

بررسی اثرات الگوهای مختلف توزیع بار جانبی در آنالیز استاتیکی غیرخطی قاب‌های خمشی

محسن علی شایانفر^{۱*} و رضا رضایی ابیانه^۲

^۱ استادیار دانشکده مهندسی عمران - دانشگاه علم و صنعت ایران

^۲ دانش آموخته کارشناسی ارشد سازه - دانشکده مهندسی عمران - دانشگاه علم و صنعت ایران

(تاریخ دریافت ۸۶/۱/۲۵، تاریخ روایت اصلاح شده ۸۹/۷/۲۸، تاریخ تصویب ۸۹/۸/۲۵)

چکیده

آنالیز استاتیکی غیرخطی^۱ اغلب برای تعیین رفتار سازه در ناحیه غیرخطی استفاده می‌شود. این روش علاوه بر کارایی و محاسنی که دارد، نقاط ضعفی هم دارد که ناشی از فرضیه‌های حاکم بر آن است که فرض می‌کند پاسخ سازه فقط توسط مود اصلی آن کنترل می‌شود و شکل این مود پس از ورود سازه به مرحله غیرخطی ثابت باقی می‌ماند که هر دوی این فرضیه‌ها تقریبی هستند، به خصوص در ساختمان‌های بلند که زمان تناوب طولانی دارند. به نظر می‌رسد که الگوهای بار ثابت مورد استفاده در این روش نمی‌توانند این تأثیرات را در نظر بگیرند. در این مقاله سعی می‌شود که با در نظر گرفتن الگوهای بار مختلف موجود در FEMA و همچنین معرفی روش MPA و در نظر گرفتن سه الگوی بار متناسب با سه مود اول تغییر شکل سازه‌ها، اثرات مدهای بالاتر در مقایسه با روش‌های مرسوم آنالیز استاتیکی غیرخطی در FEMA در بالا بردن دقت پاسخ‌ها در مقایسه با آنالیز دینامیکی غیرخطی برای قاب‌های خمشی مورد بررسی قرار گیرند و برای بالا بردن سرعت محاسبه در روش MPA یک روش میانگین‌گیری نمایی ارائه شده است.

واژه‌های کلیدی: قاب‌های خمشی، تحلیل استاتیکی غیرخطی، الگوهای بار جانبی، روش MPA

مقدمه

شناخت نسبت به پدیده زلزله روز به روز در حال افزایش است و آیین‌نامه‌های ساختمانی به واسطه این پیشرفت‌ها در حال تکامل هستند. مجموعه کاستی‌های روش‌های نیرویی مورد استفاده در این آیین‌نامه‌ها نیاز به ارائه روش‌های جدید را که بر مبنای تحلیل‌های غیرخطی و در نظر گرفتن رفتار واقعی اجزای سازه هنگام زلزله بود، آشکار کرد. بر این اساس روش «مهندسی زلزله بر اساس عملکرد» معرفی و ارائه شد [۱] یکی از مرسوم‌ترین آنالیز مورد استفاده در مهندسی زلزله بر اساس عملکرد آنالیز Pushover یا روش بار افزون است که توسط چندین مرجع معتبر مثل ATC^۲ و FEMA^۳ گسترش یافت [۲،۳] و کارهای تحقیقاتی زیادی هم برای تکامل آن در حال انجام است که در این مقاله بیشتر به روش تکامل‌یافته مودی که توسط پروفیسور چوپرا در حال گسترش است پرداخته می‌شود و با استفاده از روش میانگین‌گیری نمایی مراحل کار با حفظ دقت محاسبات، بسیار کوتاه‌تر شده است؛ در داخل کشور هم با راهنمایی‌های دکتر عبدالرضا سروقدمقدم کارهای تحقیقاتی انجام شده است [۴و۵].

