

# بررسی اثر پیکربندی هندسی در رفتار لرزه‌ی قاب‌های نامنظم هندسی دارای پس‌رفتگی در ارتفاع

زهرة بهلولی (کارشناس ارشد)

مهدی پورشاء\* (استادیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند تبریز

مهندسی عمران شریف، (پاییز ۱۳۹۵)  
دوره‌ی ۲ - ۳۲، شماره‌ی ۱/۳، ص. ۶۹-۵۹

در این نوشتار رفتار لرزه‌ی سازه‌های نامنظم هندسی دارای پس‌رفتگی در ارتفاع مورد مطالعه قرار گرفته است. بدین منظور، ۲۰ قاب خمشی ویژه فولادی ۹ طبقه دارای پس‌رفتگی در ارتفاع با پیکربندی‌های هندسی مختلف طراحی و ویژگی‌های دینامیکی آنها شامل دوره‌ی تناوب و نسبت مشارکت چرم مؤثر مودی برای سه مود ارتعاشی اول و همچنین نسبت ضریب مشارکت مودی برای مود دوم به مود اول بررسی شده است. رفتار لرزه‌ی این نوع سازه‌ها با استفاده از تجزیه و تحلیل تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی با به‌کارگیری ۷ رکورد زلزله‌ی حوزه‌ی دور با تأکید بر موقعیت و سطح پس‌رفتگی بررسی شده است. همچنین با توجه به توسعه‌ی روش‌های تحلیل بارافزون ارتقاء یافته، به ارزیابی پاسخ‌های لرزه‌ی سازه‌های انتخابی با استفاده از روش‌های بارافزون ارتقاء یافته شامل: تحلیل استاتیکی غیرخطی مودال (MPA)، تحلیل بارافزون کران بالا (UBPA)، تحلیل بارافزون مودال متوالی (CMP)، و روش N۲ توسعه‌یافته (EN۲) پرداخته شده و دقت نتایج حاصل از تحلیل‌های بارافزون ارتقاء یافته مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که پاسخ لرزه‌ی سازه‌های مذکور و دقت روش‌های بارافزون ارتقاء یافته به ویژگی‌های دینامیکی و پیکربندی هندسی سازه‌های ذکر شده بستگی دارد.

واژگان کلیدی: سازه‌ی نامنظم هندسی، پس‌رفتگی در ارتفاع، ویژگی‌های دینامیکی، رفتار لرزه‌ی، تحلیل دینامیکی غیرخطی، تحلیل‌های بارافزون ارتقاء یافته.

z.bohloolie8899@yahoo.com  
poursha@sut.ac.ir

## ۱. مقدمه

عموماً بام است) تحت اثر بار جانبی به مقدار مشخص از پیش تعیین شده (تغییر مکان هدف) برسد. در روش ذکر شده، دو پارامتر مهم الگوی بار جانبی و تغییر مکان هدف تأثیرگذار است. علی‌رغم اینکه روش بارافزون گسترش زیادی پیدا کرده است، فاقد یک پشتوانه‌ی تئوریک قوی است. در نظر نگرفتن اثر مودهای ارتعاشی بالاتر و کاهش سختی پس از تسلیم از ضعف‌های این روش است. این روش مشابه روش تحلیل استاتیکی خطی است، با این تفاوت که رفتار غیرخطی تمام اعضا و اجزاء سازه در تحلیل وارد می‌شود و همچنین اثر زلزله به جای اعمال بار با مقدار مشخص، بر حسب تغییر مکان برآورد می‌شود.<sup>[۱]</sup>

