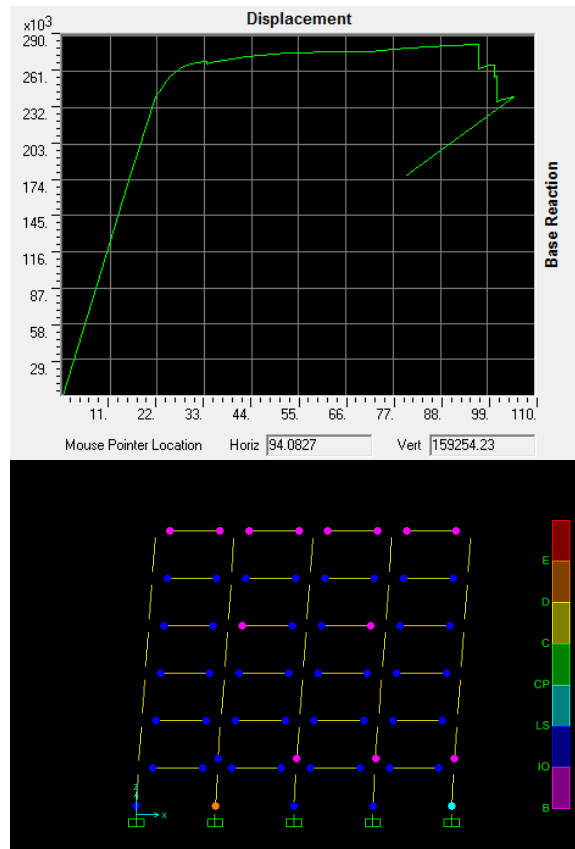
در این رابطه K_i برابر است با سختی جانبی الاستیک ساختمان در جهت مورد بررسی، T_i برابر است با دوره تناوب اصلی ساختمان با فرض رفتار خط و C_0 ضریب اصلاح برای ارتباط تغییر مکان طیفی سیستم یک درجه آزادی به تغییر مکان بام سیستم چند درجه آزادی است.

سایر ضرایب نیز با توجه به ویژگی‌های سازه مورد نظر از جداول موجود در FEMA به دست آمده است.

۱۲- روش ATC40 برای برآورد نقطه عملکرد

روش بدست آوردن نقطه عملکرد در ATC-40 بر اساس روش طیف ظرفیت CSM^{۱۰} است. در این آیین‌نامه محل تقاطع منحنی طیف ظرفیت و طیف تقاضا در مختصات جابجایی طیفی شتاب طیفی نقطه‌ی عملکرد^{۱۱} نامیده می‌شود. در مختصات جابجایی طیفی شتاب طیفی، جابجایی طیفی نقطه عملکرد سازه جابجایی تقاضا نامیده می‌شود.

با استفاده از این جابجایی، مقدار تغییر مکان نقطه‌ی کنترلی بدست می‌آید و سطح عملکردی ساختمان مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در این روش ابتدا با استفاده از یک تحلیل استاتیکی غیر خطی منحنی ظرفیت سازه (پوش آور) بدست آورده می‌شود. سپس منحنی پوش آور و منحنی طیف الاستیک سازه با میرایی ۰.۵٪ با استفاده از یک سری روابط به منحنی‌هایی براساس مختصات جابجایی طیفی (S_d) و شتاب طیفی (S_a) تبدیل می‌شوند. به این دستگاه مختصات سیستم ADRS^{۱۲} می‌گویند.



شکل ۱۱- نمونه‌ای نمودارهای پوش آور و تشکیل مفاصل پلاستیک در سازه تحت الگوی بار Eq 3-12 آیین‌نامه FEMA356

از روی این منحنی‌ها نقطه عملکرد و جابجایی هدف برای سازه مورد نظر در مناطق مختلف تهران با استفاده از دو آیین‌نامه FEMA356 و ATC40 بدست آورده شده است. با توجه به وضعیت مفاصل سازه در جابجایی هدف هر منطقه، سطح عملکرد سازه مورد نظر در هر منطقه بدست آمده است. وضعیت سازه در محدوده نقطه عملکرد بدست آمده برای مناطق مختلف شهر (متناسب با طیف پاسخ بدست آمده برای هر منطقه) سطح عملکرد سازه مورد نظر در آن منطقه را نمایان می‌نماید.

