

## مقایسه تحلیل‌های پوش‌آور ارتقاء یافته در تخمین پاسخ‌های لرزه‌ای سازه‌های نامنظم دارای پس‌رفتگی در ارتفاع

زهره بهلولی

کارشناس ارشد سازه، تبریز، ایران  
z\_bohloolie8899@yahoo.com

مهدی پورشاء

استاد یار دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی سهند تبریز  
poursha@sut.ac.ir

**کلید واژه‌ها:** قابهای نامنظم هندسی، طراحی لرزه‌ای بر اساس عملکرد، تحلیل‌های پوش‌آور ارتقاء یافته، پس‌رفتگی

### چکیده

تغییر ناگهانی در هندسه سازه در طول ارتفاع با نامهای سازه دارای پس‌رفتگی و سازه پلکانی شناخته می‌شود. این تغییر ناگهانی در هندسه سازه باعث ناپیوستگی ناگهانی در جرم، سختی و مقاومت سازه می‌شود و رفتار لرزه‌ای پیچیده‌ای در سازه ایجاد می‌کند. ارزیابی لرزه‌ای سازه‌ها اخیراً با رویکرد طراحی بر اساس عملکرد انجام می‌شود که روش تحلیل استاتیکی غیرخطی قسمت مهمی از آنرا تشکیل می‌دهد. یکی از کاستیهای تحلیل استاتیکی غیر خطی در نظر نگرفتن اثر مودهای بالاتر است. از اینرو در این مطالعه به منظور در نظرگیری اثر مودهای ارتعاشی بالاتر ارزیابی لرزه‌ای سازه‌های دارای پس‌رفتگی، روش‌های جدیدی از جمله تحلیل استاتیکی غیرخطی مودال MPA، روش تحلیل پوش‌آور کران بالا UBPA، روش تحلیل پوش‌آور مودال متوالی CMP، روش N2 توسعه یافته مورد استفاده قرار می‌گیرد. همچنین، به منظور بررسی پاسخ‌های لرزه‌ای این نوع سازه‌ها، ۲۸ قاب ۳ و ۹ طبقه دارای پس‌رفتگی با پیکربندی‌های هندسی مختلف با استفاده از روش‌های گفته شده مورد بررسی قرار می‌گیرد. به منظور بررسی دقت این روش‌ها نتایج حاصل از آنها با نتایج تحلیل دقیق NLRHA مقایسه می‌شوند. از جمله نتایج این است که هر یک از روش‌های تحلیل پوش‌آور ارتقاء یافته می‌توانند برخی پاسخ‌ها را در این سازه‌ها به خوبی ارائه دهند و دقت این روش‌ها به ویژگی‌های دینامیکی سازه‌ها بستگی دارد.

### مقدمه

رفتار لرزه‌ای سازه‌ها از سه ویژگی مهم سازه که تغییر در هر یک ویژگی دینامیکی سازه را دچار تغییر می‌کند نشئت می‌گیرد. این سه ویژگی عبارت است از سختی، مقاومت و جرم سازه. این تغییرات گاهی به دلیل تغییر ناگهانی در هندسه سازه ایجاد می‌شود. سازه‌های نامنظم دارای پس‌رفتگی در ارتفاع با کاهش ناگهانی در سطح پس‌رفتگی باعث تغییر در این سه پارامتر شده و رفتار لرزه‌ای متفاوتی در این سازه‌ها ایجاد می‌کنند.

روش تحلیل استاتیکی غیرخطی (تحلیل پوش‌آور) به دلیل کاهش هزینه تحلیل و به طور همزمان دقت قابل قبول در نتایج، امروزه به عنوان یکی از روش‌های تحلیل، مورد استفاده محققان قرار گرفته است. در روش پوش‌آور مرسوم سازه تحت الگوی باری که متناسب با شکل مود غالب سازه (مود اول الاستیک) است، قرار می‌گیرد. این بار به صورت فزاینده به سازه اعمال می‌شود تا آنجا که تغییر مکان در نقطه‌ی کنترل (که معمولاً بام می‌باشد) تحت اثر بار جانبی به مقدار مشخصی (تغییر مکان هدف) برسد. این روش علیرغم اینکه گسترش زیادی پیدا کرده است، اما فاقد یک پشتوانه تئوریک قوی می‌باشد. عدم در نظرگیری مودهای بالاتر و کاهش سختی پس از تسلیم از ضعف‌های این روش می‌باشد. این روش مشابه روش تحلیل استاتیکی خطی است، با این تفاوت که رفتار غیرخطی تمام اعضا و اجزای سازه در تحلیل وارد می‌شود و همچنین اثر زلزله به جای اعمال بار با مقدار مشخص، بر حسب تغییر مکان برآورد می‌شود [Krawinkler and Seneviratna, 1998].