در سازه‌های نامنظم و بلند، به دلیل مشارکت مودهای ارتعاشی بالاتر در پاسخ‌های لرزه‌ی سازه، روش برافزون مرسوم اعتبار ندارد. برای رفع مشکل عنوان شده، روش‌های ارتقاء یافته از جمله روش‌های: تحلیل بارافزون مودال (MPA)،<sup>[۲]</sup> تحلیل بارافزون کران بالا<sup>[۳]</sup>، تحلیل بارافزون به‌تکامل‌شونده (AMC)،<sup>[۴]</sup> تحلیل بارافزون بهبود یافته (IMPA)،<sup>[۵]</sup> تحلیل بارافزون مودال متوالی (CMP)<sup>[۶]</sup> و روش N۲ توسعه یافته (EN۲)،<sup>[۷]</sup> توسط پژوهشگران ارائه شده است، که روش‌های مذکور اثر مودهای ارتعاشی بالاتر را در برآورد نیازهای لرزه‌ی سازه‌ها لحاظ می‌کنند.

رفتار لرزه‌ی سازه‌ها تحت تأثیر ۳ ویژگی مهم سازه است، که تغییر در هر یک، ویژگی‌های دینامیکی سازه را دچار تغییر می‌کند. این ۳ ویژگی عبارت‌اند از: سختی، مقاومت، و چرم سازه. این تغییرات گاهی به دلیل تغییر ناگهانی در هندسه‌ی سازه ایجاد می‌شوند. در سازه‌های نامنظم دارای پس‌رفتگی در ارتفاع با کاهش ناگهانی در سطح پس‌رفتگی، در ۳ پارامتر مذکور تغییر ایجاد می‌شود و سازه‌های ذکر شده، رفتار لرزه‌ی متفاوتی نشان می‌دهند. به همین جهت در آیین‌نامه‌های طراحی لرزه‌ی، ضوابطی برای سازه‌های مذکور در نظر گرفته شده است.

امروزه روش تحلیل استاتیکی غیرخطی (تحلیل بارافزون) به دلیل کاهش هزینه‌ی تحلیل و به‌طور هم‌زمان دقت قابل قبول در نتایج، به‌عنوان یکی از روش‌های تحلیل مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. در روش بارافزون، سازه تحت الگوی باری که متناسب با شکل مود غالب سازه (مود اول کشسان) است، قرار می‌گیرد. این بار به‌صورت فزاینده به سازه اعمال می‌شود، تا آنجا که تغییر مکان در نقطه‌ی کنترل (که

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۳/۵/۲۵، اصلاحیه ۱۳۹۳/۱۰/۱۷، پذیرش ۱۳۹۳/۱۰/۲۸

ساختمان‌های بلند دارای پس‌رفتگی در ارتفاع با استفاده از تحلیل‌های بارافزون ارتقاء یافته مورد توجه قرار نگرفته است، در این پژوهش ارزیابی روش‌های تحلیل بارافزون ارتقاء یافته در سازه‌های مذکور، بررسی و دقت روش‌های مذکور در سازه‌های بلند دارای پس‌رفتگی در ارتفاع لازم شناخته شده است. در این پژوهش، رفتار لرزه‌ای این سازه‌ها و دقت روش‌های تحلیل بارافزون ارتقاء یافته مورد بررسی قرار گرفته است. به همین منظور یک مدل قاب ۹ طبقه به عنوان سازه‌ی منظم مرجع در نظر گرفته شده و ۱۹ قاب دارای پس‌رفتگی در ارتفاع با پیکر بندی‌های هندسی مختلف ایجاد و طراحی شده‌اند. سپس پاسخ‌های لرزه‌ی سازه‌های نامنظم دارای پس‌رفتگی در ارتفاع (Setback) با استفاده از آنالیز دینامیکی غیرخطی و ویژگی‌های دینامیکی سازه‌ها از قبیل دوره‌ی تناوب ارتعاشی سازه، نسبت مشارکت جرم مؤثر مودی و ضریب مشارکت مودی برای سه مود اول ارتعاش سازه با استفاده از تحلیل مقدار ویژه محاسبه شده و مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین نیازهای لرزه‌ی سازه‌های مذکور با استفاده از تحلیل‌های ارتقاء یافته استاتیکی غیرخطی MPA، CMP، UB و EN2 محاسبه شده و با نتایج حاصل از تحلیل دینامیکی غیرخطی مورد مقایسه قرار گرفته است. در انتها این نتیجه گرفته شده است که دو پارامتر موقعیت تراز پس‌رفتگی و میزان کاهش سطح پس‌رفتگی در پاسخ لرزه‌ی سازه‌های مذکور تأثیر دارد، که خود بیانگر اثر مهم پیکر بندی سازه در رفتار لرزه‌ی سازه است. همچنین نتایج نشان می‌دهند که پاسخ لرزه‌ی سازه‌های بلند دارای پس‌رفتگی در ارتفاع و دقت روش‌های بارافزون ارتقاء یافته به ویژگی دینامیکی سازه‌های مذکور بستگی دارد.

