



مجله علمی پژوهشی مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها

یادداشت تحقیقاتی:

ارزیابی روش‌های رایج پوش‌آور برای سازه‌های بتن مسلح نامنظم در پلان تحت اثر مولفه‌های همزمان لرزه‌ای

علی رضا فیوض^{۱*}، محمد صافی^۲ و عبدالمهدی عباسی^۳

^۱ استادیار و عضو هیات علمی دانشگاه خلیج فارس بوشهر، بوشهر

^۲ استادیار و عضو هیات علمی دانشگاه صنعت آب و برق شهید عباسپور، تهران

^۳ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی زلزله، دانشگاه آزاد اسلامی واحد بوشهر

چکیده

تحلیل استاتیکی غیرخطی (پوش‌آور) به دلیل سهولت کاربرد و هزینه محاسباتی کمتر به عنوان جایگزینی مناسب برای روش تاریخچه زمانی غیرخطی معرفی شده است. محققان روشهای پوش‌آور مختلفی را برای سازه‌های دوبعدی ارائه کرده‌اند که ارزیابی آنها در سازه‌های واقعی سه‌بعدی و نامنظم ضروری به نظر می‌رسد. در پژوهش حاضر، کارایی روش‌های رایج پوش‌آور در پیش‌بینی پاسخ قاب‌های سه‌بعدی بتن مسلح با استفاده از المان‌های غیرخطی نیرویی فیبری ارزیابی شده است. قاب‌هایی با درجات متفاوت نامنظمی پلانی به روش‌های پوش‌آور با توزیع بار ثابت، پوش‌آور با توزیع بار مثلثی معکوس، آنالیز پوش‌آور به هنگام شونده نیرویی مودال و آنالیز پوش‌آور به هنگام شونده نیرویی طیفی تحلیل شده و پارامترهای نیرو و جابجایی با نتایج تحلیل دینامیکی غیرخطی دو مولفه‌ای تحت شتابنگاشت‌های حوزه‌های دور و نزدیک گسل، مقایسه شدند. نتایج حاصل نشان می‌دهد گرچه رویکرد چند روشی می‌تواند تصویر بهتری از پاسخ سازه‌ای قاب‌های سه‌بعدی بتن مسلح ارائه دهد اما روش‌های به هنگام شونده بطور متوسط از موفقیت بالاتری در پیش‌بینی رفتار غیرخطی اینگونه سازه‌ها برخوردارند.

کلمات کلیدی: چند مولفه‌ای؛ پوش‌آور؛ ساختمان‌های نامنظم در پلان؛ حوزه نزدیک گسل.

Technical Note:

Parametric evaluation of pushover methods in irregular 3D RC structures under multicomponents seismic loading

A. R. Feuze^{1*}, M. Safi² and A. M. Abbasi³

¹ Ph.D. Assistant Prof. Persian Gulf Univ., Bushehr, Iran

² Ph.D. Assistant Prof. Shahid Abbaspoor Univ., Tehran, Iran

³ MSc. Student of Earthquake Engineering, Islamic Azad Univ., Bushehr, Iran

Abstract

Because of its relative simplicity and less computing costs, Pushover analysis, gains a supremacy over nonlinear time history analysis in structural engineering communities. Researchers conducted several 2D pushover methods that their efficiency in real 3D structures should be evaluated. In this research the proficiency of common pushover analysis procedures to predict the response of 3D in-plan Irregular reinforced concrete frames has been evaluated. Several RC frames with different in-plan Irregularities and heights was analysed using conventional pushover analysis with rectangular and triangular loading scheme, modal pushover and forced-based adaptive pushover analysis. Comparing results with bi-directional nonlinear dynamics analysis using ordinary and near-fields seismograms indicate that although the multi-procedure approach can present a better picture of the structural response of 3D RC frames, the more advanced procedures in contrast to other procedures, on the average, have higher achievements on predicting nonlinear behaviour of such structures.

Keywords: Multicomponents; Pushover; Irregular RC buildings; Near field effects.

۱- مقدمه

در حال حاضر روش دینامیکی غیرخطی دقیق‌ترین روش در پیش‌بینی رفتار لرزه‌ای سازه‌های مختلف به شمار می‌رود. دشواری در انتخاب مجموعه شتابنگاشت‌های مناسب و مقیاس کردن آنها، نیاز به سخت‌افزار قوی و زمان محاسباتی طولانی، مسائل مرتبط با تشکیل ماتریس میرایی و نیاز به پس‌پردازنده‌های قوی برای تفسیر حجم بالای نتایج آن موجب شده است تا کاربرد این روش در دفاتر مهندسی با محدودیت‌هایی روبرو شود [۱]. از طرف دیگر، رفتار مسلم غیرخطی سازه‌ها هنگام زمین لرزه، همچنین عدم کارایی مفهومی و ذاتی روش‌های خطی در ارزیابی سازه‌های موجود و نیازمندی روش‌های نوین طراحی بر اساس عملکرد به آگاهی از چگونگی رفتار غیرخطی سازه مستلزم استفاده از روش‌های غیرخطی است [۲]. روش‌های مختلف پوش‌آور که طی دو دهه گذشته توسعه داده شده‌اند نمونه‌ای از تلاش‌های پژوهشگران در جهت معرفی مفاهیم غیرخطی به شکلی ساده‌تر می‌باشد. مبنای استخراج اغلب روش‌های موجود قاب-های دو بعدی است که این موضوع استفاده از آنها را در وضعیت واقعی سازه‌های سه بعدی دچار ابهام می‌کند. همچنین، به رسمیت شناخته شدن این روش‌ها در آیین‌نامه-های طراحی مدرن [۳ و ۴] که منجر به کاربرد روزمره آنها در دفاتر مهندسی شده است لزوم ارزیابی آنها در سازه‌های سه بعدی نامنظم در پلان تحت مولفه‌های همزمان لرزه‌ای-که حجم زیادی از ساختمان‌های موجود را تشکیل می‌دهد- را بیش از پیش پررنگ کرده است [۵]. در این میان ساختمان‌های بتن مسلح به دلیل رفتار زیاد غیرخطی در اثر ترک-خوردگی و در نتیجه آن کاهش سختی حین تجربه زلزله از اهمیت بیشتری برخوردارند.