۱۱- روش FEMA356 برای برآورد تغییر مکان هدف

یکی از روش‌های بدست آوردن تغییر مکان هدف روش توضیح داده شده در FEMA356 است. این روش به اسم روش ضریب جابجایی^۸ معروف است. قابل ذکر است که این روش

جدول ۱- وضعیت عملکردی مفاصل سازه در مراحل مختلف تحلیل به ازای الگوی بار EQ(3-12)PATTERN-X

TABLE: Pushover Curve - EQ(3-12)PATTERN-X											
Step	Displacement	BaseForce	AtoB	BtoO	IOtoLS	LStoCP	CPtoC	CtoD	DtoE	BeyondE	Total
	cm	Tonf									
0	0	0	612	0	0	0	0	0	0	0	612
1	8	89.9	612	0	0	0	0	0	0	0	612
2	16	179.7	612	0	0	0	0	0	0	0	612
3	20	225.2	610	2	0	0	0	0	0	0	612
4	22.1	244.4	558	54	0	0	0	0	0	0	612
5	26.2	262.3	512	100	0	0	0	0	0	0	612
6	28.8	267	484	126	2	0	0	0	0	0	612
7	33	270.3	444	120	48	0	0	0	0	0	612
8	35.2	271.3	428	120	64	0	0	0	0	0	612
9	35.6	271.3	424	120	68	0	0	0	0	0	612
10	44	272.3	402	94	116	0	0	0	0	0	612
11	48	272.6	390	84	138	0	0	0	0	0	612
12	49.9	272.6	386	82	142	2	0	0	0	0	612
13	54.3	272.6	380	68	162	2	0	0	0	0	612
14	61.1	272.5	376	52	179	5	0	0	0	0	612
15	61.7	272.5	376	50	180	4	0	0	2	0	612
16	61.7	271.9	376	50	180	4	0	0	2	0	612
17	62	272.2	376	50	180	4	0	0	2	0	612
18	62.4	272.4	376	50	180	4	0	0	2	0	612
19	71.5	274.6	372	30	204	4	0	0	2	0	612
20	81.3	276.3	366	32	188	24	0	0	2	0	612
21	89.3	277.4	366	32	158	54	0	0	2	0	612
22	91.5	277.7	366	30	154	60	0	0	2	0	612
23	97.2	278.1	364	32	130	76	6	0	4	0	612
24	72	180.9	364	32	127	68	7	0	14	0	612

در شکل (۱۲) نمونه‌هایی از استخراج جابجایی تقاضای سازه مورد نظر به ازای الگوهای بار جانبی مختلف به روش ATC40 نشان داده شده است.

در جدول (۲) چند نمونه از سطح عملکرد و جابجایی هدف برای سازه مورد بررسی به ازای طیف پاسخ استخراج شده در مناطق مختلف تهران مشاهده می‌شود، این نقاط عملکرد به ازای طیف پاسخ برای زلزله با دوره بازگشت ۴۷۵ سال (۱۰ درصد احتمال وقوع در ۵۰ سال عمر مفید سازه) که معادل زلزله طرح طبق تعریف نشریه ۳۶۰ می‌باشد، بدست آمده است. برای مقایسه بهتر وضعیت عملکردی سازه در مناطق مختلف تهران سطوح عملکرد در رویکردی نوین به صورت نقشه‌های پهنه‌بندی رقومی^{۱۴} به ازای الگوهای بار جانبی مختلف در شکل (۱۳) ارائه گردیده است.