روش استاتیکی غیرخطی در FEMA 273 در روش استاتیکی غیرخطی^۴ (NSP) ارائه شده در این راهنما، خصوصیات غیرخطی بار جابه‌جایی از اجزاء به طور مستقیم مدل می‌شود. مدل ساختمان تحت یک بار جانبی اضافه‌شونده قرار می‌گیرد تا یک جابه‌جایی هدف به دست آید یا ساختمان فرو بریزد. این جابه‌جایی هدف، نمایانگر جابه‌جایی حداکثری است که سازه در طی زلزله طراحی تجربه می‌کند. اثرات غیرخطی به طور مستقیم در مدل اعمال شده‌اند و نیروهای اینرسی محاسبه شده تقریبی از نیروهایی هستند که توقع داریم در طی زلزله طراحی در سازه ایجاد شوند [۶،۱].

جابه‌جایی هدف می‌تواند به وسیله هر روشی که اثر پاسخ غیرخطی روی جابه‌جایی را در نظر می‌گیرد، محاسبه شود [۳]. در این تحقیق جابه‌جایی هدف برای تحلیل استاتیکی غیرخطی به وسیله الگوهای بار FEMA همان جابه‌جایی بام در مود اول که در مرحله ۶ام روش MPA محاسبه خواهد شد، در نظر گرفته می‌شود [۷].

الگوهای بار جانبی

بار جانبی در مقطع طولی به ساختمان اعمال می‌شود که به طور تقریبی بیان‌کننده توزیع نیروهای اینرسی زلزله است. سه الگوی بار اصلی FEMA به این ترتیب خلاصه می‌شوند [۳]:

۱- **توزیع یکنواخت**: در این توزیع، نیروی وارد بر هر طبقه متناسب با جرم آن طبقه مطابق رابطه (۱) محاسبه می‌شود:

$$S_j^* = \frac{m_j}{\sum_{i=1}^N m_i} \quad (1)$$

۲- **توزیع بار جانبی معادل**: اغلب وقتی استفاده می‌شود که بیشتر از ۷۵ درصد مشارکت جرم کلی در مود پایه مورد بررسی باشد:

$$S_j^* = \frac{m_j h_j^k}{\sum_{i=1}^N m_i h_i^k} \quad (2)$$

شماره طبقه $j = 1, 2, \dots, N$

۳- **الگوی SRSS**: بار جانبی در این روش وابسته به نیروهای اینرسی به دست آمده از تحلیل طیفی الاستیک است:

$$\tilde{f}_j = \frac{f_j}{\sum_{i=1}^N f_i} \quad (3)$$

معایب تحلیل Pushover در FEMA

این معایب عبارتند از [۸، ۹، ۱۰]:

۱- زمینه تئوری، روش قوی‌ای نبوده و دفاع کردن از آن مشکل است. یک فرض اساسی که به طور ضمنی در زمینه روش Pushover نهفته است، ربط دادن پاسخ سازه چند درجه آزادی به طور مستقیم با پاسخ سیستم یک درجه آزادی است؛ اگر چه در اغلب مواقع مود اصلی، حاکم بر پاسخ سازه است، با این وجود نمی‌تواند به معنی یک بیان عمومی و کلی باشد. علاوه بر آن خود شکل مود اصلی ممکن است بسته به میزان ورود به محدوده غیرالاستیک، تغییر کند.

۲- در سازه‌هایی که اثرات مودهای بالاتر مهم است، تغییر شکل‌های تخمین‌زده‌شده با روش Pushover ممکن است چندان دقیق نباشد و این در حالی است که در روش‌های شرح داده شده در آیین‌نامه‌ها به طور صریح مشارکت مودهای بالاتر در پاسخ کلی سازه صرف‌نظر می‌شود.

۳- تحلیل Pushover همچنان براساس نیروست و دلیل آن نبود توانایی این روش بر پایه جابه‌جایی در لحاظ کردن ضعف‌های سازه‌های مهم از قبیل نامنظمی در مقاومت است. با این وجود از نظر تئوری اعمال توزیع‌هایی بر مبنای جابه‌جایی بسیار اهمیت دارد، چون عامل جابه‌جایی ارتباط بهتری با آسیب‌پذیری سازه‌های دارد.

