



ارزیابی نیازهای لرزه‌ای قاب‌های خمشی فولادی با استفاده از روش‌های مختلف تحلیل استاتیکی غیرخطی

محسن گرامی*، امیر حسام مشایخی، نوید سیاه پلو
دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۲۱ مهر ۱۳۹۳
بازنگری: ۲۲ اردیبهشت ۱۳۹۴
پذیرش: ۲۰ خرداد ۱۳۹۴
ارائه آنلاین: ۶ مهر ۱۳۹۴

کلمات کلیدی:

تحلیل دینامیکی غیرخطی
تحلیل استاتیکی غیرخطی تطبیقی
زاویه دررفت
شکل‌پذیری متوسط

چکیده: تخمین نیازهای لرزه‌ای در سطوح عملکردی مختلف نیازمند بررسی‌های دقیق و گسترده رفتار غیر ارتجاعی سازه است. روش تحلیل استاتیکی غیرخطی (بار افزون) یکی از روش‌های مهم در طراحی سازه‌ها بر اساس عملکرد است و به همین دلیل در سال‌های اخیر بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. الگوی بار ثابت با وجود ورود سازه به ناحیه غیر ارتجاعی، یکی از مهم‌ترین محدودیت‌های روش‌های استاتیکی غیرخطی سنتی است. بنابراین در سال‌های اخیر روش‌های پیشرفته پوش‌آور با اعمال اثر مودهای بالاتر ارائه شده است. در این پژوهش الگوهای مختلف بار جانبی در روش پوش‌آور سنتی به همراه روش‌های پیشرفته شامل روش تطبیقی بر اساس جابجایی (DAP) و به‌هنگام‌شونده با لحاظ کردن اثر اندرکنش مودی (APAM)، مورد ارزیابی قرار گرفته و نتایج با تحلیل دینامیکی غیرخطی حاصل از ۱۰ شتاب‌نگاشت دور از گسل مقایسه شده است. در همه روش‌های پوش‌آور، تغییر مکان بام سازه تا رسیدن حداکثر دوران گره به 0.02 رادیان (معرف حد شکل‌پذیری متوسط بر اساس مبحث ۱۰ مقررات ملی و حد پایین سطح عملکرد آستانه فروریزش آیین‌نامه SEAOC) افزایش می‌یابد. نتایج نشان می‌دهند روش‌های سنتی تخمین مناسبی از جابجایی و زاویه دررفت سازه‌های بلندمرتبه ارائه نمی‌دهند. بیشترین مقدار اختلاف درمقایسه با روش‌های تطبیقی $7/9$ درصد است. همچنین در میان روش‌های مختلف، روش پوش‌آور تطبیقی DAP تخمین مناسبی از نیازهای لرزه‌ای سازه‌ها ارائه می‌دهد و به‌خوبی اثر مودهای بالاتر را در فرآیند تحلیل لحاظ می‌کند. روش تطبیقی APAM تخمین مناسبی از زاویه دررفت طبقات تحتانی سازه به‌ویژه در سازه‌های بلندمرتبه ندارد به نحوی که بیشترین میزان اختلاف در مقایسه با روش DAP، $3/7$ درصد است.

۱- مقدمه

بدیهی است که در کلیه روش‌های بار افزون، الگوی بار جانبی از ملزومات تحلیل بار افزون است. در بسیاری از موارد فرض می‌شود که الگوی توزیع بار بر مبنای بازتاب مود اول محاسبه می‌شود. این موضوع می‌تواند در سازه‌های متأثر از مشارکت مودهای بالاتر به نتایج غیردقیقی بیانجامد. این روش‌ها در دودسته طبقه‌بندی می‌شوند. در روش‌های سنتی، الگوهای توزیع بار به نحوی تعریف می‌شوند که در خلال رفتار غیرخطی سازه از نظر آرایش و توزیع در ارتفاع ثابت باشند. در دسته دوم الگوهای بار به‌هنگام‌شونده تعریف می‌شوند. برای بهبود روش‌های بار افزون مطالعات مختلفی انجام گرفته است. در این بین روش بار افزون چند مودی پیشنهاد گردید [۱ و ۲]. یکی از روش‌های رایج چند مودی، روش بار افزون مودال یا MPA^2 است که در آن سازه در برابر الگوهای بارگذاری متناظر با هر مود تحلیل شده و سپس نتایج تحلیل به روش‌های رایج ترکیب مودی، ترکیب می‌شوند. لازم به ذکر است که روش MPA در حقیقت نوعی روش تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی است که بر سازه تک درجه آزادی معادل انجام می‌پذیرد. در این روش نیز شکل مود ارتعاشی به‌صورت الاستیک در نظر گرفته می‌شود [۳ و ۴]. از آنجاکه با ورود به حوزه غیرخطی، ماتریس سختی تغییر می‌کند، الگوهای بار نیز باید متناظر

تحلیل استاتیکی غیرخطی یا بار افزون^۱ در دهه‌های اخیر گسترش یافته و به‌عنوان روشی رایج در ارزیابی لرزه‌ای سازه‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. این روش نیروهای جانبی را با یک توزیع یکسان و منطقی در ارتفاع سازه تا زمان رسیدن به تغییر مکان هدف موردنظر، افزایش می‌دهد. روش تحلیل استاتیکی غیرخطی سنتی شامل ساده‌سازی‌هایی است که موجب کاهش دقت نتایج حاصل از آن می‌شود. به‌طور کلی روش پوش‌آور با الگوی بار ثابت شامل محدودیت‌های زیادی به‌ویژه برای سازه‌های بلند است، زیرا توزیع نیروی اینرسی واقعی به‌طور پیوسته در حین زلزله، به علت سهم مودهای بالاتر و تنزل سختی المان‌ها و درنهایت تنزل سختی کل سازه، تغییر می‌کند. به همین دلیل اثر مودهای بالاتر در برآورد نیازهای لرزه‌ای سازه‌های بلند باید در نظر گرفته شود. به همین منظور روش‌های پیشرفته تحلیل استاتیکی غیرخطی به‌منظور لحاظ نمودن اثر مودهای بالاتر و اندرکنش بین مودی توسط محققین مختلف ارائه شده است.

*نویسنده عهده‌دار مکاتبات: mgerami@semnan.ac.ir

- انتخاب کارآمدترین روش‌های سنتی و پیشرفته برای تخمین نیاز غیرخطی سازه
- کمینه‌سازی خطای هر روش به تفکیک برای هر مدل
- بررسی تأثیر افزایش ارتفاع بر کارایی روش‌های سنتی و پیشرفته
- بررسی تأثیر مدهای بالاتر بر دقت نتایج حاصل از روش‌های سنتی و پیشرفته

۲- تحلیل استاتیکی غیرخطی (بار افزون)

به دلیل رفتار غیرخطی سازه در حین زلزله‌های شدید، فلسفه طراحی لرزه‌ای سازه‌ها بر مبنای رفتار غیرخطی آن‌ها است، بنابراین آسیب‌پذیری سازه‌ها در برابر زلزله توسط ظرفیت تغییر شکل غیر الاستیک المان‌های سازه‌ای کنترل می‌شود. با توجه به پیچیدگی‌های مدل‌سازی و تحلیل به روش دینامیکی غیرخطی امروزه از روش‌های مختلف تحلیل استاتیکی غیرخطی به‌عنوان روشی جایگزین استفاده می‌شود.

در روش تحلیل استاتیکی غیرخطی، بار جانبی با آهنگ ثابت و الگوی مشخص تا رسیدن تغییر مکان نقطه‌ی مشخصی از سازه به تغییر مکان هدف از پیش تعیین شده افزایش می‌یابد. الگوهای بار مورد استفاده در این تحلیل به دو دسته‌ی الگوهای بار ثابت و متغیر طبقه‌بندی می‌شوند. در الگوهای بار ثابت، نیروهای اینرسی در حین زلزله ثابت و بدون تغییر باقی می‌ماند. این در حالی است که در الگوهای متغیر، نیروهای اینرسی جانبی با توجه به سختی سازه ناشی از رفتار غیرخطی المان‌های سازه، در هر گام افزایش می‌یابد. استفاده از الگوی بار ثابت در حین تحلیل و در نظر نگرفتن کاهش سختی سازه، از جمله کاستی‌های روش تحلیل استاتیکی غیرخطی سنتی (روش‌های موجود در آیین‌نامه‌های [۱۰] FEMA365 و [۱۱] ATC-40) است. به همین منظور در سال‌های اخیر روش‌های پیشرفته تحلیل استاتیکی غیرخطی توسط محققین مختلف ارائه شده است.

