ارزیابی رفتار لرزه ای قاب های بتن مسلح استاتیکی غیرخطی بهنگام شونده تغییرمکانی (DAP) با استفاده از روش تحلیل

رضا وهدانی
استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران
reza.vahdani2001@gmail.com

مجید بیطرفان
دانشجو کارشناسی ارشد زلزله، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران
Majidb68@yahoo.com

کلید واژه‌ها: *مود های بالاتر، تحلیل دینامیکی غیرخطی، تحلیل استاتیکی غیرخطی بهنگام شونده،* opensees، دریفت.

چکیده

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 می‌دهد. الگوی بار ثابت علی الرغم ورود سازه به ناحیه غیرارتجاعی، یکی از مهمترین محدودیت های روش های استاتیکی غیرخطی سنتی می‌باشد. به همین منظور در سال های اخیر روش های پیشرفته تحلیل استاتیکی غیرخطی با در نظرگرفتن اثر مودهای بالاتر ارائه شده است. هدف از این پژوهش، ارزیابی توانایی روش پوش اور بهنگام شونده تغییرمکانی (DAP) در تخمین نیازهای لرزه ای (جابجایی و دریفت طبقات) قاب های خمشی بتن مسلح می باشد. تعداد ۳ قاب خمشی بتن مسلح ۵ دهانه، با تعداد طبقات ۱۰، ۱۵و۲۰ طبقه، با شکل پذیری متوسط طراحی شده است. در نهایت نتایج حاصل، با تحلیل های استاتیکی غیرخطی سنتی و تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی (NTHA)، به عنوان پاسخ دقیق مقایسه می‌شود. کلیه شتابنگاشت های مورد استفاده در این پژوهش، به روش ۲۸۰۰ مقیاس شده اند. همچنین در کلیه روش های پوش اور، تغییر مکان بام سازه بر اساس دستورالعمل بهسازی لرزه ای ساختمان های موجود (نشریه شماره ۳۶۰) محاسبه گردیده است. نتایج نشان می دهد اختلاف میان پاسخ های حاصل از روش های مختلف پوش اور، در سازه های کوتاه مرتبه ناچیز می باشد. همچنین روش DAP به خوبی نیاز جابجایی و زاویه دریفت طبقات را به خصوص برای سازه های بلند تخمین می زند و اثرات مود های بالاتر را به خوبی 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 تغییرمکان هدف مورد نظر، افزایش می‌دهد. 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 غیر خطی 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 الگوهای بار جانبی مختلف شامل الگوی بار مثلثی، مود اول نوسان سازه و یکنواخت مورد ارزیابی قرار می گیرد و نتایج حاصل با روش های پیشرفته تحلیل پوش اور و شامل روش پوش اور بهنگام شونده بر اساس جابجایی (DAP)، 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 می شود. به همین منظور تعداد ۳ قاب خمشی بتن مسلح 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 می شود. این نرم افزار قابلیت انجام تحلیل های استاتیکی غیرخطی بهنگام شونده را ندارد، بنابراین به منظور انجام تحلیل های مذکور، کد های روش های مختلف پوش اور بهنگام شونده نوشته شده است.

کلیه شتابنگاشت های مورد استفاده در این پژوهش به روش ۲۸۰۰ مقیاس شده اند. همچنین در کلیه ی سازه های مورد بررسی در این پژوهش، جابجایی بام سازه، با توجه به تحلیل دینامیکی غیر خطی محدود شده اند.

تحلیل استاتیکی غیرخطی (پوش اور)

به دلیل رفتار غیرخطی سازه درحین زلزله های شدید، فلسفه طراحی لرزه ای سازه ها بر مبنای رفتار غیرخطی آنها می باشد بنابراین آسیب‌پذیری سازه ها در برابر زلزله توسط ظرفیت تغییر شکل غیر الاستیک المان های سازه ای کنترل می شود. با توجه به پیچیدگی های مدل‌سازی و تحلیل به روش دینامیکی غیرخطی امروزه از روش های مختلف تحلیل استاتیکی غیرخطی به عنوان روشی جایگزین استفاده می شود.