برای رفع این مشکل در سازه‌های نامنظم و بلند، که به دلیل مشارکت مودهای ارتعاشی بالاتر در پاسخ‌های لرزه‌ای سازه، روش پوش‌آور



مرسوم دارای اعتبار نمی‌باشد، روش‌های ارتقاء یافته از جمله روش تحلیل پوش آور مودال (MPA) [Chopra and Goel, 2004]، تحلیل پوش آور کران بالا (Upper-bound) [Jan et al, 2004]، تحلیل پوش آور بهبود یافته IMPA [Mao et al., 2008]، روش تحلیل پوش آور مودال متوالی (CMP) [Poursha et al., 2009] و روش N2 توسعه یافته (EN2) [Kreslin and Fajfar, 2011] توسط محققین ارائه شده است که این روش‌ها اثر مودهای بالاتر را در نیاز لرزه‌ای سازه‌ها لحاظ می‌کنند و در همه روش‌ها دو پارامتر مهم الگوی بار جانبی و تغییر مکان هدف تأثیر گذار است. نامنظمی در ساختمان‌ها طبق تعاریف آیین نامه‌های مختلف به علت توزیع نامتناسب جرم، سختی و مقاومت در سازه رخ می‌دهد و یا به دلیل نامنظمی هندسی در ارتفاع، که ابعاد پلان سازه در ارتفاع تغییر قابل توجهی می‌یابد که ساختمان‌های دارای پس رفتگی یا عقب نشینی در ارتفاع (Setback) و ساختمان‌های با شکل هرمی از این نوع هستند [Le-Trung et al., 2012]. از این رو این نوع نامنظمی، مورد توجه محققین قرار گرفته است. هومر و رایت پاسخ لرزه‌ای قاب‌های فولادی دارای پس رفتگی را مورد مطالعه قرار دادند و تأثیر پس رفتگی‌ها روی فرکانس‌های سازه و اشکال مودی و همچنین اثر آنها را بر پاسخ لرزه‌ای بررسی کردند [Humar and Wright, 1977]. وانگ و سو اعتبار ضوابط آیین نامه‌های طراحی را برای ساختمان‌های دارای پس رفتگی بررسی کردند که لازم است برش پایه حاصل از تحلیل دینامیکی به برش پایه حاصل از روش بار استاتیکی معادل آیین نامه هم پایه شود [Wong and Tso, 1994]. سو و مقدم یک روش تحلیل استاتیکی غیر خطی را برای ارزیابی لرزه‌ای سازه‌های چند طبقه ارائه کردند. در این روش از یک تحلیل طیف پاسخ برای محاسبه جابجایی هدف و توزیع بار برای تحلیل پوش آور استفاده می‌شود [Moghadam and Tso, 2000].

سونی و میستری مشاهده کردند که بسیاری از مطالعات انجام شده بر افزایش تقاضا در قسمت برج سازه‌های دارای پس رفتگی و افزایش تقاضای لرزه‌ای برای ساختمان‌های با ناپیوستگی در توزیع جرم، سختی و مقاومت توافق دارند [Soni and Mistry, 2006]. کراواسیلیس و همکاران روشی جدید برای شناسایی نامنظمی در قاب‌های ساختمانی ناشی از حضور پس رفتگی‌ها پیشنهاد کردند و نشان دادند که تعداد طبقات، نسبت مقاومت تیر به ستون، و نوع نامنظمی هندسی بر توزیع در ارتفاع و دامنه تغییر شکل‌های غیرالاستیک به طور قابل توجهی تأثیر می‌گذارد [Karavasilis et al, 2008]. آتاناسیادو و همکاران نتیجه گرفتند که ساختمان‌های دارای پس رفتگی و ساختمان‌های منظم طراحی شده بر اساس EC8 هنگامی که تحت بارگذاری لرزه‌ای قرار می‌گیرند به یک اندازه دارای رفتار مناسبی هستند [Athanasiadou, 2008]. سرکار و همکارانش با بررسی سازه‌های دارای پس رفتگی شاخصی برای نامنظمی این سازه‌ها معرفی کردند [Sarkar et al, 2010].

باتوجه به کاربرد روز افزون تحلیل‌های پوش آور و پوش آور ارتقاء یافته و کمبود و در بعضی روش‌ها نبود ارزیابی این روش‌ها در این سازه‌ها، بررسی رفتار و دقت این روش‌ها در این نوع سازه‌ها لازم دیده شد. در این تحقیق به بررسی رفتار لرزه‌ای این سازه‌ها و ارزیابی دقت این روش‌ها پرداخته می‌شود. به همین منظور دو مدل قاب ۳ و ۹ طبقه به عنوان سازه منظم مرجع در نظر گرفته شده و ۲۶ قاب دارای پس رفتگی در ارتفاع با پیکربندی‌های هندسی مختلف ایجاد و طراحی شدند. سپس پاسخ لرزه‌ای سازه‌های نامنظم دارای پس رفتگی در ارتفاع (Setback) با استفاده از آنالیز دینامیکی غیر خطی و ویژگی‌های دینامیکی سازه‌ها از قبیل پرورد ارتعاشی سازه، نسبت مشارکت جرم مؤثر مودی و ضریب مشارکت مودی برای سه مود اول با استفاده از تحلیل مقدار ویژه محاسبه و بررسی شد. همچنین در این تحقیق نیازهای لرزه‌ای این سازه‌ها با استفاده از تحلیل‌های ارتقاء یافته استاتیکی غیر خطی MPA، CMP، UB، و EN2 محاسبه شد. در نهایت این نتیجه گرفته شد که پاسخ لرزه‌ای این سازه‌ها و دقت روش‌های پوش آور ارتقاء یافته به ویژگی دینامیکی این سازه‌ها بستگی دارد.

## تحلیل‌های پوش آور ارتقاء یافته

### روش پوش آور مودال (MPA)

چوپرا و گوئل روش تحلیل پوش آور مودال (MPA) را ابتدا برای ساختمان‌های الاستیک خطی توسعه داده و نشان دادند که این روش معادل روش معروف تحلیل طیف پاسخ (RSA) است. سپس، این روش را برای ساختمان‌های غیرالاستیک بسط دادند. در واقع این روش بر این فرض استوار است که پاسخ سازه در مودهای مختلف در حالت غیر الاستیک مستقل از هم می‌باشند. بنابراین پاسخ لرزه‌ای سازه در هر مود به طور مستقل محاسبه می‌شود و در نهایت پاسخ کلی سازه از ترکیب پاسخ‌های مودی با استفاده از روش ترکیب جذر مجموع مربعات (SRSS) به دست می‌آید [Chopra and Goel, 2004].