توسعه یک روش تحلیلی ساده برای پیش‌بینی رفتار غیرخطی سازه‌های نامنظم در پلان به دلیل رفتار دینامیکی انتقالی و پیچشی وابسته به هم با دشواری روبرو بوده است [۶]. نخستین تلاش‌ها در تعمیم روش‌های پوش‌آور به سازه‌های نامنظم در پلان از سال ۱۹۹۸ آغاز شد. در نمونه‌ای از این تلاش‌ها استفاده از روش پوش‌آور با توزیع بار ثابت و اعمال آن در مرکز جرم سازه صورت گرفت در این پیاده-سازی نامنظمی در پلان با تغییر مرکز جرم سازه حاصل می-شد. محل اعمال بار استاتیکی نسبت به موقعیت مرکز جرم

در چهار حالت مختلف تغییر داده شد تا نزدیکترین پاسخ به روش دینامیکی غیرخطی بدست آید. این روش تنها روی یک مدل آزموده شده است با این وجود مولفان نتیجه‌گیری کرده‌اند که اختلاف نتایج روش پوش‌آور با نتایج حاصل از روش دینامیکی غیرخطی روی پاسخ سازه‌ی مورد مطالعه کم‌تاثیر است [۷].

در سال ۲۰۰۰، نخستین روش پوش‌آور سه بعدی برای ارزیابی آسیب‌پذیری ساختمان‌ها ارائه گردید [۸]. در این روش دو آنالیز پوش‌آور معمولی به صورت جداگانه و طی دو مرحله روی سازه انجام می‌گیرد. فرض شده است جابجایی مرکز جرم بطور کامل وضعیت جابجایی پیچشی و انتقالی سازه را تعریف می‌کند. از انجام روش پوش‌آور نخست و با تشکیل سازه یک درجه آزاد معادل و با فرض حاکم بودن مود اول بر رفتار آن، تغییر فرم هدف در مرکز جرم بدست می‌آید. با انجام تحلیل پوش‌آور دوم و با در دست بودن تغییر فرم هدف، پاسخ‌های سازه محاسبه می‌شود. این روش توسط مولفین روی یک سازه نمونه آزموده شده است. هر چند فرض حاکم بودن مود اصلی انتقالی سازه منجر به عدم پاسخ مناسب روش در سازه‌های با مود غالب پیچشی می‌شود. به این مورد در مقاله مذکور اشاره شده است [۸]. در روش‌های فوق توزیع بار جانبی در گام‌های مختلف روش پوش‌آور ثابت نگه داشته شده است؛ علاوه بر این، در این روش‌ها از منحنی پوش‌آور هم برای تخمین نیاز لرزه‌ای و هم برای بدست آوردن نیروهای داخلی اعضا و پاسخ‌های کلی سازه حاصل از آن نیاز لرزه‌ای استفاده شده است. در خلال تلاش‌های انجام شده در توسعه یک روش تحلیل پوش‌آور سه بعدی کارآمد در اواخر دهه‌ی ۹۰ میلادی، آگاهی از تاثیر مودهای بالاتر منجر به ابداع روش‌های جدیدی گردید که از این میان می‌توان به روش N2، روش مودال و روش پوش‌آور بهنگام شونده اشاره کرد [۹-۱۱]. در این میان تنها روش‌های N2 و مودال قابلیت تخمین نیاز لرزه‌ای را از طریق پیش‌بینی تغییر فرم هدف دارند. روش پوش‌آور بهنگام شونده تنها برای تخمین پاسخ لرزه‌ای قابل استفاده است.

در سال ۲۰۰۵، روش N2 به ساختمان‌های نامنظم در پلان گسترش داده شد. در این روش نتایج حاصل از تحلیل پوش‌آور سه بعدی سازه با نتایج حاصل از تحلیل دینامیکی خطی (طیفی) ترکیب می‌شود [۱۲]. الگوی بار جانبی در این

سنتی با توزیع بار جانبی ثابت مستطیلی (UPA) و توزیع بار جانبی مثلثی (TPA)، همچنین روش‌های پوش آور مدرن توزیع بار جانبی بهنگام شونده نیرویی مودال (MMPA) و توزیع بار جانبی بهنگام شونده نیرویی طیفی (AMPA) با یکدیگر و با روش دقیق دینامیکی غیرخطی (NTH) از طریق میانگین‌گیری آماری مقایسه شده است. پاسخ‌های لرزه‌ای حاصل از روش دینامیکی غیرخطی به عنوان نیاز لرزه‌ای محسوب شده است.

در این مقاله برای نخستین بار در مقایسه با پژوهش‌های مرتبط با موضوع، یک چارچوب مدلسازی کامل برای بررسی روش‌های پوش آور در مورد سازه‌های سه بعدی بتن مسلح ارایه گردیده است. در این چارچوب، میزان خروج از مرکزیت به عنوان یک شاخص عمده نامعینی به صورت منظم از مقدار حداقل (صفر درصد که نماینده سازه کاملاً معین می باشد) تا مقدار ۲۰ درصد (که در اکثر آیین نامه‌های رایج طراحی به عنوان حد بالای نامنظمی عنوان می شود) افزایش داده شده است که به این ترتیب علاوه بر اینکه امکان مطالعه پارامتریک روش‌های پوش آور را فراهم شده است؛ مقایسه کارایی روشها در سازه‌های نامنظم دقت آماری بهتری یافته است، نکته ای که اغلب در پژوهش‌های گذشته نادیده گرفته شده است.

۲- مبانی تئوری روشهای مورد مطالعه

روش‌های پوش آور با بار ثابت، حل افزایشی-تکراری غیرخطی معادله‌ی تعادل $KU = P$ با فرمول بندی المان محدود است. در معادله‌ی تعادل مذکور، K ماتریس سختی غیرخطی، U بردار جابجایی و P بردار بار از پیش تعریف شده‌ای است که بصورت جانبی در ارتفاع سازه توزیع می‌شود. این توزیع بار جانبی - که می‌تواند به شکل نیرو یا جابجایی باشد - لزوماً در طی فرایند تحلیل از نسبت ثابتی برخوردار است (الگوی ثابت). در پایان هر تکرار بردار عکس العمل سازه (P^e) از مشارکت کلیه‌ی المان‌های محدود حاصل می‌شود. نیروهای Out-Of-balance بصورت تکراری، دوباره اعمال می‌شوند تا وقتی همگرایی با تولرانس مورد نظر حاصل گردد. در این روش، بردار بار جانبی بصورت $P = \gamma \cdot P_0$ در نظر گرفته می‌شود. که P_0 در این پژوهش، در یک حالت با مقدار ۰ در تراز پایه و مقدار حداکثر P_0 در تراز بام (توزیع مثلثی معکوس یا

روش نیز مستطیلی و در طول تحلیل ثابت می‌باشد. این روش برای سازه‌های منظم منجر به پاسخ‌های محافظه کارانه می‌شود.

