



بررسی پاسخهای قابهای با نامنظمی جرم در ارتفاع باروش تحلیل استاتیکی فزاینده غیرخطی مدی

مجتبی دیرباز، فارغ التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی زلزله / محسن غفوری آشتیانی، استاد / عبدالرضا سر و قدم مقدم، استادیار پژوهشگاه

۱- چکیده

قرار گرفته اند. تغییر در هر کدام از پارامترهای مذکور، باعث تغییر ویژگیهای دینامیکی سیستم گردیده است.

هدف، مشاهده رفتار قابهای با نامنظمی جرم در ارتفاع و مقایسه نتایج MPA با روش دقیق تاریخچه زمانی غیرخطی (NLTH) می باشد. در این تحقیق، پارامتر نسبت تغییر مکان نسبی طبقات که اهمیت خاصی در برآورد میزان آسیب پذیری سازه دارد و برش طبقات مورد بررسی قرار گرفته اند.

نتایج این پژوهش حاکی از آن است که تغییر در نسبتهای جرمی و محل نامنظمی تأثیر کمی در نتایج MPA می گذارد؛ اما متوسط تغییر مکان نسبی طبقه در روش MPA اختلاف زیادی نسبت به روش دقیق تاریخچه زمانی غیرخطی ندارد. مقایسه نمودارهای برش طبقات با نسبت تغییر مکان نسبی نیز میباید آن است که MPA نسبت به محل نامنظمی و نسبت جرمی حساستر و پاسخها به روش دقیق نزدیکتر است.

کلید واژه ها: تحلیل استاتیکی فزاینده غیرخطی مدی، تاریخچه زمانی غیرخطی، نامنظمی جرم در ارتفاع، نسبت تغییر مکان نسبی، برش طبقه

امروزه با ورود دستورالعملها و فلسفه های جدید طراحی که از معیار رفتار برای طراحی سازه ها استفاده می کنند، موضوع برآورد لرزه ای سازه ها از اهمیت بسیاری برخوردار و تحقیقات زیادی در این زمینه در حال انجام می باشد. در این راستا، استفاده از روشهای تحلیل استاتیکی غیرخطی در تخمین عملکرد سازه ها در هنگام زلزله بسیار مورد توجه متخصصین قرار گرفته است. اخیراً برای بهبود هر چه بیشتر روش استاتیکی فزاینده غیرخطی، روش استاتیکی فزاینده غیرخطی مدی (MPA) توسط چوپرا و گوئل ارائه شده است که امکان ملحوظ نمودن تمامی مدهای مؤثر در پاسخ سازه را به کار بر می دهد. رفتار ساختمانهای نامنظم در زلزله های گذشته، نشان می دهد که رفتار مطلوبی نسبت به ساختمانهای منظم نداشته اند. پس به ارزیابی مناسبتر نیاز می باشد و بهتر است که این ارزیابی با روشها و تفسیرهای ساده همراه باشند. در این تحقیق، روش MPA در این سازه ها مطالعه شده است.

در این راستا، سی قاب فولادی که در آنها پارامترهای تعداد طبقات (هشت، دوازده و شانزده)، موقعیت طبقه نامنظم (پایین، وسط و بالا) و نسبت جرمی طبقه نامنظم به طبقات دیگر (۵۰، ۱۵۰ و ۳۰۰ درصد) متغیر بودند، مورد بررسی

روندهای تحلیل استاتیکی غیرخطی (مانند MPA) در کنار روش تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی غیرخطی توسعه یافته و چون روندهای ساده تری را شامل می شوند، جذابیت‌های خود را علی‌رغم پیشرفت و توان روش تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی غیرخطی، حفظ کرده‌اند.

روش تحلیل استاتیکی فزاینده غیرخطی، روش ساده‌ای است که برای برآورد پاسخ ناشی از رفتار غیرخطی سازه‌ها و اجتناب از انجام تحلیل دینامیکی غیرخطی متداول شده است. با توجه به نتایج نسبتاً قابل قبول به دست آمده از این روش تحلیل بویژه برای سازه‌هایی که مد اول تغییر شکل در آنها حاکم است، می‌توان آن را روش مناسبی برای تخمین رفتار سازه دانست.

آنچه که بر کارایی این روش می‌افزاید، امکان ترکیب آن با مفاهیم نیاز لرزه‌ای و به دست آوردن تخمین از رفتار و پاسخ سازه در زلزله دلخواه می‌باشد. در واقع در روش تحلیل استاتیکی فزاینده غیرخطی مدی از این قابلیت استفاده شده است. با توجه به کاربرد روزافزون این روش برای تخمین پاسخ سازه‌ها، محققان بسیاری به منظور شناخت و کاهش نقاط ضعف و بهبود روش فعالیت نموده‌اند. والی و هریس روش اعمال اثرمدهای بالاتر را به صورت عملی برای سازه‌های موجود پیشنهاد کرده‌اند [۵] و کیلار و فایفر استفاده از این روش را برای ساختمانهای نامنظم بسط داده‌اند [۶]. گوپتا و کونات با استفاده از تحلیل استاتیکی فزاینده روشی برای تعیین تغییر مکان سازه بر پایه طیف پیشنهاد داده‌اند [۷] و در دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای ساختمانهای موجود این روش و نحوه استفاده از آن گنجانده شده است [۱].

در این مقاله، ابتدا به اصول تحلیل استاتیکی فزاینده غیرخطی مدی و مدلسازی و محاسبات اشاره شده، سپس نتایج

عملکرد لرزه‌ای یک ساختمان به خسارات سازه‌ای و غیرسازه‌ای در هر زلزله بستگی دارد. به عنوان مثال، در دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای ساختمانهای موجود، عملکرد به محدود کردن خسارت به یک سطح مورد نظر و ایجاد یک سطح عملکردی از پیش تعیین شده برای یک زلزله با خصوصیات معلوم اطلاق می‌گردد [۱]. در این میان استفاده از پارامتر تغییر مکان برای محدود کردن خسارت به یک حد مورد نظر در ساختمان از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. دستورالعملهایی مانند FEMA302 و FEMA303 [۲ و ۳] کنترل تغییر مکان جانبی بام و تغییر مکان بین طبقه‌ای برای محدود کردن خسارت‌های وارد به تیغه‌ها، شیشه‌ها، درها و اجزای غیرسازه‌ای را ضروری می‌دانند.

آیین‌نامه‌های طراحی موجود هنوز از مقاومت به عنوان مهمترین پارامتر استفاده می‌کنند. این آیین‌نامه‌ها محاسبه و کنترل تغییر مکان را به انتهای طراحی واگذار می‌کنند و مقادیر واقعی پاسخ تغییر مکان غیرخطی سازه در مدت زلزله و خسارات سازه‌ای و غیرسازه‌ای محتمل را محاسبه نمی‌نمایند. روندهای تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی غیرخطی در سالهای اخیر با گسترش توان رایانه‌ها بیشتر مطرح گردیده‌اند؛ اما هنوز به دلیل پیچیدگی مدلسازی و کار با نتایج تحلیلها یکی از روشهای آکادمیک محسوب شده و در جامعه مهندسی فراگیر نمی‌باشند. با کاربرد تحلیل‌های دینامیکی تاریخچه زمانی غیرخطی، روشهای استاتیکی غیرخطی مقبولیت خود را از دست نداده و برعکس با کمک گرفتن از مفاهیم تحلیل‌های دینامیکی تاریخچه زمانی غیرخطی روشهای جدیدتری از تحلیل استاتیکی غیرخطی به وجود آمده است که روش Modal Pushover Analysis از جدیدترین روشهای تحلیل

عددی مقایسه و نمودارها بررسی و در نهایت اهم نتایج تحقیق آورده شده است.

۳- تحلیل استاتیکی فزاینده غیر خطی مدی

اصول اولیه روش تحلیل استاتیکی فزاینده غیرخطی مدی (MPA) در سالهای ۲۰۰۱ و ۲۰۰۲ توسط چوپرا و گوئل پیشنهاد گردید [۸ و ۹]. در این روش با استفاده از مفهوم سازه یکدرجه آزاد معادل در هر مد و با اعمال نگاهت زلزله دلخواه، تغییر مکان سازه یکدرجه آزاد معادل به دست می آید که از روی آن تغییر مکان سازه اصلی در مد مورد نظر محاسبه می شود.

۳-۱- مفهوم سازه یکدرجه آزاد معادل

مفهوم حاکم در کلیه روشهای تحلیل استاتیکی غیرخطی، مفهوم سازه یکدرجه آزاد معادل می باشد [۵]. در واقع پس از به دست آوردن منحنی ظرفیت سازه از یک تحلیل Pushover، با تقسیم مقادیر محور افقی منحنی ظرفیت سازه اصلی بر حاصل ضرب مشارکت مدی در مقدار مدسازه در نقطه بام $(\Gamma_n \phi_n)$ و تقسیم محور قائم منحنی ظرفیت سازه اصلی بر جرم مدی مؤثر (M_n^*) منحنی طیف پاسخ تغییر مکان شتاب (Acceleration Displacement Response Spectra) در مد مورد نظر به دست می آید. در روش طیف ظرفیت هدف از این کار، رسم همزمان پارامترهای نیاز و ظرفیت در یک دستگاه مختصات و تعیین نقطه تقاطع آنها به عنوان نقطه عملکرد سازه (Performance Point) می باشد؛ اما در حقیقت منحنی حاصل نشان دهنده رفتار سازه یکدرجه آزاد معادل می باشد.

در این منحنی دو خطی شیب قسمت اول نشان دهنده رفتار خطی سازه یکدرجه آزاد معادل و شیب قسمت دوم، که معمولاً به صورت ضریبی از شیب قسمت اول بیان می شود،

نشان دهنده سخت شدگی پس از تسلیم است. با داشتن این منحنی می توان رفتار غیرخطی سازه یکدرجه آزاد معادل را تعیین کرد. محورهای مختصات منحنی سازه از یک تحلیل استاتیکی فزاینده غیرخطی به دست می آید که پس از تبدیل به ADRS به منحنی رفتار غیرخطی سازه یکدرجه آزاد معادل با جرم واحد تبدیل می شود. برای تعیین مقدار پاسخ این سازه باید معادله حرکت آن را تشکیل داد و سپس آن را حل کرد. با توجه به منحنی های نشان داده شده در شکل (۱)، معادله حرکت سازه یکدرجه آزاد معادل به شکل رابطه (۱) خواهد بود:

$$\ddot{D}_n + 2\zeta\omega_n \dot{D}_n + \frac{F_{sn}(D_n, \dot{D}_n)}{L_n} = -\ddot{u}_g(t) \quad (1)$$

در رابطه (۱)، D_n پاسخ تغییر مکان سازه یکدرجه آزاد معادل و \dot{D}_n و \ddot{D}_n مشتقات اول و دوم D_n ، ζ میرایی در نظر گرفته شده، ω_n فرکانس سازه در مد nام و تاریخچه زمانی شتاب زلزله می باشد. $\frac{F_{sn}}{L_n}$ از تقسیم محور قائم منحنی ظرفیت (برش پایه سازه اصلی) بر جرم مدی مؤثر (M_n^*) به دست می آید و \ddot{u}_g شتاب زمین می باشد.