۴- فقط اثر بارهای لرزه‌ای افقی در نظر گرفته می‌شود. اثر مؤلفه قائم بارگذاری لرزه‌ای که در بعضی از موارد اهمیت زیادی دارد، نادیده گرفته شده است.

۵- در این روش به طور ضمنی یک تفکیک بین نیاز و ظرفیت وجود دارد. از آنجایی که پاسخ سازه‌های غیرالاستیک وابسته به مسیر بارگذاری بوده و ظرفیت سازه‌های همواره وابسته به نیاز لرزه‌ای است، روشن است که این تفکیک صحیح نیست.

با توجه به موارد گفته شده مشخص است که تحلیل Pushover در مقایسه با تحلیل دینامیکی غیرخطی کمبودهای زیادی دارد. اما می‌توان با استفاده از راهکارهایی به طور قابل ملاحظه‌ای این نواقص را کاسته و کارایی و مقبولیت این روش را بهبود بخشید. این روش‌های اصلاحی به عنوان روش‌های Pushover پیشرفته شناخته می‌شوند. در این تحقیق روش Pushover پیش‌رفته مودال^۷ (MPA) معرفی و مورد استفاده قرار خواهد گرفت.

تحلیل Pushover مودال

این روش یکی از روش‌های ارائه‌شده برای منظور کردن اثرات مودهای بالاتر است که در سال ۲۰۰۲ توسط چوپرا و گونل [۷] ارائه شد. این روش به دلیل بیان یک درک هندسی ملموس از موضوع، مقبولیت بیشتری نسبت به سایر روش‌های Pushover پیش‌رفته پیدا کرده است. در روش MPA فرض می‌شود که پاسخ مودها در حالت غیرالاستیک به طور غیر همبسته است. بنابراین پاسخ لرزه‌ای سازه در هر مود به طور مستقل از هل‌دادن سازه با الگوی توزیع بار ثابت ناشی از نیروهای اینرسی در آن مود

$$\Gamma_n = \frac{\sum_{k=1}^N m_k \phi_{kn}}{\sum_{k=1}^N m_k \phi_{kn}^2} \quad (9)$$

۵- محاسبه ماکزیمم جابه‌جایی غیرالاستیک سیستم یک درجه آزادی غیرالاستیک مربوط به مود n ام از طریق تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی یا تحلیل طیفی. دوره ارتعاشی مود n ام از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$T_n = 2\pi \sqrt{\frac{L_n D_{ny}}{F_{sny}}} \quad (10)$$

برای هر مود با استفاده از روش میانگین‌گیری نمایی میانگین D_i ها حساب می‌شود.

$$\hat{D}_n = \exp \left[\frac{\sum_{i=1}^n \ln(D_i)}{n} \right] \quad (11)$$

۶- محاسبه جابه‌جایی بام در مود n ام

$$\hat{U}_{rno} = \Gamma_n \phi_{rn} \hat{D}_n \quad (12)$$

۷- مقادیر پاسخ‌های کمیت‌های دلخواه r_n (از قبیل جابه‌جایی طبقات، جابه‌جایی نسبی داخل طبقه، دوران مفاصل پلاستیک و...) از روی تحلیل Pushover وقتی که جابه‌جایی بام برابر با جابه‌جایی محاسبه‌شده در گام ۶ باشد تعیین می‌شوند.