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 می یابد. الگوهای بار مورد استفاده در این تحلیل به دو دسته ی الگوهای بار ثابت و متغیر طبقه بندی می شوند. در الگوهای بار ثابت، نیروهای اینرسی در حین زلزله ثابت و بدون تغییر باقی می ماند. 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 می یابد. 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 آیین نامه‌های FEMA 356 و ATC-40) می باشد. به همین منظور در سال های اخیر روش های پیشرفته تحلیل استاتیکی غیرخطی توسط محققین مختلف ارائه شده است.

در روش پوش اور تطبیقی DAP توسط آنتینیو و پینهو (۲۰۰۴) ارائه شده است، در هر مرحله با توجه به زوال سختی اعضای سازه، ناشی از نیروهای داخلی، ماتریس سختی و مشخصات تغییریافته ی سازه تعیین می شود و در نهایت الگوی جابجایی با توجه به بردار جابجایی اولیه و بردار جابجایی مودی بر اساس روابط ارائه شده توسط محققین مذکور، تصحیح می شود. توضیحات تکمیلی پیرامون این روش در مرجع ذکر شده است.

در این پژوهش توانایی روش پوش اور سنتی با الگوهای بار جانبی مثلثی (TR)، مود اول نوسان سازه (M1) و یکنواخت (Uniform) به همراه روش پوش اور تطبیقی DAP، در برآورد نیازهای لرزه ای سازه های فولادی مورد ارزیابی قرار می گیرند.

معرفی مدل‌ها

به منظور بررسی روش های مختلف تحلیل پوش اور، از مدل های ۱۰ ، ۱۵ و ۲۰ طبقه با ارتفاع طبقات ۳.۲ 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 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 می باشد.

به منظور انجام تحلیل استاتیکی غیرخطی از نرم افزار OpenSees استفاده شده است. در جدول ۱ مقاطع مورد استفاده برای سازه‌های مختلف ارائه شده است.

معرفی شتاب نگاشت‌ها

به منظور انجام تحلیل دینامیکی غیرخطی از ۱۰ شتابنگاشت دور از گسل مطابق جدول ۴، استفاده شده است. تمامی نگاشت‌های 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 شده‌اند.

جدول ۱- معرفی مقاطع مورد استفاده در قاب ها

دهانه-مدل	ستون های خارجی			ستون های داخلی			تیر ها		
	طبقه	اندازه (cm)	آرماتور (mm)	طبقه	اندازه (cm)	آرماتور (mm)	طبقه	اندازه (cm)	آرماتور (mm)
۱۰-۵	۱ ۲ ۳ ۴ ۸-۵ ۱۰-۹	۷۰X۷۰ ۶۰X۶۰ ۶۰X۶۰ ۶۰X۵۰ ۵۰X۴۰ ۵۰X۴۰	۲۴φ۲۰ ۲۰φ۲۰ ۱۶φ۱۶ ۱۲φ۱۶ ۱۲φ۱۶ ۸φ۱۶	۱ ۴-۲ ۶-۵ ۸-۷ ۱۰-۹	۷۰X۷۰ ۶۰X۶۰ ۶۰X۵۰ ۵۰X۴۰ ۵۰X۴۰	۱۶φ۲۰ ۱۶φ۱۶ ۱۲φ۱۶ ۱۴φ۱۶ ۸φ۱۶	۷-۱ ۱۰-۸	۵۵X۵۰ ۵۰X۴۰	۱۳φ۲۰ ۷φ۲۰
۱۵-۵	۲-۱ ۳ ۴ ۶-۵ ۷ ۱۵-۸	۷۰X۷۰ ۶۰X۶۰ ۶۰X۶۰ ۶۰X۶۰ ۶۰X۵۰ ۵۰X۴۰	۲۸φ۲۰ ۲۸φ۲۰ ۲۰φ۲۰ ۱۶φ۱۶ ۱۴φ۱۶ ۱۲φ۱۶	۱ ۲ ۴-۳ ۸-۵ ۱۲-۹ -۱۳ ۱۵	۷۰X۷۰ ۶۰X۶۰ ۶۰X۶۰ ۶۰X۶۰ ۶۰X۵۰ ۵۰X۴۰	۲۸φ۲۰ ۲۸φ۲۰ ۲۰φ۲۰ ۱۶φ۱۶ ۱۴φ۱۶ ۱۲φ۱۶	۸-۱ ۱۲-۹ -۱۳ ۱۵	۶۰X۶۰ ۶۰X۶۰ ۵۰X۴۵	۱۴φ۲۰ ۱۱φ۲۰ ۸φ۲۰
۲۰-۵	۲-۱ ۵-۳ ۹-۶ ۱۱-۱۰ ۱۵-۱۲ ۲۰-۱۶	۷۰X۷۰ ۶۰X۶۰ ۶۰X۶۰ ۶۰X۶۰ ۵۰X۴۰ ۵۰X۴۰	۲۸φ۲۰ ۲۸φ۲۰ ۲۰φ۲۰ ۱۶φ۱۶ ۱۴φ۱۶ ۱۲φ۱۶	۱ ۴-۲ ۱۱-۵ ۱۴-۱۲ -۱۵ ۱۸ -۱۸ ۲۰	۷۰X۷۰ ۶۰X۶۰ ۶۰X۶۰ ۶۰X۶۰ ۶۰X۵۰ ۵۰X۴۰	۱۶φ۲۰ ۲۸φ۲۰ ۲۰φ۲۰ ۱۶φ۱۶ ۱۴φ۱۶ ۱۲φ۱۶	۱۰-۱ ۱۶-۱۱ ۲۰-۱۶	۷۰X۶۰ ۶۰X۵۰ ۶۰X۵۰	۱۶φ۲۰ ۱۳φ۲۰ ۸φ۲۰