شکل (۱) مبین آن است که سختی سازه تابعی از مقدار تغییر مکان و جهت آن می باشد. با حل رابطه (۱) به صورت عددی و یا مدلسازی مستقیم سازه یکدرجه آزاد با رفتار غیرخطی مورد نظر، می توان مقدار بیشینه تغییر مکان سازه یکدرجه آزاد معادل (D_n) را به دست آورد. پس از به دست آوردن این مقدار، از رابطه (۲)، تغییر مکان بیشینه انتهای سازه اصلی محاسبه می گردد:

$$U_{r,n} = \Gamma_n \phi_{r,n} D_n \quad (2)$$

در رابطه (۲)، $\phi_{r,n}$ تغییر شکل انتهای سازه در مد مورد نظر و D_n تغییر مکان بیشینه سازه یکدرجه آزاد معادل می باشد. در واقع اگر روش طیف ظرفیت روشی بر پایه تحلیل طیفی تصور شود، می توان روش MPA را روشی بر پایه تحلیل تاریخچه زمانی

کل بار ثقلی و سپس بار جانبی به سازه اعمال شود. انتظار می رود که بر اثر اعمال بار ثقلی به سازه هیچ گونه رفتار غیرخطی در اعضای سازه ای بروز ننماید که نتایج تحلیل، مؤید این مطلب می باشد [۴].

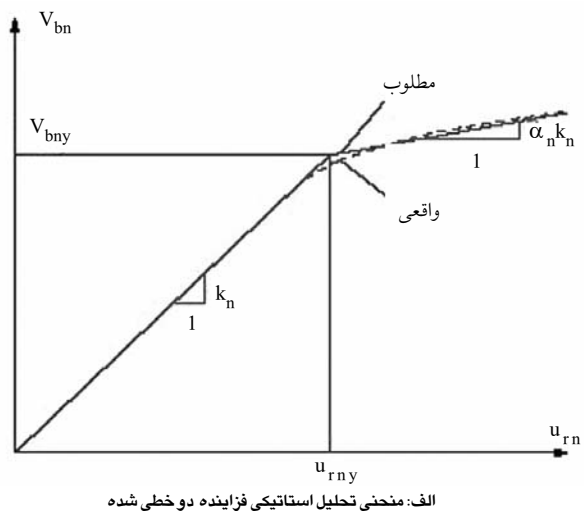
۳-۲-۱- محاسبه منحنی ظرفیت سازه

پس از انجام تحلیل استاتیکی فزاینده، منحنی های ظرفیت سازه برای هر مد به دست می آید. به منظور انجام تحلیل MPA، منحنی ظرفیت به دست آمده را باید به منحنی های دو خطی تبدیل کرد. در این راستا سه اصل اساسی باید مورد توجه قرار گیرد:

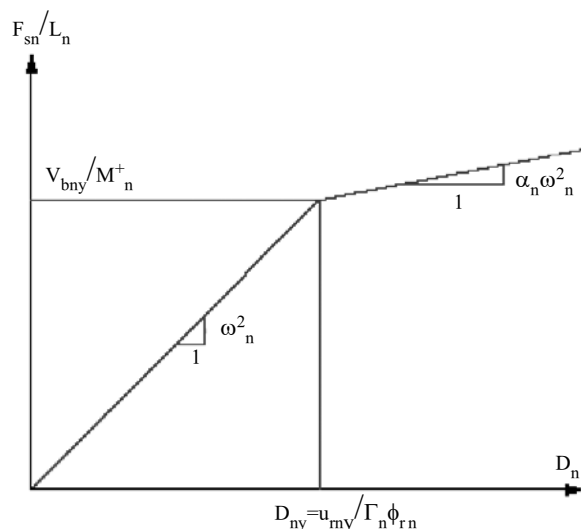
- ۱- شیب قسمت اولیه منحنی دو خطی مساوی شیب ابتدای منحنی اولیه است.
- ۲- سطح زیر منحنی دو خطی با سطح زیر منحنی اولیه مساوی است.
- ۳- نقطه گسیختگی منحنی دو خطی، منطبق بر گسیختگی منحنی اولیه است.

۳-۲-۲- تحلیل استاتیکی فزاینده غیر خطی مدی

با داشتن رفتار غیرخطی یکدرجه آزاد معادل و انجام تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی بر روی آن می توان حداکثر تغییر مکان را برای هر زلزله به دست آورد. برای هر مد جداگانه تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی غیرخطی با استفاده از نگاشت زلزله های مورد نظر صورت می گیرد. نتایج حاصله با استفاده از رابطه (۲) به تغییر مکان انتهایی سازه اصلی در مد مربوطه تبدیل می شوند. یکی از مزایای این روش، همگرا شدن تحلیل برای کلیه سازه ها است [۸]. علاوه بر آن، خطای ناشی از قرائت محل تقاطع طیف پاسخ و طیف ظرفیت که در روش تحلیل ظرفیت امکان بروز آن وجود دارد، در این روش حذف می گردد. با توجه به اینکه انجام تحلیل دینامیکی



الف: منحنی تحلیل استاتیکی فزاینده دو خطی شده



ب: رابطه نیرو-تغییر مکان سازه یکدرجه آزاد معادل

شکل (۱): رابطه نیرو-تغییر مکان سازه اصلی و یکدرجه آزاد معادل

به حساب آورد. در هر دوروش با استفاده از یکی از روشهای ترکیب مدی می توان نتایج را به مدهای دیگر تعمیم داد.

۳-۲-۳- مراحل تحلیل روش MPA

با توجه به اینکه در تحلیل از منحنی ظرفیت سازه استفاده می شود، انجام تحلیل استاتیکی فزاینده برای سازه های مورد نظر لازم است. برای در نظر گرفتن آثار مدهای بالاتر در این سازه ها، الگوی توزیع بار جانبی با توجه به شکل مد مورد نظر انتخاب می گردد. در واقع اعمال بارهای جانبی باید پس از اعمال بارهای ثقلی انجام شود. به عبارت دیگر، در ابتدا باید

- ۱- تعداد دهانه‌ها در تمام قابها ثابت و برابر سه می‌باشد که طول هر دهانه پنج متر است.
 - ۲- ارتفاع کلیه طبقات با هم مساوی و برابر سه متر می‌باشد.
 - ۳- دهانه بارگیر تیرها پنج متر فرض می‌شود.
 - ۴- سقف طبقات از نوع تیرچه بلوک است و صلب فرض می‌شود.
 - ۵- سیستم سازه‌ای از نوع سیستم دوگانه قاب خمشی فولادی معمولی و مهاربند می‌باشد.
 - ۶- برای بارگذاری زلزله از استاندارد ۲۸۰۰ استفاده شده است [۱۰].
 - ۷- کلیه ستونهای قابهای مذکور، قوطی و تیرهای آنها از مقطع IPE می‌باشد. برای بادبندها از ناودانی دوتایی و برای تحلیل و طراحی قابها از نرم افزار SAP2000 استفاده شده است. قابهای مذکور با آیین نامه تنش مجاز AISC-ASD89 طراحی شده‌اند [۴].
- برای نامگذاری مدل‌ها از چپ به راست ابتدا یک عدد به عنوان تعداد طبقات (هشت، دوازده و شانزده)، سپس در قاب منظم حرف R و در قاب نامنظم حرف IR و پس از آن با توجه به موقعیت طبقه نامنظم که در بالا (T=TOP)، در وسط (M=MIDDLE) یا در پایین (B=BOTTOM) باشد، به ترتیب حرف T، M یا B و در انتها نسبت جرمی می‌آید که این نسبت جرمی ۰/۵، ۱/۵ یا ۳ (05، 15 و 30) در انتهای نام می‌آید. برای مثال، 12IRB05 نشان دهنده یک قاب دوازده طبقه نامنظم است که جرم طبقه اول آن نصف جرم بقیه طبقات می‌باشد و 8IRM30 نشان دهنده یک قاب هشت طبقه نامنظم می‌باشد که جرم طبقه چهارم آن سه برابر جرم بقیه طبقات و 16R نشان دهنده یک قاب شانزده طبقه منظم است که جرم همه طبقات یکسان می‌باشد (شکل ۲).

غیرخطی برای سازه یکدرجه آزاد به زمان زیادی نیاز ندارد، برتری زمانی روش تحلیل طیف ظرفیت بر این روش قابل اغماض است. از طرف دیگر، در روش تحلیل طیف ظرفیت در مرحله اول رفتار خطی یا غیرخطی سازه تشخیص داده می‌شود. در صورت خطی بودن رفتار، به انجام سعی و خطا نیاز نیست؛ اما در روش تحلیل استاتیکی فزاینده غیرخطی مدی در هر صورت سازه با رفتار غیرخطی، مدل و تحلیل می‌شود.

۳-۲-۳- تعیین نسبت تغییر مکان نسبی

یکی از مهمترین پارامترهای مؤثر در تعیین آسیب پذیری سازه‌ها، تغییر مکان نسبی طبقات (Drift Ratio) است که در آیین نامه‌های مختلف حدودی به عنوان حدود مجاز آن تعیین گردیده است. برای تعیین تغییر مکان نسبی در روش تحلیل دینامیکی غیرخطی، تاریخچه پاسخ هر طبقه برای هر زلزله به دست می‌آید. با کسر تاریخچه پاسخ این طبقه از تاریخچه پاسخ طبقه بالا، تاریخچه تغییر مکان نسبی (Drift) طبقه بالا تعیین می‌شود. مقدار بیشینه این تاریخچه (به صورت قدر مطلق) به عنوان تغییر مکان نسبی طبقه منظور می‌گردد. با تقسیم این مقدار بر ارتفاع طبقه، نسبت تغییر مکان نسبی تعیین می‌شود.

۴- مدلسازی و محاسبات

با هدف حصول به نتایج عددی قابل بحث و بررسی تعداد سی قاب فولادی با مشخصات مختلف سازه‌ای، هندسی و با متغیر کردن سه پارامتر محل طبقه نامنظم، نسبت جرمی و تعداد طبقات تعریف گردید.

۴-۱- معرفی مدل‌ها

برای انجام مطالعات تحلیلی در این تحقیق در مجموع از سی قاب فولادی هشت، دوازده و شانزده طبقه استفاده شده است که مشخصات سازه‌ها به شرح زیر می‌باشد:

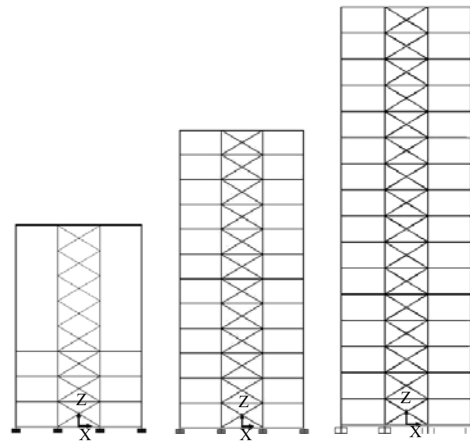
همخوانی مناسب در محدوده‌های زمان تناوب مورد نظر می‌باشد. خصوصیت دیگر اکثر این حرکات آن است که حرکات، حوزه نزدیک و دارای ماهیت ضربه‌ای (Impulsive) می‌باشند. طیف پاسخ هر یک به همراه میانگین پاسخ در شکل (۳) نشان داده شده است [۴].

۴-۳- تعیین نسبت تغییر مکان نسبی

برای تعیین تغییر مکان نسبی در روش تحلیل دینامیکی غیرخطی، تاریخچه پاسخ هر طبقه برای هر زلزله به دست می‌آید. با کسر تاریخچه پاسخ این طبقه از تاریخچه پاسخ طبقه بالا، تاریخچه تغییر مکان نسبی (Drift) طبقه بالا تعیین می‌شود. مقدار بیشینه این تاریخچه (به صورت قدر مطلق) به عنوان تغییر مکان نسبی طبقه منظور می‌گردد. با تقسیم این مقدار بر ارتفاع طبقه، نسبت تغییر مکان نسبی تعیین می‌شود.