### روش آنالیز پوش آور کران بالا (UBPA)

این روش در سال ۲۰۰۳ توسط جان و کائو ارائه شد. در این روش برای مشارکت تغییر مکان پاسخ مود بالاتر در مقایسه با مود اصلی، از

نسبت مشارکت مود دوم به مود اول  $\left(\frac{q_2}{q_1}\right)$  در محاسبه الگوی بار و تغییر مکان هدف استفاده می‌شود.

از طیف پاسخ الاستیک زلزله برای محاسبه کران بالای نسبت مشارکت مود دوم به مود اول  $\left(\frac{q_2}{q_1}\right)$ ،  $UB$ ، که بصورت زیر می‌باشد استفاده می‌شود:



$$\left(\frac{q_2}{q_1}\right)_{UB} = \left|\frac{\Gamma_2 D_2}{\Gamma_1 D_1}\right| \quad (1)$$

که در آن  $n$  ( $n=1$  و  $2$ ) ضریب مشارکت مودی و  $D_n$  ( $n=1$  و  $2$ ) جابجایی بدست آمده از طیف پاسخ جابجایی الاستیک می باشد [Jan et al, 2004]. روش پوش آور مودال متوالی (CMP) در سال ۲۰۰۹ پورشاء و همکاران، روش پوش آور مودی متوالی (CMP) را برای تحلیل استاتیکی غیر خطی ساختمان‌ها ارائه دادند. در این روش، آنالیزهای پوش آور یک مرحله‌ای و چند مرحله‌ای انجام می‌شود و پاسخ لرزه‌ای سازه از حداکثر پاسخ تحلیل‌های یاد شده بدست می‌آید. در تحلیل چند مرحله‌ای، تغییر مکان بام در هر مرحله طبق رابطه ۲ محاسبه می‌شود:

$$u_{ni} = i \quad t \quad (2)$$

که در آن :

$$i = i \quad (3)$$

$$i = 1 - \sum_{j=1}^{N_s-1} j \quad (4)$$

که  $t$  جابجایی هدف کلی در بام و  $N_s$  تعداد مراحل موجود در آنالیز پوش آور چند مرحله‌ای است. همچنین  $i$  نسبت جرم مؤثر مودال برای مود  $i$  ام می‌باشد که از معادله ۵ حاصل می‌شود.

$$i = \frac{M_n^*}{M^*} \quad (5)$$

$M_n^*$  جرم مؤثر مود  $n$  ام و  $M^*$  جرم لرزه‌ای کل سازه می‌باشد [Poursha et al., 2009].

## روش N2 توسعه یافته (EN2)

روش N2 به منظور لحاظ نمودن اثر موده‌های بالاتر در محاسبه پاسخ‌های لرزه‌ای توسط کرسلین و فایفر توسعه یافت و روش EN2 نام گرفت. توسعه این روش بر این فرض استوار است که وقتی سازه در موده‌های بالاتر ارتعاش می‌کند، در محدوده الاستیک باقی می‌ماند. نیازهای لرزه‌ای بر حسب جابجایی و دررفت طبقه می‌تواند از ترکیب تحلیل پوش آور اصلی و تحلیل مودال الاستیک استاندارد به دست آید. در روش N2 توسعه یافته که برای سازه‌های با اثر موده‌های بالاتر قابل کاربرد می‌باشد ایده اصلی روش ثابت نگه داشته شده است و برای در نظرگیری اثر موده‌های بالاتر از ضرایب تصحیح بر پایه نتایج تحلیل مودال الاستیک استفاده می‌شود. در واقع تحلیل پوش آور رفتار آن قسمت‌هایی از سازه را که تغییر شکل‌های پلاستیک بزرگ اتفاق می‌افتد کنترل می‌کند، در حالی که تحلیل الاستیک تقاضای لرزه‌ای را در قسمت‌هایی که اثر موده‌های بالاتر مهم است تعیین می‌کند [Kreslin and Fajfar, 2011].