رابطه‌ی بین S_d و S_a برای انتقال طیف ظرفیت (پوش‌آور) از سیستم S_a-T به سیستم ADRS به صورت زیر است.

$$Sd_i = \frac{T_i^2}{4\pi^2} Sa_i g \quad (7)$$

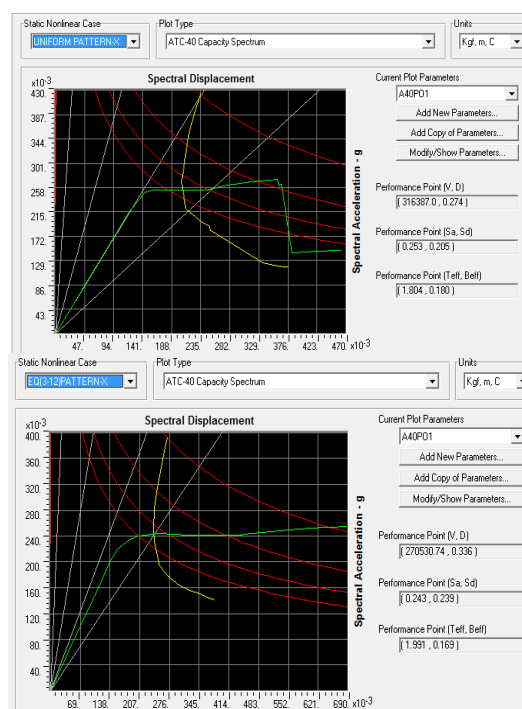
پس از رسم هر دو منحنی در یک دستگاه مختصات یک جابجایی طیفی برای سازه فرض می‌شود و بر اساس این جابجایی طیفی میرایی سازه محاسبه می‌شود. با توجه به میرایی موثر محاسبه شده ضریب کاهش طیفی به دست می‌آید. با استفاده از ضریب کاهش طیفی، طیف تقاضا در فرمت ADRS کاهش داده می‌شود تا منحنی طیف ظرفیت سازه را قطع کند. اگر درصد اختلاف جابجایی طیفی نقطه تقاطع بدست آمده با جابجایی طیفی فرض شده در حد مجاز (۰/۰۵) باشد این جابجایی طیفی همان جابجایی تقاضای سازه است.



جدول ۲- نمونه‌هایی از سطوح عملکرد و جابجایی‌های هدف برای سازه مورد بررسی به ازای طیف پاسخ استخراج شده برای هر منطقه

شماره پروفسل	الگوی بار جانبی	نقطه عملکرد بر اساس ATC40 "دوره بازگشت ۴۷۵ سال"	جابجایی هدف بر اساس FEMA356 "دوره بازگشت ۴۷۵ سال"	وضعیت عملکردی
2800 II	EQF356-X	33.6	37.6	LS
9	UNI PT-X	41.1	54.9	E
10	UNIFORM PT-X	44.1	58.5	E
11	UNI PT-X	29.7	37.7	E
12	UNI PT-X	37.6	50.6	E
13	UNI PT-X	21.9	24.8	LS
9	EQF356-Y	38.9	51.2	E
10	EQF356-Y	41.5	54.9	E
11	EQF356-Y	27	32.5	E
12	EQF356-Y	36	47	E
13	EQ(3-12)F356-Y	19.1	21.8	CP
9	MODE 1	47.9	65.4	IO
10	MODE 1	51.2	70	LS
11	MODE 1	36.1	45.3	LS
12	MODE 1	44.2	60.1	LS
13	MODE 1	25.4	27.9	IO

با بررسی الگوهای مختلف بار جانبی مشاهده می‌شود که سازه تحت الگوی بار جانبی یکنواخت دارای کمترین مقدار جابجایی هدف می‌باشد، در این الگوی بار مفاصل سازه سریع‌تر وارد وضعیت غیر خطی می‌شوند و نسبت به دو حالت دیگر