۴-۴- انجام تحلیل استاتیکی غیرخطی

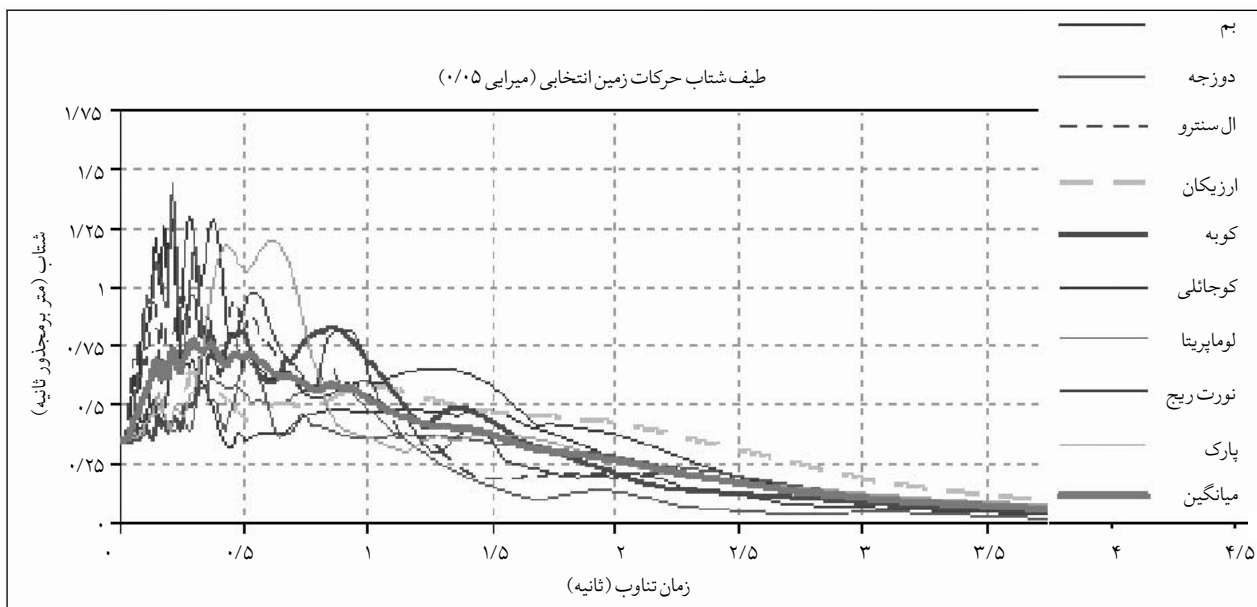
برای انجام تحلیلها از نرم‌افزار SAP2000 که دارای امکانات مناسب برای انجام تحلیلهای استاتیکی غیرخطی، تحلیلهای دینامیکی غیرخطی و امکانات مناسب گرافیکی می‌باشد، استفاده شده است. با توجه به اینکه در تحلیل استاتیکی غیرخطی مدی



شکل (۲): مدل‌های هشت، دوازده و شانزده طبقه منظم و نامنظم

۴-۲- شتابنگاشت‌های مورد استفاده

به منظور انجام تحلیل‌های دینامیکی تاریخچه زمانی غیرخطی و استاتیکی فزاینده غیرخطی مدی از نه شتابنگاشت به عنوان تاریخچه زمانی حرکت شدید زمین استفاده گردید. برای ایجاد همگونی و امکان مقایسه بهتر بین نتایج و استفاده از نتایج میانگین، تمام شتابنگاشت‌ها به $PGA=0.35g$ همپایه شدند. طراحی مدل‌ها بر اساس خاک نوع III انجام شده است (به منظور پوشش محدوده فرکانسی بیشتر). حرکات انتخابی نیز به گونه‌ای بودند که متناسب با این فرض باشند. طیف میانگین با طیف آیین‌نامه برای خاک نوع III مقایسه و نتایج حاکی از



شکل (۳): طیف شتاب و میانگین آن

خمیری در محاسبه یک منحنی ظرفیت جزء مراحل اساسی کار می باشد. در این تحقیق، تعریف مفاصل خمیری با استفاده از FEMA273 انجام گرفته است [۱۱]. علاوه بر آن، الگوی توزیع بار جانبی مورد استفاده، توزیع بار مدی می باشد که می توان منحنی های ظرفیت را بر اساس مدهای مدل تولید کرد. در روشهای تحلیل و طراحی بر اساس عملکرد، در تعیین رفتار غیرخطی اعضا و به اصطلاح مفاصل خمیری از آیین نامه های طراحی و تحلیل عملکردی استفاده می شود که در این تحقیق از FEMA273 استفاده گردیده است [۱۱]. به طور معمول در سازه ها سه عنصر بادبند، تیر و تیر - ستون استفاده می شود که به ترتیب سه نوع رفتار، نیروی محوری، خمش و اندرکنش خمش - نیروی محوری برای آنها تعریف می گردد.

۴-۶- منحنی های ظرفیت

برای انجام تحلیل های استاتیکی فزاینده غیرخطی و استخراج منحنی های ظرفیت از برنامه SAP2000 استفاده شده است. با اعمال تغییر مکانهای نسبتاً بزرگ و انتخاب یک الگوی تغییر بار فزاینده بر اساس هر مد می توان منحنی ظرفیت مدل را در یک مد خاص به صورت کامل و تا حد فروریزش به دست آورد. ابتدا تغییر مکان بام برای هر قاب در هر مد تغییر شکل در زلزله های مختلف به دست می آید. سپس یک تحلیل استاتیکی فزاینده غیر خطی برای آن سازه در آن مد تغییر شکل که در آن حداکثر تغییر مکان بام برابر مقدار به دست آمده در مرحله قبل است انجام می گیرد. در نتیجه، تغییر مکان هر طبقه از سازه در آن مد و برای آن زلزله تعیین و تغییر مکان نسبی طبقات به دست می آید. با انجام تحلیل های مشابه برای مدها و زلزله های مختلف، می توان نمودار تغییر مکان نسبی طبقات را رسم نمود. پس از انجام تحلیل استاتیکی فزاینده غیرخطی مدی، از

برای یافتن ویژگیهای سیستم یکدرجه آزاد معادل با هر مدار تعاشی به منحنی ظرفیت سازه نیاز است، انجام تحلیل استاتیکی فزاینده غیرخطی برای قابهای معرفی شده لازم می باشد. برای در نظر گرفتن آثار مدهای بالاتر در سازه های موجود از الگوی توزیع بار جانبی با توجه به شکل مدار تعاشی سازه استفاده می گردد. با اعمال تغییر مکانهای نسبتاً بزرگ و انتخاب یک الگوی تغییر بار فزاینده بر اساس هر مد می توان منحنی ظرفیت سازه را در یک مد خاص به صورت کامل و تا حد فروریزش به دست آورد. به عبارت دیگر، سازه با استفاده از نیروی متناسب با شکل مدار تعاشی رانده می شود و این رانش تا جایی ادامه پیدا می کند تا سازه به تغییر مکان هدف برسد و یا اینکه بر اثر تشکیل مفاصل خمیری ناپایدار شود. در هر مرحله از تحلیل، برش پایه اعمالی به سازه در مقابل تغییر مکان نقطه کنترل، ثبت شده و در مقابل هم رسم می شود و منحنی ظرفیت سازه به دست می آید. برنامه SAP2000 گزینه ای برای اعمال بار جانبی متناسب با شکل مد دارد. برنامه، بار جانبی را طوری به سازه وارد می کند که تغییر شکل سازه در هر مرحله از اعمال نیرو، نسبتی از تغییر شکل نهایی سازه در مد انتخابی باشد. نکته دیگر اینکه اعمال بارهای جانبی باید پس از پایان تحلیل بر اثر بارهای ثقلی شروع شود. در اعمال بارهای ثقلی به سازه بر خلاف بارهای جانبی انتظار می رود هیچ گونه رفتار غیرخطی در اعضای سازه ای بروز ننماید که البته نتایج تحلیل مؤید این مطلب می باشد [۴].

۴-۵- مفاصل خمیری و خواص غیرخطی اعضا

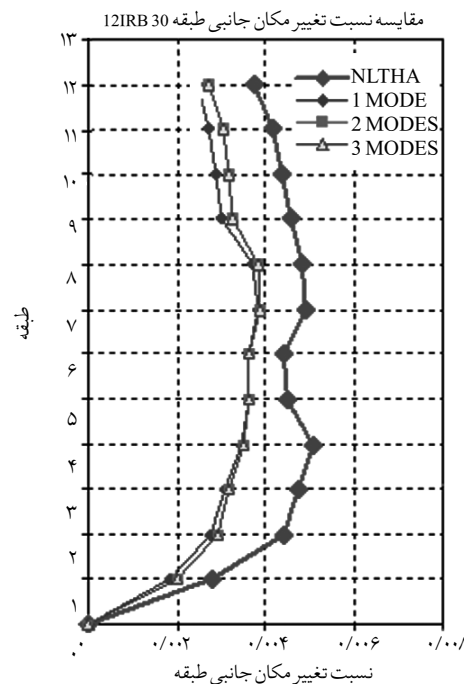
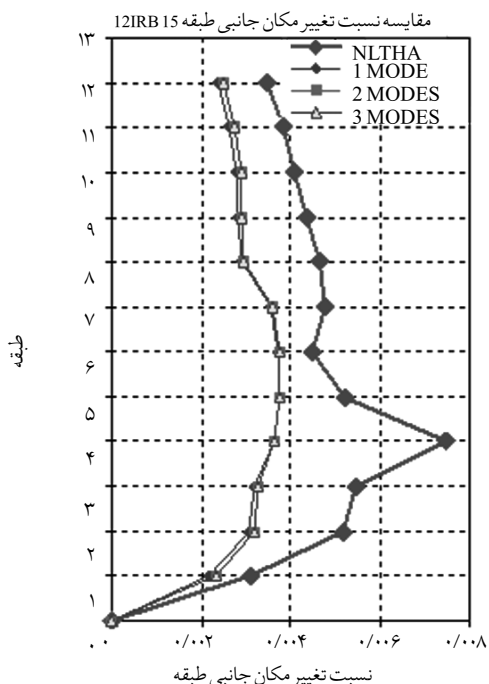
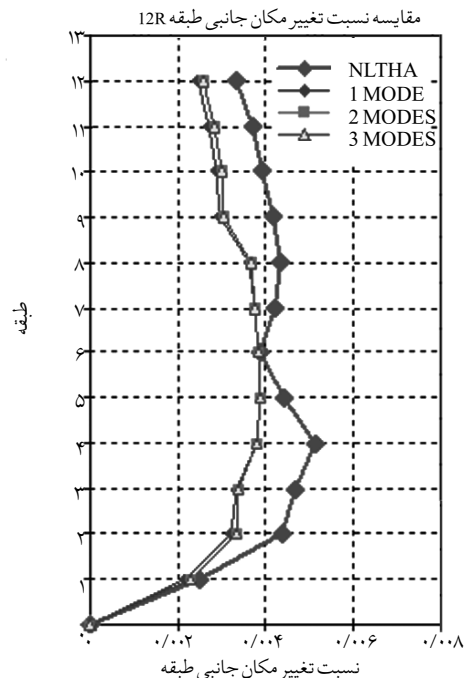
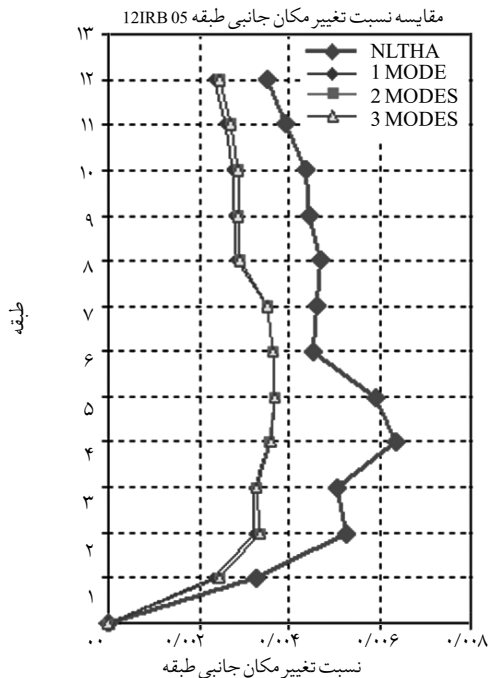
تعریف مفاصل خمیری مدل ها برای تحلیل استاتیکی فزاینده غیرخطی در تمام روشهای تحلیل استاتیکی غیرخطی همانند تحلیل استاتیکی فزاینده غیرخطی مدی (MPA)، برای محاسبه منحنی ظرفیت سازه یکی از مراحل اولیه و مهم تحلیل می باشد. تعیین نوع الگوی توزیع بار جانبی و تعریف مفاصل

