

ارزیابی روش تحلیل استاتیکی غیر خطی بهنگام شونده تغییر مکانی (DAP) در برآورد نیاز لرزه ای قاب های خمشی فولادی

محسن گرامی

دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان
mgerami@semnan.ac.ir

امیر حسام مشایخی

دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران گرایش زلزله، دانشگاه سمنان
amh.civil_m@yahoo.com:

نوید سیاه پلو

دانشجوی دکتری مهندسی زلزله، دانشگاه سمنان
n_siahpolo@yahoo.com:

کلید واژه‌ها: تحلیل دینامیکی غیرخطی، تحلیل استاتیکی غیرخطی تطبیقی، زاویه دریافت، شکل پذیری متوسط

چکیده

تخمین نیازهای لرزه ای در سطوح عملکردی مختلف نیازمند بررسی های دقیق و گسترده رفتار غیرارتجاعی سازه است. روش تحلیل استاتیکی غیرخطی (پوش اور) یکی از روش های مهم در طراحی سازه ها بر اساس عملکرد می باشد و به همین دلیل در سال های اخیر بیشتر مورد توجه محققین قرار گرفته است. الگوی بار ثابت علی الرغم ورود سازه به ناحیه غیرارتجاعی، یکی از مهمترین محدودیت های روش های استاتیکی غیرخطی سنتی می باشد. به همین منظور در سال های اخیر روش های پیشرفته تحلیل استاتیکی غیرخطی با در نظر گرفتن اثر مودهای بالاتر ارائه شده است. در این پژوهش الگوی بار جانبی ناشی از تحلیل دینامیکی طیفی در روش پوش اور سنتی به همراه روش پوش اور پیشرفته "روش پوش اور تطبیقی بر اساس جابجایی (DAP)" مورد ارزیابی قرار گرفته است و نتایج با تحلیل دینامیکی غیرخطی حاصل از ۱۰ شتاب نگاشت دور از گسل مقایسه شده است. در کلیه روش های پوش اور مذکور، تغییر مکان بام سازه تا رسیدن حداکثر دوران گره به مقدار ۰/۰۲ رادیان (معرف حد شکل پذیری متوسط بر اساس مبحث دهم مقررات ملی ساختمان و حد پایین سطح عملکرد آستانه فروریزش بر مبنای آیین نامه SEAOC) افزایش می یابد، که نوآوری مورد استفاده در این پژوهش می باشد. نتایج نشان می دهد روش DAP به خوبی نیاز جابجایی و زاویه دریافت طبقات را به خصوص برای سازه های بلند تخمین می زند و اثرات مود های بالاتر را لحاظ می کند.

مقدمه

تحلیل استاتیکی غیر خطی یا پوش اور در دهه های اخیر گسترش یافته و به عنوان روشی رایج در ارزیابی لرزه ای سازه ها 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 مورد نظر، افزایش می دهد. روش تحلیل استاتیکی غیرخطی سنتی شامل ساده سازی هایی می باشد که موجب کاهش دقت نتایج حاصل از آن می شود. به طور کلی روش پوش اور با الگوی بار ثابت شامل محدودیت های زیادی به ویژه برای سازه های بلند می باشد زیرا توزیع نیروی اینرسی واقعی به طور پیوسته در حین زلزله، به علت سهم مودهای بالاتر و تنزل سختی المان ها و در نهایت تنزل سختی کل سازه، تغییر می کند. به همین دلیل اثر مودهای بالاتر در برآورد نیازهای لرزه ای سازه های بلند می بایست در نظر گرفته شود. به همین منظور روش های پیشرفته تحلیل استاتیکی غیرخطی به منظور لحاظ نمودن اثر مودهای بالاتر و اندرکنش بین مودی توسط محققین مختلف ارائه شده است. در این پژوهش روش پوش اور سنتی با الگوی بار حاصل از تحلیل دینامیکی طیفی مورد ارزیابی قرار می گیرد و نتایج حاصل با روش