۸- مقادیر کلی تقاضای کمیت‌های تعیین شده در گام ۷، برای هر مود از طریق قانون ترکیب جذر مجموع مربع‌های (SRSS) پاسخ‌های مودال تعیین می‌شود (اغلب سه مود اول).

$$r_0 \approx \left(\sum_{n=1}^N r_{n0}^2 \right)^{1/2} \quad (13)$$

معرفی قاب‌های مدل‌سازی شده

مدل‌های به کار رفته در این تحقیق [۸] دو قاب فولادی به تعداد طبقات ۶ و ۱۸ است. سیستم مقاوم باربر جانبی هر دو قاب از نوع قاب خمشی فولادی ویژه و ارتفاع طبقات در هر دو مدل ۳/۳ متر است و همگی آنها چهار دهانه به طول ۵ متر دارند. سقف‌ها از نوع دال و صلب هستند. در انتخاب قاب‌ها فرض شده که قاب‌ها جزئی از

تا رسیدن به تغییر مکان هدف حاصل می‌شود. سپس پاسخ کلی سازه از روی ترکیب پاسخ مودها با استفاده از روش جذر مجموع مربع‌ها (SRSS) به دست می‌آید. دقت روش MPA به نوع حرکت شدید زمین نیز بستگی دارد. بنابراین برای اینکه بتوان به نتایج حاصل از این روش اطمینان کرد، باید روند MPA برای چندین زلزله انجام شده و از نتایج حاصل میانگین‌گیری شود که این کار مستلزم انجام عملیات پر حجم و وقت‌گیر است. برای غلبه بر این مشکل و با توجه به ماهیت غیرخطی پاسخ‌ها در این مقاله از یک روش میانگین‌گیری نمایی استفاده شده است.

مراحل روش MPA

در ذیل مراحل روش MPA به طور گام به گام ارائه می‌شود:

۱- انجام تحلیل مقادیر ویژه برای تعیین دوره‌های طبیعی ارتعاش T_n و اشکال مودی ϕ_n

۲- انجام تحلیل Pushover برای هر مود با الگوی توزیع بار $S_n^* = m\phi_n$ و تعیین منحنی برش پایه- تغییر مکان بام

۳- ایده‌آل‌سازی منحنی Pushover به طور منحنی دوخطی

۴- تبدیل منحنی دوخطی Pushover به فرمت $D_n - \frac{F_{sn}}{L_n}$ به وسیله روابط زیر:

$$D_{ny} = \frac{U_{rny}}{\Gamma_n \phi_{rn}} \quad (5)$$

$$\frac{F_{sn}}{L_n} = \frac{V_{bny}}{M_n^*} \quad (6)$$

که در آن M_n^* جرم مؤثر مودال بوده و از این روابط به دست می‌آید:

$$M_n^* = L_n \Gamma_n \quad (7)$$

$$L_n = \sum_{k=1}^N m_k \phi_{kn} \quad (8)$$

جدول ۱: مشخصات مقاطع قاب ۶ طبقه.

مقاطع تیرها	B1	IPE 400
	B2	IPE 450
مقاطع ستونها	C1	IPE 400
	C2	IPE 450
	C3	IPE 500
	C4	IPE 550
	C5	IPE 600
	C6	IPE 750×137

جدول ۲: مشخصات مقاطع قاب ۱۸ طبقه.

مقاطع تیرها	B1	2IPE 240
	B2	2IPE 270
	B3	2IPE 270+2PL50×20D135
	B4	2IPE 270+2PL60×22D135
	B5	2IPE 300+2PL30×10D150
	B6	2IPE 300+2PL40×20D150
	B7	2IPE 300+2PL60×22D150
مقاطع ستونها	C1	BOX40×40×12
	C2	BOX45×45×12
	C3	BOX50×50×15
	C4	BOX55×55×15
	C5	BOX60×60×20

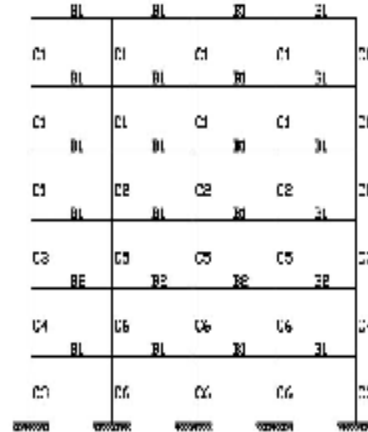
تحلیل دینامیکی غیر خطی (NL-RHA)