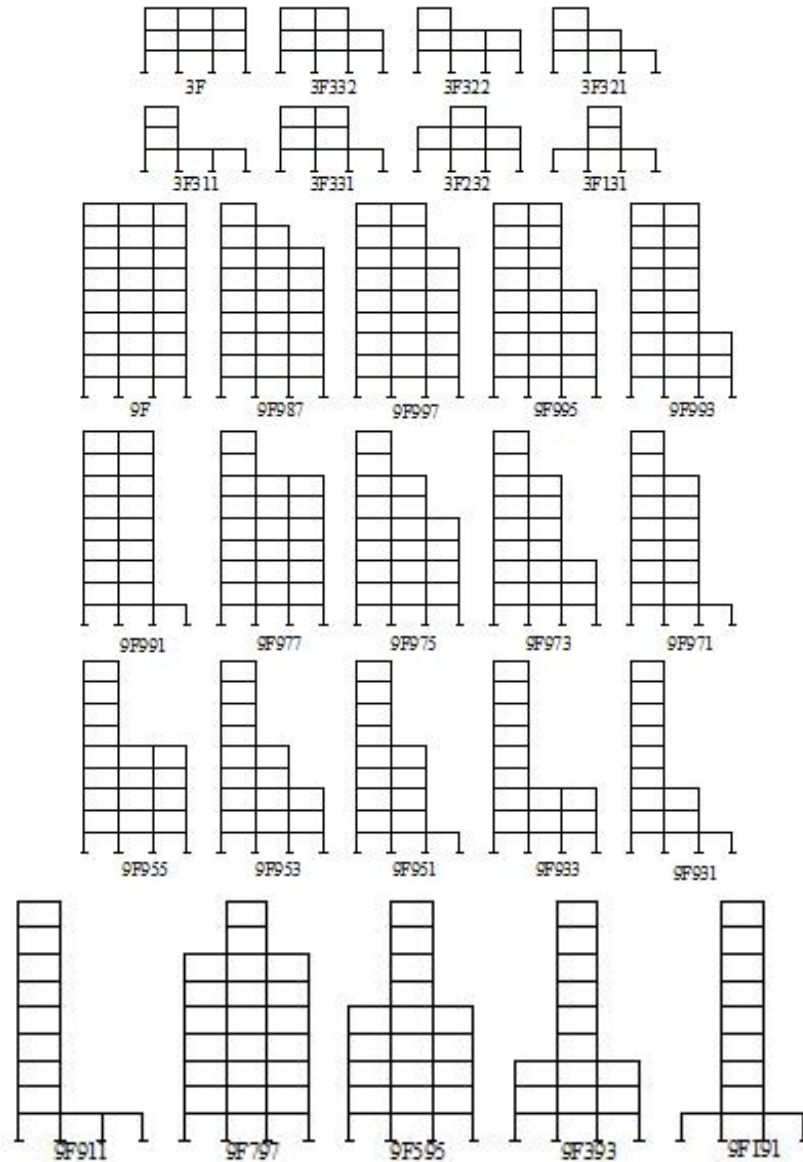
## مشخصات سازه‌های مرجع

۲۸ قاب فولادی ۳ و ۹ طبقه با سیستم قاب خمشی ویژه ( $R=10$ ) بر اساس استاندارد ۲۸۰۰ ایران [۱۳۸۴] به روش تنش مجاز طراحی شده‌اند. خاک منطقه از نوع C آیین نامه NEHRP با خطر لرزه خیزی زیاد است. عرض قاب ۱۵ متر (سه دهانه به طول ۵ متر) و ارتفاع طبقات ۳.۲ متر می‌باشد. دهانه بارگیر قابها ۵ متر، و بارمرده  $650(kg/m^2)$  و بار زنده  $200(kg/m^2)$  می‌باشند. همچنین جرم لرزه‌ای  $DL+0.2LL$  در نظر گرفته شده است. از اثرات اندرکنش خاک و سازه صرف نظر شده است.

## معرفی قابهای نامنظم دارای پس رفتگی در ارتفاع

برای این منظور ۲۸ قاب نامنظم دارای پس رفتگی در ارتفاع با پیکربندی‌های هندسی مختلف در نظر گرفته شده است. همه قاب‌های نامنظم انتخابی با توجه به پیش نویس اول استاندارد ۲۸۰۰ [۱۳۹۱] دارای نامنظمی هندسی می‌باشند. در قاب‌های ۳ طبقه همه اشکال ممکن

نامنظمی و در قاب‌های ۹ طبقه با گامهای به ترتیب ۲ تا ۱ که هر گام یک طبقه است، نامنظمی هندسی پس رفتگی در ارتفاع ایجاد شده است. نامگذاری قابها به صورتی است که مثلاً در قاب 9F987 عدد اول نشانه‌ی تعداد طبقات، حرف F مخفف کلمه FRAME به دلیل قابهای دوبعدی انتخابی، سه عدد بعدی که به معنی سه دهانه بودن قاب است، به ترتیب نشانگر تعداد طبقات موجود در هر دهانه قاب از چپ به راست می باشد. بنابراین 9F987 نشانگر قاب ۹ طبقه ایست که از چپ به راست در دهانه اول ۹ طبقه، در دهانه دوم ۸ طبقه و در دهانه سوم ۷ طبقه وجود دارد، اشکال قابها در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱: سازه های نامنظم در ارتفاع انتخابی

جهت مدلسازی و تحلیل و طراحی سازه‌های منظم و نامنظم در ارتفاع از نرم افزار SAP2000 استفاده شده است. در تمام مدل‌ها کنترل ضابطه تیر ضعیف - ستون قوی به کار گرفته شده است.

### ویژگی‌های دینامیکی قابها

به منظور تعیین مشخصه های ارتعاشی شامل فرکانس‌ها و شکل مودهای طبیعی سازه از مسأله مقدار ویژه بهره جویی شده است. در جدول (۱)  $(T_n)$ ، نسبت مشارکت جرم مؤثر مودی  $(n)$  و نسبت مشارکت مودی  $(n)$  برخی از سازه‌های ۹ طبقه آورده شده است. همانطور که از جدول ۲ مشخص است، نسبت جرم مؤثر مودی برای مود اول ۱، در سازه‌های نامنظم کاهش می‌یابد ولی نسبت جرم مؤثر مودی برای مود دوم ۲، و مود سوم ۳، در سازه‌های نامنظم افزایش می‌یابد.