تعداد طبقات، موقعیت طبقه نامنظم و نسبت جرمی طبقه نامنظم نسبت به دیگر طبقات بررسیهایی انجام گرفت. در شکل‌های (۴) تا (۱۰) نمودارهای نسبت تغییر مکان نسبی و در شکل‌های (۱۱) تا (۱۶) نمودارهای برش طبقات با متغیر بودن پارامترهای مذکور نشان داده شده است.

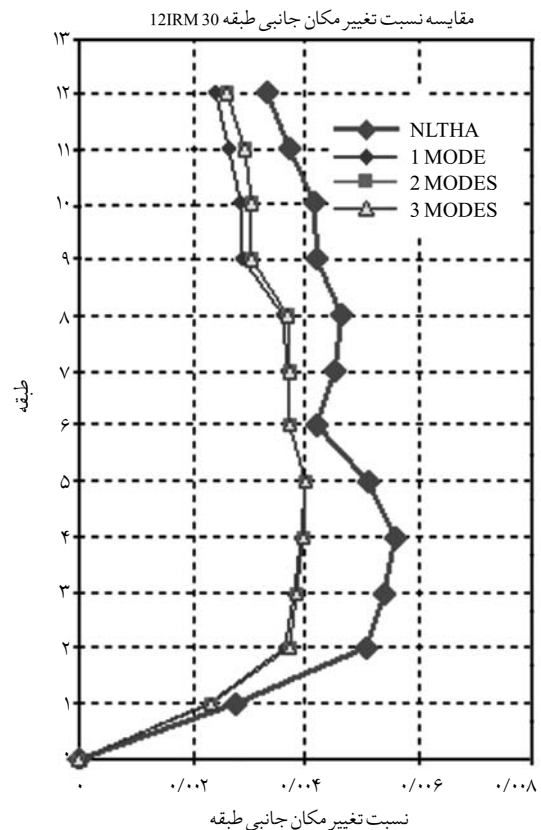
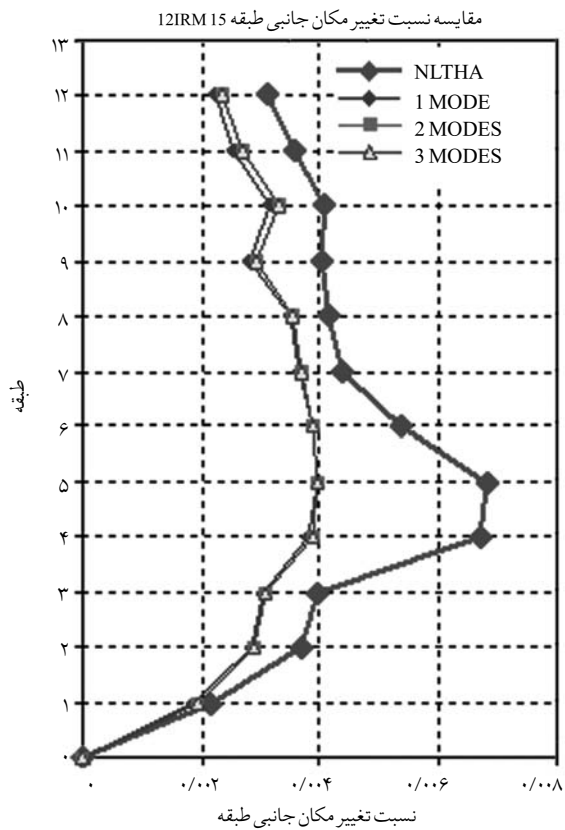
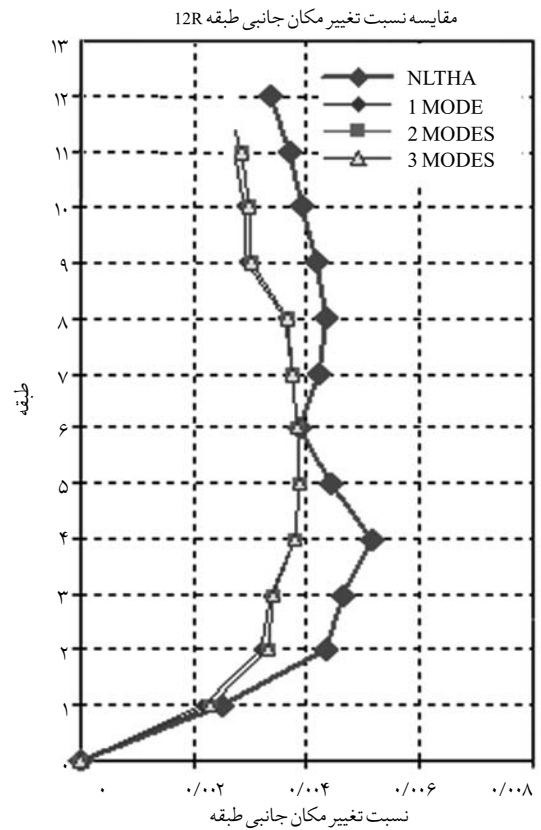
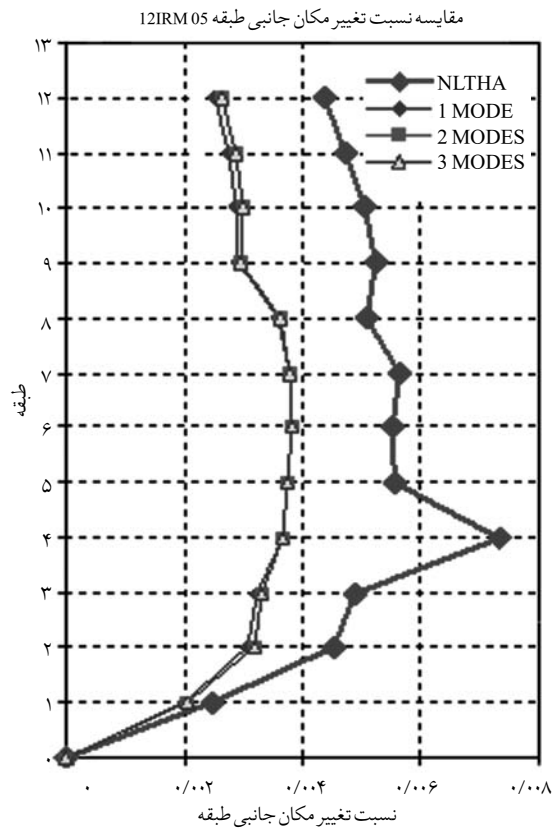
تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی غیرخطی بر روی همه مدل‌ها به عنوان روش شاهد و برای بررسی دقت پاسخها استفاده شده است [جزئیات در مرجع ۴].

۵- مقایسه نتایج عددی

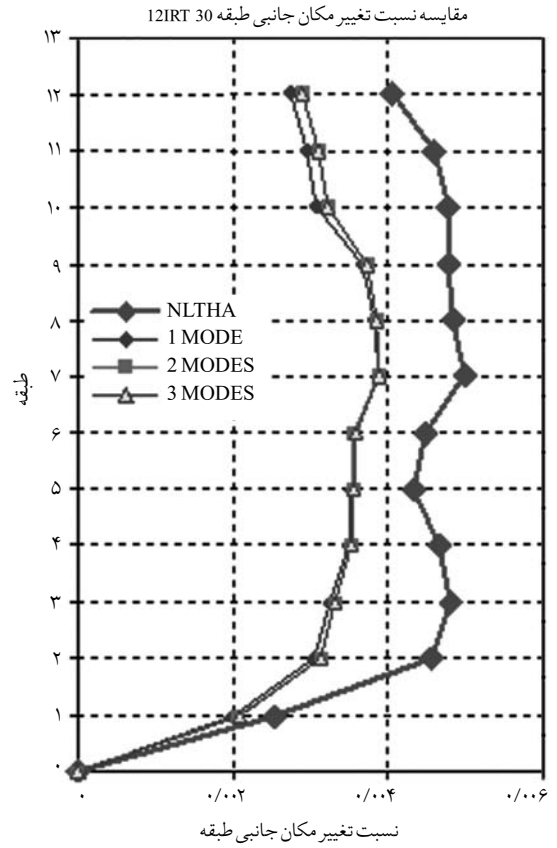
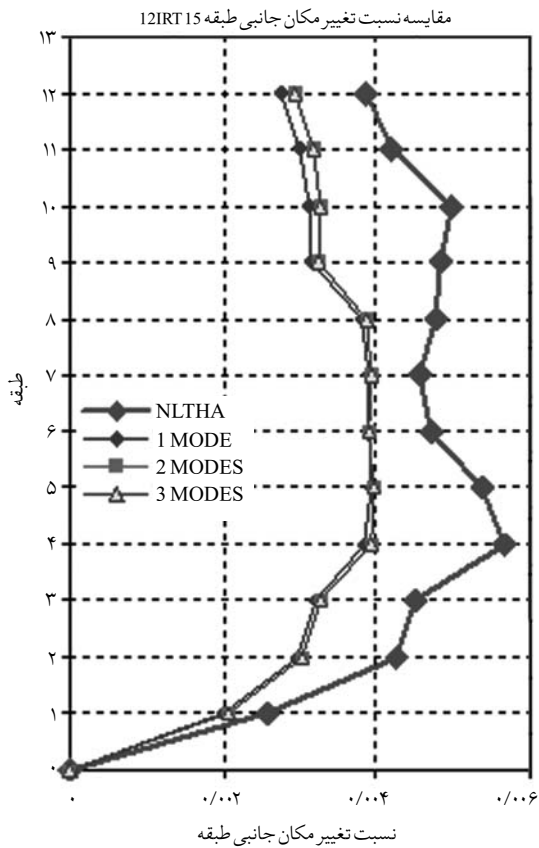
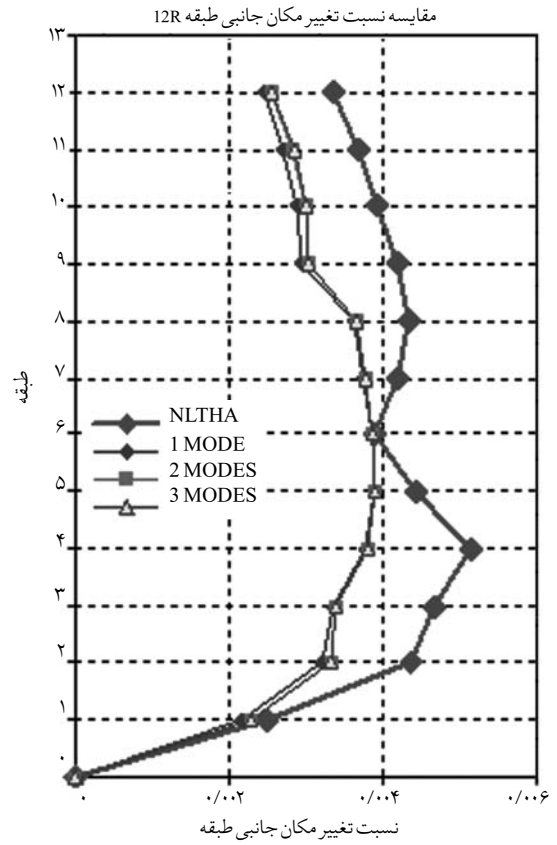
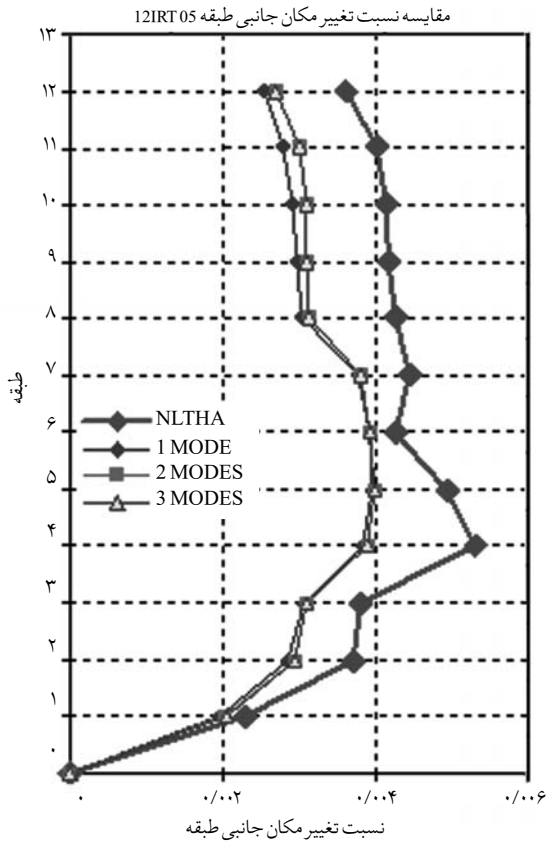
برای مشاهده پاسخ سازه با توجه به متغیر بودن سه پارامتر