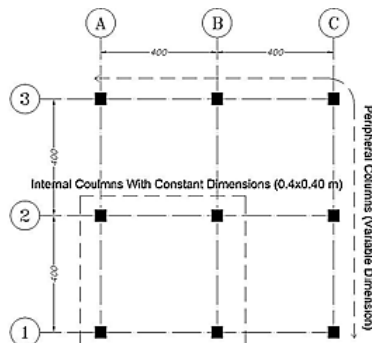
در سال ۲۰۰۴، روش پوش آور مودال به ساختمان‌های نامنظم در پلان گسترش داده شد. تفاوت روش جدید با روش مودال سنتی در وارد کردن اثرات $P-\Delta$ در تحلیل پوش آور تمامی مودها، ترکیب نتایج حاصل از جابجایی ثقلی و مودال و استفاده از روش CQC در ترکیب مودهاست. مولفان روش مذکور نتیجه‌گیری کرده‌اند این تعمیم از دقت کم و بیش مشابهی با حالت دوبعدی برخوردار است. هر چند تخمین روش از جابجایی‌ها دست پایین می‌باشد. در این روش امکان محاسبه نیروهای داخلی اعضا وجود ندارد [۱۳]. در سال ۲۰۰۵، روش پوش آور مودال برای محاسبه نیروهای داخلی اعضا اصلاح شد [۱۴]. در سال ۲۰۱۰، روش پوش آور مودال عملیاتی یا PMPA برای تحلیل پوش آور مودال سه بعدی معرفی شد. مولفان این روش نشان داده‌اند برای سازه‌های بسیار بلند دقت این روش برای سیستم‌های غیرخطی با دقت روش تحلیل طیفی سازه‌های خطی برابری می‌کند هر چند با توجه به نو بودن روش، نیازمند ارزیابی بیشتری است [۱۵].

روش بهنگام شونده، بر مبنای به‌نگام سازی الگوی بار جانبی اعمالی به سازه در هر گام از منحنی پوش آور، بر مبنای وضعیت سازه در آن گام پیاده سازی شده است [۱۱]. در این روش بر خلاف روش‌های با الگوی بار ثابت در هر مرحله اثرات طولانی شدن پریرود و افزایش تجمعی نرم شدگی سازه در الگوی بار جانبی اعمال می‌شود. پیاده سازی اصلی این روش مبتنی بر الگوی بار جانبی نیرویی است ولی در سال ۲۰۰۳ با الگوی بار جانبی بر مبنای جابجایی بهبود یافت؛ هر چند اساساً هر دو روش از فلسفه یکسانی برخوردارند [۱۶]. روش بهنگام شونده نیرویی در سال ۲۰۰۵ برای سازه‌های دوبعدی و یک حالت خاص سه بعدی مختلف ارزیابی گردید. نتایج حاصل از موفقیت نسبی آن نسبت به روش‌های سنتی حکایت می‌کند [۱۷].

تخمین پاسخ لرزه‌ای، فصل مشترک کلیه روش‌های پوش آور پس از تعیین نیاز لرزه‌ای است [۲]. از مجموعه مسائل قابل بررسی در تحلیل سه بعدی سازه‌های نامنظم در پلان، در این مقاله، پاسخ‌های حاصل از روش‌های پوش آور

۳-۱- توسعه مدل‌های تحلیلی

مدل‌های تحلیلی با استفاده از نرم افزار SeismoStruct ایجاد شد [۱۹]. از میان روشهای مختلف مدلسازی المان‌های غیرخطی، المان تیر-ستون غیرخطی نیرویی با مقطع لایه بندی شده فیبری انتخاب گردید. استفاده از این المان باعث کاهش قابل توجه حجم مدل از طریق امکان استفاده از یک المان به ازای هر عضو می‌شود [۲۰]. کلیه میلگرد‌های طولی دقیقاً مطابق نتایج طراحی در جای خود مدلسازی شدند. میلگردهای مقطع با مدل تنش - کرنش دو خطی تک محوری با سخت گردانی کرنشی سینماتیک برابر 0.005 مدل شدند. برای مقاطع بتنی از مدل رفتاری تک محوری Mander et al استفاده شد [۲۱]. تعداد مقاطع انگرال گیری برای هر المان برابر ۴ و تعداد فیبرها برای هر مقطع برابر ۲۰۰ منظور گردید. اندرکنش دال سقف و سازه با استفاده از مفهوم دیافراگم صلب و استفاده از مرکز جرم به عنوان Master Node مدلسازی و جرم دالها با توجه به سهم بارگیری بین تیرها توزیع شد. اتصال کلیه ستون‌ها در تراز پایه بصورت گیردار کامل مدلسازی گردید.



Height Of Models From Base		
ID	Story	Height(m)
B3-XX	3	9.60
B6-XX	6	19.2
B9-XX	9	28.8

Peripheral Columns Dimensions		
e-XX(%)	Width(cm)	Height(cm)
0	40	40
6	45	45
11	50	50
16	55	55
20	60	60

شکل ۱- مشخصات کلی قاب‌های مورد استفاده

(TPA) و در حالت دوم در کلیه ترازهای ساختمان ثابت و برابر P_0 (توزیع مستطیلی یا UPA) می‌باشد. بنابراین میزان جابجایی در هر گام از رابطه $\Delta U = [K_T]^{-1} \cdot (\gamma P_0 - P^e)$ بدست می‌آید که در این رابطه K_T ماتریس مماسی غیرخطی در گام فعلی محاسبات است.