پیشرفته تحلیل پوش اور شامل روش پوش اور تطبیقی بر اساس جابجایی (DAP)¹ مقایسه می‌شود و در نهایت پارامترهای لرزه ای (جابجایی و دریفت طبقات) حاصل از تحلیل های استاتیکی غیرخطی با نتایج تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی مقایسه می‌شود. به همین منظور تعداد ۳ قاب خمشی فولادی با تعداد طبقات ۲۰، ۱۵، ۱۰ با ۵ دهانه و با شکل پذیری متوسط و خاک نوع III طراحی می‌شوند و کلیه تحلیل های غیرخطی توسط نرم افزار OpenSees انجام می‌شود. این نرم افزار قابلیت انجام تحلیل های استاتیکی غیرخطی تطبیقی را ندارد بنابراین به منظور انجام تحلیل های مذکور، کدهای روش پوش اور تطبیقی نوشته شده است.

کلیه شتابنگاشت های مورد استفاده در این پژوهش به روش مقیاس سازی بر اساس محدود کردن دوران گره های سازه به میزان ۰/۰۲ رادیان (که معرف حد شکل پذیری متوسط بر اساس مبحث دهم مقررات ملی ساختمان و حد پایین سطح عملکرد آستانه فروریزش بر مبنای آیین نامه SEAOC می‌باشد)، مقیاس می‌شوند که نوآوری اصلی این پژوهش می‌باشد. همچنین در کلیه ی سازه های مورد بررسی در این پژوهش، جابجایی بام سازه، تا رسیدن حداکثر دوران گره به میزان ۰/۰۲ رادیان، افزایش داده می‌شود که تخمین تغییر مکان هدف به وسیله ی محدود کردن دوران گره های سازه، نوآوری دیگر در این پژوهش می‌باشد. دوران گره بر اساس تعریف مبحث دهم مقررات ملی ساختمان، تغییر مکان نسبی طبقه فوقانی آن گره تقسیم بر ارتفاع طبقه مورد نظر، در نظر گرفته شده است که این تعریف همان زاویه دریفت بین طبقه‌ای می‌باشد.

تحلیل استاتیکی غیر خطی (پوش اور)

به دلیل رفتار غیرخطی سازه در حین زلزله های شدید، فلسفه طراحی لرزه ای سازه ها بر مبنای رفتار غیرخطی آنها می‌باشد بنابراین آسیب پذیری سازه ها در برابر زلزله توسط ظرفیت تغییر شکل غیر الاستیک المان های سازه ای کنترل می‌شود. با توجه به پیچیدگی های مدل سازی و تحلیل به روش دینامیکی غیرخطی امروزه از روش های مختلف تحلیل استاتیکی غیرخطی به عنوان روشی جایگزین استفاده می‌شود. در روش تحلیل استاتیکی غیرخطی، بار جانبی با آهنگ ثابت و الگوی مشخص، تا رسیدن تغییر مکان نقطه ی مشخصی از سازه به تغییر مکان هدف از پیش تعیین شده افزایش می‌یابد. الگوهای بار مورد استفاده در این تحلیل به دو دسته ی الگوهای بار ثابت و متغیر طبقه بندی 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 المان های سازه، در هر گام افزایش می‌یابد. استفاده از الگوی بار ثابت در حین تحلیل و عدم در نظر گرفتن کاهش سختی سازه، از جمله کاستی های روش تحلیل استاتیکی غیرخطی سنتی (روش های موجود در آیین‌نامه‌های FEMA 356 و ATC-40) می‌باشد. به همین منظور در سال های اخیر روش های پیشرفته تحلیل استاتیکی غیرخطی توسط محققین مختلف ارائه شده است.

روش پوش اور تطبیقی بر اساس جابجایی (DAP)

در این روش که در سال ۲۰۰۴ توسط آنتینیو و پینهو (Antoniou and Pinho, 2005) ارائه شده است، در هر مرحله با توجه به زوال سختی اعضای سازه، ناشی از نیروهای داخلی، ماتریس سختی و مشخصات تغییر یافته ی 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 ذکر شده است.