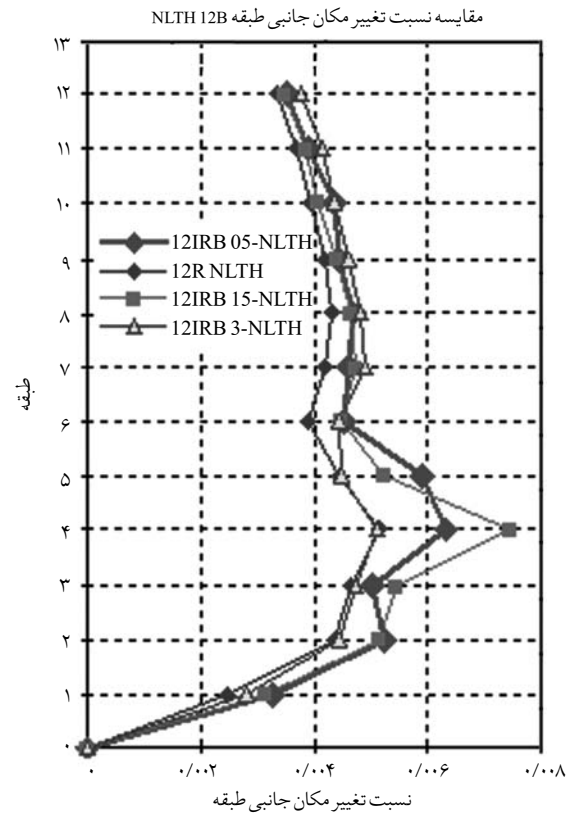
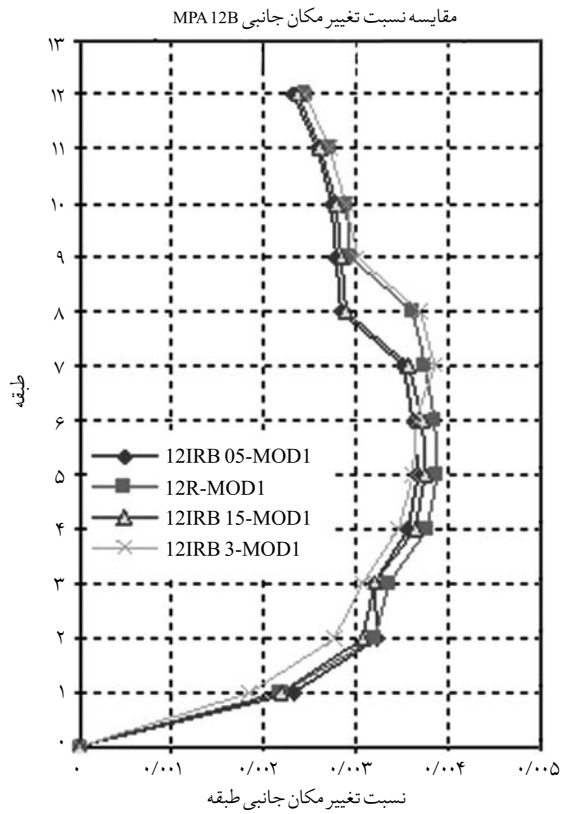
شکل (۴): نمودار نسبت تغییر مکان نسبی برای قابهای دوازده طبقه با نامنظمی جرم در طبقه اول با دوروش MPA و NLTHA



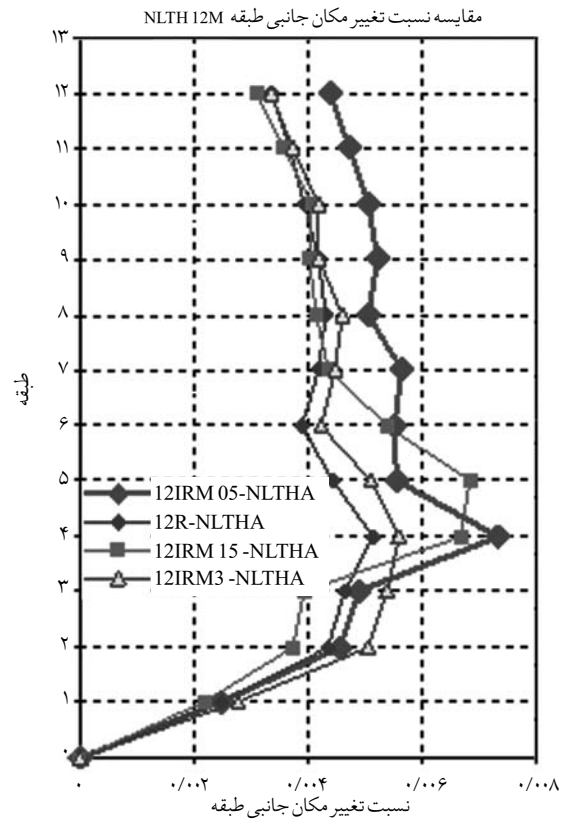
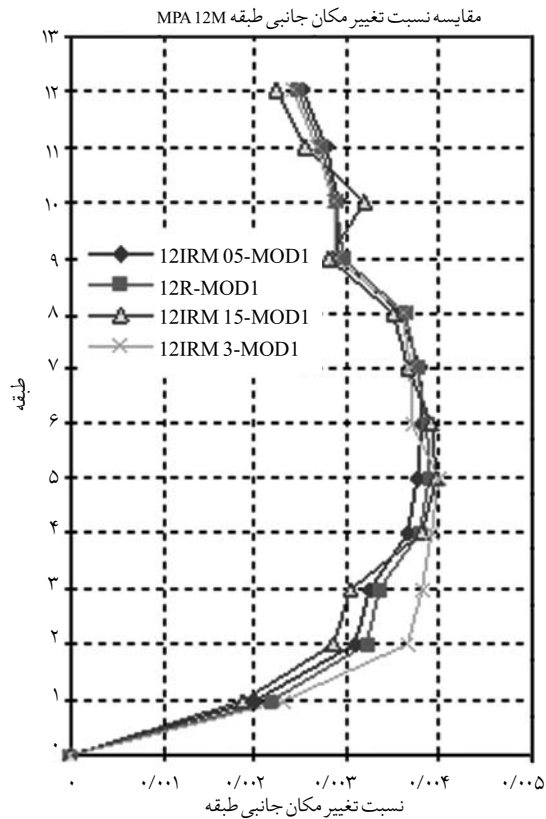
شکل (۵): نمودار نسبت تغییر مکان نسبی برای قابهای دوازده طبقه با نامنظمی جرم در طبقه ششم با دروش NLTHA و MPA



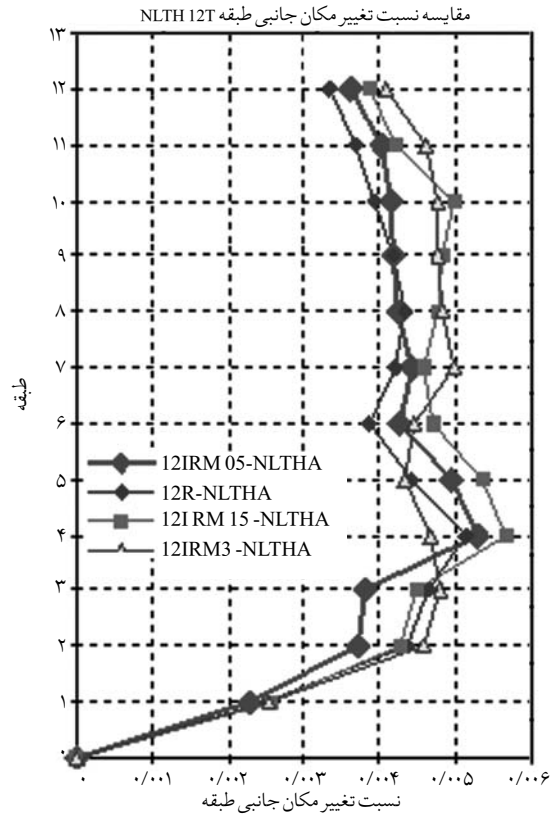
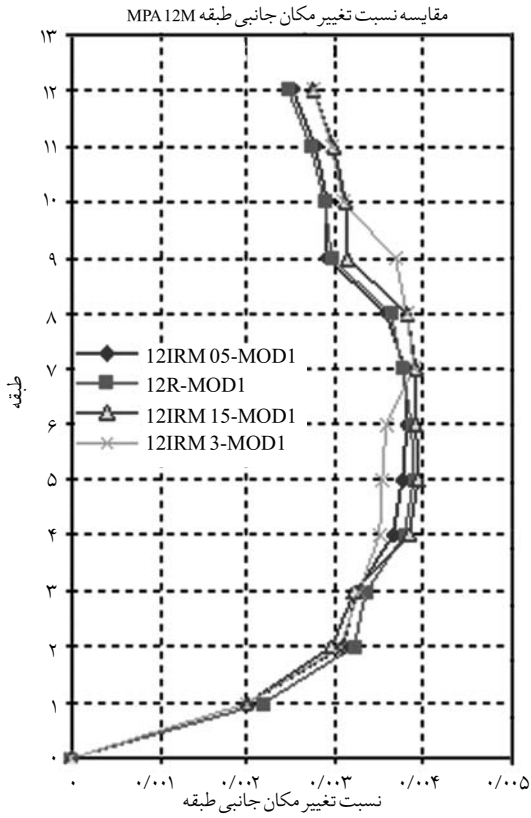
شکل (۶): نمودار نسبت تغییر مکان نسبی برای قابهای دوازده طبقه با نامنظمی جرم در طبقه دوازدهم با دروش NLTHA و MPA