در روش پوش آور بهنگام شونده نیرویی مودال و طیفی، توزیع بار جانبی در فرایند تحلیل ثابت نبوده، بلکه بر اساس اشکال مودی (MMPA) یا دامنه طیف پاسخ (AMPA) دائماً به هنگام می‌شود. اشکال مودی با تحلیل مقدار ویژه (با استفاده از الگوریتم Lanczos) روی ماتریس مماسی غیرخطی K_T در هر گام محاسبه می‌گردد. در روش پوش آور بهنگام شونده نیرویی مودال (MMPA)، بار مودی i که در درجه آزادی z سازه وارد می‌شود از رابطه $F_z^i = \Gamma^i \cdot \Phi_z^i \cdot m_j$ محاسبه می‌شود. در این رابطه Γ^i فاکتور مشارکت مود i و m_j جرم متمرکز در گره z می‌باشد. اگر در هر گام مقدار F_z^i در دامنه‌ی طیفی متناظر با پیوند مود i ضرب شود روش حاصل روش پوش آور بهنگام شونده نیرویی طیفی است (AMPA). پس از تعریف الگوی بار جانبی برای هر مود، بردار نیروی نهایی با ترکیب بردار تمام مودها به روش CQC بدست می‌آید. در نهایت بردار نیروی نهایی نرمالایز شده به نسبت حاصلضرب بار اسمی P_0 و ضریب بار مرحله جاری افزایش یافته به سازه اعمال می‌شود.

۳- معرفی مدل‌های تحلیلی و شتابنگاشت‌ها

برای فراهم شدن امکان مطالعه پارامتریک روشها، سه دسته قاب بتنی خمشی سه، شش و نه طبقه انتخاب شدند. برای هر دسته قاب، ابعاد ستون‌های دو ضلع عمود بر هم پیرامونی به صورت منظم افزایش داده شد در حالی که ابعاد سایر ستونها ثابت گرفته شد؛ از این طریق میزان خروج از مرکزیت مرکز جرم نسبت به مرکز سختی و در نتیجه میزان نامنظمی به ترتیب 0% (سازه منظم در پلان)، 6%، 11%، 16% و در نهایت 20% (سازه کاملاً نامنظم در پلان) افزایش یافته است. هر یک از پانزده قاب بتنی حاصل مطابق آیین نامه بتن آمریکا برای شکل پذیری متوسط طراحی شد [۱۸]. شکل ۱ مشخصات کلی قاب‌های مورد استفاده را نشان می‌دهد.

۳-۲- شتابنگاشت‌های مورد استفاده

شش جفت شتابنگاشت دور از گسل و سه جفت شتابنگاشت نزدیک گسل انتخاب گردید تا پراکندگی مناسبی از مشخصات لرزه ای حاصل شود. در جدول ۱ مشخصات کلی شتابنگاشت‌ها ارائه شده است. کلیه شتابنگاشت‌های دور از گسل به 0.3g مقیاس شدند. شتابنگاشت‌های حوزه نزدیک گسل بصورت مقیاس نشده مورد استفاده قرار گرفتند [۲۱]. در انتخاب شتابنگاشت‌های از کلاس C ژئوتکنیک مطابق توصیه [۲۲] ATC 2005 استفاده شد. در این کلاس سرعت موج برشی (Vs) بین ۳۶۰ تا ۷۶۰ متر بر ثانیه می باشد.

برای صحت آزمایشی روش مدل سازی از مدل استاندارد ICONS استفاده گردید. این مدل توسط Elnashai و همکاران، برای بررسی روش پوش آور FAP مورد استفاده قرار گرفت [۱۱]. از آنجا که در بررسی صورت گرفته توسط محققین مذکور منحنی پوش آور سازه برای روش پوش آور با توزیع بار با الگوی بار ثابت مستطیلی و الگوی بار به هنگام شونده نیرویی حاصل از نرم افزار ZeusNL ارائه گردیده است؛

مقایسه منحنی پوش آور حاصل از مدلسازی انجام شده توسط مولفین با نرم افزار Seismostruct، نشان دهنده نتایج یکسان با مرجع [۱۱] است.

۳-۳- پارامترهای مورد ارزیابی و روش آماری

جهت ایجاد امکان ارزیابی جامع از رفتار سازه، الگوهای جابجایی و نیرویی مختلف مورد بررسی قرار گرفت. پروفایل جابجایی و دررفت متناظر با حداکثر جابجایی ایجاد شده در تراز بام و در مرکز جرم بدست آمده از تحلیل دینامیکی غیرخطی، لنگر واژگونی حداکثر، برش پایه حداکثر، لنگر پیچشی کلی در تراز فونداسیون، لنگر پیچشی یکی از ستون-ها در طبقه‌ی همکف در مرکز جرم، سمت صلب ساختمان (بیشترین سختی) و طرف نرم آن (کمترین سختی) از جمله پارامترهای مورد مطالعه می باشد. مقادیر حاصل از روش دینامیکی غیرخطی با مقادیر متناظر انواع روش‌های پوش آور بدست آمده مورد مقایسه قرار گرفت. نظر به اینکه هدف این پژوهش ارزیابی دقت متوسط روش‌هاست از میانگین گیری ساده خطاها برای مقایسه روش‌ها استفاده شد. منظور از

جدول ۱- مشخصات شتابنگاشت‌های مورد استفاده^۱ [http://peer.berkeley.edu]

کد شتابنگاشت	زلزله	مرجع داده ها	کد رکورد	جهت	رکورد/مولفه	PGD (cm)	PGV (cm/s)	PGA (g)
C1	Superstitt Hills(B) 1987/11/24 13:16	CDMG	P0725	X	SUPERST/B-ICC000	17.5	46.4	0.358
				Y	SUPERST/B-ICC090	20.2	40.9	0.258
C2	Northridge 1994/01/17 12:31	USC	P0893	X	NORTHR/LOS000	11.75	43	0.41
				Y	NORTHR/LOS270	12.58	45.1	0.482
C3	Loma Prieta 1989/10/18 00:05	CDMG	P0735	X	LOMAP/G02090	12.07	39.1	0.322
				Y	LOMAP/G02000	7.15	32.9	0.367
C4	Loma Prieta 1989/10/18 00:05	CDMG	P0736	X	LOMAP/G03090	19.25	44.7	0.367
				Y	LOMAP/G03000	8.21	35.7	0.555
C5	Northridge 1994/01/17 12:31	USC	P0892	X	NORTHR/CNP196	20.17	60.8	0.42
				Y	NORTHR/CNP106	9.13	32.1	0.356
C6	Chi-Chi, Taiwan 1999/09/20	CWB	P1182	X	CHICHI/CHY101-W	45.28	70.6	0.353
				Y	CHICHI/CHY101-N	68	115	0.44
C7	Landers 1992/06/28 11:58	SCE	P0873	X	LANDERS/LCN275	70.31	97.6	0.721
				Y	LANDERS/LCN000	16.42	31.9	0.785
C8	Northridge 1994/01/17 12:31	DWP	P1005	X	NORTHR/RRS228	28.78	166.1	0.838
				Y	NORTHR/RRS318	19.76	73	0.472
C9	Northridge 1994/01/17 12:31	DWP	P1023	X	NORTHR/SCS142	46.99	102.8	0.897
				Y	NORTHR/SCS052	53.47	117.4	0.612

۱ شتابنگاشت‌های C7 تا C9 مربوط به حوزه نزدیک گسل هستند.