معرفی مدل‌ها

به منظور بررسی روش های مختلف تحلیل پوش اور، از مدل های ۱۰، ۱۵ و ۲۰ طبقه با ارتفاع طبقات ۴ متر و تعداد ۵ دهانه به طول ۵ متر استفاده شده است. قاب‌های مورد نظر قاب خمشی با شکل پذیری متوسط می‌باشند. به منظور طراحی سازه‌ها از آیین نامه AISC-ASD 89 و آیین نامه طراحی ساختمان ها در برابر زلزله (استاندارد ۲۸۰۰) استفاده شده است و فرضیات طراحی شامل خاک نوع III و منطقه با خطر نسبی خیلی زیاد می‌باشد. مقاطع مورد استفاده در این قاب ها شامل مقاطع جعبه ای و تیر ورق به ترتیب برای ستون ها و تیرها می‌باشد. به منظور انجام تحلیل استاتیکی غیرخطی از نرم افزار OpenSees استفاده شده است. در جدول ۱ الی ۳ مقاطع مورد استفاده برای سازه های مختلف ارائه شده است.

جدول ۱: مقاطع سازه ۱۰ طبقه

ستون ها	طبقات	تیرها	طبقات
BOX 40x20	اول تا سوم	PG 50x20	اول و دوم
BOX 40x15	چهارم تا ششم	PG 40x20	سوم و چهارم
BOX 40x10	هفتم و هشتم	PG 40x15	پنجم تا هشتم
BOX 35x10	نهم و دهم	PG 40x10	نهم و دهم

جدول ۲: مقاطع سازه ۱۵ طبقه

ستون ها	طبقات	تیرها	طبقات
BOX 50x20	۱ تا ۵	PG 50x20	۱ تا ۷
BOX 40x20	۶ تا ۹	PG 40x20	۸ تا ۱۳
BOX 40x15	۱۰ تا ۱۳	PG 40x10	۱۴ و ۱۵
BOX 40x10	۱۴ و ۱۵	-----	-----

جدول ۳: مقاطع سازه ۲۰ طبقه

ستون ها	طبقات	تیرها	طبقات
BOX 50x25	۱ تا ۶	PG 60x20	۱ تا ۱۰
BOX 50x20	۷ تا ۱۰	PG 50x20	۱۱ تا ۱۶
BOX 40x20	۱۱ تا ۱۴	PG 40x20	۱۷ تا ۲۰
BOX 40x15	۱۵ تا ۱۷	-----	-----
BOX 40x10	۱۸ تا ۲۰	-----	-----

معرفی شتاب نگاشت‌ها

به منظور انجام تحلیل دینامیکی غیرخطی از ۱۰ شتابنگاشت دور از گسل مطابق جدول ۴ استفاده شده است. تمامی نگاشت های مورد استفاده که از سایت Peer دریافت شده است، دارای مشخصات مربوط به خاک نوع III بر اساس آیین نامه طراحی لرزه ای ایران (استاندارد ۲۸۰۰) و یا خاک کلاس D بر اساس طبقه بندی دستورالعمل FEMA 356 می باشد. برای ترسیم طیف پاسخ ارتجاعی مختلف از نرم افزار SeismoSignal استفاده شده است و کلیه شتابنگاشت ها قبل از مقیاس سازی، به مقدار حداکثر شتاب (PGA) خود همپایه شده اند.

جدول ۴: مشخصات شتابنگاشت‌های مورد استفاده در این مطالعه

Number	Earthquake name	Date (yy-mm-dd)	Station	R (Km)	PGA (g)	PGV/PGA (s)	CAV (m/s)	Tp (s)	Tm (s)
1	Chi-Chi,Taiwan,	99-09-20	CHY065	83.43	0.1	0.14	9.88	0.56	0.79
2	Chi-Chi,Taiwan,	99-09-20	TAP095	109.01	0.15	0.18	56.56	0.98	0.84
3	LomaPrieta,	89-10-18	CDMG58224	72.2	0.24	0.15	27.69	0.32	0.86
4	LomaPrieta,	89-10-18	CDMG58472	74.26	0.26	0.16	28.35	0.64	0.85
5	Kobe,Japan,	95-01-16	HIK	95.72	0.14	0.11	45.02	0.6	0.76
6	LomaPrieta,	89-10-18	CDMG58223	58.65	0.23	0.11	33.26	0.3	0.53
7	Manjil,Iran,	90-06-20	Qazvin	49.97	0.13	0.09	59.48	0.16	0.46
8	Northridge,	94-01-17	CDMG13122	82.32	0.1	0.07	31.22	0.38	0.44
9	Tabas,Iran,	78-09-16	Ferdows	91.14	0.1	0.08	48.38	0.24	0.29
10	Kocaeli,Turkey,	99-08-17	Bursa Tofas	60.43	0.1	0.21	100.9	0.68	0.93