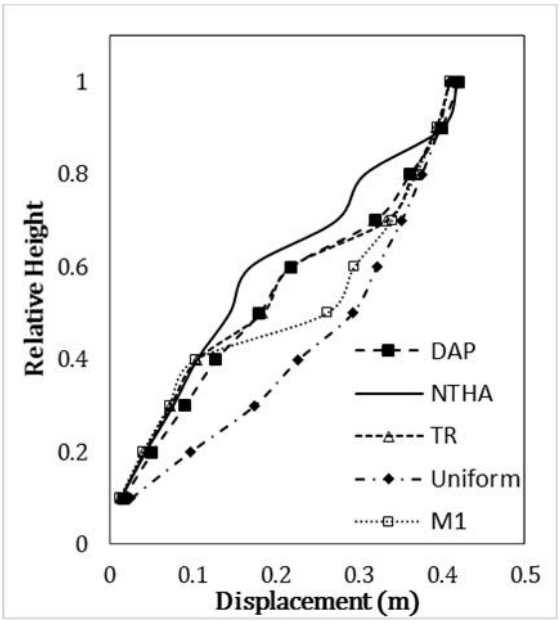
به منظور مقایسه روش های مختلف تحلیل استاتیکی غیرخطی مورد بحث، تحلیل دینامیکی غیرخطی بر روی قاب های مورد نظر با استفاده از نرم افزار OpenSees انجام شده است و نتایج مربوط به جابجایی ودریفت طبقات در ادامه ارائه شده است. رکوردهای انتخاب شده در این مطالعه، به مدل های مذکور اعمال شده و ودر نهایت میان پاسخ های بدست آمده میانگین گیری شده است و نتایج با روش‌های مختلف تحلیل استاتیکی غیرخطی (سنتی و بهنگام شونده) مقایسه می شود.