## ۲. تحلیل‌های بارافزون ارتقاء یافته برای در نظر گرفتن اثر

### مدهای ارتعاشی بالاتر در ارتفاع

#### ۱.۲. روش بارافزون مودال (MPA)

چوپرا و گوئل روش تحلیل بارافزون مودال (MPA) را ابتدا برای ساختمان‌های کشسان خطی توسعه داده و نشان داده‌اند که روش معادل روش معروف تحلیل طیف پاسخ (RSA) است. سپس، روش مذکور را برای ساختمان‌های غیرکشسان بسط داده‌اند. در واقع روش تحلیل بارافزون مودال (MPA) بر این فرض استوار است که پاسخ سازه در مدهای مختلف در حالت غیرکشسان مستقل از هم هستند. بنابراین پاسخ لرزه‌ی سازه در هر مود مستقلاً محاسبه می‌شود و در نهایت، پاسخ کلی سازه از ترکیب پاسخ‌های مودی با استفاده از روش ترکیب جذر مجموع مربعات (SRSS) به دست می‌آید.<sup>[۲]</sup>

#### ۲.۲. روش تجزیه و تحلیل بارافزون کران بالا (UBPA)

روش تجزیه و تحلیل بارافزون کران بالا (UBPA) در سال ۲۰۰۳ ارائه شده است، که در آن برای مشارکت تغییر مکان پاسخ مود بالاتر در مقایسه با مود اصلی، از نسبت مشارکت مود دوم به مود اول  $\left(\frac{q_2}{q_1}\right)_{UB}$ ، در محاسبه‌ی الگوی بار و تغییر مکان هدف استفاده شده است.<sup>[۳]</sup>

از طیف پاسخ کشسان زلزله نیز برای محاسبه‌ی کران بالای نسبت مشارکت مود دوم به مود اول  $\left(\frac{q_2}{q_1}\right)_{UB}$ ، استفاده می‌شود (رابطه‌ی ۱):

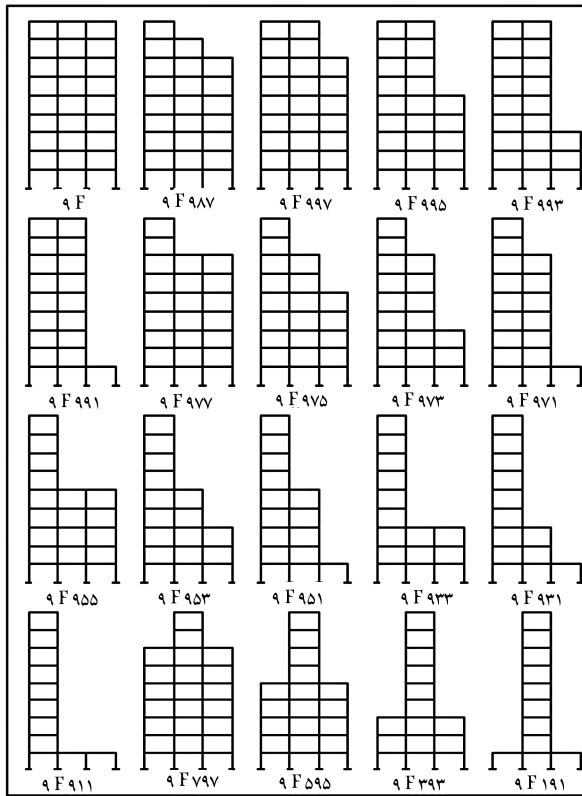
$$\left| \frac{\Gamma_r D_r}{\Gamma \backslash D_r} \right| =_{UB} \left( \frac{q_r}{q_1} \right) \quad (1)$$

