

بررسی آنالیز غیر خطی استاتیکی قاب‌های بتنی نامنظم در ارتفاع

محمدعلی نامجویان¹ محمدرضا کریمیان² سینا جبارزاده³ رضا رهگذر⁴

1- گروه مهندسی سپاسد

manamjuyan@yahoo.com

2- گروه مهندسی سپاسد

moharezka@yahoo.com

3- کارشناسی ارشد مهندسی عمران سازه، گروه مهندسی عمران، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی کرمان

jabarzadesina@gmail.com

4- دانشیار، عمران، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ایران

چکیده

با توسعه کاربرد تحلیل پوش آور در سال های اخیر روش های پوش آور پیشرفته متعددی برای لحاظ کردن اثر مودهای بالاتر و همچنین اثر تغییر مشخصات مودال سازه در طول تحلیل ناشی از تسلیم اعضاء پیشنهاد شده است. روش های پیشنهادی عموماً برای لحاظ کردن اثرات مودهای بالاتر از چندین تحلیل پوش آور با الگوی بارهای متناسب با اشکال مودی سازه استفاده می نمایند و نتایج حاصل از این تحلیل ها با یکدیگر ترکیب می شوند. در روش های رایج، تحلیل استاتیکی غیرخطی سازه تحت الگوی بار جانبی از پیش تعریف شده قرار می گیرد و بار جانبی بطور افزایشی به سازه اعمال می شود تا سازه به تغییر مکان هدف برسد. فرض اساسی در روش های تحلیل استاتیکی غیرخطی رایج این است که پاسخ سازه توسط مود اصلی آن کنترل می شود. این فرض در سازه های منظم و کم ارتفاع دقت قابل قبولی داشته، اما برای سازه های نامنظم و مرتفع، به دلیل مشارکت مودهای بالاتر سازه در پاسخ لرزه ای، جواب های دقیقی را به دست نمی دهد. در این تحقیق، پاسخ های لرزه ای قاب های بتن آرمه دو بعدی نامنظم در ارتفاع با استفاده از روش های رایج (FEMA356) و روش تحلیل استاتیکی غیرخطی مودال محاسبه شده و ضمن مقایسه با مقادیر متناظر بدست آمده از تحلیل تاریخچه زمانی نیز با روش پیشنهادی مقایسه می شوند. قاب های نامنظم مورد استفاده دارای نامنظمی از نوع عقب رفتگی در ارتفاع بوده که این عقب رفتگی تقریباً در میانه ارتفاع قابها اتفاق می افتد. معیارهای ارزیابی شامل جابجایی حداکثر طبقات، تغییر مکان نسبی طبقات می باشند.

کلمات کلیدی: قاب های نامنظم، تحلیل استاتیکی غیر خطی مودال، تحلیل تاریخچه زمانی، روش دو مرحله ای پوش -

آور مودال

مقدمه

در طول ده گذشته تحلیل پوش آور به عنوان یک ابزار کاربردی مناسب نقش موثری در توسعه مهندسی زلزله بر مبنای عملکرد ایفا کرده و به طور گسترده ای در آیین نامه ها و دستورالعمل های ارزیابی لرزه ای سازه ها

مورد استفاده قرار گرفته است. با روایج یافتن تحلیل پوش آور به صورت حرفه ای در بین مهندسان، مطالعات گسترده ای در خصوص مزایا و معایب این روش صورت گرفته است.

Jianmeng و همکاران یک روش تحلیل پوش اور مودال اصلاح شده را پیشنهاد کرده اند که توزیع دوباره نیروهای اینرسی را بعد از تسلیم شدگی سازه در نظر گرفته اند. روش آنها باعث رسیدن به نتایج دقیقتری نسبت به روشهای تحلیل استاتیکی غیر خطی مودال و تحلیل پوش آور رایج برای سازه ها شده است [1].

با این حال در روش های پوش آور مودال با چند بار اجرا چه در حالت استفاده از الگوی بار ثابت و چه در حالت استفاده از الگوی بار متغیر به هنگام شونده، مودها مستقل از هم لحاظ شده و اثرات تسلیم اعضاء در یک مود در مودهای دیگر منعکس نمی شود. در واقع این روش ها توانایی لحاظ کردن اثرات اندرکنش بین مودها در ناحیه غیر خطی الاستیک را ندارد همچنین استفاده از قوانین ترکیب مودال الاستیک در ناحیه غیر الاستیک معتبر نمی باشد و از طرفی دیگر اجرای چندین تحلیل پوش آور مشخصاً پیچیده تر از اجرای یک تحلیل پوش آور می باشد همچنین از آنجایی که پاسخ کلی سازه در انتهای تحلیل از ترکیب نتایج حاصل از مودهای مختلف به دست می آید لذا امکان تعقیب و بررسی نتایج تحلیل، ترتیب و توالی وقوع مکانیسم های محلی و کلی در طول تحلیل غیر ممکن می باشد. به همین خاطر برخی محققین روش های پوش آور مودال با یک بار اجرا را پیشنهاد دادند که از قوانین ترکیب مودال برای ترکیب نیروهای مودال استفاده می شود [211].

همچنین به منظور لحاظ کردن اثرات تغییر مشخصات مودال سازه ناشی از تسلیم اعضاء در طول تحلیل، روش های پوش آور مودال با یک بار اجرا با الگوی بار به هنگام شونده پیشنهاد شده است [3]. در این روش، در هر مرحله بارگذاری الگوی بار از روی ترکیب نیروهای مودال لحظه ای سازه تعیین شده و از طریق یک تحلیل پوش آور واحد بر سازه اعمال می شود (یک بار اجرا). در الگوی بار اعمالی اثرات مودهای بالاتر و اندرکنش بین آنها در ناحیه غیر الاستیک لحاظ شده است همچنین رفتار سازه، ترتیب و توالی وقوع مفصل های پلاستیک، مکانیسم های محلی و کلی در طول تحلیل به راحتی از طریق تحلیل پوش آور با یک بار اجرا قابل تعقیب و بررسی می باشد.