۲-۱- روش بار افزون تطبیقی بر اساس جابجایی (DAP)

در این روش که در سال ۲۰۰۴ توسط آنتینیو^۷ و پینهو^۸ ارائه شده است، در هر مرحله با توجه به زوال سختی اعضای سازه، ناشی از نیروهای داخلی، ماتریس سختی و مشخصات تغییر یافته‌ی سازه تعیین می‌شود و در نهایت الگوی جابجایی با توجه به بردار جابجایی اولیه و بردار جابجایی مودی بر اساس روابط ارائه شده توسط محققین مذکور، تصحیح می‌شود. توضیحات تکمیلی پیرامون این روش در مرجع [۱۲] ذکر شده است.

۲-۲- روش بار افزون تطبیقی با لحاظ کردن اندرکنش بین مودی (APAM)

در این روش، در هر گام بارگذاری، ابتدا یک تحلیل مودال برای تعیین مشخصات مودال سازه صورت می‌گیرد. سپس بردار بارگذاری متناسب هر

با این تغییرات باشند. در این خصوص الگوهای بار تطبیقی (به‌هنگام‌شونده) پیشنهاد شده‌اند [۵-۷]. تمامی روش‌های تطبیقی به روشی که توسط آیدینوگلو^۱ پیشنهاد گردید، نمی‌توانند به‌خوبی اندرکنش بین پاسخ مدهای مختلف را که به اثرات مدهای بالاتر (HME^۲) مشهور است، به‌خوبی در نظر بگیرند [۷]. از آنجاکه روش‌های تطبیقی دشوار بوده و ممکن است توسط مهندسين برای مقاصد حرفه‌ای به‌سادگی قابل استفاده نباشد، برخی از محققین به دنبال اصلاح و پیشنهاد الگوهای بارگذاری جدیدی هستند که بدون نیاز به استفاده از تغییرات ماتریس سختی، بتواند تخمین خوبی از نیازهای کلی و محلی سازه ارائه نماید. شاخص‌ترین مطالعه سال‌های اخیر در خصوص تأثیر روش‌های مختلف بار افزون بر ضریب رفتار قاب‌های خمشی مربوط به ایزدی نیا و همکاران (۲۰۱۱) است. مطالعه ایشان نشان داد که ضریب رفتار و شکل‌پذیری کلی محاسبه شده از روش‌های مختلف بار افزون می‌تواند باهم اختلاف داشته باشد. بعلاوه بیشترین تغییر شکل تسلیم مربوط به روش DAPA^۳ است. از طرفی تغییر در الگوی بارگذاری روش CPA^۴ تغییر چندانی را بر ضریب رفتار نخواهد گذاشت [۸].

در این پژوهش روش پوش‌آور سنتی با الگوهای بار جانبی مختلف شامل الگوی بار مثلثی، مود اول نوسان سازه، یکنواخت و الگوی بار حاصل از تحلیل دینامیکی طیفی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد و نتایج حاصل با روش‌های پیشرفته تحلیل پوش‌آور شامل روش پوش‌آور تطبیقی بر اساس جابجایی (DAP^۵) و روش پوش‌آور به‌هنگام‌شونده با لحاظ کردن اثر اندرکنش مودی (APAM^۶)، مقایسه می‌شود و در نهایت پارامترهای لرزه‌ای (جابجایی و دریفت طبقات) حاصل از تحلیل‌های استاتیکی غیرخطی با نتایج تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی مقایسه می‌شود. به همین منظور تعداد ۵ قاب خمشی فولادی با تعداد طبقات ۴، ۷، ۱۰، ۱۵، ۲۰ با ۵ دهانه و با شکل‌پذیری متوسط و خاک نوع III طراحی می‌شوند و کلیه تحلیل‌های غیرخطی توسط نرم‌افزار OpenSees [۹] انجام می‌شود. این نرم‌افزار قابلیت انجام تحلیل‌های استاتیکی غیرخطی تطبیقی را ندارد بنابراین به‌منظور انجام تحلیل‌های مذکور، کدهای روش‌های مختلف پوش‌آور تطبیقی نوشته شده است. در یک تقسیم‌بندی ساده مهم‌ترین ویژگی‌ها و وجوه تمایز این مطالعه با تحقیقات پیشین را می‌توان در موارد زیر خلاصه نمود:

- ارزیابی توانمندی مهم‌ترین و رایج‌ترین روش‌های بار افزون سنتی در پیشگویی و تخمین نیازهای غیرخطی سازه
- بررسی توانمندی روش‌های بار افزون پیشرفته
- بررسی کیفی و کمی نتایج الگوهای بار ثابت و به‌هنگام‌شونده برای تعیین تفاوت‌ها و شباهت‌های موجود

- 1 Aydinglu MN
- 2 High Mode Effect
- 3 Displacement-Based Adaptive Pushover Analysis
- 4 Conventional Pushover Analysis
- 5 Displacement-Based Adaptive Pushover, DAP
- 6 Adaptive Pushover Analysis Based On Modal Mass Participation, APAM

V_b : برش پایه در گام i ام
 $\Delta E^{(i)}$: تغییرات انرژی حاصل از کار انجام شده توسط نیروهای جانبی طبقات
 $F_j^{(i)}$: نیروی جانبی متناظر طبقه j ام در گام i ام
 $\Delta d_j^{(i)}$: جابجایی انتقالی طبقه j ام در گام i ام
 K : تعداد طبقات سازه [۱۵]

در این پژوهش توانایی روش پوش‌آور سنتی با الگوهای بار جانبی مثلثی (TR)، طیفی (SPEC²)، مود اول نوسان سازه (M1) و یکنواخت به همراه روش‌های بار افزون تطبیقی DAP و APAM، در برآورد نیازهای لرزه‌ای سازه‌های فولادی مورد ارزیابی قرار می‌گیرند.

در کلیه روش‌های بار افزون مورد بحث در این پژوهش، بار جانبی تا رسیدن سازه به دوران پلاستیک گره به میزان ۰/۰۲ رادیان (معرف حد شکل‌پذیری متوسط بر اساس مبحث دهم مقررات ملی ساختمان و حد پایین سطح عملکرد آستانه فروریزش بر مبنای آیین‌نامه SEAOC³) افزایش می‌یابد که نوآوری اصلی این پژوهش است.

۳- معرفی مدل‌ها

صحت‌سنجی مدل‌های تحلیلی یکی از مهم‌ترین گام‌های یک مطالعه است. در مطالعات عددی و بخصوص زمانی که باید یک بانک اطلاعات قابل‌توجه برای استخراج روابط تجربی تهیه شود، عدم اطمینان از صحت مدل ساخته‌شده می‌تواند به نتایج غیردقیق بیانجامد. برای پرهیز از چنین پیشامدی در این مقاله، تمامی مدل‌ها بر اساس مدل ۹ طبقه نشان داده‌شده در شکل ۱ صحت‌سنجی شده‌اند. این ساختمان توسط شرکت مهندسی مشاور Brandow و Johnson برای فاز ۲ پروژه SAC طراحی شده است. ابعاد این ساختمان در پلان ۴۵/۷۳ در ۴۵/۷۳ متر و ارتفاع آن ۳۷/۱۹ متر است. کف تا کف هر طبقه ۳/۹۶ ارتفاع داشته و از ۵ دهانه ۹/۱۵ متری تشکیل شده است. قاب‌های پیرامون سازه از نوع مقاوم خمشی هستند که نقش سیستم برابری جانبی را بر عهده دارند. همه اتصالات دهانه‌های میانی از نوع ساده و دهانه‌های کناری از نوع صلب می‌باشند. برای ستون از مقطع I شکل با مقاومت تسلیم ۳۴۵ مگاپاسکال استفاده شده که در فاصله ۱/۸۳ متر از تراز طبقه اول، سوم، پنجم و هفتم وصله شده‌اند. این وصله برای انتقال هم‌زمان نیروی محوری و لنگر خمشی طراحی شده است. در طبقه همکف اتصالات ستون به صورت مفصل مدل‌سازی شده است. تیرهای طبقه نیز از مقطع I بوده که با دال بتنی کف طبقه به صورت مرکب در اندرکنش می‌باشند. برای پرهیز از تغییر مکان افقی سیستم (به دلیل اتصالات مفصل در پایه) در پیرامون طبقه همکف از دیوار برشی بتن مسلح استفاده شده است. بدین ترتیب تراز پایه به کف طبقه اول منتقل شده است. جرم لرزه‌ای طبقه همکف ۹۶۵ تن و جرم لرزه‌ای طبقه اول، دوم تا هشتم و نهم به ترتیب ۱۰۱۰، ۹۸۹ و ۱۰۷۰ تن انتخاب شده‌اند؛ بنابراین جرم کل سازه ۹۰۰۰ تن

مود در گام i ام، بر اساس رابطه ۱ محاسبه می‌شود. در گام بعد ضرایب جرم مؤثر مودال سازه α_n که نمایانگر میزان مشارکت جرمی مودهای مختلف هستند، طبق رابطه ۲ به دست آمده و ضرایب مودال بردارهای بارگذاری بر اساس آن تعیین می‌شوند (روابط ۳ و ۴). در نهایت بردار بارگذاری معادل سازه در گام i ام ($S^{(i)}$)، از رابطه ۵ تعیین شده و به سازه اعمال می‌گردد و پاسخ سازه در هر گام ثبت می‌گردد [۱۳].