جدول ۲- مقادیر جابجایی مطلق بدست آمده در مرکز جرم مربوط به مدل سه طبقه با خروج از مرکزیت ۱۱ درصد تحت شتابنگاشت C3.

جابجایی مطلق در مرکز جرم طبقات										
AMPA Y	AMPA X	MMPA Y	MMPA X	TPA Y	TPA X	UPA Y	UPA X	NTH Y	NTH X	طبقه
0.098	0.195	0.099	0.195	0.100	0.195	0.100	0.194	0.102	0.197	3
0.071	0.148	0.071	0.147	0.071	0.145	0.076	0.154	0.075	0.169	2
0.030	0.072	0.031	0.072	0.030	0.069	0.035	0.081	0.042	0.134	1
دریفت طبقات در مرکز جرم طبقات										
AMPA Y	AMPA X	MMPA Y	MMPA X	TPA Y	TPA X	UPA Y	UPA X	NTH Y	NTH X	طبقه
0.009	0.015	0.009	0.015	0.009	0.016	0.008	0.012	0.008	0.009	3
0.013	0.024	0.013	0.024	0.013	0.024	0.013	0.023	0.010	0.011	2
0.010	0.023	0.010	0.022	0.009	0.022	0.011	0.025	0.006	0.007	1

بررسی نتایج تحلیل میانگین خطاها نشان می‌دهد استفاده از روش پوش‌آور به هنگام شونده نیرویی طیفی، تاثیر بسیار جزئی در بهبود نتایج دارد. مقایسه‌ی نتایج نشان می‌دهد در مورد پارامترهای جابجایی، روشهای پیچیده‌تر پوش‌آور برتری خاصی نسبت به روش ساده‌تر توزیع بار ثابت مستطیلی ندارند؛ هر چند لازم به ذکر است این نکته در مورد نتایج دریفت صادق نیست. در این پارامتر دقت روش پوش‌آور با توزیع بار ثابت مستطیلی با افزایش تعداد طبقات نسبت به روش مودال کاهش می‌یابد نکته‌ای که به دلیل دخالت مودهای بالاتر ارتعاش سازه کاملاً مورد انتظار است. روش پوش‌آور سنتی با توزیع بار مثلثی ثابت گرچه در محدوده رفتار خطی جایگاه خود را در کدهای طراحی یافته است اما نتایج پژوهش فعلی نشان می‌دهد در اکثر موارد این روش موفقیت‌چندانی در مقایسه با سایر روشهای پوش‌آور نداشته است. در مورد پارامتر برش پایه نیز هر چند نزدیکی نتایج حاصل نمایانگر عدم امکان معرفی یک روش پوش‌آور خاص به عنوان روش برتر دارد ولی در مجموع روش MMPA نتایج بهتری را از خود نشان می‌دهد. روش پوش‌آور با توزیع بار ثابت مستطیلی بیشترین خطا را در پیش‌بینی لنگر واژگونی در تراز پایه داشته است. لنگر واژگونی تنها پارامتری است که در آن روش پوش‌آور با توزیع بار مثلثی توانسته است نتایجی بهتر از سایر پارامترها از خود نشان دهد.

در مورد پارامترهای پیچش، روشهای مودال بهنگام شونده به دلیل ایجاد امکان دخالت مودهای بالاتر ارتعاشی در رفتار سازه و وضعیت توزیع سختی در هر گام موفقیت بیشتری در مقایسه با سایر روشها کسب نمایند. جدول ۳

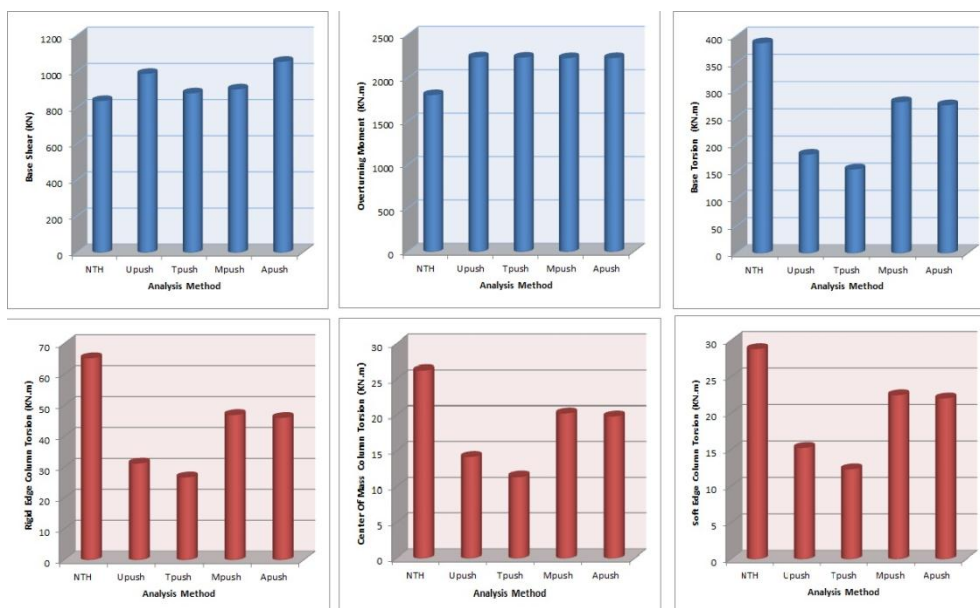
خطا، اختلاف میان مقدار پیش‌بینی شده پارامتر مورد مطالعه به روش تاریخچه زمانی غیرخطی با روشهای پوش‌آور است. در شکل ۲ و جدول ۲ به ترتیب نمونه خروجی نیروی بدست آمده و پارامترهای مربوط به جابجایی برای یکی از مدل‌ها و یکی از شتابنگاشت‌ها را ارائه شده است.