در تحقیقی دیگر در سال 2008، یک روش تحلیل پوش اور پیشنهاد شده است که اثر مودهای بالاتر ارتعاشی را در یک الگوی توزیع بار متناسب با جرم لرزه ای در تراز کفها و بام لحاظ کرده است [4]. همچنین در مطالعه ای دیگر در سال 2008، *Saffari* و همکاران روشی ارائه دادند که طبق آن روش بار-گذاری سازه منطبق بر خصوصیات دینامیکی سازه در هر گام از تحلیل می باشد [5].

در سال 2012 *Tripathy* و همکاران روند تعیین جابه جایی هدف را در سازه های نامنظم بهبود دادند. در این روش آن ها بر مبنای آیین نامه *FEMA356* الگوی باری بر مبنای توزیع یکسان جرم در طبقات را پیشنهاد دادند [6].

Khoshnoudian و همکاران در سال 2012 روش آنالیز پوش آور پی در پی یا متوالی را بهبود بخشیدند و تحت عنوان آنالیز پوش آور مودال اصلاح شده بیان کردند. آن ها در این روش شکل های مودی سازه را نسبت

به درصد مشارکت جرم مودی در تحلیل وارد کردند. نتایج تحقیق آن‌ها حاکی از دقت این روش و رسیدن پاسخ‌ها به پاسخ‌های حاصل از تحلیل تاریخچه زمانی بود [7].

Shakeri و همکاران در سال 2012 روشی بر طبق آنالیز پوش آور به‌هنگام شونده برای تحلیل سازه‌هایی که در پلان نامتقارن هستند پیشنهاد دادند. در این روش آن‌ها از الگوی بار گذاری بر مبنای توزیع نیروی برشی در طبقات استفاده کردند. همچنین آن‌ها اثر مودهای الاستیک و پیچشی سازه را نیز مد نظر قرار دادند و نتایج آن‌ها حاکی از دقت مناسب روش فوق نسبت به روش‌های دیگر و نزدیک شدن پاسخ به تحلیل تاریخچه زمانی بود [8].

برخورداری و همکاران در سال 87 روی الگوهای بار مودی در روش تحلیل استاتیکی غیرخطی مودال تمرکز کرده‌اند و تاثیر سه مود اول لرزه‌ای سازه را در قابهای خمشی بتنی بلند مرتبه برای پارامترهای جابجایی ماکزیمم و جابجایی نسبی طبقات مورد بررسی قرار داده‌اند و نتایج را با تحلیل دینامیکی غیر خطی مقایسه کرده‌اند. آنها نتیجه گرفتند که در نظر گرفتن مودهای بالاتر لرزه‌ای باعث رسیدن به پاسخ‌هایی دقیقتر، برای ساختمانهای مرتفع شده است [9].

در این تحقیق به منظور افزایش دقت روش تحلیل استاتیکی غیر خطی مودال یک روش دو مرحله‌ای با در نظر گرفتن مودهای غیر الاستیک با الگوی بار گذاری متفاوت در هر مرحله پیشنهاد شده است. در این تحقیق، قاب‌های بتن آرمه دو بعدی نامنظم در ارتفاع با استفاده از روش‌های رایج (FEMA356) و روش تحلیل استاتیکی غیرخطی مودال تحلیل شده و ضمن مقایسه با مقادیر متناظر بدست آمده از تحلیل تاریخچه زمانی نیز با روش پیشنهادی مقایسه شده است. همچنین در این تحقیق از نرم افزار *IDARC 2D* به منظور انجام تحلیل پوش آور و از نرم افزار *MATLAB* نیز جهت انجام محاسبات مربوطه استفاده شده است.

2. مروری بر انواع روشهای تحلیل استاتیکی غیر خطی

1- تحلیل استاتیکی غیر خطی بر مبنای FEMA 356

یک روش مستقیم عددی برای محاسبه تغییر مکان هدف می باشد که در آن نیازی به تبدیل منحنی ظرفیت به مختصات طیفی نمی باشد و در آیین نامه FEMA به استفاده از این روش توصیه شده است. در این روش با استفاده از یکسری ضرایب، تغییر مکان هدف محاسبه می گردد به گونه‌ای که، پاسخ الاستیک خطی سیستم یکدرجه آزاد معادل را با ضرب در ضرایب C_0 تا C_3 برای تخمین ماکزیمم جابجایی کل سازه اصلاح می کنند که به آن جابجایی هدف گویند. در این روش پس از ساخت منحنی دو خطی از منحنی ظرفیت، سختی بخش فرا الاستیک K_s و سختی الاستیک موثر K_e را طبق ضوابط موجود در FEMA356 به دست آورده و سپس پر یود اصلی موثر (T_e) محاسبه می گردد.