جدول ۱: مشخصات دینامیکی سازه ۹ طبقه

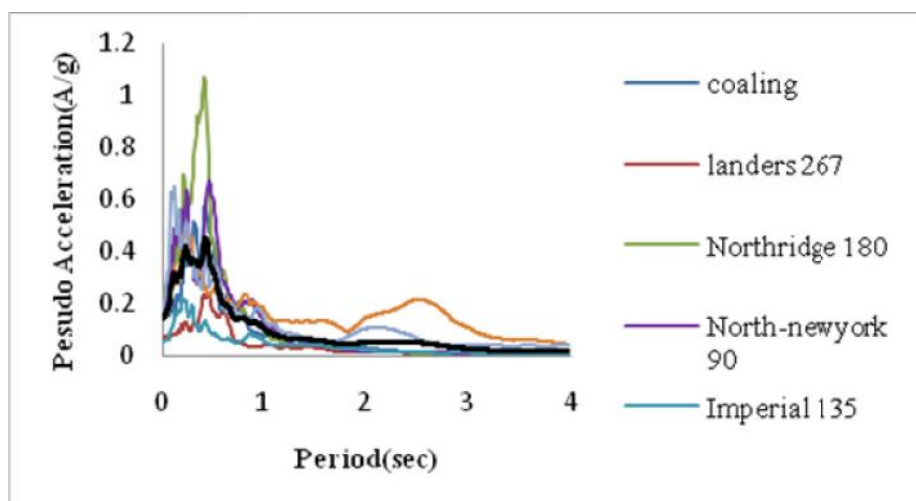
Frame	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	1	2	3	2/ 1	2/ 1	3/ 1
9F	1.173	0.42	0.246	0.756	0.118	0.054	0.407	0.156	0.071
9F993	1.081	0.40	0.249	0.661	0.178	0.076	0.491	0.269	0.115
9F933	0.93	0.370	0.237	0.461	0.296	0.122	0.64	0.642	0.264

### شتابنگاشت‌های انتخابی

مشخصات شتابنگاشت زلزله‌های انتخابی جهت انجام آنالیز دینامیکی غیر خطی تاریخچه زمانی (NLRHA) در جدول (۱) نشان داده شده است. برای این منظور ۷ رکورد از پایگاه مرکز تحقیقات مهندسی زلزله PEER-BERKELEY [2013] با خاک نوع استاندارد ۲۸۰۰ ایران (نوع C آیین نامه NEHRP) انتخاب شده است. همه رکوردهای انتخابی رکوردهای معمولی حوزه دور بوده و دارای بزرگای (۶-۷/۵) ریشتر می‌باشند. برای اطمینان از اینکه سازه‌های منظم و نامنظم در ارتفاع تحت اثر رکوردهای زلزله انتخابی وارد مرحله غیر خطی می‌شوند، همه شتابنگاشت‌های انتخابی به 0.7g مقیاس شده‌اند. در شکل (۲) نمودار طیف میانگین رکوردهای زلزله انتخابی نشان داده شده است. برای طراحی مدل‌های نامنظم از تحلیل دینامیکی طیفی استفاده شده است که از طیف میانگین رکورد زلزله‌های جدول (۱) برای این منظور استفاده شده است.

جدول ۲: مشخصات شتابنگاشت زلزله‌های انتخابی

Number	Name	Year	Distance(km)	Magnitude	PGA(g)	Duration(sec)
1	Coalinga/Parkfield -Cholame 5W	1983	47.3	6.4	0.147	40
2	Landers/Glendale - Las Palmas	1992	147.9	7.3	0.071	56.7
3	Imperial Valley/Plaster City	1979	31.7	6.5	0.057	18.745
4	Northridge/Pasadena -N Sierra Madre	1994	39.2	6.7	0.245	19.91
5	Northridge/La Crescenta - New York	1994	22.3	6.7	0.178	29.99
6	San Fernando/Hollywood Stor Lot	1971	21.2	6.6	0.174	28
7	Loma Prieta/Agnews State Hospital	1989	28.2	6.9	0.159	40