همچنین در این پژوهش به منظور انجام تحلیل استاتیکی غیرخطی تطبیقی به روش DAP، از طیف های پاسخ جابجایی و شتاب حاصل از هر یک از شتابنگاشت های مذکور، استفاده شده است و در نهایت میان پاسخ های حاصل از ۱۰ شتابنگاشت میانگین گیری صورت گرفته است. به منظور مقایسه روش های مختلف تحلیل استاتیکی غیرخطی مورد بحث، تحلیل دینامیکی غیرخطی بر روی قاب های مورد نظر با استفاده از نرم افزار OpenSees انجام شده است و نتایج مربوط به جابجایی و زاویه دررفت طبقات در ادامه ارائه شده است. رکوردهای انتخاب شده در این مطالعه، به مدل های مذکور اعمال شده و در نهایت میان پاسخ های بدست آمده میانگین گیری شده است و نتایج با روش های مختلف تحلیل استاتیکی غیرخطی (سنتی و تطبیقی) مقایسه می شود.

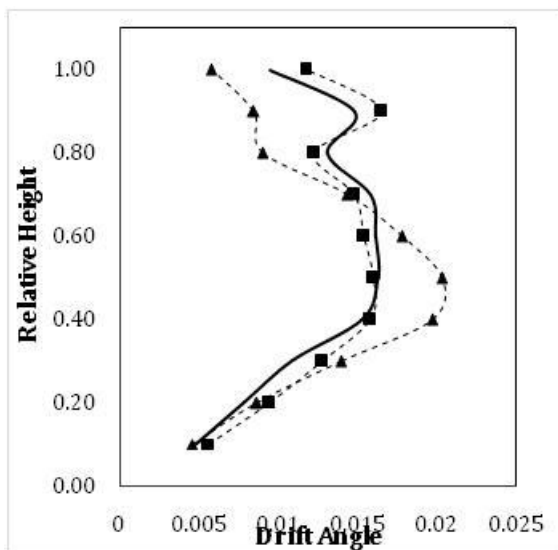
مقیاس سازی شتاب نگاشت‌ها

در این تحقیق از مقیاس کردن زاویه دررفت نهایی طبقه معادل ۰/۰۲ رادیان نسبت به هر زمین لرزه استفاده شده است بدین ترتیب مقیاس کردن رکورد زلزله به روش غیر مستقیم صورت پذیرفته است. مقدار زاویه دررفت ۲ درصد برای طبقه معادل سطح عملکرد ایمنی جانی بر اساس دستورالعمل سیاک (ورژن ۲۰۰۰) می باشد.

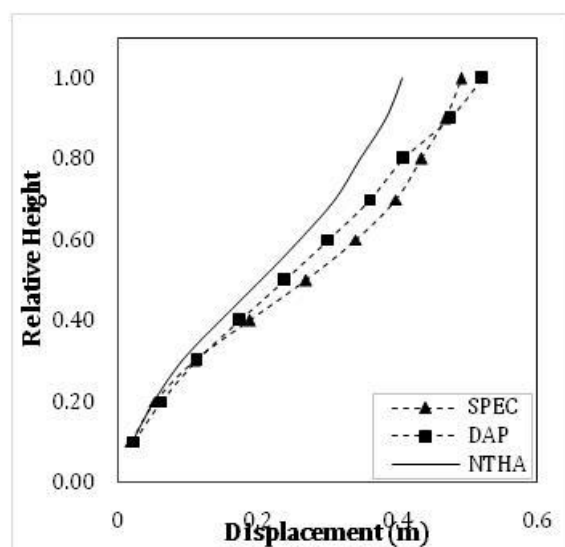
در روش مقیاس سازی مذکور، شتابنگاشت های مورد نظر به نحوی مقیاس می شوند که سازه مورد بررسی تحت شتابنگاشت مقیاس شده دارای حداکثر دوران گره به میزان 0.02 رادیان باشد. علت در نظر گرفتن دوران گره به میزان 0.02 رادیان، اطمینان در عدم تجاوز شکل پذیری سازه از حد شکل پذیری متوسط و قرار گرفتن سازه در سطح عملکرد ایمنی جانبی باشد. ذکر این نکته ضروری می باشد که مقدار 0.02 رادیان مبحث ۱۰، زاویه دررفت طبقه می باشد این در حالی است که در این تحقیق مقدار 0.02 رادیان شامل دوران حاصل از تیر و ستون می باشد.