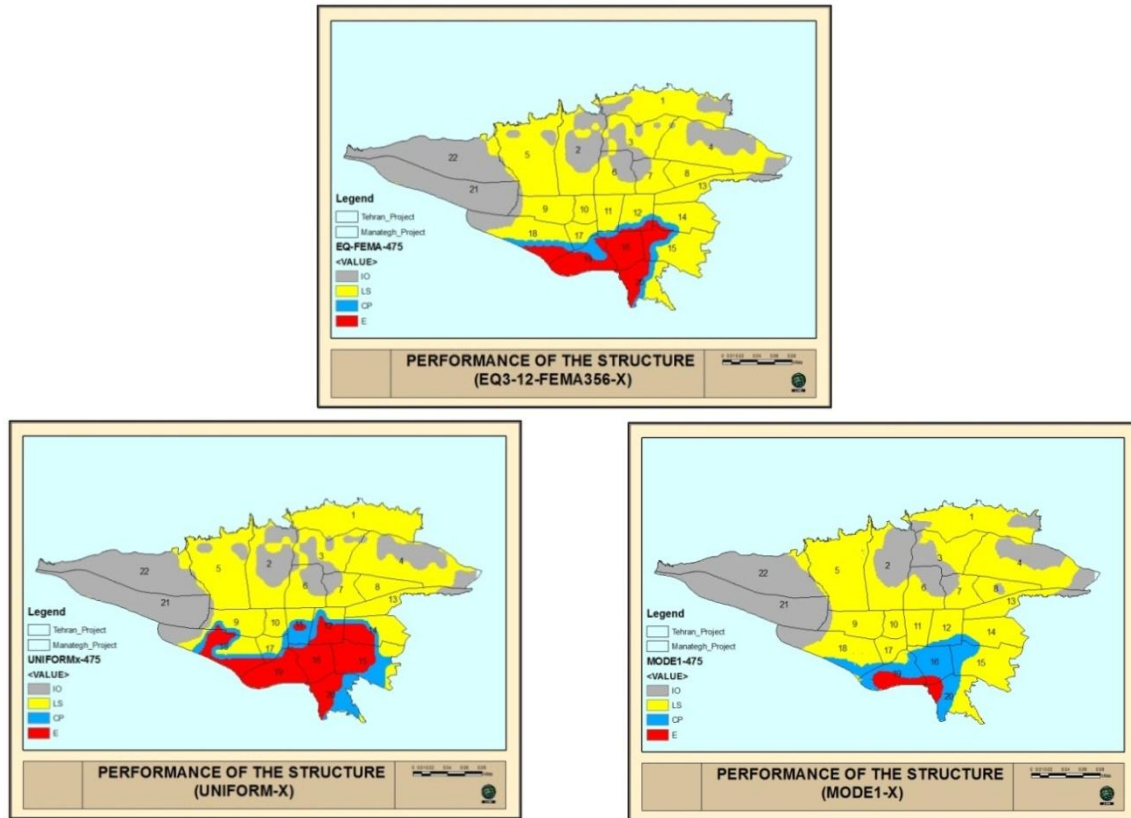


شکل ۱۲- نمونه‌هایی از استخراج جابجایی تقاضای سازه مورد نظر به روش ATC40 -بالا: منطقه یک، بار جانبی یکنواخت - پایین: منطقه یک، بار جانبی شبه مثلثی^{۱۳}