جدول ۲- مشخصات شتابنگاشت های مورد استفاده در این مطالعه

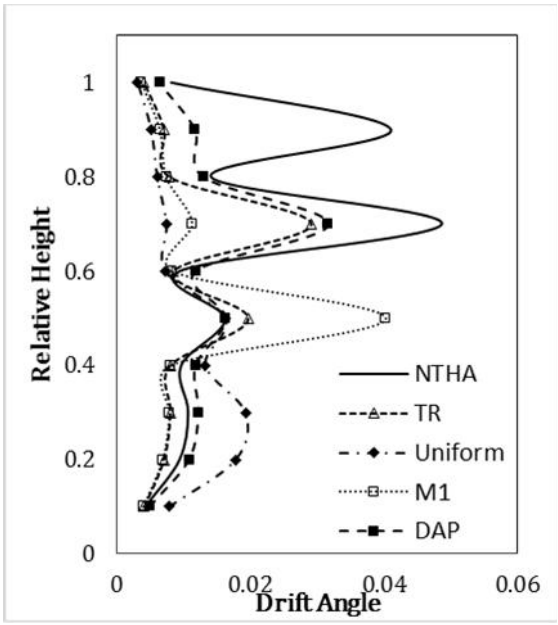
Number	Earthquake name	Date (yy-mm-dd)	Station	R (Km)	PGA (g)	PGV/PGA (s)	CAV (m/s)	Tp (s)	Tm (s)
1	Chi-Chi,Taiwan,	99-09-20	CHY065	83.43	0.1	0.14	9.88	0.56	0.79
2	Chi-Chi,Taiwan,	99-09-20	TAP095	109.01	0.15	0.18	56.56	0.98	0.84
3	LomaPrieta,	89-10-18	CDMG58224	72.2	0.24	0.15	27.69	0.32	0.86
4	LomaPrieta,	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

مقایسه روش های مختلف تحلیل استاتیکی غیرخطی

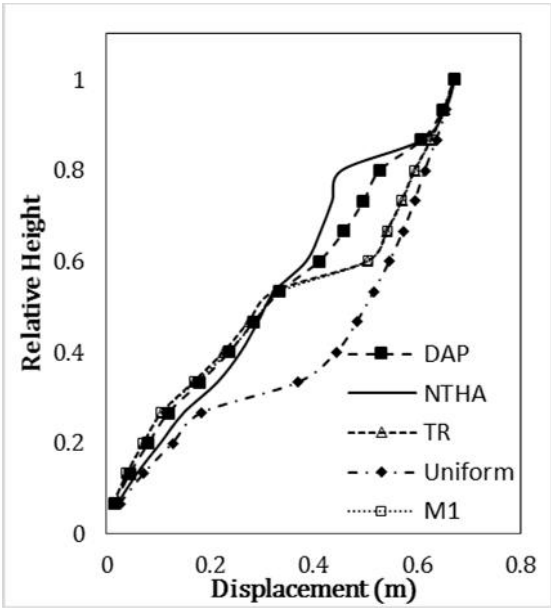
به منظور مقایسه روش های مختلف تحلیل استاتیکی غیر خطی در تخمین جابجایی و زاویه دریفت طبقات (به عنوان یکی از مهمترین شاخص های ارزیابی نیاز لرزه ای سازه ها)، نتایج حاصل از تحلیل دینامیکی غیرخطی به عنوان مبنا در نظر گرفته شده و نتایج حاصل از روش های مختلف تحلیل استاتیکی غیرخطی (سنتی و بهنگام شونده) با روش مبنا مقایسه شده است. نتایج حاصل از تحلیل استاتیکی غیرخطی سنتی با الگوهای بار جانبی مود اول (M1)، مثلثی (TR)، یکنواخت (Uniform) و روش بهنگام شونده DAP، در شکل های ۱ تا ۶، ارائه شده است.



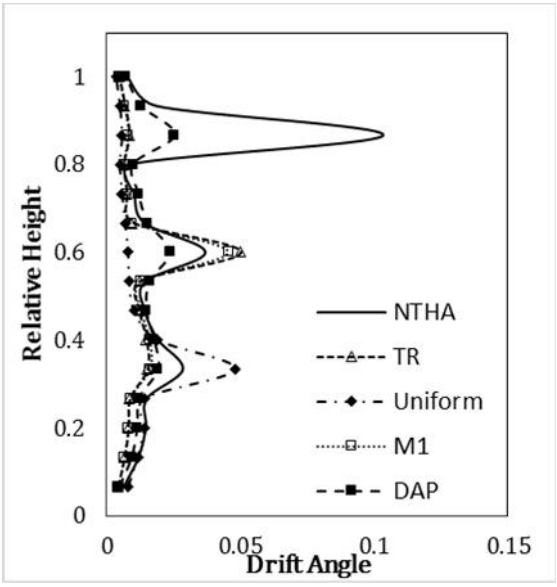
شکل ۱- نمودار جابجایی طبقات سازه ۱۰ طبقه