که در آن،  $\Gamma_n$  ( $n = 1, 2$ ) ضریب مشارکت مودی و  $D_n$  ( $n = 1, 2$ ) جابه‌جایی به دست آمده از طیف پاسخ جابه‌جایی کشسان است.

نامنظمی در ساختمان‌ها طبق تعریف آیین‌نامه‌های مختلف به علت توزیع نامتناسب جرم، سختی و مقاومت در سازه رخ می‌دهد و یا به دلیل نامنظمی هندسی در ارتفاع ایجاد می‌شود، که ابعاد پلان سازه در ارتفاع تغییر قابل توجهی می‌یابد، که ساختمان‌های دارای پس‌رفتگی یا عقب‌نشینی در ارتفاع (Setback) و ساختمان‌های با شکل هرمی از این نوع هستند.<sup>[۸]</sup> از این رو این نوع نامنظمی، مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. در سال ۱۹۷۷ پژوهشگران، پاسخ لرزه‌ی قاب‌های فولادی دارای پس‌رفتگی را مورد مطالعه قرار داده و تأثیر پس‌رفتگی‌ها در بسامدهای سازه و شکل‌های مودی و همچنین اثر آنها در پاسخ لرزه‌ی را بررسی کردند.<sup>[۹]</sup> در پژوهش دیگری در سال ۱۹۸۴، تقاضای شکل‌پذیری قاب‌های RC نامنظم در ارتفاع بررسی و نتیجه گرفته شده است که نامنظمی در ارتفاع، تقاضای شکل‌پذیری را تقریباً به ۲ برابر افزایش می‌دهد.<sup>[۱۰]</sup> همچنین برخی پژوهشگران (۱۹۹۰) با انجام آزمایش بر روی یک ساختمان بتن مسلح ۶ طبقه‌ی دارای پس‌رفتگی در وسط ارتفاع، ضمن بررسی آیین‌نامه‌ی UBC ۱۹۸۸ برای این نوع سازه‌ها، یک روش طراحی استاتیکی را برای سازه‌های بتن مسلح دارای پس‌رفتگی پیشنهاد کرده‌اند.<sup>[۱۱]</sup> همچنین در سال ۱۹۹۴ نیز اذیتبار ضوابط آیین‌نامه‌های طراحی برای ساختمان‌های دارای پس‌رفتگی بررسی و نتیجه گرفته شده است که باید برش پایه‌ی حاصل از تحلیل دینامیکی به برش پایه‌ی حاصل از روش بار استاتیکی معادل آیین‌نامه هم‌پایه شود.<sup>[۱۲]</sup> برخی پژوهشگران نیز در پژوهشی در سال ۱۹۹۵، سازه‌های setback را مورد مطالعه قرار داده و نتیجه گرفته‌اند که رفتار لرزه‌ی سازه‌های منظم و نامنظم، مشابه است. در مطالعه‌ی آنها مقدار پس‌رفتگی و نسبت ارتفاع پایه به ارتفاع کل سازه کوچک است.<sup>[۱۳]</sup> در پژوهش دیگری در سال ۱۹۹۶ نیز این نتیجه به دست آمده است که وجود پس‌رفتگی‌ها پاسخ لرزه‌ی را بدتر نمی‌کند.<sup>[۱۴]</sup> همچنین برخی پژوهشگران (۲۰۰۰)، یک روش تحلیل استاتیکی غیرخطی را برای ارزیابی لرزه‌ی سازه‌های چند طبقه ارائه کرده‌اند، که در آن از یک تحلیل طیف پاسخ برای محاسبه‌ی جابه‌جایی هدف و توزیع بار برای تحلیل بارافزون استفاده شده است.<sup>[۱۵]</sup> پژوهشگران دیگری (۲۰۰۴) نیز به ارزیابی رفتار سازه‌های قاب بتن مسلح نامنظم در ارتفاع پرداخته و نتیجه گرفته‌اند که سازه‌های دارای پس‌رفتگی رفتاری متفاوت از سازه‌ی منظم ندارند.<sup>[۱۶]</sup>