2- تحلیل استاتیکی غیر خطی مودال

اساس این روش بر اساس ترکیب مقادیر پاسخ ماکزیمم تعیین شده در تحلیل های پوش اور جداگانه (برای چند مود اول) با استفاده از قاعده ترکیب مودال می باشد. در این روش با استفاده از مفهوم سازه یک درجه آزاد معادل برای هر مود و با اعمال شتابنگاشت زلزله دلخواه، تغییر مکان حداکثر سازه یک درجه آزاد تحت اثر هر شتابنگاشت محاسبه می شود و با توجه به مقدار به دست آمده، تغییر مکان هدف در سازه اصلی در هر مود بدست می آید. سپس سازه در هر مود بطور جداگانه تا رسیدن به تغییر مکان هدف مشخص شده تحت نیروهای متناسب با شکل مود مورد نظر، تحلیل استاتیکی غیر خطی می شود. نهایتاً پاسخهای مطلوب با ترکیب پاسخهای استخراج شده از تحلیل استاتیکی غیر خطی در هر مود تعیین می گردد.

3. روش دو مرحله ای تحلیل پوش آور مودال

با توجه به نتایج تحقیقات ارائه شده از روش تحلیل استاتیکی غیر خطی مودال، ملاحظه شد که نتایج به دست آمده از این روش در سطوح عملکرد ایمنی جانی در بر آورد پارامترهای لرزه ای که مورد مطالعه قرار گرفته است دارای دقت بالایی بوده و نتایج حاصل از این روش در این سطح عملکرد در مقایسه با تحلیل تاریخیچه زمانی غیر خطی تطابق خوبی دارد اما با افزایش سطح عملکردی سازه به عدم فروریزش نتایج دقت کافی نداشته و با خطای بالایی همراه است.

مرحله اول

1) انجام تحلیل استاتیکی پوش آور تحت الگوی بار مثلثی در سطح عملکرد فروریزش بر اساس آیین نامه FEMA-356

2) استخراج خصوصیات اشکال مودی سازه بعد از انجام تحلیل پوش آور و تعیین دیگر خصوصیات دینامیکی سیستم.

3) تعیین الگوی بار جانبی متناسب با جرم و بر مبنای مودهای ارتعاشی استخراج شده سازه از تحلیل پوش آور (بند ب) مطابق فرمول زیر:

$$S_n = m (\varphi_n)_{new} \quad (1-5)$$

4) تعیین الگوی توزیع نیروهای جانبی در هر مود ارتعاشی با رابطه زیر و اعمال آن به سازه:

$$F_{ij} = \Gamma_i \varphi_{ij} m_j S_a(i) \quad (2-5)$$

5) انجام تحلیل استاتیکی غیر خطی مودال با الگوی بار جانبی متناسب با جرم و شکل مود غیر الاستیک در هر مود و رسم منحنی ظرفیت سازه و ایده آل سازی منحنی ظرفیت به صورت منحنی دو خطی.

6) تبدیل منحنی ظرفیت دو خطی به منحنی دوخطی نیرو - تغییر مکان $(D_n - \frac{F_{sn}}{L_n})$. این منحنی نشان دهنده رفتار غیر خطی سازه یک درجه آزاد با جرم واحد است.

7) محاسبه تغییر مکان ماکزیمم سیستم یک درجه آزاد (D_n) در هر مود از روی طیف پاسخ تغییر مکان رکوردهای لرزه‌ای و محاسبه میانگین نمایی تغییر مکان حداکثر رکوردهای لرزه‌ای با استفاده از رابطه زیر:

$$D = \exp \left[\frac{\sum_{i=1}^n \ln(D_i)}{n} \right] \quad (3-5)$$

8) محاسبه تغییر مکان هدف در هر مود ارتعاشی با استفاده از رابطه زیر:

$$U_m = \Gamma_n \phi_n \overline{D_n} \quad (4-5)$$

انجام تحلیل استاتیکی غیر خطی مودال بر روی سازه در هر مود تا رسیدن به تغییر مکان هدف (U_m) .

9) تعیین پاسخ سازه در هر مود ارتعاشی.

مرحله دوم

10) در مود غالب (مودی که در مرحله قبل بیشترین اثر را در مکانیزم تشکیل مفصل پلاستیک نتیجه داده است) جابه‌جایی حداکثر طبقات را به عنوان شکل مودی سازه در نظر می‌گیریم.

11) تعیین الگوی بار جانبی بر مبنای جابه‌جایی حداکثر طبقات مطابق با رابطه زیر:

$$S^* = m(U_n) \quad (5-5)$$

12) تعیین الگوی توزیع نیروهای جانبی:

$$F_{nj} = \Gamma_n \phi_{nj} m_j S_a(n) \quad (6-5)$$

13) انجام تحلیل استاتیکی غیر خطی مودال با الگوی بار جانبی به دست آمده از مرحله قبل و رسم منحنی ظرفیت سازه و ایده آل سازی منحنی ظرفیت به صورت منحنی دوخطی و تبدیل این منحنی به منحنی دوخطی

$$\text{نیرو - تغییر مکان } (D_n - \frac{F_{sn}}{L_n})$$

14) محاسبه تغییر مکان ماکزیمم سیستم یک درجه آزاد (D_n) و محاسبه تغییر مکان هدف با استفاده از رابطه زیر:

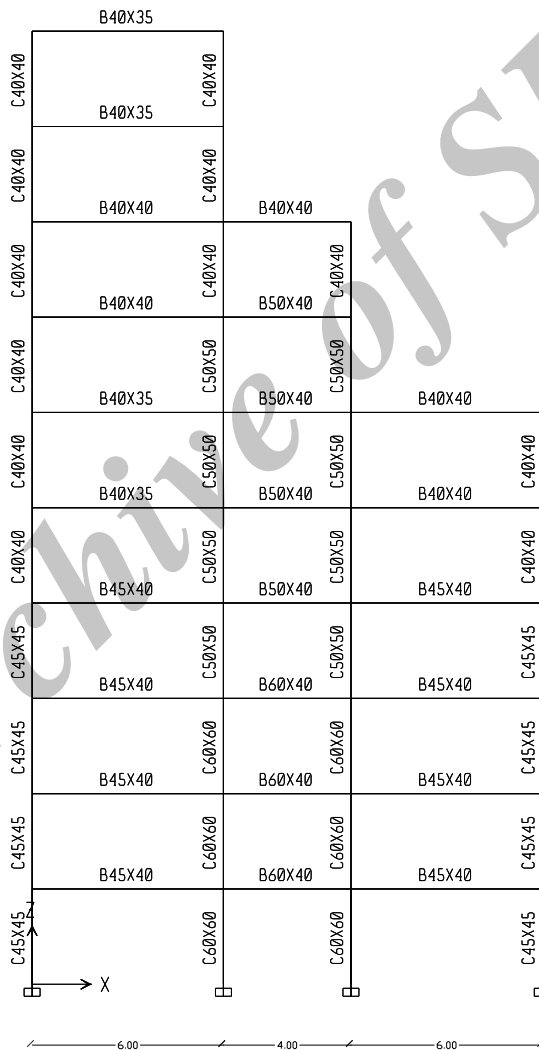
$$U_{\max} = \Gamma D_{\max} U_e \quad (7-5)$$

15) تعیین پاسخ کل سازه با ترکیب پاسخ های به دست آمده از مرحله اول برای تمامی مودها با پاسخ به دست آمده از مرحله دوم با استفاده از قاعده ترکیب مودال SRSS.

$$r_{total} = \left(\sum_{n=1}^j (r_n^2 + r_e^2) \right)^{1/2} \quad (8-5)$$

4. مثال عددی (سازه نامنظم 10 طبقه)

قاب دویبعدی مورد نظر یک قاب ده طبقه نامنظم با دو دهانه عقب رفتگی از میان ارتفاع قاب با مقاطع مورد استفاده مطابق با شکل زیر می باشد.



شکل 1- قاب 10 طبقه نامنظم

در این فصل روش‌های تحلیل استاتیکی غیر خطی بر مبنای FEMA-356 در سه سطح عملکرد و روش تحلیل استاتیکی غیرخطی مودال موجود و روش پیشنهادی و تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی به سازه‌های مورد مطالعه اعمال شده است. در روش استاتیکی غیر خطی بر مبنای FEMA-356، از الگوی بار مثلثی معکوس استفاده شده است. همچنین برای مقایسه روش‌های استاتیکی غیرخطی موجود و پیشنهادی، از روش تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی نیز به‌عنوان روش دقیق استفاده شده است. در این روش از شش رکورد زلزله مطابق با جدول (1) استفاده شده است که همگی این شتاب‌نگاشت‌ها نسبت به طیف طرح آیین نامه 2800 ایران همپایه شده‌اند.

جدول 1- مشخصات رکوردهای لرزه ای

No	Record ID	Earthquake	M	R(km)	PGA(g)
1	NGA0770	Loma Prieta,1989-10-18,00:05	6.9	6.1	0.563
2	NGA0006	Imperial Valley-02,1940-05-19,04:37	7.0	8.3	0.313
3	NGA0266	Victoria,Mexico,1980-06-09,03:28	6.33	36.67	0.15
4	NGA0367	Coalinga-01,1983-05-02,23:42	6.36	9.98	0.38
5	NGA0996	Northridge-01,1994-01-17,12:31	6.69	16.99	0.273
6	NGA0029	Parkfield,1966-06-28,04:26	6.19	34.01	0.246

نتایج حاصله از روش استاتیکی غیر خطی بر مبنای FEMA-356:

در این روش پس از انجام تحلیل استاتیکی غیر خطی تحت الگوی بار جانبی تعریف شده در FEMA 356 که در این تحقیق از الگوی بار مثلثی شکل استفاده شده است. منحنی ظرفیت سازه رسم می‌شود، پس از رسم منحنی‌های ظرفیت و منحنی‌های دو خطی ایده‌آل که از تحلیل پوش اور قاب‌ها بدست آمده‌اند، سختی جانبی موثر و سختی بخش فراالاستیک را با استفاده از نرم افزار MATLAB بدست آورده ایم. بعد از آن تغییر مکان هدف سازه با ضرب کردن ضرایب ثابت C_0 تا C_3 در پاسخ الاستیک خطی سیستم یک درجه آزادی معادل به دست می‌آید.

پارامترهای به دست آمده بعد از رسم منحنی ظرفیت و منحنی دوخطی ایده‌آل برای سازه‌های مورد مطالعه در جدول (2) نشان داده شده است:

جدول 2- پارامترهای محاسبه شده برای قابهای مورد مطالعه از FEMA-356

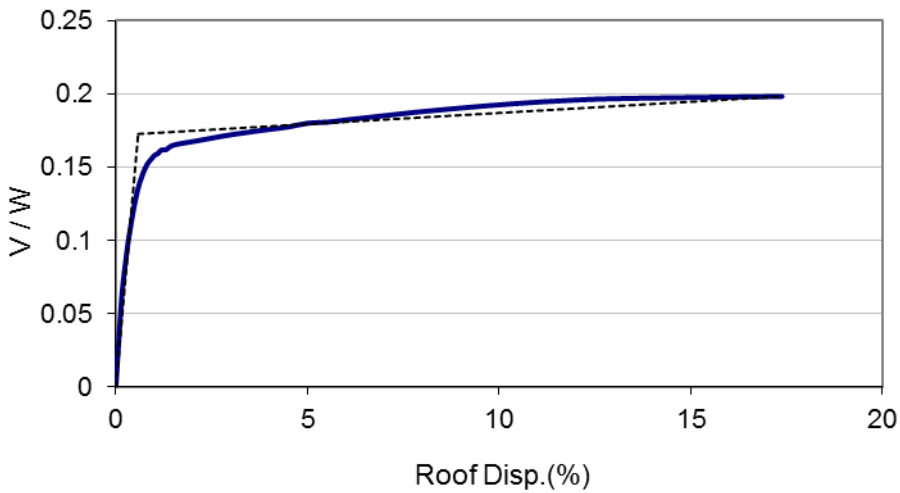
پارامترهای محاسبه شده	قاب 10 طبقه نامنظم
Ki	0.4103
Ke	0.2975
Ti	1.15606
Te	1.3576
Sa	0.4496
Vy	0.1726
Dy	0.5801

مقادیر تغییر مکان هدف برای سطوح مختلف عملکردی در سازه‌های مورد نظر محاسبه و در جدول 3 ارائه شده است:

جدول 3- تغییر مکان هدف برای قاب‌های مورد مطالعه از روش ضرایب تغییر مکان در FEMA-356 برحسب میلی‌متر

قاب‌های مورد مطالعه	سطح عملکرد		
	FEMA-356-IO	FEMA-356-LS	FEMA-356-CP
10 طبقه نامنظم	267.6593	294.4252	321.1912

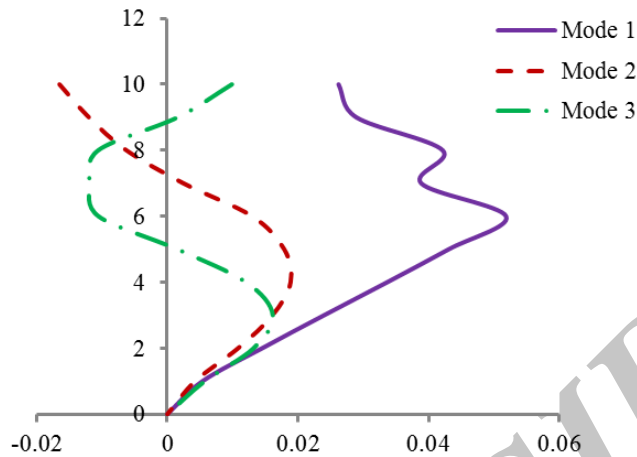
سازه‌های مورد نظر را تا رسیدن به تغییر مکانهای هدف بدست آمده از جدول 3 با همان الگوی بار FEMA-356 پوش داده می‌شود و در تغییر مکان‌های هدف مربوطه نیازهای لرزه‌ای مانند حداکثر تغییر مکان طبقات، نسبت تغییر مکان نسبی طبقات ثبت می‌شوند که در ادامه نشان داده شده است. نمودارهای ظرفیت سازه برای در شکل‌های زیر نشان داده شده است.



شکل 2- منحنی ظرفیت قاب 10 طبقه نامنظم- الگوی بار مثالی

تحلیل استاتیکی غیرخطی مودال:

در این روش سازه تحت الگوی بار متناسب با هر مود و برای هر الگوی بار جداگانه تحت تحلیل استاتیکی غیرخطی مودال قرار می‌گیرد سپس برای هر قاب و برای هر مود بطور جداگانه مقادیر تغییر مکان سازه یکدرجه آزاد از روی طیف پاسخ رکوردهای لرزه ای مختلف محاسبه شده و با استفاده از فرمول ارائه شده در بخش مذکور به تغییر مکان انتهایی سازه اصلی تبدیل می‌شود. در نهایت سازه دوباره تحت تحلیل استاتیکی غیرخطی مودال در هر مود و تحت الگوی بار مربوطه به همان مود تا رسیدن به تغییر مکان انتهایی سازه اصلی قرار می‌گیرد و تقاضاهای لرزه‌ای در هر مود در این لحظه ثبت شده و با استفاده از قاعده ترکیب مودال پاسخها از ترکیب پاسخ مودهای مختلف محاسبه می‌شوند.



شکل 3- الگوی بارگذاری متناسب با مودها - سازه 10 طبقه

با توجه به الگوهای بارگذاری جانبی برای سازه‌های مورد نظر متوجه می‌شویم که در محل نامنظمی در ارتفاع یک شکستگی در نمودارها رخ می‌دهد به خصوص در مود اول. علت این نامنظمی را می‌توان تغییر ناگهانی در جرم طبقه بیان کرد، که این مورد از شکل‌های کاملاً مشهود است. مقادیر تغییر مکان هدف برای سازه‌های فوق در هر مود در جدول (3-7) بیان شده است.

جدول 4- تغییر مکان هدف برای قاب‌های مورد مطالعه در روش استاتیکی غیر خطی در هر مود

بر حسب میلی‌متر

قاب‌های مورد مطالعه	تغییر مکان هدف		
	Mode 1	Mode 2	Mode 3
10 طبقه نامنظم	485.95	426.81	149.862