شکل ۲- نمودار زاویه دریفت طبقات سازه ۱۰ طبقه



شکل ۳- نمودار جابجایی طبقات سازه ۱۵ طبقه

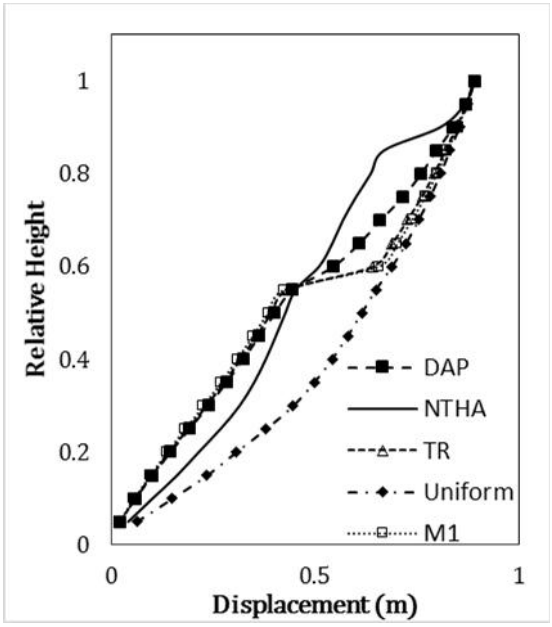


شکل ۴- نمودار زاویه دریفت طبقات سازه ۱۵ طبقه

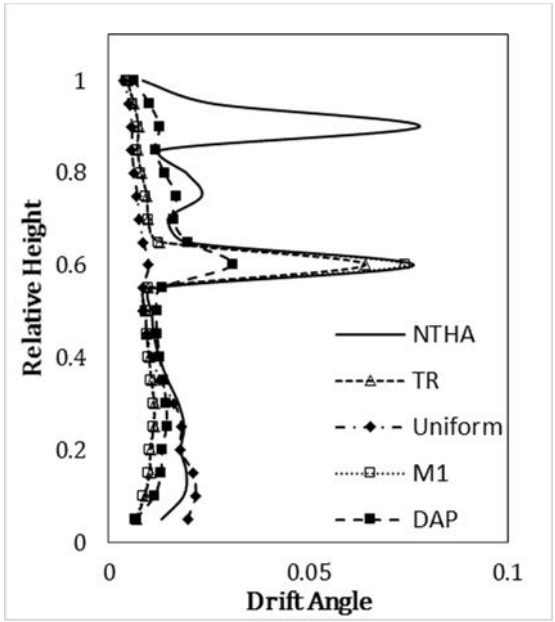
شکل های ۷ تا ۱۲، مقادیر خطای روش های مختلف را در مقایسه با روش تحلیل دینامیکی طیفی نشان می دهد. به منظور محاسبه درصد خطای هر روش از رابطه ۱ که توسط پینهو و همکاران (۲۰۰۵) معرفی شده است، استفاده می شود.

$$Error(\%) = \frac{100}{n}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{\Delta_{i_{NTHA}} - \Delta_{i_{Pushover}}}{\Delta_{i_{NTHA}}}\right)^2} \quad (۱)$$