همچنین در پژوهشی در سال ۲۰۰۶، رفتار لرزه‌ی سازه‌های نامنظم در ارتفاع بررسی و مشاهده شده است که بسیاری از مطالعات انجام شده بر افزایش تقاضا در قسمت برج سازه‌های دارای پس‌رفتگی و افزایش تقاضای لرزه‌ی برای ساختمان‌های با ناپوستگی در توزیع جرم، سختی، و مقاومت توافق دارند.<sup>[۱۷]</sup> پژوهشگرانی نیز (۲۰۰۶)، دو سازه‌ی نامنظم ۱۴ طبقه به صورت قاب بتنی خمشی مسلح را بررسی کرده و تمرکز تنش نامطلوبی در همسایگی پس‌رفتگی گزارش کرده‌اند.<sup>[۱۸]</sup> در پژوهش دیگری در سال ۲۰۰۸، روش جدیدی برای شناسایی نامنظمی در قاب‌های ساختمانی ناشی از حضور پس‌رفتگی پیشنهاد و نشان داده شده است که تعداد طبقات، نسبت مقاومت تیر به ستون، و نوع نامنظمی هندسی در مقدار و توزیع تغییر شکل‌های غیرکشسان در ارتفاع سازه تأثیر می‌گذارد.<sup>[۱۹]</sup> برخی پژوهشگران نیز در پژوهشی در سال ۲۰۰۸، عملکرد لرزه‌ی قاب‌های بتن مسلح (RC) چند طبقه‌ی نامنظم در ارتفاع را بررسی کرده و نتیجه گرفته‌اند که ساختمان‌های دارای پس‌رفتگی و ساختمان‌های منظم طراحی شده بر اساس ECA هنگامی که تحت بارگذاری لرزه‌ی قرار می‌گیرند، مشابه هم رفتار می‌کنند.<sup>[۲۰]</sup> در پژوهش دیگری (۲۰۱۰) نیز با بررسی سازه‌های دارای پس‌رفتگی در ارتفاع، شاخصی برای نامنظمی سازه‌های مذکور معرفی شده است.<sup>[۲۱]</sup>

از آنجا که با وجود کاربرد روزافزون تحلیل‌های بارافزون تاکنون ارزیابی لرزه‌ی



شکل ۱. سازه‌های مورد مطالعه.

است. از اثرات اندرکنش خاک و سازه صرف‌نظر شده است. همچنین در طراحی تمام مدل‌ها، کنترل ضابطه‌ی تیر ضعیف - ستون قوی و کنترل دررفت انجام شده است. رفتار مفصل غیرخطی تعریف شده در تیرها از نوع خمشی (M) و برای ستون‌ها از نوع محوری دو لنگری (P-M-M) است. برای طراحی مدل‌های نامنظم از تحلیل دینامیکی طیفی استفاده شده است،<sup>[۶]</sup> که از طیف میانگین رکورد زلزله‌های مندرج در جدول ۱ برای این منظور استفاده شده است.