۴- بررسی نتایج ارزیابی روشهای پوش‌آور

برای ارزیابی روشهای پوش‌آور در این پژوهش از روش مرحله‌ای استفاده شده است. به این ترتیب که ثبت میزان خطای پارامترهای مورد ارزیابی اشاره شده در بخش ۳.۳ و با استفاده از میانگین گیری آماری، امکان نتیجه گیری کیفی و انتخاب روش پوش‌آور به صورت نسبی موفق را فراهم می‌کند. به این منظور ابتدا میانگین خطای هر روش پوش‌آور برای هر پارامتر مورد ارزیابی در هر مدل و برای هر شتابنگاشت بدست آمد. سپس میانگین کلی خطای هر روش پوش‌آور برای مدل مورد مطالعه و پارامتر مورد نظر به ازای کلیه شتابنگاشت‌ها ثبت گردید. بنابراین به صورت مجزا برای هر پارامتر مورد ارزیابی، امکان انتخاب بهترین روش پوش‌آور متناظر با کمترین خطای میانگین میسر گردید. این روند برای کلیه مدل‌ها و برای شتابنگاشت‌های حوزه دور و نزدیک گسل به صورت مجزا انجام گرفت. با مقایسه میانگین و انحراف معیار، روشهای پوش‌آور برای هر پارامتر از نظر دقت رتبه بندی شدند.

۴-۱ بررسی نتایج برای شتابنگاشت‌های دور از گسل

شکل ۳ خلاصه نتایج تحلیل آماری پارامترها را برای شتابنگاشت‌های دور از گسل نشان می‌دهد.



شکل ۲- نتایج پارامترهای نیرویی مربوط به مدل سه طبقه با خروج از مرکزیت ۱۱ درصد و شتابنگاشت C3

نمی‌کند؛ هرچند در رویکرد پارامتری (مثلا برای دریافت که قبلا اشاره شد) اختلاف دقت میان روشهای پوش آور سنتی و مدرن کاملا قابل توجه است (شکل ۳). از جمله موارد قابل اشاره دیگر توانایی کمتر روش پوش آور سنتی با توزیع بار مثلی در ایجاد تصویری از رفتار سازه با توجه به پارامترهای انتخابی نسبت به روش دینامیکی غیرخطی است. این مهم به دلیل قابلیت بهتر انطباق توزیع بار در سایر روشها با وضعیت سازه در محدوده رفتار غیرخطی است. این نکته در پژوهش های قبلی نیز مورد توجه قرار گرفته است [۱۲].

۲-۴ بررسی نتایج برای شتابنگاشتهای حوزه نزدیک گسل

شکل ۴ خلاصه نتایج بدست آمده به روش مورد اشاره در مقدمه این بخش را برای شتابنگاشت های حوزه نزدیک گسل نشان می‌دهد.

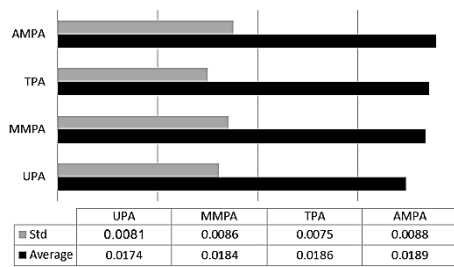
در مورد نتایج نزدیک گسل و به دلیل محتوی فرکانسی خاص این نوع شتابنگاشتها، در مورد پارامتر جابجایی به طور نسبی و پارامتر دریافت به طور مطلق وضعیت روشهای پوش آور سنتی مناسب نمی‌باشد.

جمع بندی نهایی توانایی هر یک از روشهای پوش آور مورد مطالعه در شبیه سازی نتایج حاصل از تحلیل دینامیکی غیرخطی با توجه به روش ارزیابی توضیح داده شده در ابتدای بخش ۴ را نشان می‌دهد.

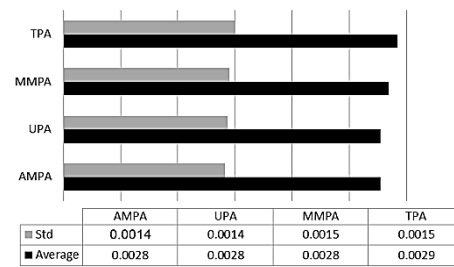
جدول ۳- جمع بندی نتایج ارزیابی روشهای پوش آور در مورد شتابنگاشتهای حوزه دور از گسل

روش پوش آور	پارامتر مورد مطالعه
UPA	جابجایی مرکز جرم
UPA	دریافت مرکز جرم
MMPA	پارامترهای پیچشی
MMPA	برش پایه
TPA	لنگر واژگونی

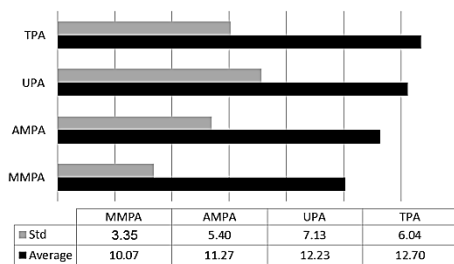
در مجموع روش MMPA به دلیل فراهم آوردن امکان تاثیر اثرات مودهای بالاتر ارتعاشی و وضعیت کرنشی المان ها در سختی کلی سازه در هر گام محاسباتی، نتایج نسبتا بهتری از خود نشان داده اند. هر چند اختلاف میان موفقیت روش های مدرن MMPA و AMPA با روش سنتی توزیع بار ثابت حدود ۱۲ درصد می‌باشد. این مهم نشان می دهد استفاده از روشهای مدرن پوش آور نسبت به روشهای سنتی در مجموع بهبود قابل توجهی در نتایج در دیدگاه کلی ایجاد