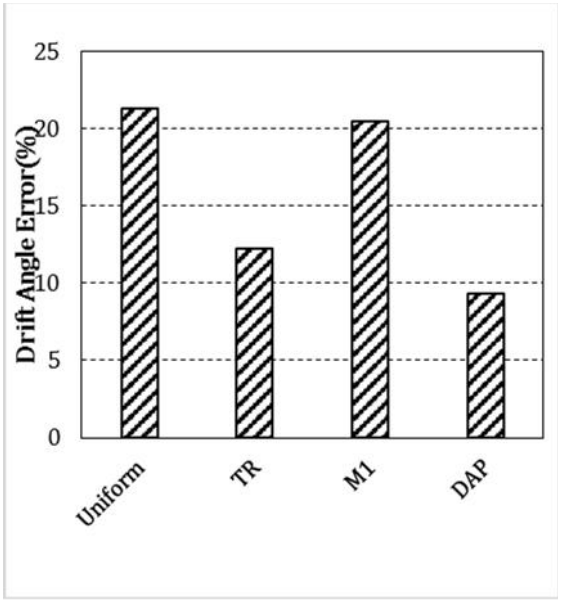
در رابطه ی فوق، n تعداد طبقات سازه، $\Delta_{i_{NTHA}}$ حداکثر تغییرمکان نسبی یا مطلق در طبقه i حاصل از تحلیل دینامیکی غیرخطی، $\Delta_{i_{Pushover}}$ حداکثر تغییرمکان نسبی یا مطلق در طبقه i حاصل از تحلیل پوش اور می باشد.



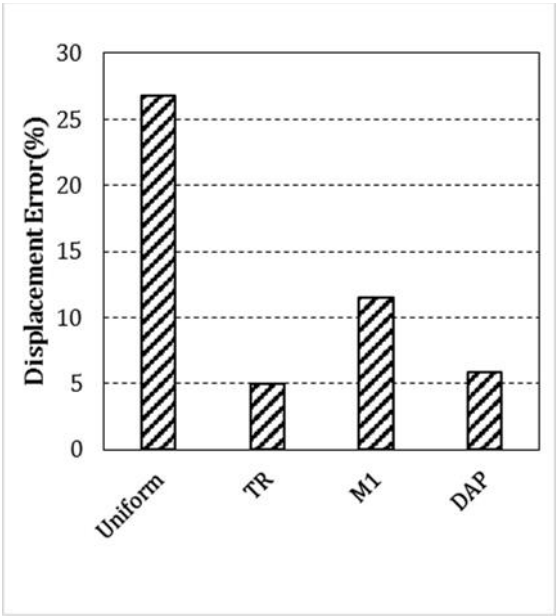
شکل ۵- نمودار جابجایی طبقات سازه ۲۰ طبقه



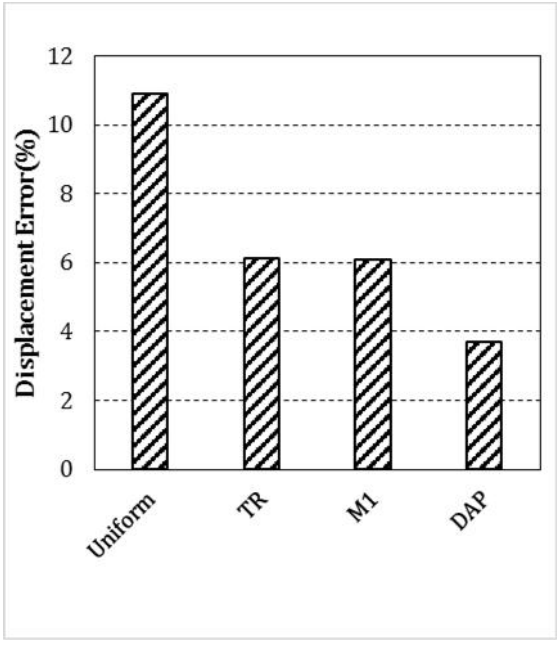
شکل ۶- نمودار زاویه دریفت طبقات سازه ۲۰ طبقه