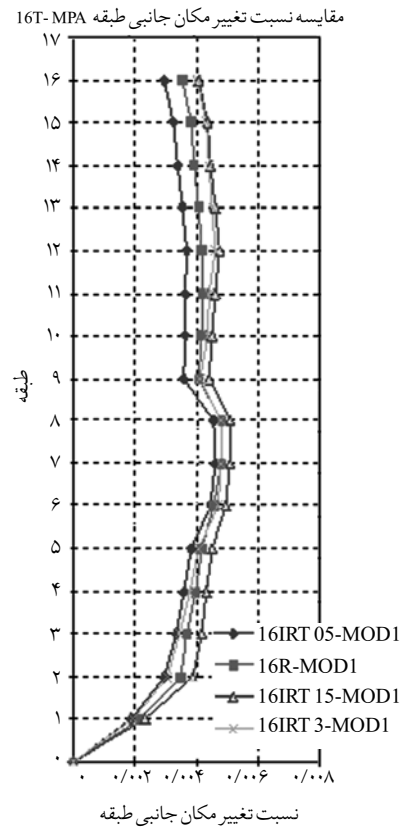
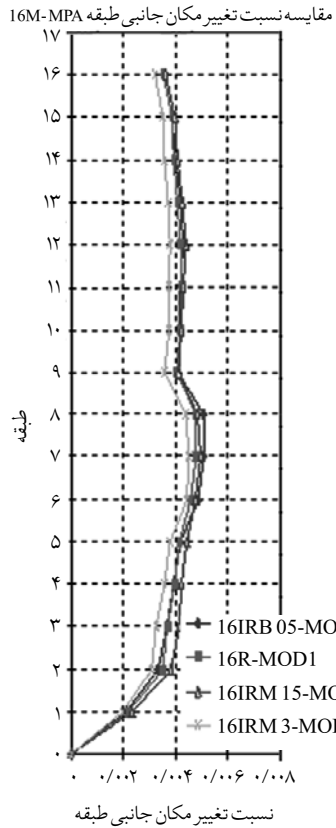
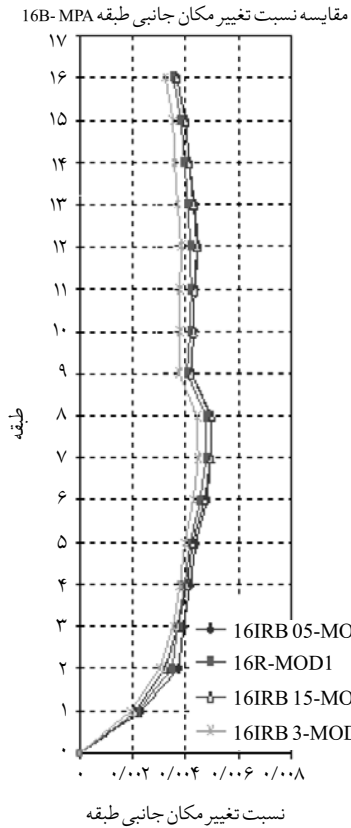
شکل (۷): نمودار نسبت تغییر مکان نسبی برای قابهای دوازده طبقه با نامنظمی جرم در طبقه اول با دو روش NLTH و MPA



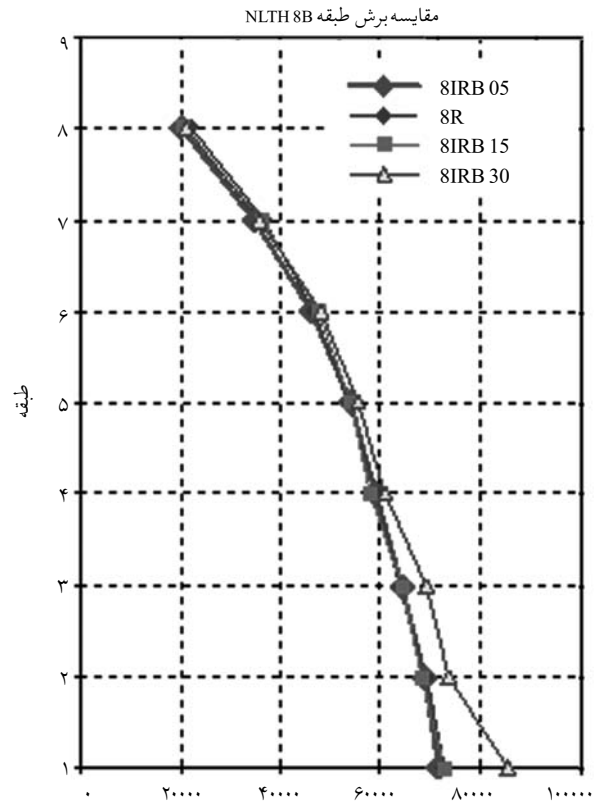
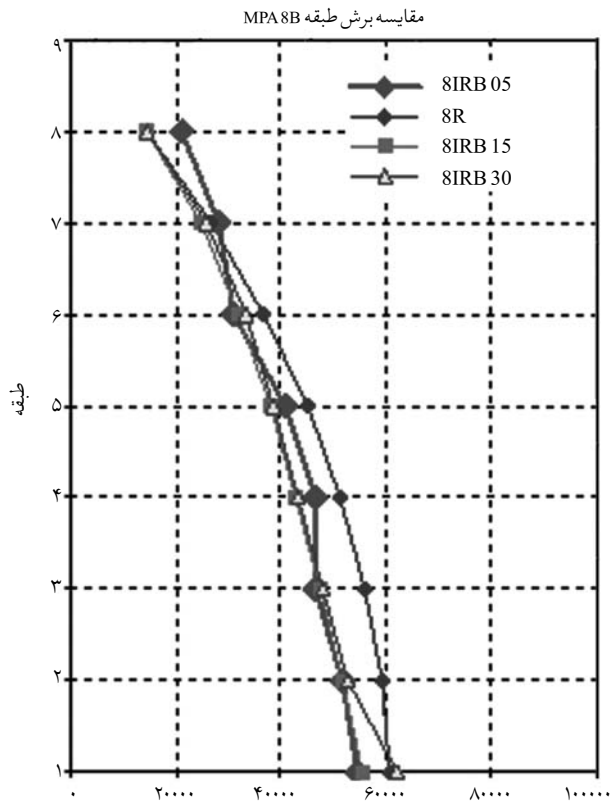
شکل (۸): نمودار نسبت تغییر مکان نسبی برای قابهای دوازده طبقه با نامنظمی جرم در طبقه ششم با دو روش NLTH و MPA



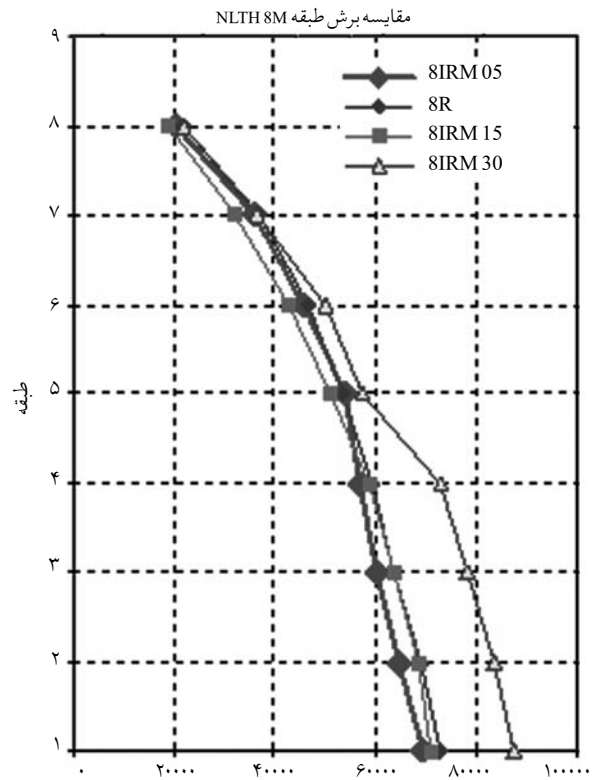
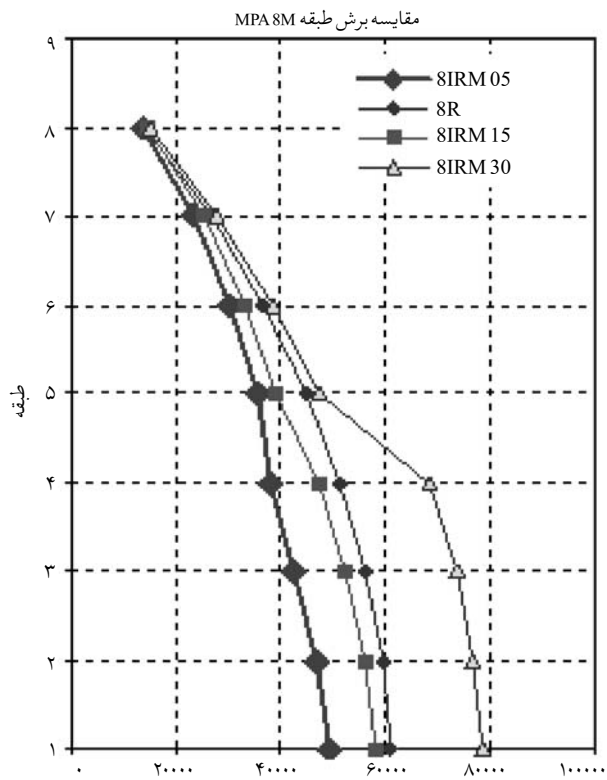
شکل (۹): نمودار نسبت تغییر مکان نسبی برای قابهای دوازده طبقه با نامنظمی جرم در طبقه دوازدهم با در روش MPA و NLTH