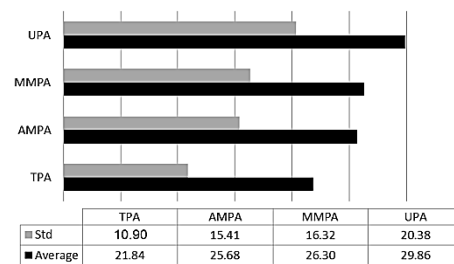
Displacement



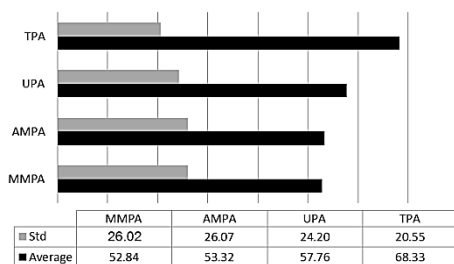
Drift



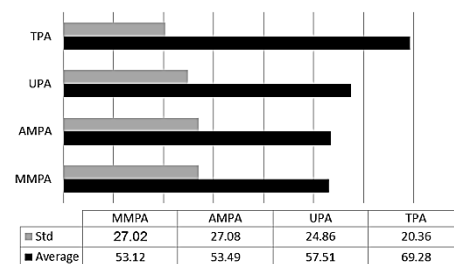
Base Shear



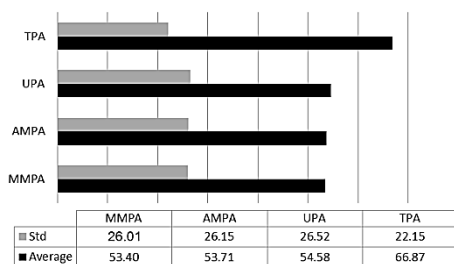
Overturning Moment



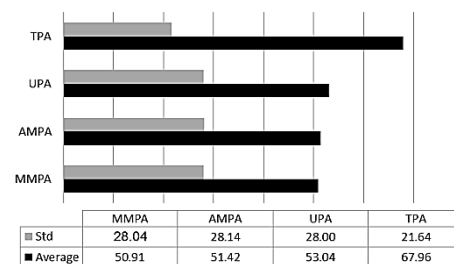
Base Torsion



Torsion Rigid Edge Column



Torsion C.O.M Column

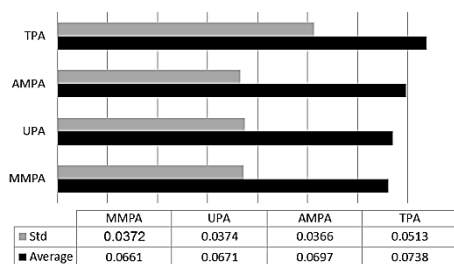


Torsion Soft Edge Column

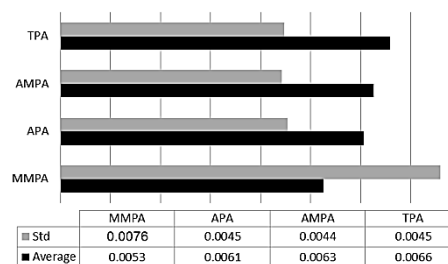
شکل ۳- نتایج ارزیابی نتایج ارزیابی برای شتابنگاشت های دور از گسل برای هر پارامتر

تراز پایه، همچنین پیچش سمت صلب سازه مدل‌های مورد مطالعه، روش‌های مدرن پوش آور توانایی بالاتری از خود نشان داده‌اند. میزان موفقیت روش‌های مدرن پوش آور و روش پوش آور با توزیع بار ثابت در پیچش سمت نرم و مرکز جرم تا حدودی یکسان بوده است این نکته می‌تواند به دلیل

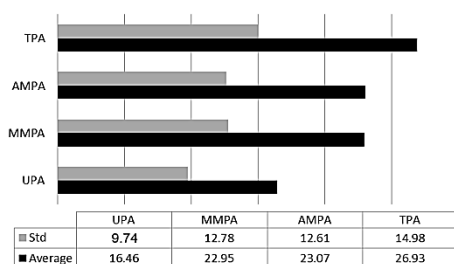
حاکم بودن مدهای ارتعاشی بالاتر از مود ارتعاشی پایه و ورود قابل توجه سازه به محدوده رفتار غیرخطی در حوزه نزدیک گسل از دقت روش‌های پوش آور سنتی می‌کاهد. در مورد پارامتر برش پایه در حوزه نزدیک گسل روش پوش آور سنتی با توزیع بار ثابت از موفقیت بیشتری نسبت به سایر روشها برخوردار بوده است. هر چند در مورد لنگر واژگونی و پیچش



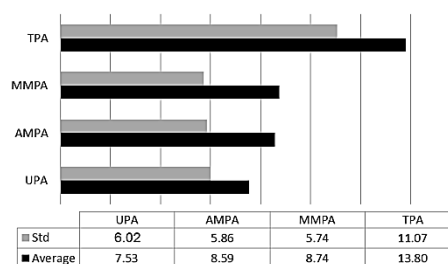
Displacement



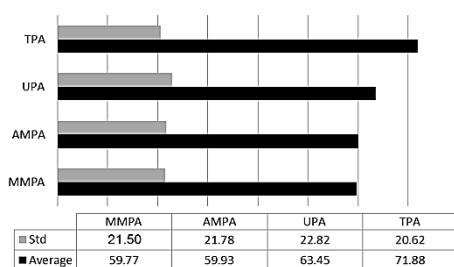
Drift



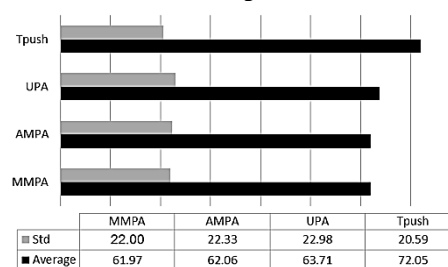
Base Shear



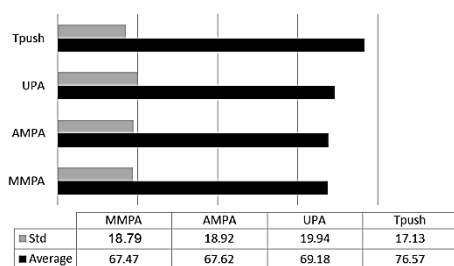
Overturning Moment



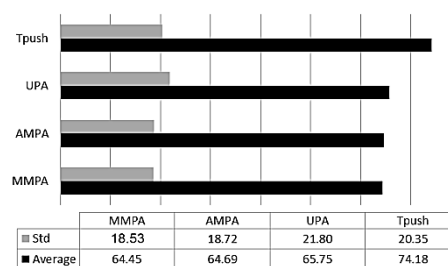
Base Torsion



Torsion Rigid Edge Column



Torsion C.O.M Column



Torsion Soft Edge Column

شکل ۴- نتایج ارزیابی برای شتابنگاشت‌های حوزه نزدیک برای هر پارامتر

جدول ۴ جمع بندی نهایی توانایی هر یک از روشهای پوش آور مورد مطالعه در شبیه سازی نتایج حاصل از تحلیل دینامیکی غیرخطی با توجه به روش ارزیابی توضیح داده شده در ابتدای بخش ۴ برای شتابنگاشت‌های حوزه نزدیک گسل را نشان می دهد. در اینجا نیز در مقیاس کلی روشهای مدرن در مقایسه با روش‌های سنتی نتایج بهتری از خود نشان داده‌اند. عدم