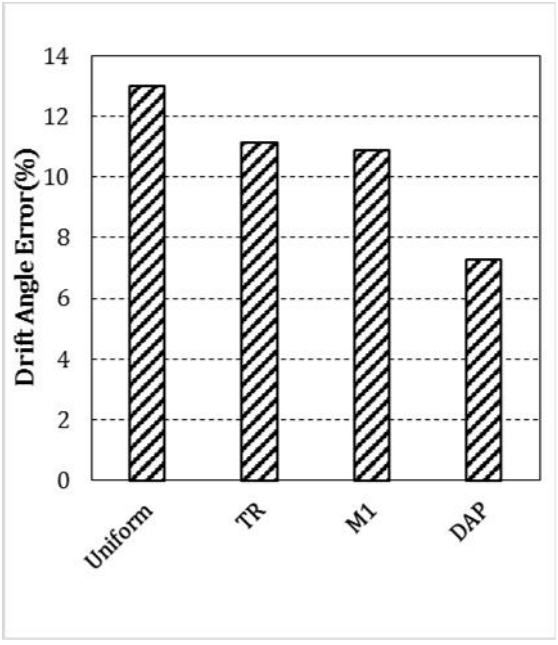
شکل ۸- خطای ناشی از روش های مختلف تحلیل استاتیکی غیر خطی در محاسبه دریفت طبقات سازه ۱۰ طبقه



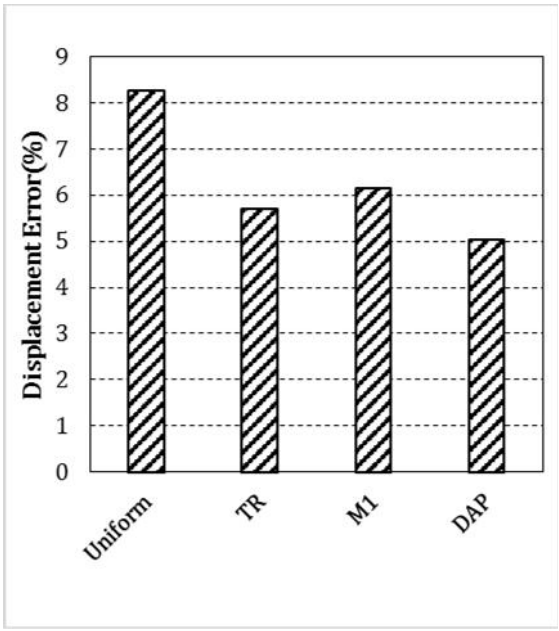
شکل ۷- خطای ناشی از روش های مختلف تحلیل استاتیکی غیر خطی در محاسبه جابجایی طبقات سازه ۱۰ طبقه



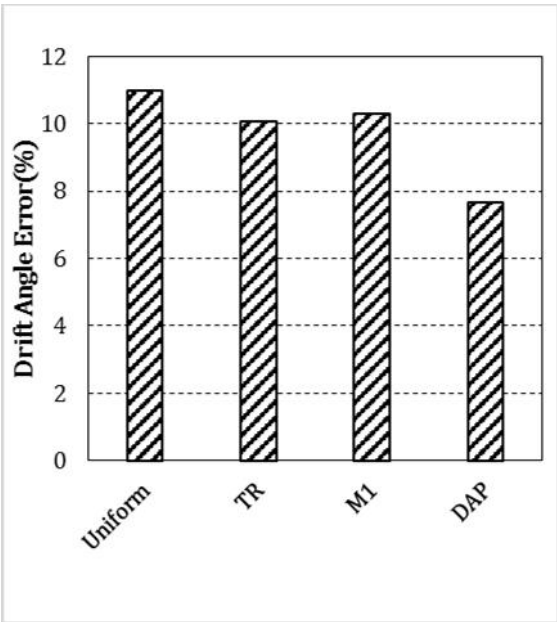
شکل ۹- خطای ناشی از روش های مختلف تحلیل استاتیکی غیر خطی در محاسبه جابجایی طبقات سازه ۱۵ طبقه



شکل ۱۰- خطای ناشی از روش های مختلف تحلیل استاتیکی غیر خطی در محاسبه دریفت طبقات سازه ۱۵ طبقه



شکل ۱۱- خطای ناشی از روش های مختلف تحلیل استاتیکی غیر خطی در محاسبه جابجایی طبقات سازه ۲۰ طبقه



شکل ۱۲- خطای ناشی از روش های مختلف تحلیل استاتیکی غیر خطی در محاسبه دریفت طبقات سازه ۲۰ طبقه