برای انجام آنالیز دینامیکی غیرخطی از روش نیومارک به عنوان روش توسعه یافته انتگرال گیری مستقیم به روش شتاب خطی استفاده شده است [۱۱]. برای تعیین میزان دقت روش‌های FEMA و MPA آنالیز دینامیکی غیرخطی با ۷ رکورد زلزله که همگی آنها برای سازگاری با منطقه با روش همپایه کردن طیف، همپایه شده‌اند به نحوی که طیف پاسخ آنها در دوره تناوب 0/1 تا ۳ ثانیه با طیف طرح آئین‌نامه ایران برای خاک نوع II از نظر انرژی سازگاری داشته باشد [۱۲]. مقادیر PGA واقعی و مقیاس شده مربوط به رکوردهای زلزله در جدول (۳) ارائه شده است.

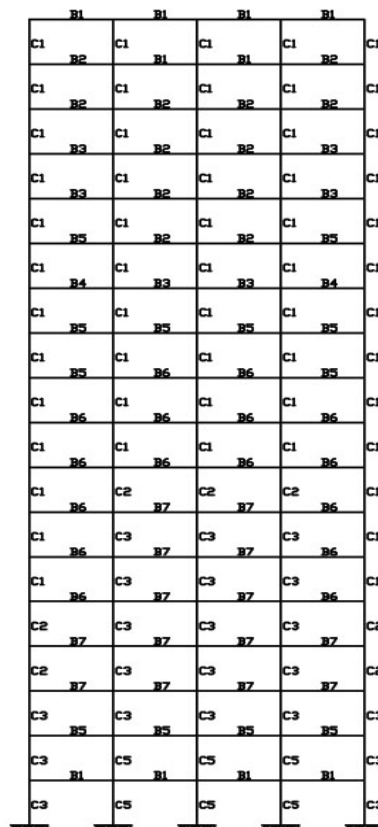
اعمال روش‌ها و بررسی نتایج

در این بخش با اعمال الگوهای بار موجود در FEMA273 و الگوهای بار مودی مورد استفاده در روش MPA روی مدل‌های انتخاب شده، به مقایسه دقت و توانایی این روش‌ها در برآورد پاسخ‌های سازه، نسبت به نتایج حاصل از تحلیل دینامیکی غیرخطی به عنوان روش دقیق، پرداخته می‌شود. عوامل پاسخ که از نتایج تحلیل‌ها استخراج شده و مورد مقایسه قرار گرفته‌اند عبارتند از: حداکثر تغییر مکان طبقات، به صورت درصدی از ارتفاع قاب و در صد تغییر مکان نسبی طبقات.

ساختمان‌های منظم (بدون اثر پیچش) هستند و پی‌ها نیز صلب هستند. برای تحلیل و طراحی قاب‌ها از نرم‌افزار SAP2000 استفاده شده است. برای بارگذاری قاب‌ها از آئین‌نامه UBC97 استفاده شده و آیین‌نامه طراحی AISC-ASD89 است. به اشکال (۱و۲) جداول (۱و۲) مراجعه شود.