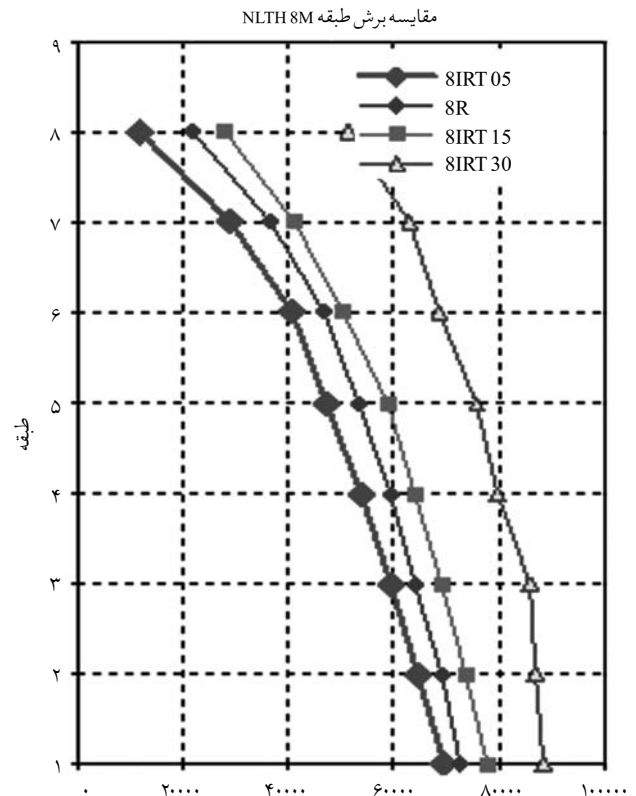
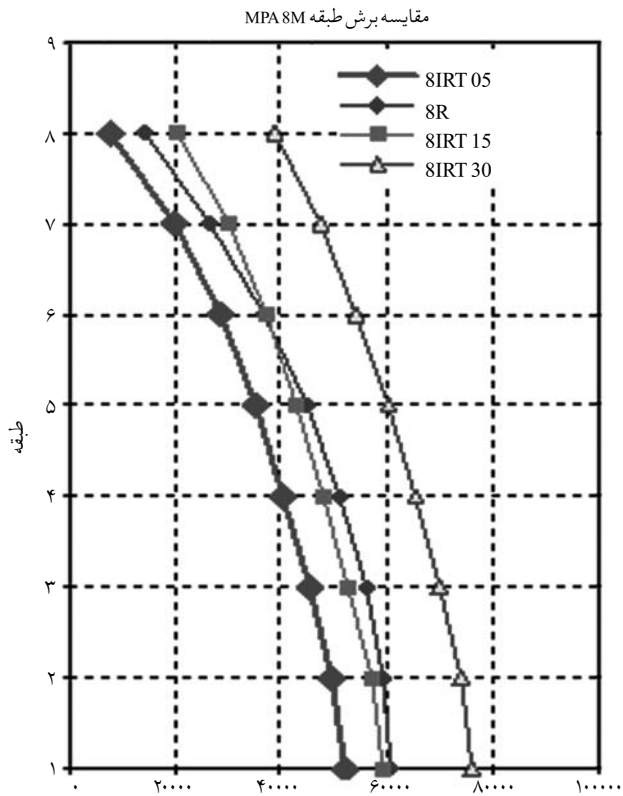
شکل (۱۰): نمودار نسبت تغییر مکان نسبی برای قابهای شانزده طبقه با نامنظمی جرم در طبقات مختلف با روش MPA



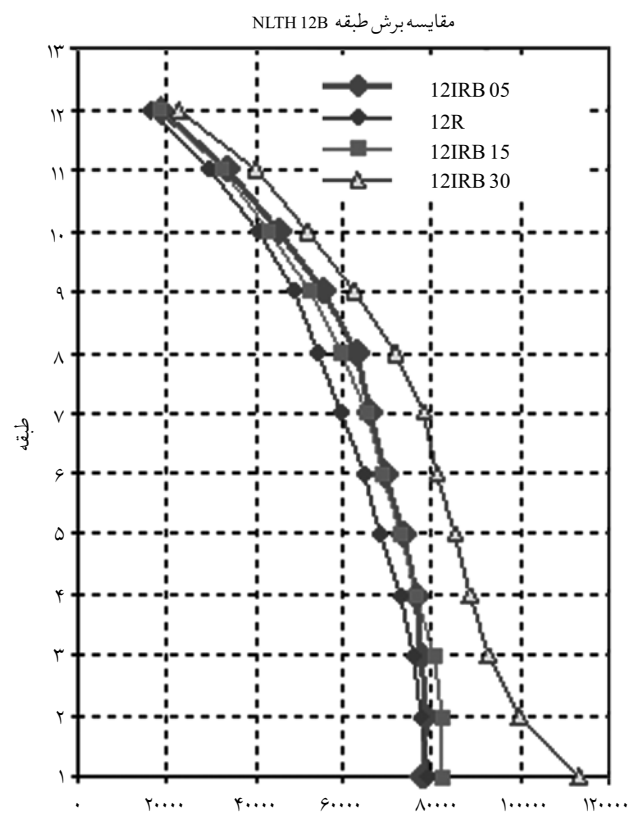
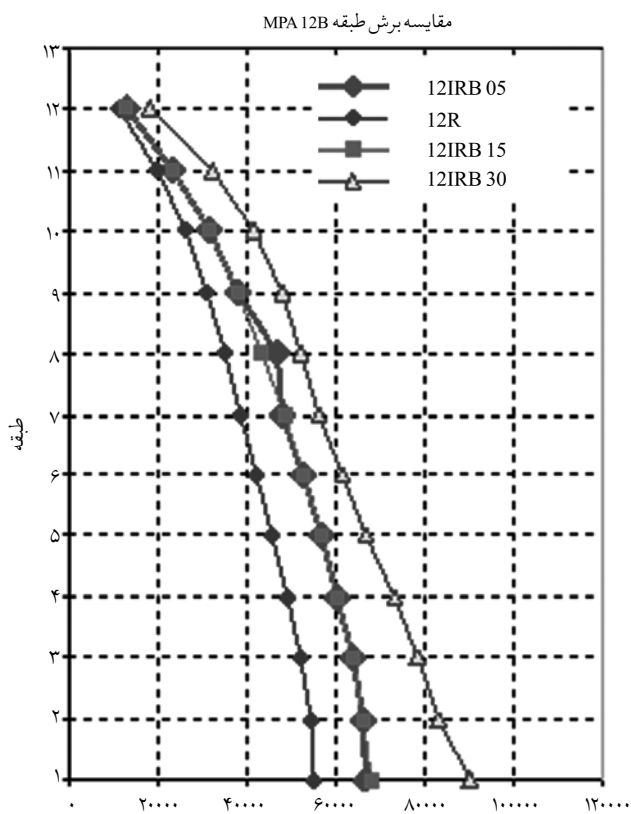
شکل (۱۱): نمودار برش طبقات برای قابهای هشت طبقه با نامنظمی جرم در طبقه اول با دوروش MPA و NLTH



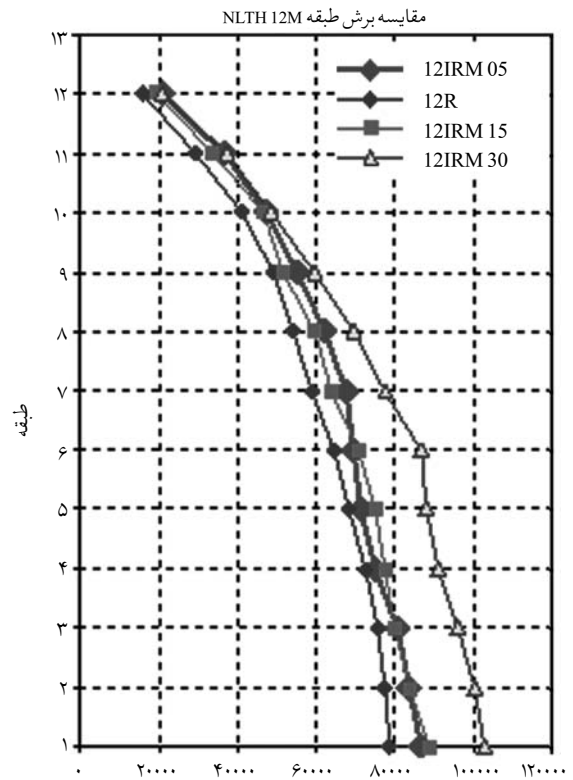
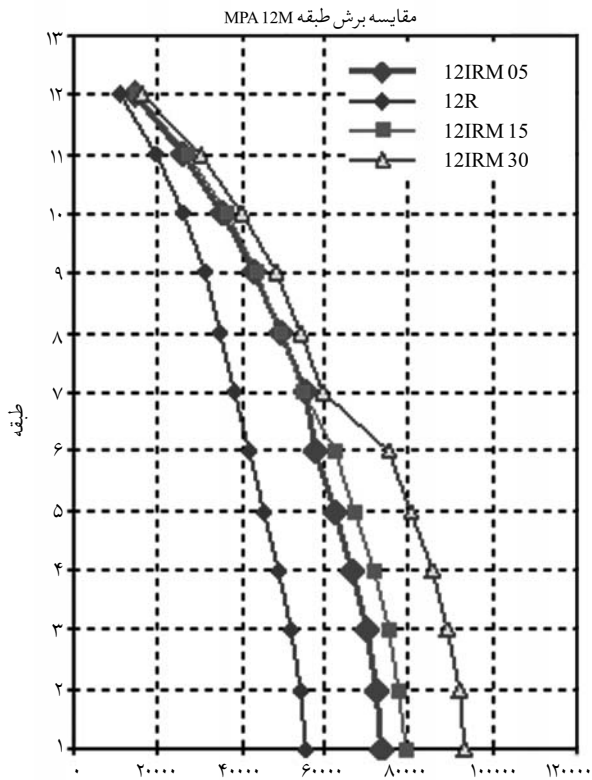
شکل (۱۲): نمودار برش طبقات برای قابهای هشت طبقه با نامنظمی جرم در طبقه چهارم با دوروش MPA و NLTH



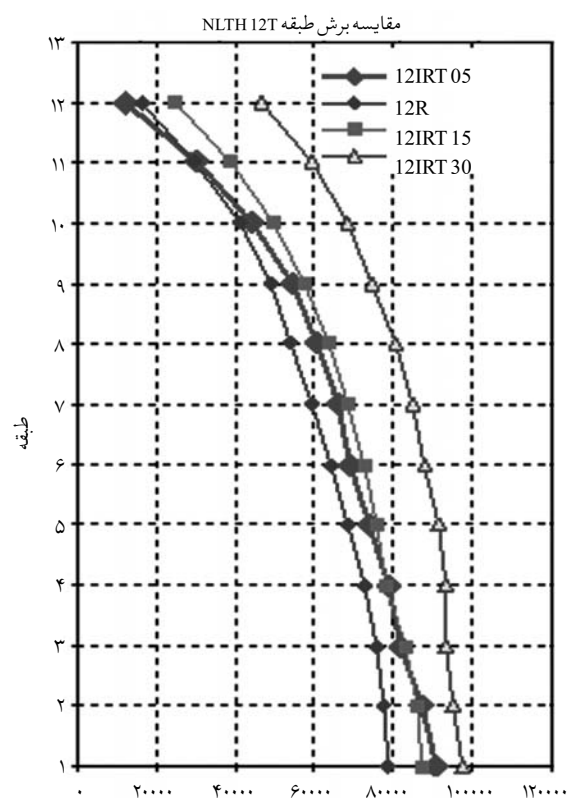
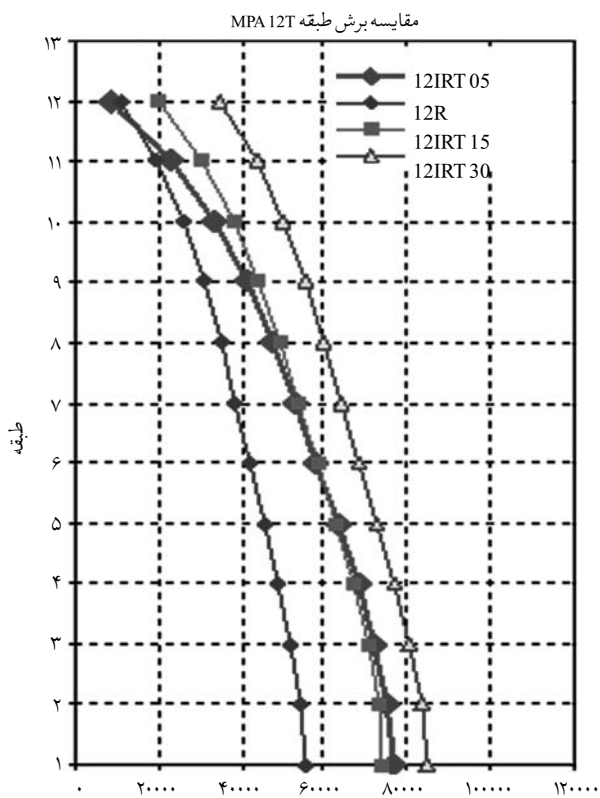
شکل (۱۳): نمودار برش طبقات برای قابهای هشت طبقه با نامنظمی جرم در طبقه هشتم با دوروش MPA و NLTH



شکل (۱۴): نمودار برش طبقات برای قابهای دوازده طبقه با نامنظمی جرم در طبقه اول با دوروش MPA و NLTH



شکل (۱۵): نمودار برش طبقات برای قابهای دوازده طبقه با نامنظمی جرم در طبقه ششم با دوروش MPA و NLTH



شکل (۱۶): نمودار برش طبقات برای قابهای دوازده طبقه با نامنظمی جرم در طبقه دوازدهم با دوروش MPA و NLTH

۶- تفسیر نمودارها

در این تحقیق برای نمونه نمودارهای دوازده طبقه بیشتر مورد بررسی قرار گرفتند. بررسیهای کاملتر نشان داد که روند پاسخها با افزایش یا کاهش طبقات تغییر محسوسی نمی‌کند و فقط مقدار آن کمی تفاوت می‌کند.