مقایسه روش های مختلف تحلیل استاتیکی غیر خطی

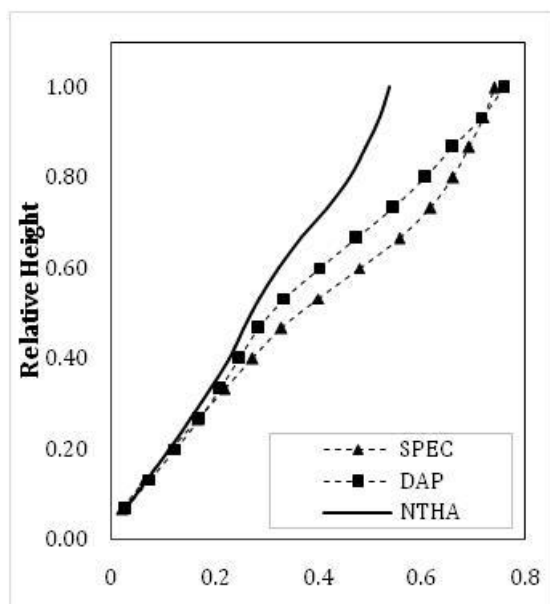
به منظور مقایسه روش تحلیل استاتیکی غیر خطی تطبیقی در تخمین جابجایی و زاویه دررفت طبقات (به عنوان یکی از مهمترین شاخص های ارزیابی نیاز لرزه ای سازه ها)، نتایج حاصل از تحلیل دینامیکی غیرخطی به عنوان مبنا در نظر گرفته شده و نتایج حاصل از روش های مختلف تحلیل استاتیکی غیرخطی (سنتی و پیشرفته) با روش مبنا مقایسه شده است. نتایج حاصل از تحلیل استاتیکی غیرخطی سنتی با الگوی بار جانبی طیفی (SPEC) و روش تطبیقی DAP، در اشکال ۱ الی ۶ ارائه شده است.



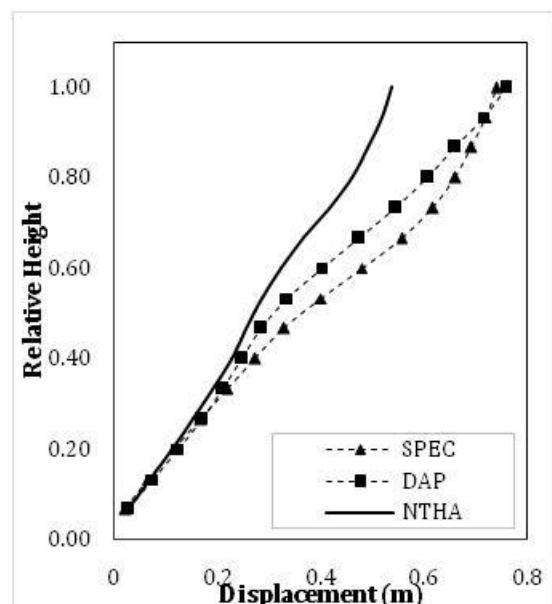
شکل ۲: نمودار زاویه دررفت طبقات سازه ۱۰ طبقه