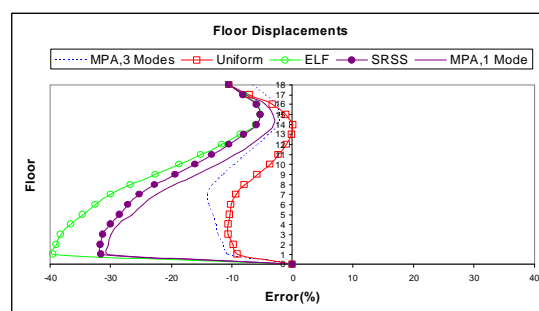
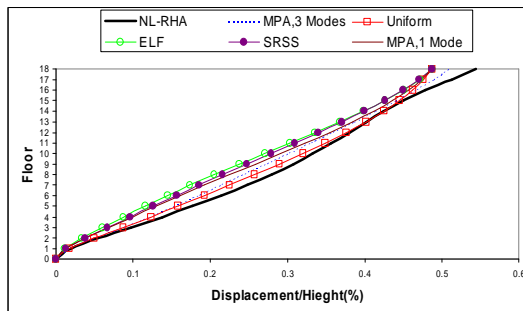
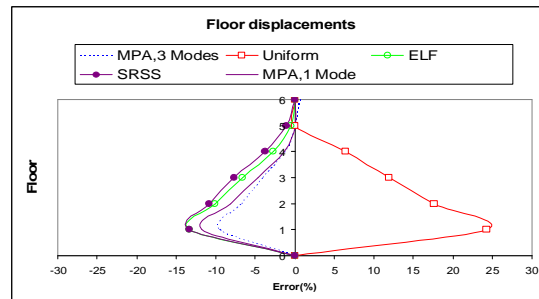
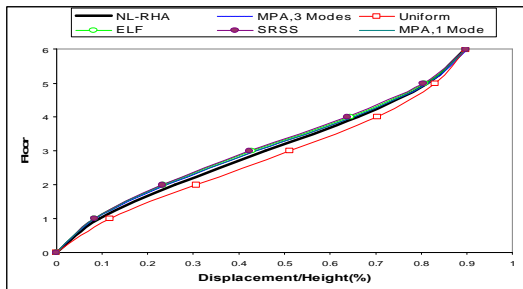
شکل ۱: شکل هندسی قاب ۶ طبقه.



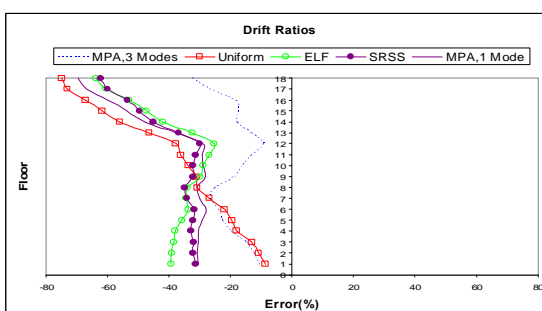
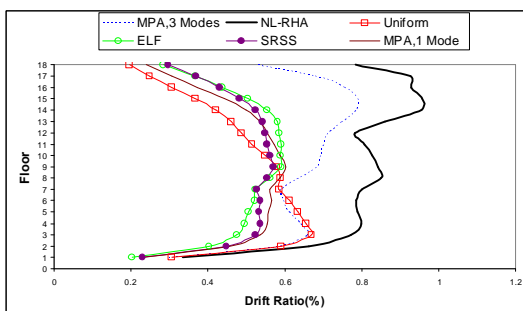
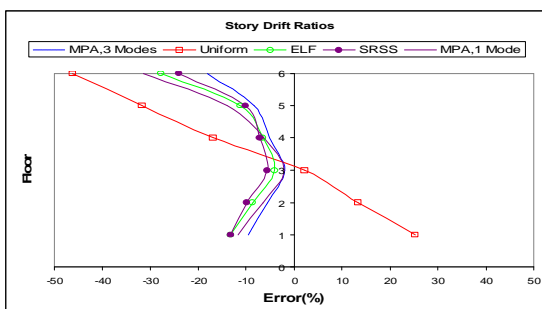
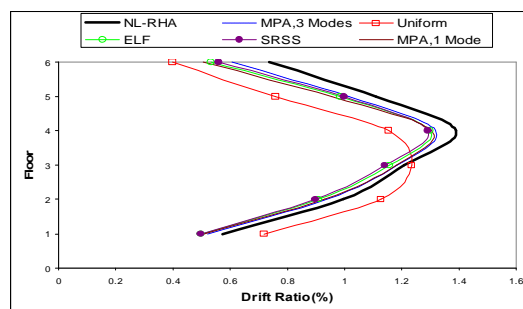
شکل ۲: شکل هندسی قاب ۱۸ طبقه.