که در روابط ۱ تا ۶:

m : ماتریس جرم سازه

i : گام تکرار تحلیل غیرخطی

j : شماره طبقه

$\phi_n^{(i)}$: بردار شکل‌های مودی متناظر مود n ام

$S_n^{(i)}$: بردار بارگذاری متناظر مود n ام در گام i ام

$C_n^{(i)}$: ضرایب مودال متناظر مود n ام در گام i ام

$S^{(i)}$: بردار بارگذاری معادل سازه

Γ_n : ضریب مشارکت مودی متناظر مود n ام

$$S_n^{(i)} = \Gamma_n \Delta \phi_{n(j,j-1)}^{(i)} S_{dn} \quad (1)$$

$$\alpha_n^{(i)} = \frac{\left(\left[\phi_n^{(i)} \right]^T m i \right)^2}{\left(\left[\phi_n^{(i)} \right]^T m \phi_n \right) \sum_n m_n} \quad (2)$$

$$\alpha_{\max}^{(i)} = \text{Max} \left(\left| \alpha_1^{(i)} \right|, \left| \alpha_2^{(i)} \right|, \dots, \left| \alpha_n^{(i)} \right| \right) \quad (3)$$

$$C_n^{(i)} = \frac{\alpha_n^{(i)}}{\alpha_{\max}^{(i)}} \quad (4)$$

$$S^{(i)} = C_1^{(i)} \cdot S_1^{(i)} + C_2^{(i)} \cdot S_2^{(i)} + C_3^{(i)} \cdot S_3^{(i)} \quad (5)$$

$$\Gamma_n = \frac{\phi_n^T m i}{\phi_n^T m f_n} \quad (6)$$

این روش، برای تخمین منحنی ظرفیت سیستم یک درجه آزادی معادل سازه، از رویکرد مبتنی بر انرژی بر اساس کار انجام شده ناشی از حاصل ضرب توزیع بار جانبی در جابجایی انتقالی هر طبقه استفاده می‌کند؛ بنابراین، افزایش جابجایی سیستم یک درجه آزادی معادل ΔD_e ، طبق رابطه ۷ قابل محاسبه است:

$$\Delta D_e^{(i)} = \Delta E^{(i)} / V_h^{(i)} \quad (7)$$

$$\Delta E^{(i)} = \Delta E_F^{(i)} = \sum_{j=1}^k F_j^{(i)} \Delta d_j^{(i)} \quad (8)$$

که در روابط ۷ و ۸:

1 Triangular

2 Spectrum

3 Structural Engineers Association of California (SEAOC)

به منظور انجام تحلیل استاتیکی غیرخطی از نرم افزار OpenSees استفاده شده است. در جداول ۱ تا ۵ مقاطع مورد استفاده برای سازه های مختلف ارائه شده است.

جدول ۲: مقاطع مدل ۷ طبقه

Table 2. Sections of 7 story model

ستون ها	تیرها	طبقات
BOX ۴۰×۱۵	PG ۴۰×۲۰	۳ تا ۱
BOX ۴۰×۱۰	PG ۴۰×۱۵	۵ و ۴
BOX ۳۰×۱۰	PG ۴۰×۱۰	۷ و ۶

جدول ۳: مقاطع مدل ۱۰ طبقه

Table 3. Sections of 10 story model

ستون ها	طبقات	تیرها	طبقات
BOX ۴۰×۲۰	۳ تا ۱	PG ۵۰×۲۰	۲ و ۱
BOX ۴۰×۱۵	۶ تا ۴	PG ۴۰×۲۰	۳ و ۴
BOX ۴۰×۱۰	۸ و ۷	PG ۴۰×۱۵	۵ تا ۸
BOX ۳۵×۱۰	۱۰ و ۹	PG ۴۰×۱۰	۹ و ۱۰

جدول ۴: مقاطع مدل ۱۵ طبقه

Table 4. Sections of 15 story model

ستون ها	طبقات	تیرها	طبقات
BOX ۵۰×۲۰	۵ تا ۱	PG ۵۰×۲۰	۷ تا ۱
BOX ۴۰×۲۰	۹ تا ۶	PG ۴۰×۲۰	۸ تا ۱۳
BOX ۴۰×۱۵	۱۳ تا ۱۰	PG ۴۰×۱۰	۱۴ و ۱۵
BOX ۴۰×۱۰	۱۵ و ۱۴	-----	-----

جدول ۵: مقاطع مدل ۲۰ طبقه

Table 5. Sections of 20 story model

ستون ها	طبقات	تیرها	طبقات
BOX ۲۵×۵۰	۶ تا ۱	PG ۲۰×۶۰	۱۰ تا ۱
BOX ۲۰×۵۰	۱۰ تا ۷	PG ۲۰×۵۰	۱۱ تا ۱۶
BOX ۲۰×۴۰	۱۴ تا ۱۱	PG ۲۰×۴۰	۱۷ تا ۲۰
BOX ۱۵×۴۰	۱۷ تا ۱۵	-----	-----
BOX ۱۰×۴۰	۲۰ تا ۱۸	-----	-----

است. از آنجا که ساختمان ۹ طبقه پروژه SAC9 در پلان منظم است، در این مقاله تنها قاب دوبعدی، نماینده قاب پیرامونی شمالی-جنوبی مدل سازی شده است. نیمی از جرم لرزه ای به این قاب اختصاص داده شده است. برای مدل سازی، از روش مدل سازی M1 که توسط گوپتا^۱ و کراوینکلر^۲ ارائه شده است، استفاده گردید [۱۵]. تأثیر $P-\Delta$ در نظر گرفته شده اما اثرات چشمه اتصال صرفه نظر شده است. در مدل M1 کلیه تیرها و ستون ها به روش خط مرکزی مدل سازی شده اند. دلیل اصلی انتخاب این سیستم سازه ای آن است که در این مقاله هدف اصلی ارزیابی انواع نیازهای لرزه ای غیرخطی در اثر روش های مختلف بار افزون و بررسی کفایت هر یک نسبت به نتایج تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی است؛ بنابراین مدل انتخابی باید بتواند توصیف قابل قبولی از توزیع نیازهای غیر ارتجاعی ارائه دهد و با حداقل جزییات مدل سازی، قابل بازتولید در نرم افزارهای عددی باشد. بعد از مدل سازی مدل M1 در نرم افزار OpenSees، نمودار بار افزون حاصل از مطالعه گوپتا به همراه مدل ۲ بعدی ساخته شده توسط نویسندگان این مقاله در شکل ۲ نمایش داده شده است. مقایسه بین دو نمودار نشان دهنده دقت قابل قبول در فاز مدل سازی این تحقیق است. دلیل اختلاف نیز در دو موضوع مستتر است. اول اینکه گوپتا در مدل سازی از ایده مفصل پلاستیک متمرکز استفاده کرده است در حالی که در این مطالعه از خاصیت پلاستیسیته گسترده که توسط المان فیبر مدل سازی می شود، استفاده شده است. ثانیاً در نرم افزار مورد استفاده توسط گوپتا شبیه سازی اثر $P-\Delta$ توسط یک ستون مجازی که بر آن بار ثقلی وارد شده و با یک عضو خرپایی با سختی قابل توجه به قاب اصلی متصل می شود، انجام گرفته است، در حالی که در این مطالعه اثرات غیرخطی شدن هندسه توسط ماتریس های انتقال که از ویژگی ها برنامه OpenSees است تعریف شده است.