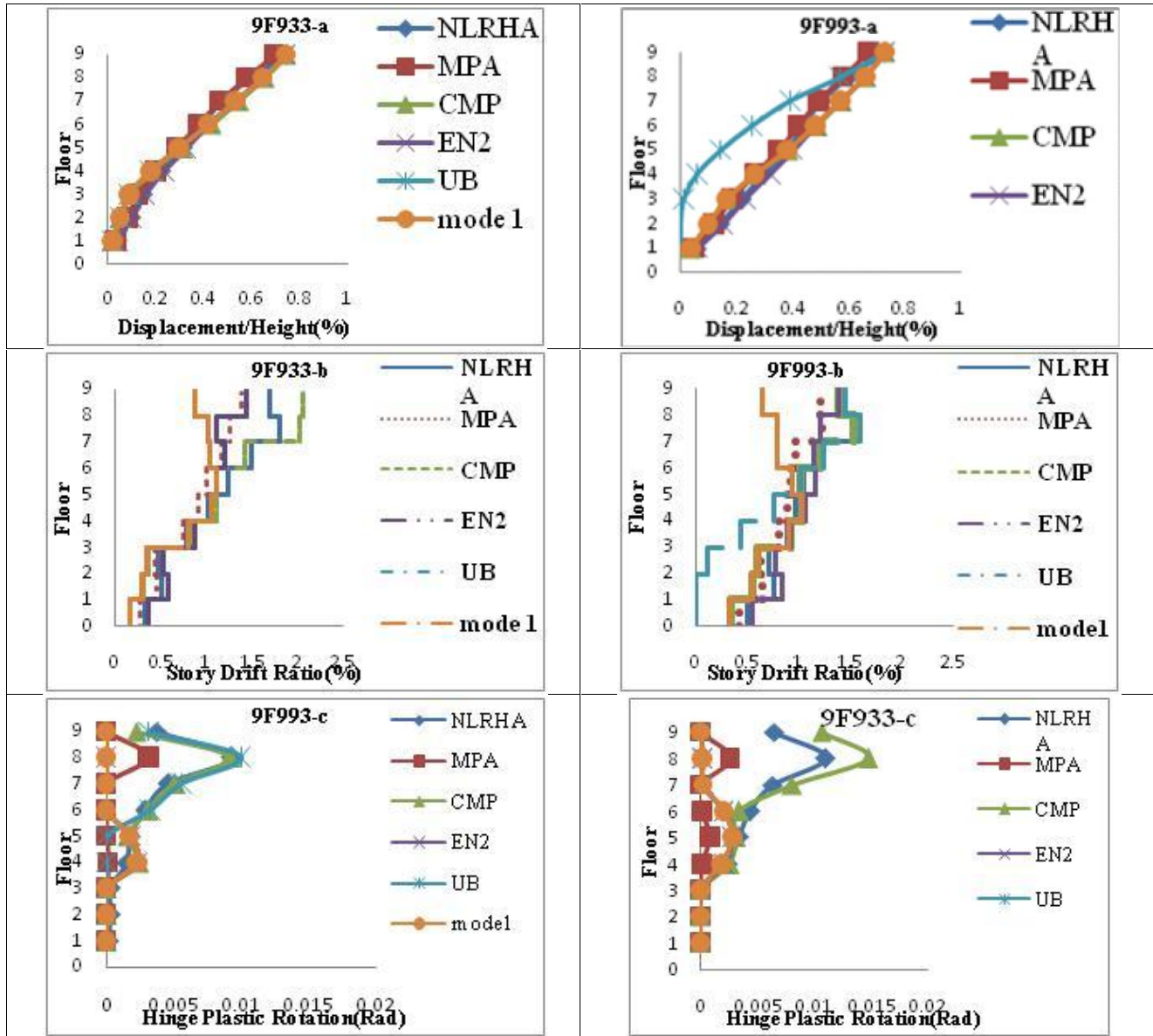
شکل ۲: طیف میانگین رکوردهای انتخابی

### بحث و بررسی

در نمودار شکل (۳) پاسخ‌های لرزه‌ای (جابجایی حداکثر کف‌ها، جابجایی نسبی بین طبقات، دوران پلاستیک مفاصل) برای برخی قاب‌های نامنظم ۹ طبقه برای تحلیل‌های ارتقاء یافته پوش آور (MPA, CMP, EN2, UB) و تحلیل دینامیکی غیر خطی تاریخچه زمانی (NLRHA) نشان داده شده است. در سازه‌ها چون زمان تناوب مود اول کمتر از ۲/۲ ثانیه می‌باشد، برای تحلیل پوش آور مودال متوالی (CMP) از آنالیز پوش آور دو مرحله‌ای استفاده شده است، همچنین یک تحلیل پوش آور بر اساس الگوی مود اول در سازه‌ها انجام شد. به منظور بهبود دقت روش پوش آور مودال از نتایج سه مود جهت ارزیابی نیازهای لرزه‌ای سازه‌ها استفاده شده است. در روش پوش آور ارتقاء یافته کران بالا (UB)، تغییر مکان هدف برابر با میانگین تغییر مکان‌های حاصل از تحلیل تاریخچه زمانی NLRHA در نظر گرفته شده است. در انجام روش N2 توسعه یافته (EN2) برای تحلیل طیف پاسخ الاستیک در سازه ۹ طبقه، از پنج مود استفاده شده است. برای محاسبه تغییر مکان نسبی در تحلیل مودال الاستیک که نرم



افزار قادر به محاسبه آن نیست و همچنین محاسبه آن از مقادیر جابجایی ترکیب یافته درست نمی‌باشد [Chopra,2011]. بسته به روش ترکیب انتخاب شده، (SRSS یا CQC) با داشتن جابجایی ترکیب یافته در پایان هر مود و با حل یک معادله درجه دو به صورت معکوس تغییرمکان نسبی هر مود محاسبه می‌گردد، که به منظور ترکیب نتایج برای سازه منظم از روش SRSS و برای سازه‌های نامنظم از روش CQC استفاده شده است. به منظور بررسی نتایج چند نمودار از پاسخ‌های سازه در ادامه آورده شده است. در مدل قاب ۳ طبقه هم این تحلیل‌ها انجام گرفته است که در اینجا به نتایج برخی از قاب‌های ۹ طبقه اکتفا می‌شود.



شکل ۳: (a) مقایسه نمودار جابجایی کف (b) تغییرمکان نسبی طبقه و (c) دوران مفاصل پلاستیک سازه‌های 9F933 و 9F993 در روشهای ارتقاء یافته MPA, CMP, EN2, UB با نتایج تحلیل NLRHA

همانطور که در نمودارهای شکل ۳ مشاهده می‌شود روش‌های MPA, CMP, EN2 نتایج خوبی از جابجایی کف طبقات ارائه می‌کنند، البته نتایج روش MPA به نتایج تحلیل دینامیکی غیر خطی نزدیکتر است. لازم به ذکر است که در ارزیابی آسیب‌های لرزه‌ای سازه‌ها تغییر مکان طبقات شاخص مناسبی نمی‌باشد. روش UB تغییرمکان طبقات را در طبقات پایین خیلی کمتر تخمین می‌زند. همچنین از مقایسه نمودارها نتیجه می‌گیریم روش الگوی Mode 1 قادر به نمایش پاسخها در سازه‌های بلند مرتبه و به خصوص در طبقات بالای این سازه‌ها نمی‌باشد. در ادامه به بررسی دقت روش‌های پوش آور ارتقاء یافته در تخمین پاسخ دررفت طبقات می‌پردازیم. برای سازه‌های با تراز پس رفتگی در طبقه اول، سوم، پنجم و هفتم و برای کاهش سطح پس رفتگی به میزان ۳۳٪ (یک سوم از سطح طبقات کسر شده مانند مدل 9F993) و ۶۶٪ (دو سوم از سطح طبقات کسر شده مانند مدل 9F933)، در مواردی که مقادیر نسبت جرم مؤثر مودی برای مود سوم و مود دوم به مود اول بیشتر باشد، دقت روش