جدول ۳: شتاب نگاشت های همپایه شده با طیف طرح آیین نامه ایران برای خاک نوع II [۸].

شماره رکورد	نام رکورد	مقدار واقعی بر حسب g	مقدار PGA مقیاس شده بر حسب g
1	Elcentro	0.3188	0.4644
2	Kobe	0.8213	0.4466
3	Northridge	0.5143	0.4511
4	Manjil	0.5179	0.7546
5	Tabas	0.9154	0.696
6	Naghan	0.7095	0.6782
7	Lomapieta	0.4794	0.521



شکل ۳: الف) تعیین جابجایی طبقات با استفاده از برآوردهای MPA و FEMA (ب) خطاها در برآورد [۸].



شکل ۴: الف) تعیین جابجایی نسبی طبقات با استفاده از برآوردهای MPA و FEMA (ب) خطاها در برآورد [۸].

بررسی نتایج

در نمودارهای (۳- الف) و (۴- الف) پاسخ‌های محاسبه شده از روش‌های مختلف (الگوهای بار متفاوت) و همچنین نتایج حاصل از تحلیل تاریخچه پاسخ غیرخطی (NL-RHA) به عنوان روش دقیق و مبنای مقایسه نشان داده شده است. محور قائم، نشان‌دهنده شماره طبقه و محور افقی مقدار پاسخ را نشان می‌دهد. در نمودارهای (۳- ب) و (۴- ب) مقدار خطای این روش‌ها بر محور افقی به شکل درصد نشان داده شده است.

در قاب ۶ طبقه مشاهده می‌شود که به دلیل کوتاه مرتبه بودن سازه، مودهای بالاتر چندان در پاسخ سازه نقش مهمی ندارند و می‌توان از اثرات آنها چشم‌پوشی کرد و با دو توزیع متفاوت بار FEMA به دقت قابل قبول در برآورد جابه‌جایی حداکثر و درصد جابه‌جایی نسبی طبقات رسید.

در قاب ۱۸ طبقه، روش MPA با سه مود در برآورد جابه‌جایی حداکثر طبقات دقت بیشتری نسبت به الگوهای بار FEMA بخصوص الگوهای SRSS و ELF را نشان می‌دهد و محافظه‌کارانه‌تر است. اثرات مودهای بالاتر در پاسخ سازه در این قاب اثر قابل توجهی را از خود نشان می‌دهند. الگوهای بار FEMA و به طور خاص الگوی بار یکنواخت (Uniform)، در برآورد جابه‌جایی نسبی خطای بزرگی یعنی تا ۷۵ درصد خطا را نشان می‌دهد که نشانگر شکست این الگو در برآورد جابه‌جایی نسبی در این مدل است.

نتایج

۱- الگوی بار یکنواخت (Uniform) در برآورد جابه‌جایی طبقات مناسب است، ولی در برآورد جابه‌جایی نسبی طبقات محافظه‌کارانه ناست. است یا نیست؟

مراجع

- 1 - Naeim, F. (2000). "The seismic design hand book, chapter 15, Performance Based Seismic Engineering." Van Nostrand,
- 2 - Applied Technology Council, (1996). "Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings." Report ATC - 40.
- 3 - FEMA, (1997). "NEHRP guidelines for the seismic rehabilitation of buildings." FEMA 273, and "NEHRP Commentary on the guidelines for the seismic rehabilitation of buildings", FEMA 274. Federal Emergency Management Agency, Washington D.C.