به منظور بررسی روش های مختلف تحلیل بار افزون، از مدل های ۴، ۷، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ طبقه با ارتفاع طبقات ۴ متر و تعداد ۵ دهانه به طول ۵ متر استفاده شده است. قاب های مورد نظر قاب خمشی با شکل پذیری متوسط می باشند. به منظور طراحی سازه ها از آیین نامه AISI-ASD89 و آیین نامه طراحی ساختمان ها در برابر زلزله (استاندارد ۲۸۰۰ [۱۶]) استفاده شده است و فرضیه های طراحی شامل خاک نوع III و منطقه با خطر نسبی خیلی زیاد است. مقاطع مورد استفاده در این قاب ها شامل مقاطع جعبه ای و تیورق به ترتیب برای ستون ها و تیرها است.

جدول ۱: مقاطع مدل ۴ طبقه

Table 1. Sections of 4 story model

طبقات	تیرهای میانی	تیرهای کناری	ستون ها
۱ و ۲	PG ۴۰×۱۰	PG ۴۰×۱۵	BOX ۴۰×۱۰
۳ و ۴	PG ۴۰×۱۰	PG ۴۰×۱۰	BOX ۳۰×۱۰

- 1 Gupta A
- 2 Krawinkler H

۴- معرفی شتاب‌نگاشت‌ها

[۱۸] استفاده شده است و کلیه شتاب‌نگاشت‌ها قبل از مقیاس‌سازی، به مقدار حداکثر شتاب (PGA) خود هم‌پایه شده‌اند.

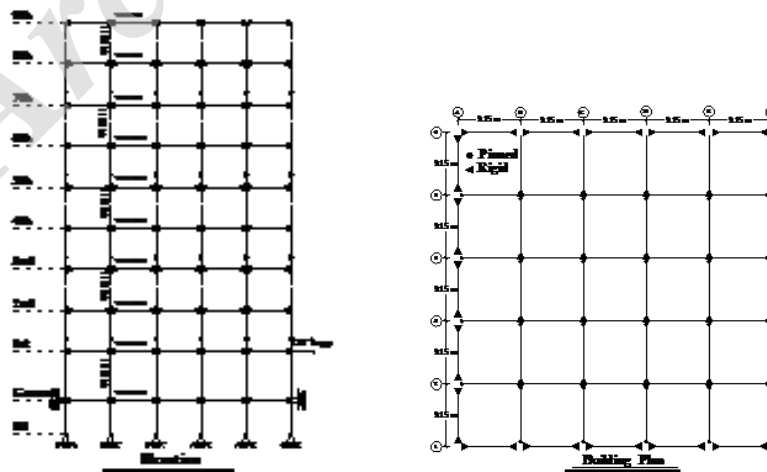
هم‌چنین در این پژوهش به‌منظور انجام تحلیل استاتیکی غیرخطی تطبیقی به روش‌های DAP و APAM، از طیف‌های پاسخ جایجایی و شتاب حاصل از هر یک از شتاب‌نگاشت‌های مذکور استفاده شده است و درنهایت از پاسخ‌های حاصل از ۱۰ شتاب‌نگاشت میانگین گرفته شده است.

به‌منظور انجام تحلیل دینامیکی غیرخطی از ۱۰ شتاب‌نگاشت دور از گسل مطابق جدول ۶ استفاده شده است. تمامی نگاشت‌های مورداستفاده که از سایت Peer [۱۷] دریافت شده است، دارای مشخصات مربوط به خاک نوع III بر اساس آیین‌نامه طراحی لرزه‌ای ایران (استاندارد ۲۸۰۰) و یا خاک کلاس D بر اساس طبقه‌بندی دستورالعمل FEMA 356 است. برای ترسیم طیف پاسخ ارتجاعی مختلف از نرم‌افزار SeismoSignal

جدول ۶: مشخصات شتاب‌نگاشت‌های مورداستفاده در این مطالعه

Table 6. Characteristics of ground motions used in this study

Tm [s]	Tp [s]	CAV [m/s]	PGV/PGA [s]	PGA [g]	R [Km]	ایستگاه	تاریخ [روز-ماه-سال]	نام زلزله	ردیف
۰/۷۹	۰/۵۶	۹/۸۸	۰/۱۴	۰/۱	۸۳/۴۳	CHY065	۹۹-۰۹-۲۰	Chi-Chi,Taiwan	۱
۰/۸۴	۰/۹۸	۵۶/۵۶	۰/۱۸	۰/۱۵	۱۰۹/۰۱	TAP095	۹۹-۰۹-۲۰	Chi-Chi,Taiwan	۲
۰/۸۶	۰/۳۲	۲۷/۶۹	۰/۱۵	۰/۲۴	۷۲/۲	CDMG58224	۸۹-۱۰-۱۸	LomaPrieta	۳
۰/۸۵	۰/۶۴	۲۸/۳۵	۰/۱۶	۰/۲۶	۷۴/۲۶	CDMG58472	۸۹-۱۰-۱۸	LomaPrieta	۴
۰/۷۶	۰/۶	۴۵/۰۲	۰/۱۱	۰/۱۴	۹۵/۷۲	HIK	۹۵-۰۱-۱۶	Kobe,Japan	۵
۰/۵۳	۰/۳	۳۳/۲۶	۰/۱۱	۰/۲۳	۵۸/۶۵	CDMG58223	۸۹-۱۰-۱۸	LomaPrieta	۶
۰/۴۶	۰/۱۶	۵۹/۴۸	۰/۰۹	۰/۱۳	۴۹/۹۷	Qazvin	۹۰-۰۶-۲۰	Manjil,Iran	۷
۰/۴۴	۰/۳۸	۳۱/۲۲	۰/۰۷	۰/۱	۸۲/۳۲	CDMG13122	۹۴-۰۱-۱۷	Northridge	۸
۰/۲۹	۰/۲۴	۴۸/۳۸	۰/۰۸	۰/۱	۹۱/۱۴	Ferdows	۷۸-۰۹-۱۶	Tabas,Iran	۹
۰/۹۳	۰/۶۸	۱۰۰/۹	۰/۲۱	۰/۱	۶۰/۴۳	Bursa Tofas	۹۹-۰۸-۱۷	Kocaeli,Turkey	۱۰



شکل ۱: نمای جانبی و پلان طبقه ساختمان SAC9 [۱۶]

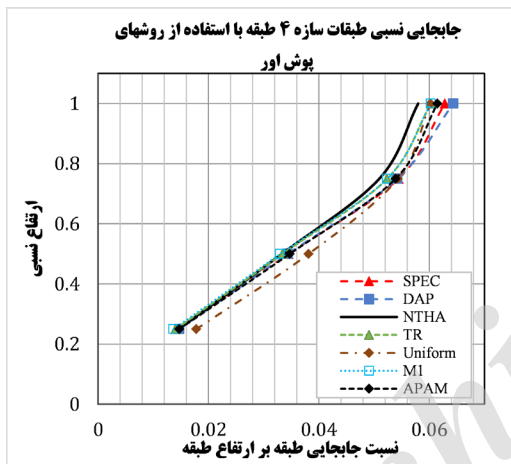
Fig. 1. Elevation and story SAC9 9-story building

1 Peak ground acceleration (PGA)

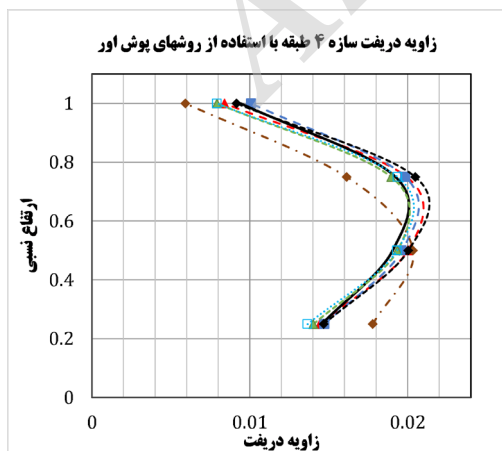
غیرخطی به‌عنوان مبنا در نظر گرفته شده و نتایج حاصل از روش‌های مختلف تحلیل استاتیکی غیرخطی (سنتی و پیشرفته) با روش مبنا مقایسه شده است. نتایج حاصل از تحلیل استاتیکی غیرخطی سنتی با الگوهای بار جانبی طیفی (SPEC)، مود اول (M1)، مثلثی (TR)، یکنواخت (Uniform) و روش‌های تطبیقی DAP و APAM، در شکل‌های ۳ تا ۱۲، ارائه شده است.