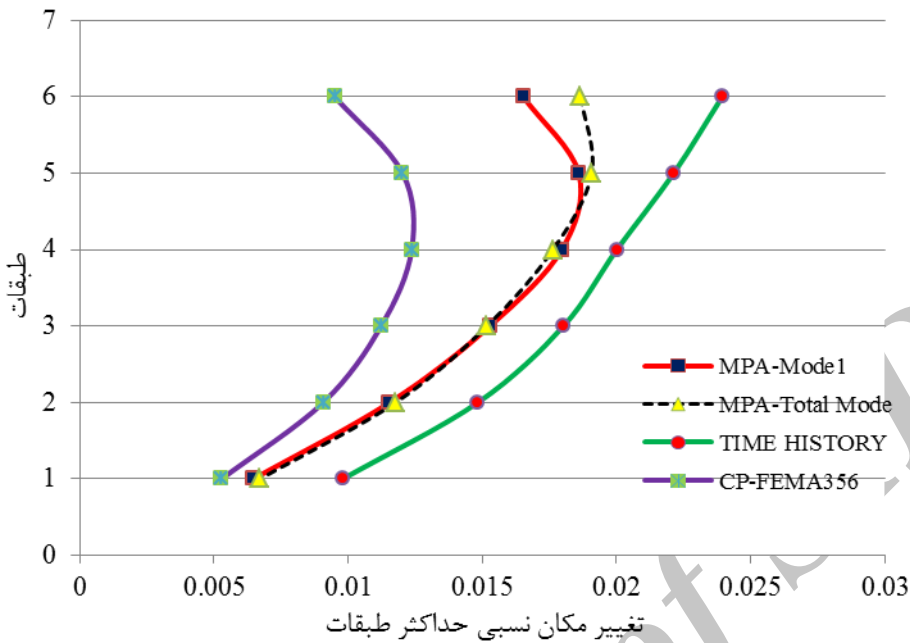
سپس هر سازه را تحت الگوی بارگذاری جانبی متناسب با مود مد نظر و تا تغییر مکان انتهایی سازه بدست آمده طبق جدول (4) پوش می‌دهیم و سپس مقادیر تغییر مکان ماکزیمم طبقات، نسبت تغییر مکان نسبی طبقات در محل تغییر مکان هدف استخراج می‌کنیم، با استفاده از قاعده ترکیب مودال، نتایج به دست آمده در مودهای مختلف را با هم ترکیب می‌کنیم. نتایج بدست آمده از تحلیل استاتیکی غیرخطی مودال سازه‌ها در ادامه نشان داده شده و با نتایج دیگر تحلیل‌ها مقایسه شده است.

انجام تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی:

برای بررسی دقت روش‌های فوق، از روش دقیق تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی استفاده شده است. رفتار غیرخطی برای اعضاء همانند رفتار غیر خطی در نظر گرفته شده برای تحلیل‌های استاتیکی غیرخطی می‌باشد تا از بروز خطا در نتایج جلوگیری شود. میرایی در نظر گرفته شده برابر 5٪ می‌باشد. پاسخ مورد نظر از تحلیل فوق به صورت میانگین نتایج حاصل از شش رکورد زلزله در نظر گرفته شده می‌باشد. نتایج در ادامه ذکر شده است.

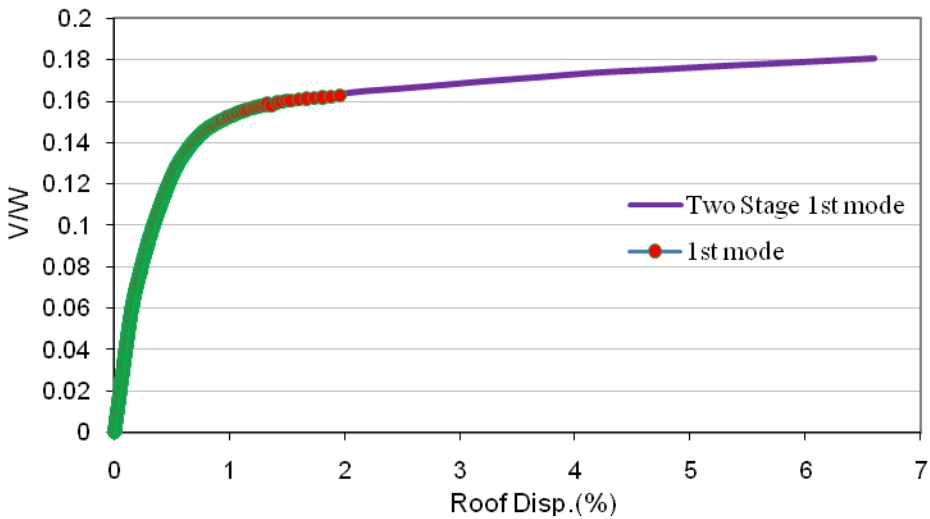
انجام روش پیشنهادی (تحلیل استاتیکی غیر خطی مودال دو مرحله‌ای با در نظر گرفتن مودهای غیرالاستیک)
با بررسی نتایج حاصله از روش تحلیل استاتیکی غیرخطی مودال و همچنین روش FEMA-356، و مقایسه با تحلیل تاریخچه زمانی ملاحظه شد که با افزایش ارتفاع سازه و همچنین افزایش میزان نامنظمی در ارتفاع، نتایج به دست آمده از این دو روش در سطح عملکرد فروریزش دارای دقت قابل قبولی نسبت به روش تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی نمی‌باشد. دلیل این اختلاف را نیز می‌توان چنین بیان کرد، زمانی که سازه تحت زلزله‌های با سطوح بالا قرار می‌گیرد رفتار اعضاء سازه بیش از پیش وارد ناحیه غیر خطی خود شده و به تناسب آن آسیب‌پذیری سازه افزایش یافته و جابه‌جایی‌های سازه افزایش چشمگیری می‌یابد. از طرفی با توجه به اینکه الگوهای بارگذاری به دست آمده از روش استاتیکی غیرخطی مودال بر مبنای این فرض است که سازه در ناحیه الاستیک بوده و این الگوهای بارگذاری جانبی که بر مبنای شکل مودهای الاستیک سازه، به سازه اعمال می‌شوند، نمی‌توانند در تخمین پاسخ‌ها موثر باشند. زیرا مشخص است که وقتی سازه وارد ناحیه غیر خطی می‌شود سازه دچار خسارت شده و سختی سازه کاهش یافته و به تناسب آن خصوصیات دینامیکی سازه نیز دستخوش تغییراتی می‌شود، پس برای غلبه بر این مشکل، روشی دو مرحله‌ای با در نظر گرفتن اثرات مودهای غیر الاستیک در الگوی بارگذاری جانبی پیشنهاد شده است.