۲- الگوهای بار FEMA جابه‌جایی نسبی طبقات را خیلی کمتر نشان می‌دهند و منجر به پاسخ‌های غیر قابل قبول با خطای زیاد می‌شوند.

۳- به طور کلی خطای الگوهای بار FEMA و روش MPA در برآورد میزان جابه‌جایی طبقات کمتر از برآورد جابه‌جایی قبیل جابه‌جایی طبقات و جابه‌جایی نسبی طبقات ارائه می‌دهد و منجر به نتایج دست بالایی نسبت به الگوهای بار ثابت FEMA می‌شود.

جایی نسبی طبقات است. البته همان طور که می‌دانیم عامل جابه‌جایی نسبی عامل تأثیرگذارتری در برآورد خسارت در قاب‌های خمشی است.

۴- هر چه تعداد طبقات سازه بیشتر می‌شود، تأثیر در نظر گرفتن مودهای بالاتر بخصوص در طبقات بالایی زیادتیر می‌شود. این تأثیر در برآورد جابه‌جایی نسبی طبقات بیشتر دیده می‌شود. اغلب سه مود اول دقت خوبی دارد.

۵- با مقایسه نتایج حاصل از روش MPA با آنالیز دینامیکی غیرخطی مشاهده می‌شود که روش MPA تخمین به نسبت خوبی از عوامل پاسخ سازه از قبیل جابه‌جایی طبقات و جابه‌جایی نسبی طبقات ارائه می‌دهد.

۶- علاوه بر خود سازه و خصوصیات آن، نوع حرکت زمین و شدت آن در نتایج حاصل از روش MPA مؤثر هستند، زیرا در تعیین جابه‌جایی هدف از تغییر مکان حداکثر سیستم‌های یک درجه آزادی غیرخطی به وسیله روش آنالیز دینامیکی غیرخطی استفاده شده است. بنابراین استفاده از رکوردهای زلزله مناسب با محل اهمیت ویژه‌ای دارد.

۷- استفاده از میانگین‌گیری نمایی به دلیل ماهیت غیرخطی عوامل پاسخ در آنالیز دینامیکی غیرخطی، منطقی به نظر می‌رسد و به طور قابل توجهی از حجم محاسبات می‌کاهد.

- 4 - Shakeri, k. (2006). *Optimum Modal Pushover Analysis for seismic assessment of structures*, Thesis for PhD . Dept of Civil Eng, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.
- 5 - Noshadravan, A. (2002). *Capacity Spectrum Method in Performance Based Design of High Rise Buildings*, Thesis for Master of Science. Tehran university, Faculty of Engineering, Tehran, Iran.
- 6 - Chopra, A. K. (1995). *Dynamics of Structures: Theory an applications to Earthquake Engineering*, Prentice Hall, New Jersey.
- 7 - Chopra, A. K. and Goel, R. K. (2001). *A modal pushover analysis procedure to estimate seismic demands for buildings: Theory and preliminary evaluation*, PEER Report 2001/03, Pacific Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California, Berkeley, January 2001.
- 8 - Rezaei Abyaneh, R. (2006). *Investigation of Lateral Load Pattern Effects on Nonlinear Static Analysis of Moment Resistant Frames*, Thesis for Master of Science. Dept of Civil Eng, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.
- 9 - FEMA, (2000). *Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings*, FEMA 356. Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.
- 10 - FEMA, (2005). *Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures*, (ATC-55 Project) FEMA 440. Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.
- 11 - Bathe , K. J . (1996). *Finite Element Procedure*, Prentice – Hall.
- 12 - International Institute Of Earthquake Engineering and Seismology, (2002). *Iranian code for retrofit and rehabilitation of buildings*.

واژه‌های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

- 1 - Pushover
- 2- Applied Technology Council
- 3- Federal Emergency Management Agency
- 4- Nonlinear Static Procedure
- 5- Uniform
- 6- Equivalent Lateral Force (ELF)
- 7- Modal Pushover Analysis