MPA رضایت بخش خواهد بود که این موضوع نشان دهنده در نظرگیری اثر مودهای بالاتر در این روش است. بیشترین خطا در روش MPA در محاسبه دریافت در مدل 9F955 (سازه دارای نامنظمی زیادی است) حدود ۴۵٪ در طبقه هفتم است.

در سازه با سطح پس رفتگی و تراز پس رفتگی یکسان، در مواردی که مقادیر نسبت جرم مؤثر مودی دوم و سوم به مود اول بیشتر باشد، دقت روش CMP رضایت بخش خواهد بود. این مفهوم نشان دهنده این موضوع است که با توجه به دو مرحله ای بودن روش CMP و استفاده از الگوی مود دوم نتایج با دقت خوبی تخمین زده می‌شود. در واقع علت موفقیت روش CMP به دلیل انجام تحلیل‌های پوش آور دو مرحله‌ای است. به طور مثال حداکثر خطای روش CMP در مدل 9F993 و ۷٪ و برای مدل 9F995 ۱۳٪ می‌باشد. بیشترین خطا در روش CMP در محاسبه دریافت در مدل 9F951 در طبقه ششم و حدود ۳۷٪ است. در این مدل همزمان در میانه ارتفاع و در تراز طبقه اول پس رفتگی رخ داده است.

در سازه با تراز پس رفتگی در طبقه اول، سوم، پنجم و هفتم و برای کاهش سطح پس رفتگی به میزان ۳۳٪ و ۶۶٪، هر چه نسبت جرم مؤثر مودی برای مود اول بیشتر می‌شود، دقت روش EN2 بیشتر می‌شود. به طور مثال دقت این روش در مدل 9F977 از مدل 9F997 بیشتر است که حداکثر خطا در این مدل‌ها به ترتیب ۱٪ و ۱۱٪ می‌باشد، همچنین مطابق شکل ۳ دقت روش در مدل 9F993 از مدل 9F933 بیشتر است زیرا نسبت جرم مؤثر مودی برای مود اول در مدل 9F993 مطابق جدول ۱ بیشتر از مدل 9F933 می‌باشد. همچنین ترکیب مناسب تحلیل طیفی و تحلیل پوش آور در روش EN2، نشان دهنده در نظرگیری مناسب مودهای بالاتر در این روش است. اما این روش در محاسبه دوران مفاصل پلاستیک دقت لازم را به خصوص در طبقات بالا ندارد که علت آن به دلیل ترکیب تحلیل پوش آور و تحلیل دینامیکی طیفی در روش EN2 به منظور محاسبه ضرایب اصلاح است که تحلیل طیفی قادر به نمایش رفتار غیر خطی اعضا نمی‌باشد. بیشترین خطا در روش EN2 در محاسبه دریافت در مدل 9F933 و در طبقه هشتم حدود ۳۷٪ است.

در سازه با تراز پس رفتگی در طبقه اول، سوم، پنجم و هفتم و برای کاهش سطح پس رفتگی به میزان ۳۳٪ و ۶۶٪، هر چه نسبت مشارکت مودی برای مود دوم به مود اول کمتر می‌شود، دقت روش UB در طبقات بالا بیشتر و در طبقات پایین کمتر می‌شود و هر چه این نسبت بیشتر می‌شود، دقت روش UB در طبقات پایین بیشتر و در طبقات بالا کمتر می‌شود. این نسبت در الگوی بار روش UB اثر داده شده است و تأیید کننده این مفهوم است که چون این روش نتایج را در طبقات بالا بیشتر و در طبقات پایین کمتر تخمین می‌زند، کاهش و افزایش آن دقت نتایج را به ترتیب در طبقات بالا و پایین بیشتر می‌کند. به طور مثال دقت این روش در مدل 9F993 از مدل 9F933 در شکل (۵) در طبقات بالا بیشتر است و دقت مدل 9F933 از مدل 9F993 در طبقات پایین بیشتر است که علت آن کمتر بودن نسبت مشارکت مودی برای مود دوم به مود اول در مدل 9F993 می‌باشد و در مدل 9F933 و مدل 9F955 در شکل (۵) هم دقت نتایج 9F933 در طبقات پایین و دقت نتایج 9F955 در طبقات بالا بیشتر است و علت آن بیشتر بودن نسبت مشارکت مودی برای مود دوم به مود اول در مدل 9F933 می‌باشد. بیشترین خطا در روش UB در محاسبه دریافت در طبقات پایین بیش از ۹۰٪ است، و در طبقات بالا بیشترین خطا در مدل 9F933 و حدود ۴۲٪ است. از میان سازه‌ها، در مدل 9F951، 9F933، 9F955، تحلیل‌های ارتقاء یافته پوش آور، نیازهای لرزه‌ای این سازه‌ها را با دقت کافی محاسبه نمی‌کنند یعنی سازه‌هایی که پس رفتگی در میانه ارتفاع رخ می‌دهد.