در ۱۹ مدل از قاب‌های ۹ طبقه، نامنظمی هندسی (پس‌رفتگی) در ارتفاع ایجاد شده است. همه قاب‌های نامنظم انتخابی براساس استاندارد ۲۸۰۰<sup>[۲۴]</sup> دارای نامنظمی هندسی هستند. نام‌گذاری قاب‌ها به صورتی بوده است که مثلاً در قاب ۹F۹۸۷ عدد اول نشانه‌ی تعداد طبقات، حرف F مخفف کلمه‌ی FRAME به دلیل دو بعدی بودن قاب‌های انتخابی است. سه عدد بعدی که به معنی سه دهانه بودن قاب است، به ترتیب نشان‌گر تعداد طبقات موجود در هر دهانه‌ی قاب از چپ به راست است. بنابراین ۹F۹۸۷ نشان‌گر قاب ۹ طبقه‌ی است که از چپ به راست در دهانه‌ی اول ۹ طبقه، در دهانه‌ی دوم ۸ طبقه و در دهانه‌ی سوم ۷ طبقه دارد، شکل‌های قاب‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است.

#### ۴. توصیف تحلیل‌ها

به منظور تعیین ویژگی‌های دینامیکی سازه‌ها از جمله بسامدها، درصد مشارکت‌های جرم مؤثر مودی و ضریب مشارکت مودی، تحلیل مقدار ویژه انجام شده است. همچنین جهت بررسی رفتار غیرخطی سازه‌ها از تحلیل تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی (NLRHA) به روش انتگرال‌گیری مستقیم و با فرض تغییر شتاب به صورت خطی

#### ۳.۲. روش بار افزون مودال متوالی (CMP)

در پژوهش سال ۲۰۰۹، روش بار افزون مودی متوالی (CMP) برای تحلیل استاتیکی غیرخطی ساختمان‌ها ارائه شده است، که در آن آنالیزهای بار افزون یک‌مرحله‌ی و چندمرحله‌ی انجام می‌شود و پاسخ لرزه‌ی سازه از پیشینه‌ی پاسخ تحلیل‌های یادشده به دست می‌آید.<sup>[۶]</sup> در تحلیل چندمرحله‌ی، تغییر مکان بام در هر مرحله طبق رابطه‌ی ۲ محاسبه می‌شود:

$$u_{ri} = \beta_i \delta_i \quad (2)$$

که در آن  $\beta_i$  از روابط ۳ و ۴ به دست می‌آید:

$$\beta_i = \alpha_i \quad (3)$$

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

که در آن‌ها،  $\delta_i$  جابه‌جایی هدف کلی در بام و  $N_s$  تعداد مراحل موجود در تجزیه و تحلیل بار افزون چندمرحله‌ی است. همچنین  $\alpha_i$  نسبت جرم مؤثر مودال برای مود  $i$ ام است، که از معادله‌ی ۵ حاصل می‌شود:

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

که در آن،  $M_n^*$  جرم مؤثر مود  $n$ ام و  $M^*$  جرم لرزه‌ی کل سازه است.