به‌منظور انجام تحلیل‌های پوش‌آور تطبیقی، از طیف خطی جابجایی و شتاب حاصل از ۱۰ شتاب‌نگاشت دور از گسل استفاده شده است و در نهایت میان پاسخ‌های حاصل از جابجایی و زاویه دررفت آن‌ها میانگین گرفته شده است و نتایج به تفکیک ارائه خواهد شد.

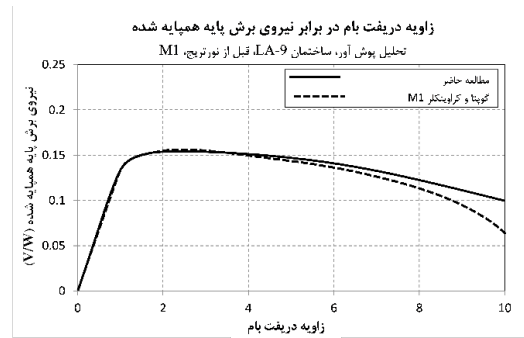
نتایج حاصل از جابجایی طبقات سازه‌های مختلف نشان می‌دهد که در کلیه سازه‌های مورد بررسی، روش‌های مختلف تحلیل استاتیکی غیرخطی مقادیر بیشتری از نتایج تحلیل دینامیکی غیرخطی ارائه می‌دهند و تخمین مناسبی از تغییر مکان هدف ندارند.



شکل ۳: نمودار جابجایی طبقات سازه ۴ طبقه
Fig. 3. Story displacement of 4 story model



شکل ۴: نمودار زاویه دررفت طبقات سازه ۴ طبقه
Fig. 4. Drift angle of 4 story model



شکل ۲: مقایسه نمودار بار افزون مدل M1 در مطالعه گوپتا با نمودار عددی مطالعه حاضر در دررفت سرتاسری ۱۰% [۱۶]

Fig. 2. Pushover curves of SAC9 structure obtained by Gupta and this study

به‌منظور مقایسه روش‌های مختلف تحلیل استاتیکی غیرخطی مورد بحث، تحلیل دینامیکی غیرخطی بر روی قاب‌های موردنظر با استفاده از نرم‌افزار OpenSees انجام شده است و نتایج مربوط به جابجایی و زاویه دررفت^۱ طبقات در ادامه ارائه شده است. رکوردهای انتخاب‌شده در این مطالعه، به مدل‌های مذکور اعمال شده و در نهایت میان پاسخ‌های به‌دست‌آمده میانگین گرفته شده است و نتایج با روش‌های مختلف تحلیل استاتیکی غیرخطی (سنتی و تطبیقی) مقایسه می‌شود.

۵- مقیاس‌سازی شتاب‌نگاشت‌ها

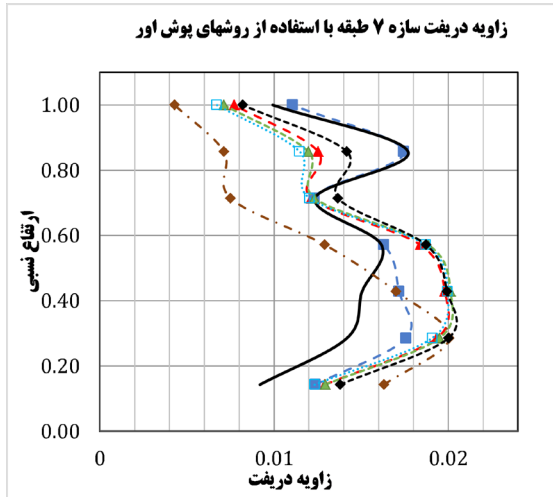
در این تحقیق از مقیاس کردن زاویه دررفت نهایی طبقه، معادل ۰/۰۲ رادیان، نسبت به هر زمین‌لرزه استفاده شده است، بدین ترتیب مقیاس کردن رکورد زلزله به روش غیرمستقیم صورت پذیرفته است. مقدار زاویه دررفت ۲ درصد برای طبقه معادل سطح عملکرد ایمنی جانی بر اساس دستورالعمل SEAOC (نسخه ۲۰۰۰) است.

در روش مقیاس‌سازی مذکور، شتاب‌نگاشت‌های موردنظر به نحوی مقیاس می‌شوند که سازه مورد بررسی تحت شتاب‌نگاشت مقیاس شده دارای حداکثر دوران گره به میزان ۰/۰۲ رادیان باشد. علت در نظر گرفتن دوران گره به میزان ۰/۰۲ رادیان، اطمینان در عدم تجاوز شکل‌پذیری سازه از حد شکل‌پذیری متوسط و قرار گرفتن سازه در سطح عملکرد ایمنی جانی است. ذکر این نکته ضروری است که مقدار ۰/۰۲ رادیان مبحث ۱۰، زاویه دررفت طبقه است، این در حالی است که در این تحقیق مقدار ۰/۰۲ رادیان شامل دوران حاصل از تیر و ستون است.

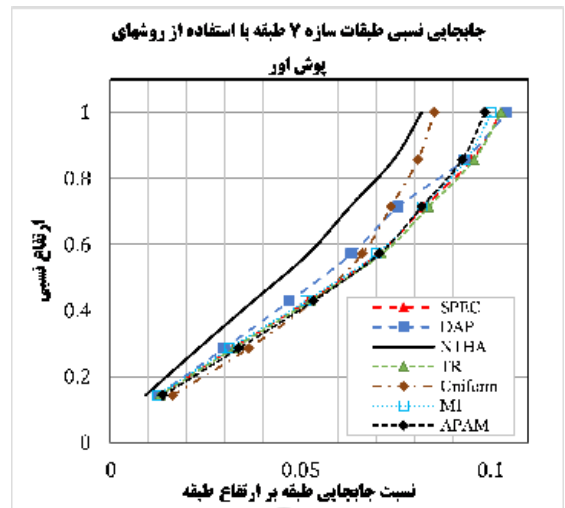
۶- مقایسه روش‌های مختلف تحلیل استاتیکی غیرخطی

به‌منظور مقایسه روش‌های مختلف تحلیل استاتیکی غیرخطی در تخمین جابجایی و زاویه دررفت طبقات (به‌عنوان یکی از مهم‌ترین شاخص‌های ارزیابی نیاز لرزه‌ای سازه‌ها)، نتایج حاصل از تحلیل دینامیکی

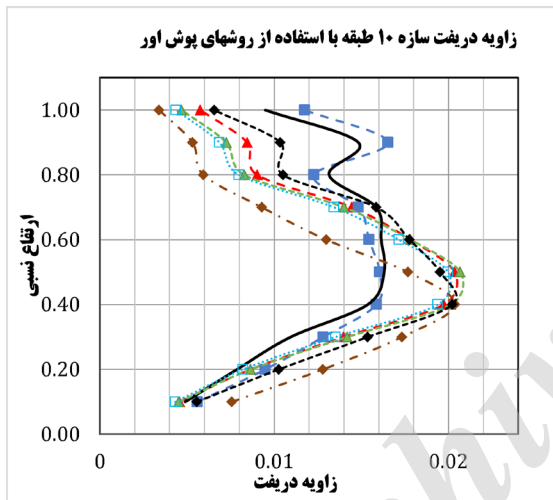
¹ Drift Angle



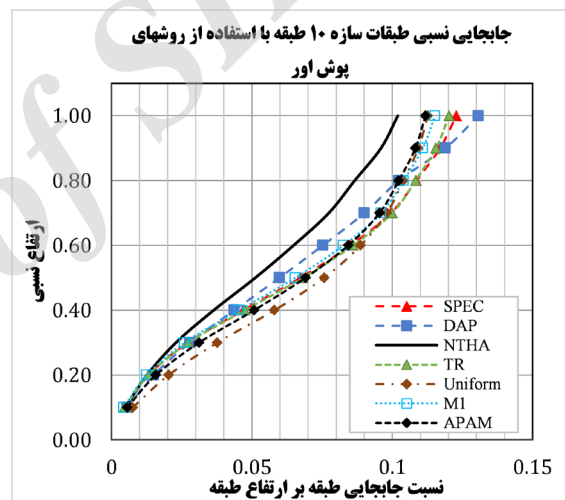
شکل ۶: نمودار زاویه دررفت طبقات سازه ۷ طبقه
Fig. 6. Drift angle of 7 story model



شکل ۵: نمودار جابجایی طبقات سازه ۷ طبقه
Fig. 5. Story displacement of 7 story model



شکل ۸: نمودار زاویه دررفت طبقات سازه ۱۰ طبقه
Fig. 8. Drift angle of 10 story model



شکل ۷: نمودار جابجایی طبقات سازه ۱۰ طبقه
Fig. 7. Story displacement of 10 story model

استاتیکی غیرخطی، اثر مودهای بالاتر در سازه‌های بلندمرتبه را به خوبی لحاظ می‌کند.