در این قسمت تغییر مکان حداکثر و تغییر مکان نسبی طبقات در قاب‌های مورد مطالعه که از روش FEMA-356 برای سطح عملکرد عدم فروریزش، تحلیل استاتیکی غیرخطی مودال با مشارکت مودهای بالاتر در سطح عملکرد ایمنی جانی و تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی به دست آمده‌اند را در شکل‌های زیر نشان داده و آنها را با یکدیگر مقایسه می‌کنیم:

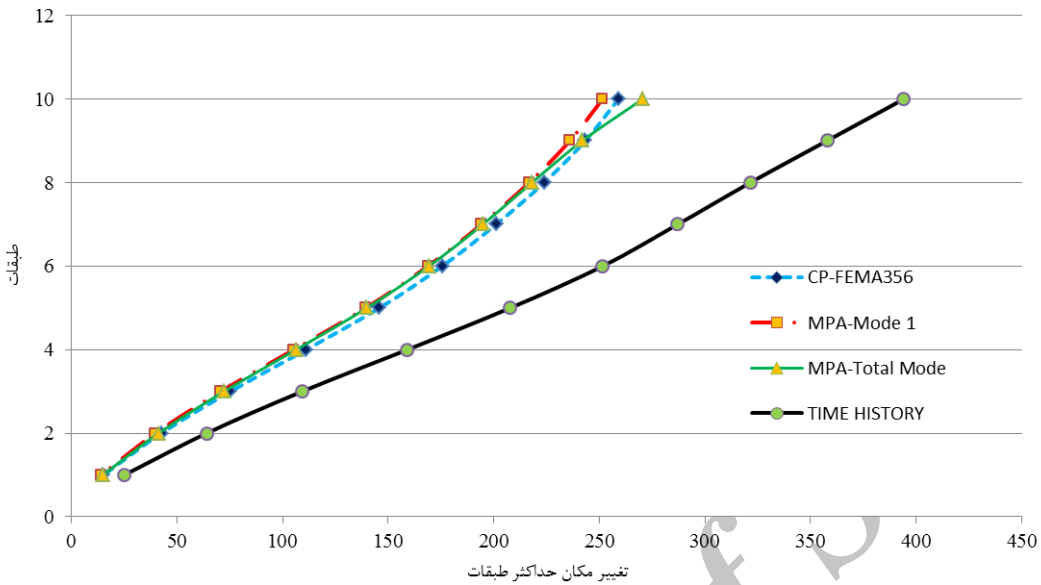


شکل 4- پاسخ تغییر مکان نسبی طبقات برای قاب 6 نامنظم در سطح عملکرد عدم فروریزش

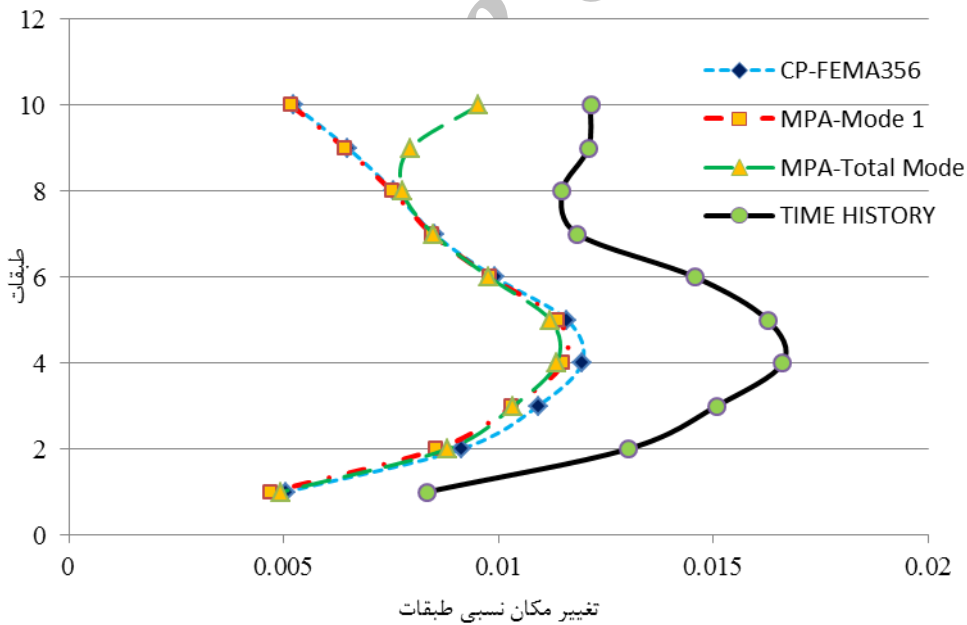
منحنی ظرفیت قاب 10 طبقه نامنظم - الگوی بار مطابق با مود اول در مرحله اول و دوم



شکل 5- منحنی ظرفیت قاب 10 طبقه نامنظم مرحله اول و دوم



شکل 6- پاسخ تغییر مکان حداکثر طبقات برای قاب 10 طبقه نامنظم در سطح عملکرد عدم فروریزش