#### ۴.۲. روش N۲ توسعه یافته (EN۲)

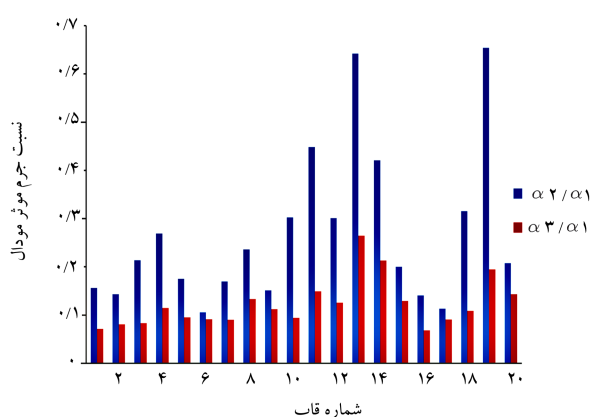
روش N۲ به منظور لحاظ کردن اثر موده‌های بالاتر در محاسبه‌ی پاسخ‌های لرزه‌ی توسط کرسلین و فایفر توسعه یافته و روش EN۲ نام گرفته است. توسعه‌ی روش مذکور بر این فرض استوار است که وقتی سازه در موده‌های بالاتر ارتعاش می‌کند، در محدوده‌ی کشسان باقی می‌ماند. نیازهای لرزه‌ی برحسب جابه‌جایی و دررفت طبقه می‌تواند از ترکیب تحلیل بار افزون اصلی و تحلیل مودال کشسان استاندارد به دست آید. در روش N۲ توسعه یافته که برای سازه‌های با اثر موده‌های بالاتر قابل کاربرد است، ایده‌ی اصلی روش ثابت نگه داشته می‌شود و برای در نظر گرفتن اثر موده‌های بالاتر از ضرایب تصحیح بر پایه‌ی نتایج تحلیل مودال کشسان استفاده می‌شود. در واقع تحلیل بار افزون، رفتار آن قسمت‌هایی از سازه را که تغییر شکل‌های خمیری بزرگ اتفاق می‌افتد کنترل می‌کند، در حالی که تحلیل کشسان تقاضای لرزه‌ی را در قسمت‌هایی که اثر موده‌های بالاتر مهم است، تعیین می‌کند.<sup>[۷]</sup>

#### ۳. سازه‌های مورد مطالعه

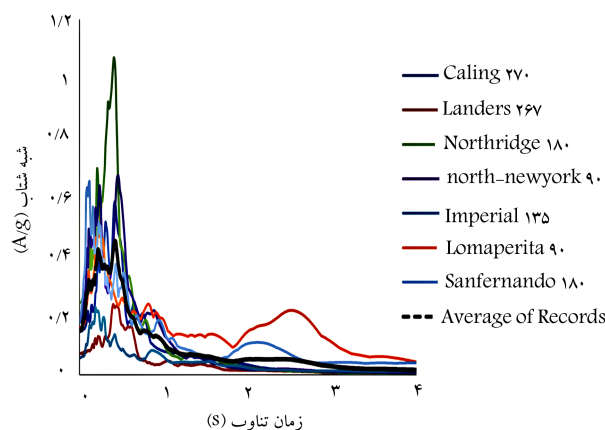
در این پژوهش قاب فولادی ۹ طبقه با سیستم قاب خمشی ویژه ( $R = 10$ ) براساس مبحث دهم مقررات ملی ساختمان<sup>[۲۴]</sup> و استاندارد ۲۸۰۰ ایران<sup>[۲۴]</sup> به روش تنش مجاز طراحی شده‌اند؛ که قاب‌ها شامل یک قاب منظم و ۱۹ قاب دارای پس‌رفتگی در ارتفاع هستند. سازه‌های انتخابی در شکل ۱ نشان داده شده‌اند. خاک منطقه از نوع II (نوع C آیین‌نامه‌ی NEHRP) با خطر لرزه‌خیزی بسیار زیاد است. عرض قاب، ۱۵ متر (۳ دهانه به طول ۵ متر) و ارتفاع طبقات ۳/۲ متر است. دهانه‌ی بارگیر قاب‌ها ۵ متر، بار مرده  $0.65 \text{ (kg/m}^2\text{)}$  و بار زنده  $2.0 \text{ (kg/m}^2\text{)}$  هستند. جرم لرزه‌ی در هر تراز کف از ترکیب بار مرده به علاوه ۲۰٪ بار زنده در نظر گرفته شده

جدول ۱. مشخصات شتاب‌نگاشت زلزله‌های انتخابی.