شکل‌های ۱۳ تا ۲۲، مقادیر خطای روش‌های مختلف را در مقایسه با روش تحلیل دینامیکی غیرخطی نشان می‌دهد. به‌منظور محاسبه درصد خطای هر روش از رابطه ۹ که توسط پینهو و همکاران معرفی شده است، استفاده می‌شود.

$$Error(\%) = \frac{100}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\Delta_{i_{NTHA}} - \Delta_{i_{Pushover}}}{\Delta_{i_{NTHA}}} \right)^2} \quad (9)$$

که در آن:

n: تعداد طبقات سازه

بررسی نتایج زاویه دررفت طبقات در سازه‌های مختلف نشان می‌دهد که روش‌های پوش‌آور سنتی (شامل الگوهای بار مختلف)، قادر به تخمین درست نتایج در مقایسه با تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی نیستند. علت این امر عدم توانایی روش‌های گفته‌شده در منظور کردن اثرات مودهای بالاتر، الگوی بار یکسان و یکنواخت، در نظر نگرفتن کاهش سختی اعضای سازه در حین فرایند تحلیل است.

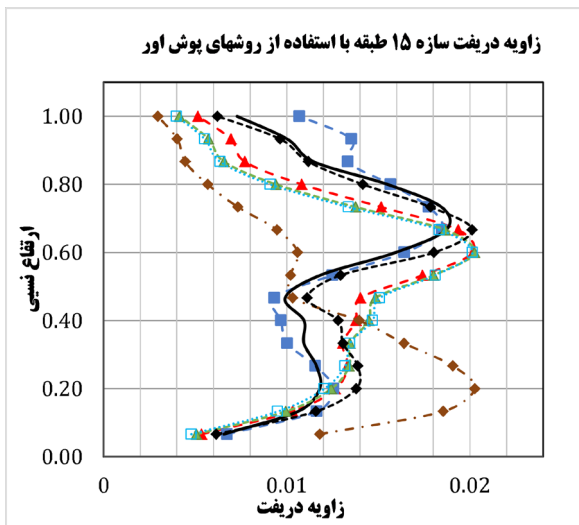
در کلیه سازه‌های موردبررسی روش پوش‌آور سنتی با الگوی بار جانبی یکنواخت (Uniform) نتایج غیرقابل قبولی در مقایسه با روش تحلیل دینامیکی خطی (NTHA) ارائه می‌دهد و روش مناسبی نیست.

با افزایش تعداد طبقات به‌ویژه در سازه‌های بلندمرتبه، زاویه دررفت طبقات حاصل از روش بار افزون پیشرفته DAP، انطباق مناسبی با تحلیل دینامیکی غیرخطی دارد که این امر نشان می‌دهد روش‌های پیشرفته تحلیل

بالتر و همچنین الگوی بار به‌هنگام‌شونده در حین فرایند تحلیل است. بررسی نتایج حاصل از روش APAM در سازه‌های مختلف نشان می‌دهد که در مقایسه با روش‌های پوش‌آور سنتی تخمین مناسبی از مقادیر جابجایی و زاویه دررفت طبقات ارائه می‌دهد. این در حالی است که روش APAM در تخمین زاویه دررفت طبقات زیرین سازه‌های مختلف دارای ضعف است و در مقایسه با روش DAP خطای بیشتری داشته است، به نحوی که بیشترین مقدار اختلاف روش APAM در مقایسه با روش DAP در محاسبه زاویه دررفت طبقات مقدار ۳/۷ درصد است.

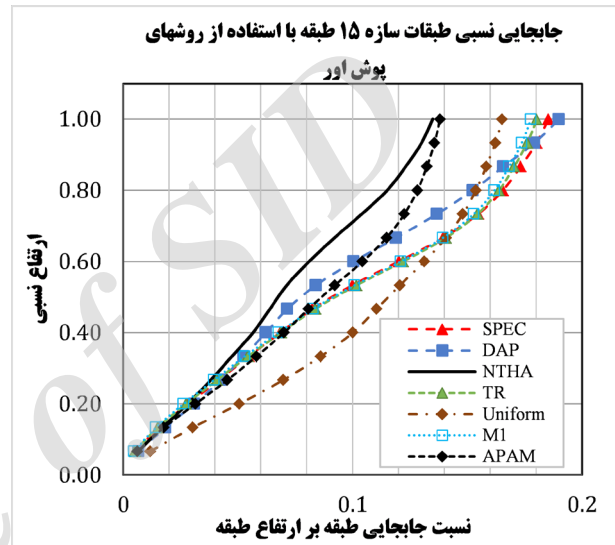
Δ_{iNTHA} : حداکثر تغییر مکان نسبی یا مطلق در طبقه i حاصل از تحلیل دینامیکی غیرخطی
 $\Delta_{iPushover}$: حداکثر تغییر مکان نسبی یا مطلق در طبقه i حاصل از تحلیل بار افزون

در میان روش‌های موردبحث در این تحقیق، روش DAP به‌خوبی قادر به تخمین زاویه دررفت طبقات مختلف سازه‌های مورد مطالعه است. مقادیر خطای محاسبه‌شده برای زاویه دررفت سازه‌های مختلف نشان می‌دهد که روش DAP با افزایش ارتفاع و دوره تناوب سازه‌ها خطای کمتری در مقایسه با سایر روش‌ها دارد. علت این امر منظور نمودن اثرات موده‌های



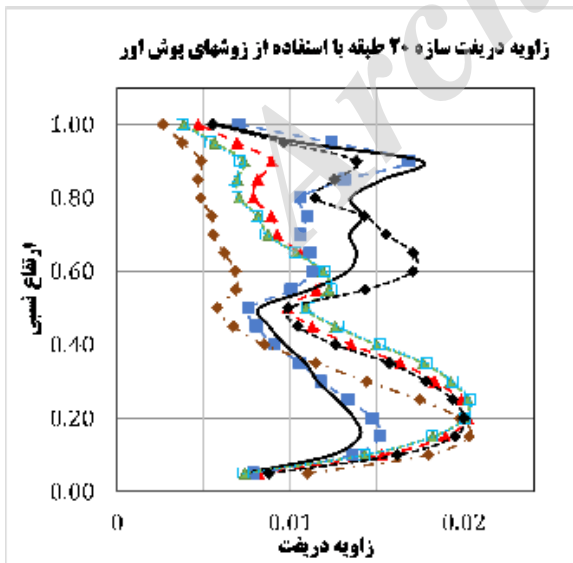
شکل ۱۰: نمودار زاویه دررفت طبقات سازه ۱۵ طبقه

Fig. 10. Drift angle of 15 story model



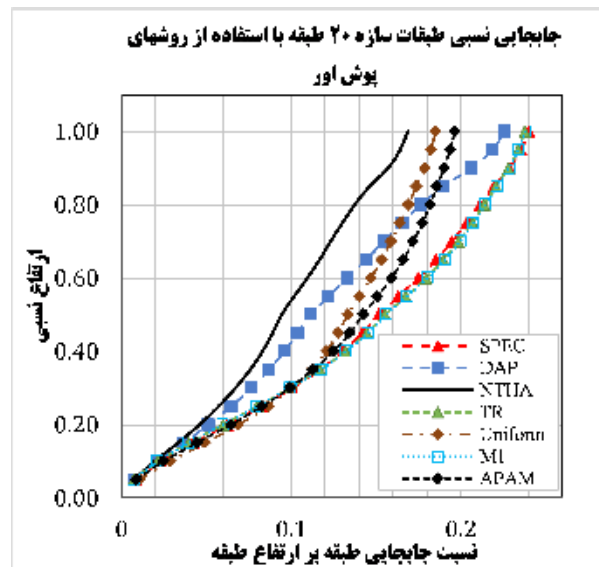
شکل ۹: نمودار جابجایی طبقات سازه ۱۵ طبقه