## نتیجه گیری

رفتار لرزه‌ای سازه‌ها از سه ویژگی مهم سازه که تغییر در هر یک ویژگی دینامیکی سازه را دچار تغییر می‌کند نشئت می‌گیرد. این سه ویژگی عبارت است از سختی، مقاومت و جرم سازه. این تغییرات گاهی به دلیل تغییر ناگهانی در هندسه سازه ایجاد می‌شود. سازه‌های نامنظم دارای پس رفتگی در ارتفاع با کاهش ناگهانی در سطح پس رفتگی باعث تغییر در این سه پارامتر شده و رفتار لرزه ای متفاوتی در این سازه‌ها ایجاد می‌کنند. به همین جهت در برخی آیین نامه‌ها ضوابطی برای این نوع سازه‌ها در نظر گرفته شده است. باتوجه به کاربرد روز افزون تحلیل‌های پوش آور و پوش آور ارتقاء یافته و کمبود و در بعضی روش‌ها نبود ارزیابی این روش‌ها در این سازه‌ها، بررسی رفتار و دقت این روش‌ها در این نوع سازه‌ها لازم دیده شد. در این تحقیق به بررسی رفتار لرزه‌ای این سازه‌ها و ارزیابی دقت این روش‌ها پرداخته می‌شود. نیازهای لرزه‌ای این سازه‌ها با استفاده از تحلیل‌های ارتقاء یافته استاتیکی غیر خطی MPA، CMP، UB و EN2 محاسبه شد و با نتایج تحلیل دینامیکی غیر خطی مقایسه شد. در این سازه‌ها درصد مشارکت مودی مودهای بالاتر در حال افزایش است، نسبت درصد جرم مؤثر مود دوم و سوم به مود اول هر یک از سازه‌ها، نشان می‌دهد که در سازه‌های نامنظم اثر مودهای بالاتر قابل توجه است. در مواردی که نسبت جرم مؤثر مودی دوم و سوم به مود اول بیشتر باشد، دقت روش CMP و MPA رضایت بخش خواهد بود. دقت روش EN2 به نسبت جرم مؤثر مودی برای مود اول وابسته است به طوری که هر چه این نسبت بیشتر می‌شود، دقت بیشتر می‌شود. دقت روش UB به نسبت مشارکت مودی برای مود دوم به مود اول وابسته است. به طور کلی می‌توان علت موفقیت روش‌های پوش آور ارتقاء یافته را در نظرگیری ویژگی‌های دینامیکی سازه در محاسبات الگوی بار و تغییر مکان هدف دانست.

## مراجع

پیش نویس اول ویرایش چهارم استاندارد ۲۸۰۰، ۱۳۹۱.

- Athanassiadou, C.J., Seismic performance of R/C plane frames irregular in elevation, *Engineering Structures*, 2008. 30(5) : p. 1250-1261.
- Chopra, A.K. and R.K. Goel, A modal pushover analysis procedure to estimate seismic demands for unsymmetric-plan buildings. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2004. 33(8) : p. 903-927.
- Dynamics of Structures (4th Edition) (Prentice-Hall International Series in Civil Engineering and Engineering Mechanics)* ; Anil K. Chopra, 2011.
- Humar, J. and E. Wright, Earthquake response of steel framed multistorey buildings with setbacks. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 1977. 5(1) : p. 15-39.
- Jan, T.S., M.W. Liu, and Y.C. Kao, An upper-bound pushover analysis procedure for estimating the seismic demands of high-rise buildings. *Engineering Structures*, 2004. 26(1) : p. 117-128.
- Kreslin, M. and P. Fajfar, The extended N2 method taking into account higher mode effects in elevation. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2011. 40(14) : p. 1571-1589.
- Karavasilis, T.L., N. Bazeos, and D. Beskos, Seismic response of plane steel MRF with setbacks: estimation of inelastic deformation demands. *Journal of Constructional Steel Research*, 2008. 64(6) : p. 644-654.
- Krawinkler, H. and G.D.P.K. Seneviratna, Pros and Cons of a pushover analysis of seismic performance evaluation. *Engineering Structures*, 1998. 20(4-6) : p. 452-464.
- Le-Trung, K., et al., Evaluation of seismic behaviour of steel special moment frame buildings with vertical irregularities. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 2012. 21(3) : p. 215-232.
- Mao, J., C. Zhai, and L. Xie, An improved modal pushover analysis procedure for estimating seismic demands of structures. *Earthquake engineering and engineering vibration*, 2008. 7(1) : p. 25-31.
- Moghadam, A. and W. Tso. Pushover analysis for asymmetric and set-back multi-story buildings. in *Proc. of the 12th world conference on earthquake engineering*. 2000.
- Poursha, M., F. Khoshnoudian, and A.S. Moghadam, A consecutive modal pushover procedure for estimating the seismic demands of tall buildings. *Engineering Structures*, 2009. 31(2) : p. 591-599.
- Pacific earthquake engineering research centre (PEER). Strong ground motion database 2013, <http://peer.berkeley.edu/>
- Soni, D.P. and B.B. Mistry, Qualitative review of seismic response of vertically irregular building frames. *ISET Journal of Earthquake Technology, Technical Note*, 2006. 43(4) : p. 121-132. 13. 14.
- Sarkar, P., A.M. Prasad, and D. Menon, Vertical geometric irregularity in stepped building frames. *Engineering Structures*, 2010. 32(8) : p. 2175-2182.
- Wong, C.M. and W.K. Tso, Seismic loading for buildings with setbacks. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 1994. 21(5) : p. 863-871.