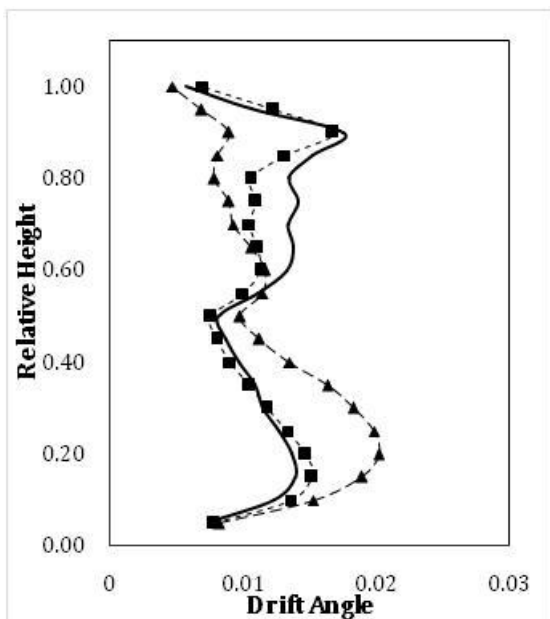
شکل ۱: نمودار جابجایی طبقات سازه ۱۰ طبقه



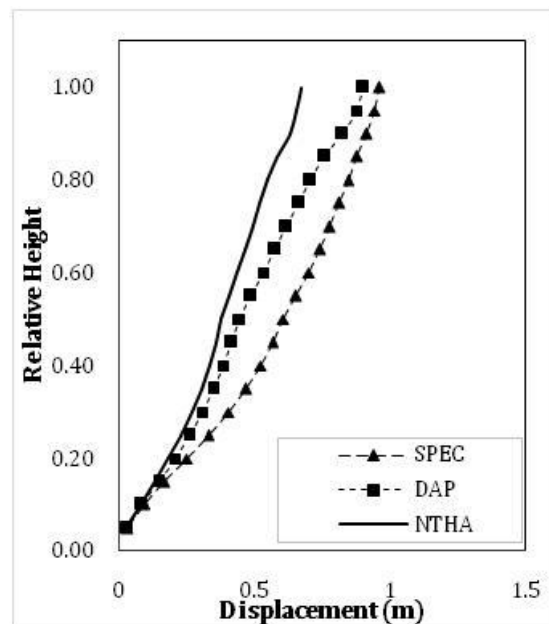
شکل ۴: نمودار زاویه دررفت طبقات سازه ۱۵ طبقه



شکل ۳: نمودار جابجایی طبقات سازه ۱۵ طبقه



شکل ۶: نمودار زاویه دررفت طبقات سازه ۲۰ طبقه

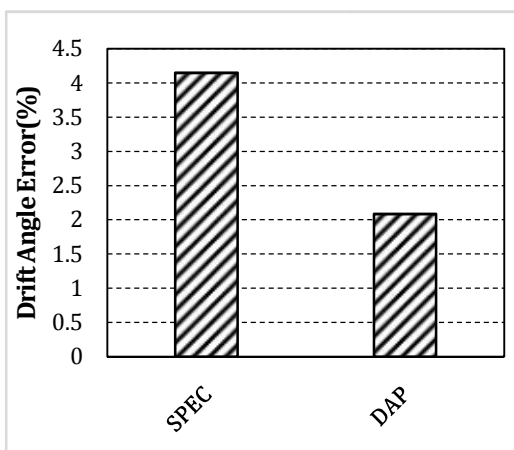


شکل ۵: نمودار جابجایی طبقات سازه ۲۰ طبقه

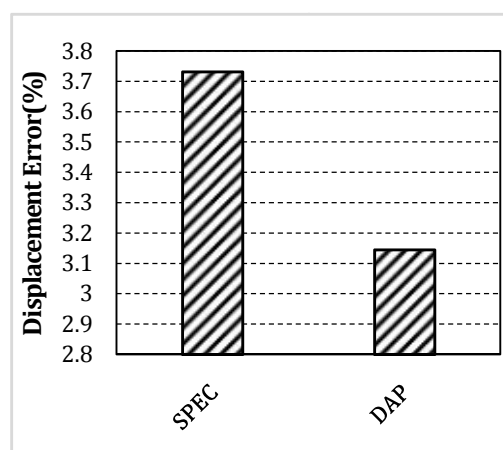
شکل ۷ تا شکل ۱۲، مقادیر خطای روش های مختلف را در مقایسه با روش تحلیل دینامیکی غیرخطی نشان می دهد. به منظور محاسبه درصد خطای هر روش از رابطه (۱) که توسط پینهو و همکاران معرفی شده است، استفاده می شود.