Fig. 9. Story displacement of 15 story model



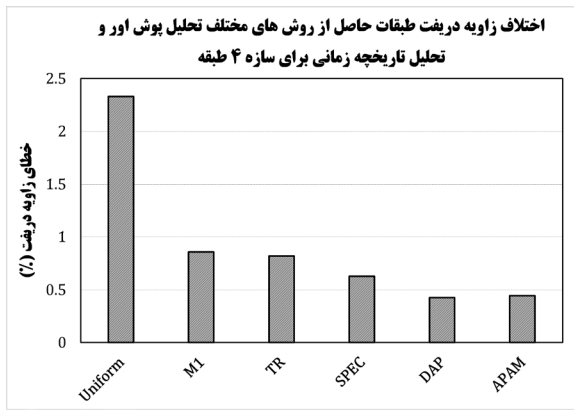
شکل ۱۲: نمودار زاویه دررفت طبقات سازه ۲۰ طبقه

Fig. 12. Drift angle of 20 story model

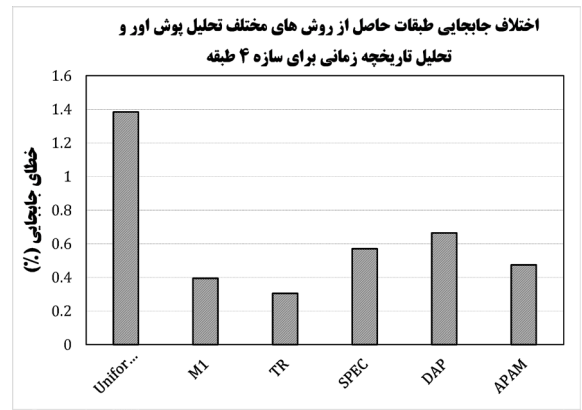


شکل ۱۱: نمودار جابجایی طبقات سازه ۲۰ طبقه

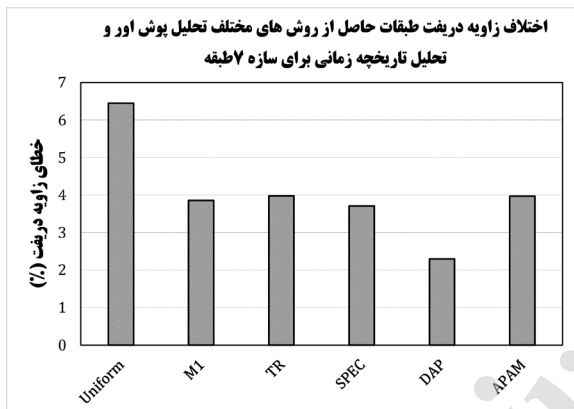
Fig. 11. Story displacement of 20 story model



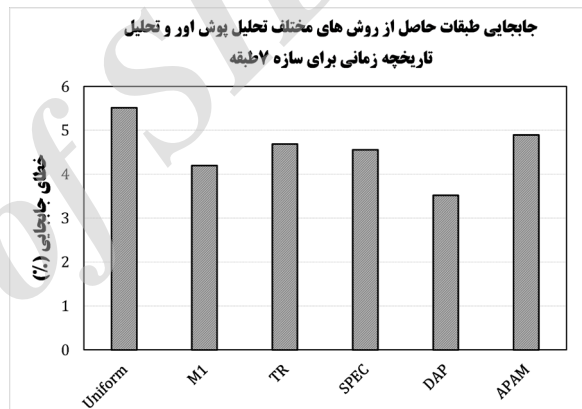
شکل ۱۴: خطای ناشی از روش‌های مختلف تحلیل استاتیکی غیرخطی در محاسبه زاویه دررفت طبقات سازه ۴ طبقه
Fig. 14. 4 story model drift angle error of NTHA in comparison with NSP method



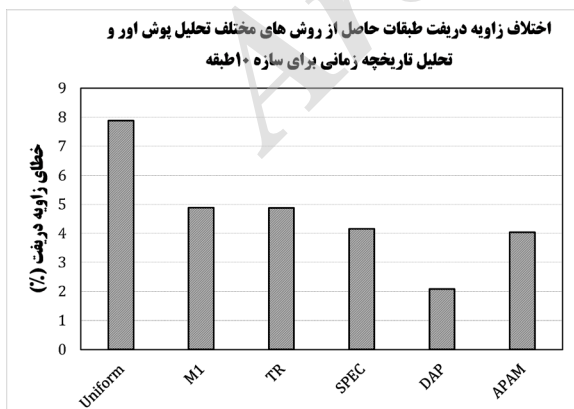
شکل ۱۳: خطای ناشی از روش‌های مختلف تحلیل استاتیکی غیرخطی در محاسبه جابجایی طبقات سازه ۴ طبقه
Fig. 13. 4 story model displacement error of NTHA in comparison with NSP method



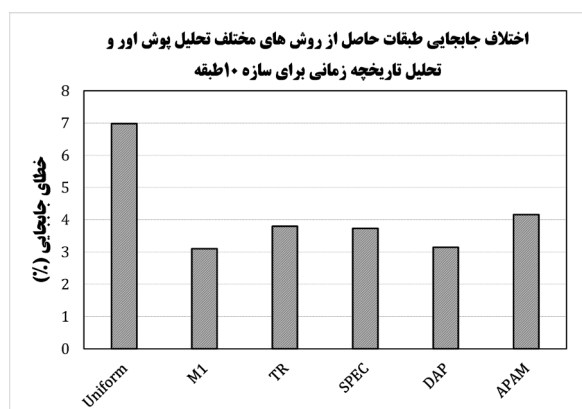
شکل ۱۶: خطای ناشی از روش‌های مختلف تحلیل استاتیکی غیرخطی در محاسبه زاویه دررفت طبقات سازه ۷ طبقه
Fig. 16. 7 story model drift angle error of NTHA in comparison with NSP method



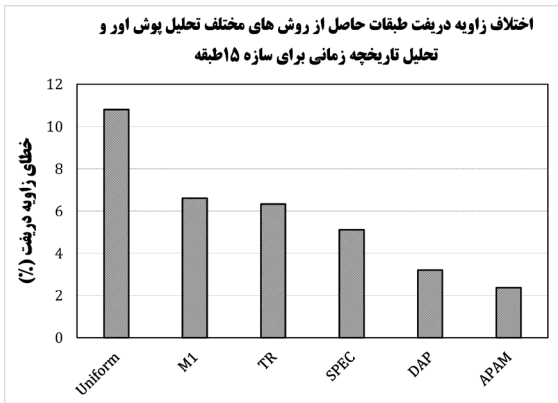
شکل ۱۵: خطای ناشی از روش‌های مختلف تحلیل استاتیکی غیرخطی در محاسبه جابجایی طبقات سازه ۷ طبقه
Fig. 15. 7 story model displacement error of NTHA in comparison with NSP method



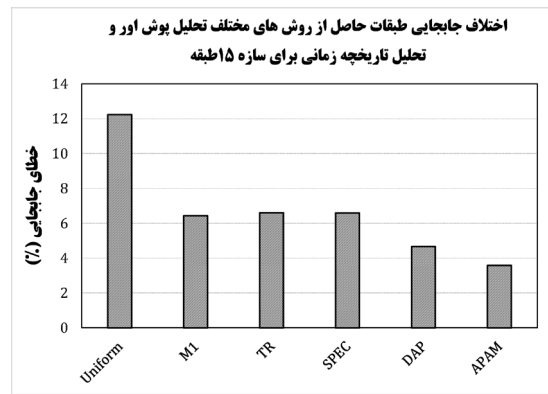
شکل ۱۸: خطای ناشی از روش‌های مختلف تحلیل استاتیکی غیرخطی در محاسبه زاویه دررفت طبقات سازه ۱۰ طبقه
Fig. 18. 10 story model drift angle error of NTHA in comparison with NSP method



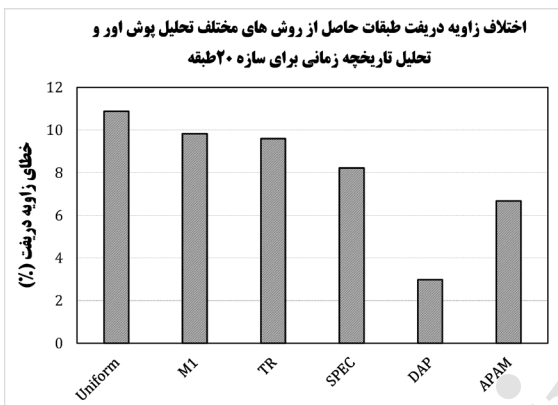
شکل ۱۷: خطای ناشی از روش‌های مختلف تحلیل استاتیکی غیرخطی در محاسبه جابجایی طبقات سازه ۱۰ طبقه
Fig. 17. 10 story model displacement error of NTHA in comparison with NSP method