۱۳- نتیجه گیری

نتایج بدست آمده مختص یک سازه قاب خمشی فولادی با شکل‌پذیری متوسط می‌باشد که بر اساس ضوابط ویرایش سوم آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله (استاندارد ۲۸۰۰) به صورت بهینه طراحی شده است، اساس طراحی این آیین‌نامه زلزله‌های میدان دور بوده است که بر اساس فرضیه‌های مطرح شده، سازه‌های طراحی شده یا این استاندارد می‌بایست قادر به تامین سطح عملکرد ایمنی جانی در زلزله طرح منطقه باشند. با توجه به سطوح عملکرد متناسب با طیف‌های میدان نزدیک بدست آمده برای مناطق مختلف تهران (نقشه‌های رقومی ارائه شده در شکل (۱۳)) مشاهده می‌شود سطوح عملکرد در مناطق ۱۶، ۱۹ و ۲۰ تهران در بحرانی‌ترین وضعیت قرار داشته و در این مناطق در دو نوع الگوی بار جانبی یک نواخت و الگوی بار متناسب با معادله FEMA از سطح آستانه فروریزش فراتر می‌رود، بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که با توجه به نقاط عملکرد بدست آمده برای سازه مورد نظر در مناطق مختلف تهران، در بسیار از مناطق جنوبی تهران سازه‌های طراحی شده بر اساس طیف ۲۸۰۰ پاسخگوی نیاز زلزله‌های میدان نزدیک محتمل تهران نمی‌باشند.





شکل ۱۳- نمونه‌هایی از سطوح عملکرد استخراج شده برای مناطق مختلف تهران با توجه به ضوابط FEMA356 و زلزله‌های میدان نزدیک

۸- مراجع

[۶] آژانس همکاری‌های بین‌المللی ژاپن (جایکا)، (۱۳۷۹)، گزارش پروژه ریزپهنه‌بندی لرزه‌ای تهران بزرگ.

[7] Seed, H.B., Wong, R.T., Idriss, I.M. and Tokimatsu, K. (1986), "Moduli and Damping factors for Dynamic Analyses of Cohesionless Soils", Journal of the Geotechnical Engineering Division, Vol. 112, No. 11, pp. 1016-1032.

[8] Liel, A., (2012), The Effect of Near-Fault Directivity on Building Seismic Collapse Risk, Final Report to U.S. Geological Survey.

[9] Chopra, A.K. and Goel, R.K. (2002), "A Modal Pushover Analysis Procedure for Estimating Seismic Demands for Buildings", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 31, No. 3, pp. 561-582.

[9] Naeim, F., Lobo, R.M. (1998), "Common Pitfalls in Pushover Analysis", Proceedings of the SEAOC Annual Convention, Reno, Nevada.

[10] Elnashai, A.S. (2001), "Advanced Inelastic Static (Pushover) Analysis for Earthquake Applications", Structural Engineering and Mechanics, Vol. 12, No. 1, pp. 51- 69.

[1] Building Seismic Safety Council., (1997), NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings, FEMA-273, Federal Emergency Management Agency, Washington, DC.

[1] Somerville, P.G. (2005), "Engineering characterization of near fault ground motions", NZSEE Conference

[2] Kalkan, E. and Kunnath, S.K. (2006), "Effects of Fling Step and Forward Directivity on Seismic Response of Buildings", Earthquake Spectra, Vol. 22, No. 2, pp. 367-390.

[3] Building Seismic Safety Council., (2000), NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings FEMA-356, Federal Emergency Management Agency, Washington, DC.

[4] Building Seismic Safety Council., (1997), NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings, FEMA-273, Federal Emergency Management Agency, Washington, DC.

[5] Tsai, N.C. and Housner, G.W. (1970), "Calculation of Surface Motions of a Layered Half Space", Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 60, No. 5, pp. 1625-1651.

پی نوشت

⁴ BSSC

⁵ Federal emergency management agency

⁶ FEMA356 (۳-۴) جدول

⁷ $C_{vX} = \frac{w_x h_x^k}{\sum_{i=1}^n w_i h_i^k}$

¹ Forward directivity effect

² ATC

³ ASCE



⁸ Displacement coefficient method

⁹ Pushover curve

¹⁰ Capacity spectrum method

¹¹ Performance point

¹² Acceleration displacement response spectra

¹³
$$C_{vX} = \frac{w_x h_x^k}{\sum_{i=1}^n w_i h_i^k}$$

¹⁴ GIS base