شکل 7- پاسخ تغییر مکان نسبی طبقات برای قاب 10 نامنظم در سطح عملکرد عدم فروریزش

با توجه به شکل‌های 7-16 و 7-17، برای قاب ده طبقه نامنظم با مقایسه روش FEMA-356، روش استاتیکی غیرخطی مودال با مشارکت مود اول و مودهای بالاتر (سه مود اول) و تحلیل تاریخچه زمانی، با مقایسه نمودارهای بدست آمده برای قاب مورد نظر، ملاحظه می‌شود که اثر مودهای بالاتر با افزایش در ارتفاع بر روی پاسخ تاثیر گذار است به طوری که شاهد پاسخ بهتری نسبت به مود اول خواهیم بود. وجود نامنظمی باعث می‌شود که پاسخ به دست آمده از روش FEMA-356 در طبقات پایینی تخمین دست بالایی نسبت به پاسخ روش استاتیکی غیر خطی مودال بدهد ولی بعد از طبقه مربوط به نامنظمی روش FEMA-356 تخمین دست پایین-تری می‌دهد و تقاضاهای بدست آمده در طبقات آخر اختلاف بیشتری را نشان می‌دهد

جدول 5- مقدار خطای حداکثر جابه جایی طبقات بر حسب درصد

Hight	CP	MPA	Proposed Method
10	34.28608	31.37631	6.381883
9	31.98536	32.38986	5.604073
8	30.37738	32.17707	4.702091
7	29.93864	32.15984	4.136718
6	30.18541	32.70437	4.245289
5	29.79772	32.66833	3.809938
4	30.13986	33.1569	4.706718
3	31.06038	33.83635	6.442255
2	33.5254	35.5615	9.949179
1	39.33146	40.6445	17.90292

نتیجه گیری

از نتایج حاصله مشخص شد که دقت روش تحلیل استاتیکی غیرخطی مودال در برآورد تغییر مکان حداکثر طبقات و تغییر مکان نسبی طبقات در سطح عملکرد عدم فروریزش نسبتا به روش تحلیل تاریخچه زمانی تا حدودی پایین است اما نتایج حاصله از این روش در مقایسه با نتایج حاصله از تحلیل استاتیکی غیرخطی رایج بر مبنای FEMA356 دقت قابل قبولی دارد. همچنین دیده شد که با افزایش ارتفاع سازه دقت روش‌های فوق کاهش می‌یابد. استفاده از روش پیشنهادی دو مرحله‌ای با الگوی بار جانبی متناسب با مودهای غیرالاستیک در هر مرحله به منظور برآورد تغییر مکان حداکثر طبقات برای سطح عملکرد عدم فروریزش، باعث رسیدن به پاسخ‌های محافظه کارانه و دقیق تر نسبت به روش تحلیل استاتیکی غیر خطی مودال با مشارکت مودهای الاستیک شده است و می‌توان گفت روش پیشنهادی با الگوی بار جانبی متناسب با مودهای غیرالاستیک در هر

مرحله از تحلیل در برآورد تغییر مکان حداکثر طبقات برای سطوح عملکرد بالا موثرتر از روش تحلیل استاتیکی غیرخطی مودال بوده و افزایش در ارتفاع قابها و وجود نامنظمی تاثیر ناچیزی بر دقت روش پیشنهادی دو مرحله-ای در برآورد این پارامتر لرزه‌ای داشته‌اند.

مراجع

1. Jianmeng M., Changhai Z. and Lili X., (2008), "An Improved Modal Pushover Analysis Procedure for Estimating Seismic Demands of Structure", *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, Vol. 7, pp.25-31.
2. Jan, T.S. Liu, M.W. & Kao, Y.C. (2004) "An Upper-Bound Pushover Analysis Procedure for Estimating the Seismic Demands of High-rise Buildings", *Engineering Structures*, Vol. 26, pp.117-128.
3. Antoniou, S. Pinho, R. (2004) "Development and Verification of a Displacement-Based Adaptive Pushover Procedure", *Journal Earthquake Engineering*, Vol. 8, No. 5, pp. 643-661.
4. Kim S. P., Kurama Y. C., (2008), "An alternative Pushover Analysis Procedure to Estimate Seismic Displacement Demands ", *Engineering Structures*, Vol. 30, pp.3793-3807.
5. Tabatabaei R., Saffari H., Fadaee M. J.,(2008),"Application of Normal Flow Algorithm in Modal Adaptive Pushover Analysis", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 65, pp.89-96.
6. Tripathy R., Sarkar H., (2012)," Pushover Analysis of R/C Setback Building Frames ", *International Journal of Civil Engineering (IJCE)*. Vol.1, pp.70-92
7. Khoshnoudian, F. Mehdi, M. Kashani, B., (2012) " Assessment of Modified Consecutive Modal Pushover Analysis for Estimating Theseismic Demands of Tall Buildings with Dual System Considering Steel Concentrically Braced Frames", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 72, pp. 155-167.

8. Shakeri, K. Tarbali, K. Mohebbi, M., (2012), "An Adaptive Modal Pushover Procedure for Asymmetric-Pplan Buildings", Journal of Engineering Structures, No. 36, pp. 160-172.

9. محمد علی برخوردار، غلامرضا قدرتی امیری، علی چراغعلی زاده، "بررسی و ارزیابی اثرات مودهای بالاتر در تحلیل فزاینده غیرخطی مودال در قابهای خمشی بتن مسلح بلند مرتبه". همایش ملی مقاومسازی ایران، سال 1387

Archive of SID