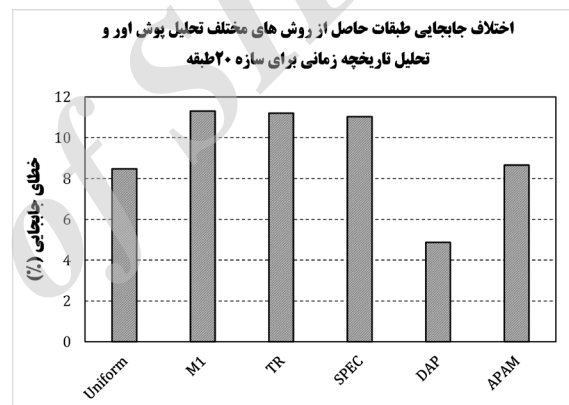
شکل ۲۰: خطای ناشی از روش‌های مختلف تحلیل استاتیکی غیرخطی در محاسبه زاویه دررفت طبقات سازه ۱۵ طبقه
Fig. 20. 15 story model drift angle error of NTHA in comparison with NSP method



شکل ۱۹: خطای ناشی از روش‌های مختلف تحلیل استاتیکی غیرخطی در محاسبه جابجایی طبقات سازه ۱۵ طبقه
Fig. 19. 15 story model displacement error of NTHA in comparison with NSP method



شکل ۲۲: خطای ناشی از روش‌های مختلف تحلیل استاتیکی غیرخطی در محاسبه زاویه دررفت طبقات سازه ۲۰ طبقه
Fig. 22. 20 story model drift angle error of NTHA in comparison with NSP method



شکل ۲۱: خطای ناشی از روش‌های مختلف تحلیل استاتیکی غیرخطی در محاسبه جابجایی طبقات سازه ۲۰ طبقه
Fig. 21. 20 story model displacement error of NTHA in comparison with NSP method

غیرخطی ارائه نمی‌دهند. علت این امر ثابت بودن شکل توزیع بار طی فرآیند بارگذاری سازه، لحاظ نکردن اثرات ماتریس سختی المان‌ها و ماتریس سختی کل سازه، در نظر نگرفتن اثرات مودهای بالاتر است. اختلاف میان روش‌های پوش‌آور سنتی و تطبیقی در محاسبه زاویه دررفت طبقات با افزایش ارتفاع سازه افزایش می‌یابد به نحوی که بیشترین مقدار این اختلاف ۷/۹ درصد و مربوط به الگوی بار یکنواخت (Uniform) است.

مقادیر جابجایی و زاویه دررفت سازه‌های مختلف برای هر سه روش بار افزون سنتی با الگوی بار طیفی، مثلثی و مود اول (که هر سه الگوی بار بر مبنای شکل الگوی مثلثی می‌باشند) یکسان است و اختلاف ناچیزی باهم دارند.

در میان روش‌های پوش‌آور تطبیقی مورد بحث (DAP و APAM) در این مطالعه، روش DAP با افزایش ارتفاع سازه

۷- نتیجه‌گیری

به منظور ارزیابی روش‌های مختلف تحلیل استاتیکی غیرخطی (سنتی و تطبیقی) در برآورد نیازهای لرزه‌ای (جابجایی و زاویه دررفت) سازه‌های فولادی، ۵ قاب خمشی فولادی با شکل‌پذیری متوسط و با تعداد طبقات ۴، ۷، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ طراحی شده است. روش تحلیل استاتیکی غیرخطی (بار افزون) سنتی با الگوهای بار جانبی مثلثی (TR)، طیفی (SPEC)، مود اول (M1) و یکنواخت (Uniform) به همراه روش‌های تطبیقی (روش بار افزون بر اساس جابجایی DAP و روش بار افزون با لحاظ کردن اندرکنش بین مودها (APAM) مورد ارزیابی قرار گرفت و نتایج حاصل با روش تحلیل دینامیکی غیرخطی مقایسه شده است. نتایج زیر در محدوده مدل‌های این پژوهش حاصل شد:

- روش‌های سنتی با افزایش ارتفاع سازه تخمین مناسبی از مقادیر جابجایی و زاویه دررفت طبقات در مقایسه با تحلیل دینامیکی

displacements for multi-mode seismic performance evaluation, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 1(1) (2003) 3-36.

- [8] M. Izadinia, M.A. Rahgozar, O. Mohammadrezaei, Response modification factor for steel moment-resisting frames by different pushover analysis methods, *Journal of Constructional Steel Research*, 79 (2012) 83-90.
- [9] S. Mazzoni, F. McKenna, M. Scott, G. Fenves, *OpenSees: open system for earthquake engineering simulation*, OpenSees Command Language Manual, Berkeley, (2006).
- [10] P. FEMA, *Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings*, FEMA-356, Federal Emergency Management Agency, Washington, DC, (2000).
- [11] A. ATC, 40, *Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings*, Applied Technology Council, report ATC-40. Redwood City, (1996).
- [12] R. Pinho, S. Antoniou, A displacement-based adaptive pushover algorithm for assessment of vertically irregular frames, in: *Proceedings of the Fourth European Workshop on the Seismic Behaviour of Irregular and Complex Structures*, 2005.
- [13] R. Abbasnia, M. Tajik Davoudi, Capacity curve estimation of reinforced concrete frames with a novel adaptive pushover method, in: *Proceedings of the 4th International Conference on Seismic Retrofitting*, Tabriz, Iran, 2012.
- [14] R. Abbasnia, A.T. Davoudi, M.M. Maddah, An adaptive pushover procedure based on effective modal mass combination rule, *Engineering Structures*, 52 (2013) 654-666.
- [15] A. Gupta, *Seismic Demands for steel Moment Resisting Frame Structure*, Stanford university, Stanford, 1998.
- [16] S. No, 2800, *Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings*, 3 (2005).
- [17] www.peer.berkeley.edu/peer_ground_motion_database.
- [18] S. Antoniou, R. Pinho, *SeismoSignal: a computer program for signal processing of strong-motion data*, Technical Report 4.0. 0. Pavia, Italy: SeismoSoft, 2004.

به‌خوبی مقادیر جابجایی و زاویه دررفت سازه‌های مختلف را تخمین می‌زند. این در حالی است که روش APAM با افزایش ارتفاع سازه تخمین مناسبی از زاویه دررفت طبقات تحتانی سازه ارائه نمی‌دهد. بیشترین مقدار اختلاف روش‌های DAP و APAM در محاسبه‌ی جابجایی و زاویه دررفت طبقات به ترتیب مقادیر ۳/۸ و ۳/۷ درصد و مربوط به سازه ۲۰ طبقه است.

- در سازه‌های کوتاه مرتبه روش‌های تحلیل استاتیکی غیرخطی سنتی و پیشرفته انطباق مناسبی با روش دینامیکی غیرخطی دارند که علت آن اثرات مودهای بالاتر است.

مراجع

- [1] A. Moghadam, W. Tso, A pushover procedure for tall buildings, in: *Proc. of the Twelfth European Conference on Earthquake Engineering*, London, United Kingdom, Paper, 2002.
- [2] A.K. Chopra, R.K. Goel, A modal pushover analysis procedure for estimating seismic demands for buildings, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 31(3) (2002) 561-582.
- [3] A.K. Chopra, R.K. Goel, A modal pushover analysis procedure to estimate seismic demands for buildings: Summary and evaluation, in: *Fifth National Conference on Earthquake*, Istanbul, Turkey Keynote Lecture, 2003.
- [4] A.K. Chopra, R.K. Goel, C. Chintanapakdee, Evaluation of a modified MPA procedure assuming higher modes as elastic to estimate seismic demands, *Earthquake Spectra*, 20(3) (2004) 757-778.
- [5] B. Gupta, S.K. Kunnath, Adaptive spectra-based pushover procedure for seismic evaluation of structures, *Earthquake spectra*, 16(2) (2000) 367-392.
- [6] E. Kalkan, S.K. Kunnath, Adaptive modal combination procedure for nonlinear static analysis of building structures, *Journal of Structural Engineering*, 132(11) (2006) 1721-1731.
- [7] M.N. Aydinoglu, An incremental response spectrum analysis procedure based on inelastic spectral

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

M. Gerami, A.H. Mashayekhi, N. Siahpolo, "Assessment of Different Pushover Methods to Estimate Seismic Inelastic Demands of SMRF's", *Amirkabir J. Civil Eng.*, 49(3) (2017) 419-430.

DOI: 10.22060/ceej.2015.421