نتیجه گیری

به منظور ارزیابی روش های مختلف تحلیل استاتیکی غیرخطی (سنتی و بهنگام شونده) در برآورد نیازهای لرزه ای (جابجایی و دریفت طبقات) سازه‌های بتن مسلح، ۳ قاب خمشی فولادی با شکل پذیری متوسط و با تعداد طبقات ۱۰ ،۱۵ و۲۰، طراحی شده است. روش تحلیل استاتیکی غیرخطی (پوش اور) سنتی با الگوهای بار جانبی مثلثی (TR)، مود اول (M1) و یکنواخت (Uniform) به همراه روش بهنگام شونده (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:

- در کلیه سازه های مورد بررسی روش پوش اور سنتی با الگوی بار جانبی یکنواخت (Uniform) نتایج غیر قابل قبولی در مقایسه با روش تحلیل دینامیکی خطی (NTHA) ارائه می دهد و روش مناسبی نمی باشد. بیشترین خطای حاصل در محاسبه دریفت و جابجایی طبقات مربوط به الگوی بار Uniform و به ترتیب در حدود ۲۱ و ۲۶ درصد، برای سازه های ۱۰ طبقه می باشد.
- در سازه هایی که ارتفاع کمتری دارند، روش های تحلیل استاتیکی غیر خطی مثلثی (TR) و پیشرفته انطباق مناسبی با روش دینامیکی غیر خطی دارند به طوری که روش TR در سازه ی ۱۰ طبقه دارای کمترین درصد خطا (حدود ۵ درصد در جابجایی طبقات) می باشد که حتی نسبت به روش های بهنگام شونده دارای خطای کمتری می باشد. با افزایش تعداد طبقات روش تحلیل استاتیکی غیر خطی مثلثی (TR) خطای بیشتری در برآورد نیازهای لرزه ای قاب های خمشی بتن مسلح (جابجایی و دریفت طبقات) خواهد داشت به طوری که بیشترین خطای حاصل از روش TR مربوط به سازه ۱۵ و ۲۰ طبقه (حدود ۶ درصد در جابجایی طبقات) می باشد. از طرفی درصد خطا در دریفت طبقات در هر سه سازه در روش TR تقریبا به یک مقدار می باشد.
- با افزایش تعداد طبقات به ویژه در سازه های بلند مرتبه، دریفت و جابجایی طبقات حاصل از روش پوش اور پیشرفته DAP انطباق مناسبی با تحلیل دینامیکی غیرخطی دارند که این امر نشان می دهد روش های پیشرفته تحلیل استاتیکی غیرخطی، اثر مودهای بالاتر در سازه های بلند مرتبه را لحاظ می کند.
- در میان کلیه روش های مورد بررسی، در کل روش DAP بیشترین انطباق را با تحلیل دینامیکی غیرخطی در تخمین نیازهای لرزه ای (جابجایی و دریفت طبقات) سازه های مورد مطالعه دارد به نحوی که کمترین خطای محاسبه شده در کلیه سازه ها در جابجایی طبقات، برای سازه ۱۵ طبقه، مربوط به روش DAP به مقدار ۳.۷٪ می باشد. همچنین کمترین خطای محاسبه شده در مجموع کلیه سازه‌ها در محاسبه دریفت طبقات، برای سازه ۱۵ طبقه، مربوط به روش DAP به مقدار ۷.۲٪ می باشد که این امر نشان می دهد روش DAP به شکل مناسبی اثر مودهای 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 مربوط به الگوهای بار جانبی مستطیلی و مود ۱ می باشد.

مراجع

آیین‌نامه طراحی ساختمانها در برابر زلزله (استاندارد ۲۸۰۰)؛ ویرایش سوم؛ وزارت مسکن و شهرسازی؛ ۱۳۸۴.

Applied Technology Council (1996) Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings, ATC- 40, Volume 1, Redwood City

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

http://seismosoft.com/en/Download.aspx

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

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

Abbasnia R, Tajik Davoudi A, Maddah MM (2012) Capacity curve estimation of reinforced concrete frames with a novel adaptive pushover method , Proceedings of the *4th International Conference on Seismic Retrofitting, Tabriz, Iran*

www.peer.berkeley.edu/peer_ground_motion_databas