$$\text{Error}(\%) = \frac{100}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\Delta_{iNTHA} - \Delta_{ipushover}}{\Delta_{iNTHA}} \right)^2} \quad (1)$$

در رابطه ی فوق، n تعداد طبقات سازه، Δ_{iNTHA} حداکثر تغییرمکان نسبی یا مطلق در طبقه i حاصل از تحلیل دینامیکی غیرخطی، $\Delta_{ipushover}$ حداکثر تغییرمکان نسبی یا مطلق در طبقه i حاصل از تحلیل پوش اور می باشد.

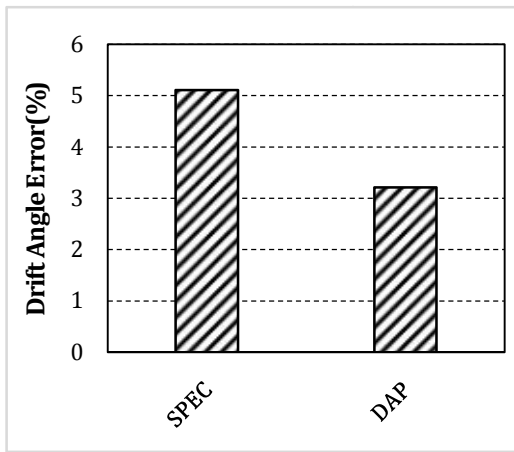


شکل ۸: خطای ناشی از روشهای مختلف تحلیل استاتیکی غیرخطی در محاسبه زاویه دررفت طبقات سازه ۱۰ طبقه

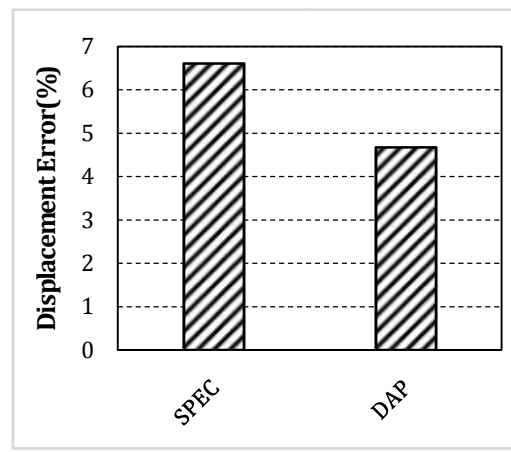


شکل ۷: خطای ناشی از روشهای مختلف تحلیل استاتیکی غیرخطی در محاسبه جابجایی طبقات سازه ۱۰ طبقه

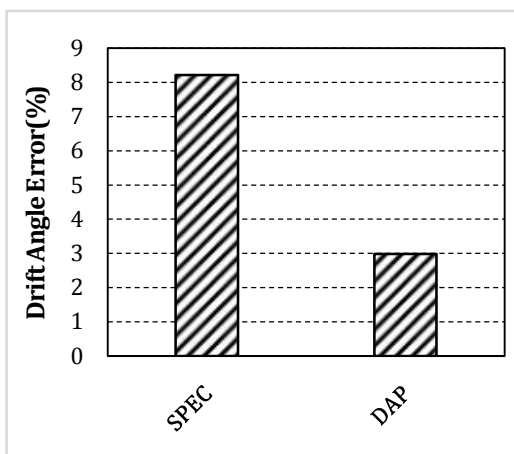




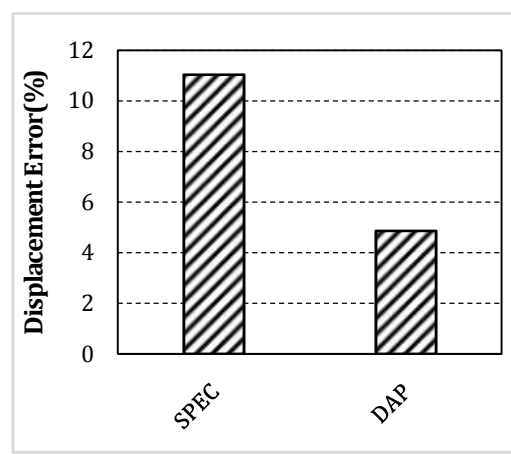
شکل ۱۰: خطای ناشی از روشهای مختلف تحلیل استاتیکی غیرخطی در محاسبه زاویه دررفت طبقات سازه ۱۵ طبقه