حاکم شدن مولفه انتقالی مودهای ارتعاشی سازه در این قسمت ها باشد. نکته قابل توجه دیگر در نتایج بدست آمده بهبود نسبی نتایج روش پوش آور سنتی با توزیع بار مثلثی در مقایسه با نتایج حاصل از شتابنگاشت‌های حوزه معمولی گسل است. هر چند در اینجا نیز باید اذعان کرد روش پوش آور سنتی با توزیع بار مثلثی از کمترین موفقیت برخوردار است.

- [7] Faella G, Kilar V (1998) Asymmetric multistorey R/C frame structures: push-over versus nonlinear dynamic analysis. 11th European Conference on Earthquake Engineering, Balkema, Rotterdam.
- [8] Moghadam AS, Tso WK (2000) 3-D Pushover analysis for damage assessment of buildings. JSEE 2(3): 23-31.
- [9] Fajfar PA (2000) Nonlinear analysis method for performance based seismic design. Earthquake Spectra 16(3): 573-592.
- [10] Chopra AK, Goel RK (2002) A modal pushover analysis procedure for estimating seismic demands for buildings. Earthquake engineering and structural dynamics 31: 561-582.
- [11] Elnashai AS (2001) Advanced inelastic static (Pushover) analysis for earthquake applications. Structural Engineering and mechanics 12(1): 51-69.
- [12] Fajfar P, Marusic Damjan, Perus Iztok (2005) Torsional effects in the pushover-based seismic analysis of buildings. Journal of Earthquake engineering 9: 831-854.
- [13] Chopra AK, Goel RK (2004) A modal pushover analysis procedure to estimate seismic demands for unsymmetric-plan buildings. Earthquake engineering and structural dynamics 33: 903-927.
- [14] Goel RK, Chopra AK (2005) Extension of modal pushover analysis to compute member forces. Earthquake Spectra 21(1): 125-140.
- [15] Reyes JC, Chopra AK (2011) Three-dimensional modal pushover analysis of buildings subjected to two components of ground motion, including its evaluation for tall buildings. Earthquake engineering and structural dynamics 40: 789-806.
- [16] Antoniou S, Pinho R (2004) Development and verification of a displacement-based adaptive pushover procedure. Journal of earthquake engineering 8(5): 643-661.
- [17] Papanikolaou VK, Elnashai AS, Pareja JF (2006) Evaluation of conventional and adaptive pushover analysis II: comparative results. Journal of Earthquake Engineering 10: 127-151.
- [18] American Concrete Institute, ACI 318-08, Building Code Requirements for Structural Concrete, 2008.
- [19] SismoStruct: Computer program for static and dynamic nonlinear analysis of frame structures, www.seismosoft.com, 2010.
- [20] Fragiadakis M, Papadrakakis M (2008) Modeling, analysis and reliability of seismically excited structures: computational issues. International journal of computational methods 5(4): 483-511.
- [21] Elnashai AS (2008) Fundamental of earthquake engineering, John Wiley and sons.
- [22] Applied Technology Council, Improvement of nonlinear static seismic analysis procedures, FEMA 440, 2005.

موفقیت روش پوش آور سنتی با توزیع بار مثلثی در نگاه کلی نیز خود را نشان می‌دهد. مجدداً باید اشاره کرد که اختلاف میان میزان موفقیت روش پوش آور سنتی با توزیع بار ثابت مستطیلی در مقایسه با روشهای مدرن در مقیاس کلی قابل توجه نمی‌باشد هر چند همانگونه که بیان شد مطالعه پارامتری نتایج در برخی موارد (نظیر میزان موفقیت در پیش بینی پروفایل دریافت میان طبقه ای) از دقت بسیار بالاتر روشهای پوش آور مدرن نسبت به روشهای سنتی حکایت می‌کند. به این علت به نظر می‌رسد انتخاب روشهای پوش آور مدرن در ارزیابی برخی پارامترها از اهمیت زیادی برخوردار باشد.

جدول ۴- جمع بندی نتایج ارزیابی روشهای پوش آور در

مورد شتابنگاشت‌های حوزه نزدیک

روش پوش آور	پارامتر مورد مطالعه
MMPA	جابجایی مرکز جرم
MMPA	دریافت مرکز جرم
MMPA	پارامترهای پیچشی
UPA	برش پایه
UPA	لنگر واژگونی

مراجع

- [1] Krawinkler H, Seneviranta GDPK (1998) Pros and cons of a pushover analysis of seismic performance evaluation, Engineering structures 20: 452-464.
- [2] Nuray Aydinoglu M, Gokturk Onem (2010) Evaluation of analysis procedures for seismic assessment and retrofit design, Earthquake Engineering in Europe Springer: Chapter 8: 171-198.
- [3] American Society of Civil Engineers, Minimum Design Loads For Building and Other Structures. 2010.
- [4] European Committee for Standardization. Euro Code 8, Design Of Structures for Earthquake Resistance, 2003.
- [5] Spacone E, Camata G, Faggella M (2009) Nonlinear models and nonlinear procedures for seismic analysis of reinforced concrete frame structures. Computational structural dynamics and earthquake engineering, Taylor & Francis Group, Chapter 21: 323-345.
- [6] Reyes JC, Chopra AK (2011) Evaluation of three dimensional modal pushover analysis for unsymmetric-plan buildings subjected to two components of ground motion. Earthquake engineering and structural dynamics. Volume 40, Issue 13, pages 1475-1494