با مقایسه نمودارهای قابهای شکل (۴) (12IRB05, 12R, 12IRB15, 12IRB30) دیده می‌شود که در روش دقیق NLTH، نسبتهای تغییر مکان نسبی در طبقات پایین بیشتر می‌شود که با بررسی نحوه تشکیل مفاصل و موقعیت آنها طبیعی به نظر می‌رسد. علاوه بر آن، تغییر در نسبتهای جرمی، تأثیر کمی در نتایج MPA دارند؛ در حالی که نتایج NLTH در نزدیکی نامنظمی متفاوت می‌باشد و هنگامی که نامنظمی در پایین می‌باشد، پاسخهای طبقات بالا تر به پاسخهای دقیق نزدیکتر است. متوسط نسبت تغییر مکان نسبی طبقه در روش MPA اختلاف زیادی نسبت به روش دقیق ندارد و به طور کلی اختلاف نتایج روش MPA و دقیق در طبقات بالا تر کمتر می‌باشد. در سازه‌هایی که مشارکت مد اول زیادی باشد و یا به عبارتی مد اول حاکم است، با استفاده از همان یک مد هم پاسخهای قابل قبولی دریافت می‌شود.

با مقایسه نمودارهای قابهای شکل (۵) (12IRM05, 12R, 12IRM15, 12IRM30) دیده می‌شود که در روش دقیق NLTH، نسبتهای تغییر مکان نسبی در نیمه پایینی بیشتر می‌شود که با بررسی نحوه تشکیل مفاصل و موقعیت آنها طبیعی به نظر می‌رسد. علاوه بر آن، تغییر در نسبتهای جرمی تأثیر کمی در نتایج MPA دارند؛ در حالی که نتایج NLTH در نزدیکی نامنظمی متفاوت می‌باشد. افزایش نسبت جرمی باعث بیشتر شدن اختلاف روش MPA و روش دقیق می‌شود. هنگامی که نامنظمی در وسط است، پاسخهای

طبقات بالا تر به پاسخهای دقیق نزدیکتر است. متوسط نسبت تغییر مکان نسبی طبقه در روش MPA اختلاف زیادی نسبت به روش دقیق ندارد و به طور کلی اختلاف نتایج روش MPA و دقیق در طبقات بالا تر کمتر می‌باشد. در سازه‌هایی که مشارکت مد اول زیادی باشد و یا به عبارتی مد اول حاکم است، با استفاده از همان یک مد هم پاسخهای قابل قبولی دریافت می‌شود.

با مقایسه نمودارهای قابهای شکل (۶) (12IRT05, 12R, 12IRT15, 12IRT30) دیده می‌شود که در روش دقیق، نسبتهای تغییر مکان نسبی همه طبقات نزدیک به هم می‌باشد که البته در طبقات پایینی کمی بیشتر می‌باشد. تغییر در نسبتهای جرمی تأثیر کمی در نتایج MPA دارند. افزایش نسبت جرمی باعث بیشتر شدن اختلاف روش MPA و روش دقیق می‌شود. متوسط نسبت مکان نسبی طبقه در روش MPA اختلاف زیادی نسبت به روش دقیق ندارد و به طور کلی اختلاف نتایج روش MPA و دقیق در طبقات بالا تر کمتر می‌باشد. در سازه‌هایی که مشارکت مد اول زیاد می‌باشد و یا به عبارتی مد اول حاکم است با استفاده از همان یک مد هم پاسخهای قابل قبولی دریافت می‌شود.

با مقایسه دو روش MPA و NLTH دیده شد که روند پاسخها برای حالت‌های نامنظم در دو روش مشابه می‌باشد (شکل‌های ۷، ۸ و ۹). برای مثال، اگر نامنظمی در بالا باشد بین نسبت جرمهای متفاوت یک اختلاف از بالا تا پایین به وجود می‌آید یا اگر نامنظمی در پایین باشد بین نسبت جرمهای متفاوت یک اختلافی در پایین به وجود می‌آید. علاوه بر آن، در حالتی که نامنظمی در طبقه بالا به وجود می‌آید این نامنظمی بر روی تمامی طبقات تأثیر می‌گذارد و یک اختلاف از طبقات بالا تا پایین بین دو روش وجود دارد و می‌توان گفت در این حالت بیشترین اختلاف دو روش وجود دارد.

تغییر نسبت‌های جرمی تأثیر کمی در نتایج روش MPA دارد و این موضوع برای همه سازه‌های هشت، دوازده و شانزده طبقه وجود دارد (شکل ۸)، که این موضوع در نمودارهای مجزا برای MPA بیشتر مشاهده می‌شود. علاوه بر آن، نمی‌توان گفت با افزایش نسبت جرمی، نسبت تغییر مکان نسبی همواره افزایش می‌یابد.

تقریباً همان روندهایی که در نسبت تغییر مکان نسبی طبقه دیده شد در نمودارهای برش طبقات دیده می‌شود (شکل‌های ۹ تا ۱۴). برای مثال، در حالتی که نامنظمی در وسط است برش طبقات از طبقه وسط تا پایین را تحت تأثیر قرار می‌دهد و یک جهش در طبقه وسط مشاهده می‌شود. با این تفاوت که MPA برش طبقات را بهتر تخمین می‌زند و به جواب‌های دقیق نزدیکتر است.

با مقایسه شکل‌های برش طبقات در سازه‌های هشت و دوازده طبقه دیده می‌شود که دقت روش MPA در تخمین برش طبقات در همه سازه‌ها خوب می‌باشد و در نمودارهای برش طبقات دیده می‌شود که MPA نسبت به محل نامنظمی و نسبت جرمی حساستر می‌باشد و پاسخ‌ها به روش دقیق نزدیکتر است.

۷- نتیجه گیری

اهم نتایج این تحقیق عبارتند از:

۱- تغییر در نسبت‌های جرمی و محل نامنظمی تأثیر کمی در نتایج MPA می‌گذارد؛ اما متوسط تغییر مکان نسبی طبقه در روش MPA اختلاف زیادی نسبت به روش دقیق تاریخیچه زمانی غیرخطی ندارد.

۲- نامنظمی در طبقات پایین، باعث به وجود آمدن مفاصل بیشتر در نزدیکی نامنظمی می‌شود و در نتیجه نسبت

تغییر مکان نسبی طبقه در نزدیکی نامنظمی (نه تنها در طبقه نامنظم بلکه در نزدیکی آن) را افزایش می‌دهد و مقدار خطای روش MPA نسبت به دقیق بیشتر می‌شود. ۳- نامنظمی در طبقات میانی، باعث به وجود آمدن مفاصل بیشتر در نزدیکی نامنظمی و طبقات پایین تر می‌شود و در نتیجه نسبت تغییر مکان نسبی را در نیمه پایینی افزایش می‌دهد و مقدار خطای روش MPA نسبت به دقیق بیشتر می‌شود.

۴- نامنظمی در طبقات بالایی، باعث به وجود آمدن مفاصل بیشتر در نزدیکی نامنظمی و طبقات پایین تر می‌شود و نسبت تغییر مکان نسبی را در همه طبقات افزایش می‌دهد و مقدار خطای روش MPA نسبت به دقیق بیشتر می‌شود.

۵- نسبت جرمی طبقه نامنظم به منظم تأثیر کمی در نتایج MPA دارد و نتایج ۵۰٪ و ۱۵۰٪ نسبت جرمی نه تنها در روش MPA بلکه در روش دقیق هم در بسیاری از موارد به هم نزدیک است.

۶- در سازه‌هایی که مشارکت مد اول زیاد می‌باشد و یا به عبارتی مد اول حاکم است، با استفاده از همان یک مد هم جواب‌های قابل قبولی به دست می‌آید. آثار مدهای بالاتر در جهت کم کردن مقدار خطا می‌باشد. این کاهش خطا معمولاً در محلهایی می‌باشد که بیشترین خطا وجود دارند.

۷- همان روندهایی که در نسبت تغییر مکان نسبی طبقه دیده شد وجود دارد. با این تفاوت که MPA برش طبقات را بهتر تخمین می‌زند و به جواب‌های دقیق نزدیکتر است.

۸- مقایسه نمودارهای برش طبقات با نسبت تغییر مکان

California, Berkeley.

9-Chopra A.K., Goel, R.K. (2002). A modal pushover analysis procedure for estimating seismic demand for building. *J. Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 31, 561-582.

۱۰- مرکز تحقیقات و مسکن. آیین نامه طراحی ساختمانها

در برابر زلزله، استاندارد ۲۸۰۰ (ویرایش دوم). تهران: مؤلف.

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

نسبی مبین آن است که MPA نسبت به محل نامنظمی و نسبت جرمی حساستر می باشد و پاسخها به روش دقیق نزدیکتر است.

۸- مراجع

۱- پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله. (خرداد ماه ۱۳۸۱). دستورالعمل بهسازی لرزه ای ساختمانهای موجود. تهران: مؤلف.

2-Building Seismic Safety Council. (1997). *NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings*, FEMA-302. Federal Emergency Management Agency. Washington DC.

3-Building Seismic Safety Council. (1997). *NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings*, FEMA-303. Federal Emergency Management Agency. Washington DC.

۴- دیرباز، مجتبی. (۱۳۸۴). کاربرد روش استاتیکی فزاینده غیرخطی مدی در قابهای با نامنظمی جرم در ارتفاع. پایان نامه کارشناسی ارشد، تهران: پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله.

5-Valley, M.T., Harris, J.R. (1998). Application of model techniques in a pushover analysis. *6th US National Conference on Earthquake Engineering*.

6-Kilar, V., Faifar, P. (1997). Simple pushover analysis of asymmetric buildings. *Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 26, pp. 233-249.

7-Gupta, B., Kunnath, S.K. (2000). Adaptive spectra based pushover procedure for seismic evaluation of structures. *J. Earthquake Spectra*. 16. No. 2.

8-Chopra, A.K., Goel, R.K. (2001). *A modal pushover analysis procedure for estimating seismic demand for building: theory and preliminary evaluation*. [Report No. PEER-2001/03]. Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of