شکل ۹: خطای ناشی از روشهای مختلف تحلیل استاتیکی غیرخطی در محاسبه جابجایی طبقات سازه ۱۵ طبقه



شکل ۱۲- خطای ناشی از روشهای مختلف تحلیل استاتیکی غیرخطی در محاسبه زاویه دررفت طبقات سازه ۲۰ طبقه



شکل ۱۱- خطای ناشی از روشهای مختلف تحلیل استاتیکی غیرخطی در محاسبه جابجایی طبقات سازه ۲۰ طبقه

نتیجه گیری

- به منظور ارزیابی روش های مختلف تحلیل استاتیکی غیرخطی (سنتی و تطبیقی) در برآورد نیازهای لرزه ای (جابجایی و زاویه دررفت طبقات) سازه های فولادی، ۳ قاب خمشی فولادی با شکل پذیری متوسط و با تعداد طبقات ۱۰، ۱۵، ۲۰ و طراحی شده است. روش تحلیل استاتیکی غیرخطی (پوش اور) سنتی با الگوی بار جانبی طیفی (SPEC) به همراه روش تطبیقی (روش پوش اور بر اساس جابجایی DAP) مورد ارزیابی قرار گرفت و نتایج حاصل با روش تحلیل دینامیکی غیرخطی مقایسه شده است. نتایج زیر در محدوده مدل های این پژوهش حاصل شد:
- با افزایش تعداد طبقات به ویژه در سازه های بلند مرتبه، زاویه دررفت طبقات حاصل از روش های پوش اور پیشرفته DAP انطباق مناسبی با تحلیل دینامیکی غیرخطی دارند که این امر نشان می دهد روش پیشرفته تحلیل استاتیکی غیرخطی (DAP)، اثر موده های بالاتر در سازه های بلند مرتبه را لحاظ می کند.
 - در میان روش های مورد بررسی، روش DAP بیشترین انطباق را با تحلیل دینامیکی غیرخطی در تخمین نیازهای لرزه ای (جابجایی و زاویه دررفت طبقات) سازه های مورد مطالعه دارد به نحوی که کمترین خطای محاسبه شده در جابجایی طبقات، برای سازه ۲۰ طبقه، مربوط به روش DAP به مقدار ۵٪ می باشد، همچنین کمترین خطای محاسبه شده در زاویه دررفت طبقات، برای سازه ۲۰ طبقه، مربوط به روش DAP به مقدار ۳٪ می باشد که این امر نشان می دهد روش DAP به شکل مناسبی اثر موده های بالاتر را در سازه های بلند مرتبه لحاظ می کند.
 - نتایج حاصل برای سازه های بلند مرتبه نشان می دهد روش های سنتی تخمین درستی از مقادیر جابجایی طبقات ندارند و بیشترین خطا در سازه ۲۰ طبقه به مقدار ۱۱٪ مربوط به الگوی بار جانبی طیفی می باشد.
 - با افزایش ارتفاع سازه دقت نتایج حاصل از روش DAP در مقایسه با تحلیل پوش اور سنتی با الگوی بار طیفی (SPEC)، افزایش می یابد.

مراجع

Antoniou S, Pinho R (2004) Advantages and limitations of adaptive and non-adaptive force-based pushover procedures. *J Earthq Eng*; 8(4):497–522

ATC (1996) Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings. Report ATC-40. Redwood City (CA): Applied Technology Council

FEMA (2000) Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings, FEMA 356. Washington (DC): Federal Emergency Management Agency

OpenSees Development Team (Open Source Project) (2008) OpenSees: Open system for earthquake engineering simulation. Berkeley (CA): Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California

Pinho R and Antoniou S (2005) A displacement-based assessment of vertically irregular frames, *Proceedings of 4th European workshop on seismic behavior of irregular and complex structures*