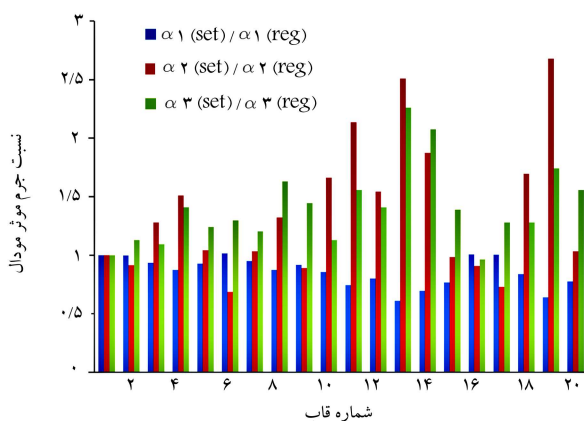
شماره زلزله	نام زلزله	مؤلفه	سال	فاصله (km)	اندازه (ریشتر)	شتاب بیشینه (g)
۱	Coalinga	H-C° ۵۲۷°	۱۹۸۳	۴۷٫۳	۶٫۴	۰٫۱۴۷
۲	Landers	LANDERS/GLP۲۶۷	۱۹۹۲	۱۴۷٫۹	۷٫۳	۰٫۰۷۱
۳	Imperial Valley	IMPVALL/H-PLS ۱۳۵	۱۹۷۹	۳۱٫۷	۶٫۵	۰٫۰۵۷
۴	Northridge	NORTHR/SMV ۱۸°	۱۹۹۴	۳۹٫۲	۶٫۷	۰٫۲۴۵
۵	Northridge	NORTHR/NYA° ۹°	۱۹۹۴	۲۲٫۳	۶٫۷	۰٫۱۷۸
۶	San Fernando	SFERN/PEL ۱۸°	۱۹۷۱	۲۱٫۲	۶٫۶	۰٫۱۷۴
۷	Loma Prieta	LOMAP/AGW° ۹°	۱۹۸۹	۲۸٫۲	۶٫۹	۰٫۱۵۹



شکل ۳. نسبت جرم مؤثر مودهای دوم و سوم به مود اول در سازه‌های ۹ طبقه.



شکل ۲. طیف شبه شتاب رکورد زلزله‌های انتخابی و طیف میانگین آنها.



شکل ۴. نسبت جرم مؤثر مودی سازه‌های دارای پس‌رفتگی به مقدار متناظر در سازه‌ی منظم ۹ طبقه.

مقادیر دوره‌ی تناوب ( $T_n$ ) و نسبت مشارکت جرم مؤثر مودی ( $\alpha_n$ ) برای سه مود ارتعاشی اول و نسبت ضریب مشارکت مودی ( $\Gamma_n$ ) برای مود دوم به مود اول سازه‌های نامنظم ۹ طبقه نشان داده شده است. همان‌طور که از جدول ۲ مشخص است، دوره‌ی تناوب مود اول سازه‌های نامنظم کاهش یافته است. همچنین مطابق جدول مذکور، نسبت جرم مؤثر مودی برای مود اول  $\alpha_1$ ، در سازه‌های نامنظم کاهش می‌یابد؛ ولی نسبت جرم مؤثر مودی برای مود دوم  $\alpha_2$ ، در مدل‌های با تراز

مطابق روش Wilson- $\theta$  ( $\theta = 1/4$ ) استفاده شده است. برای تحلیل تاریخی‌چیزی زمانی غیرخطی، ۷ رکورد زلزله از پایگاه PEER-BERKELEY [25] انتخاب شده است، که خاک ساخت‌گاه رکوردها منطبق با خاک نوع II استاندارد ۲۸۰۰ ایران (معادل خاک C آیین‌نامه‌ی NEHRP) است. رکوردهای زلزله‌ی انتخابی، رکوردهای معمولی حوزه‌ی دور با بزرگای (۶-۷/۵) هستند. مشخصات شتاب‌نگاشت زلزله‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. برای اطمینان از اینکه سازه‌های منظم و نامنظم در ارتفاع، تحت اثر رکوردهای زلزله وارد مرحله‌ی غیرخطی می‌شوند، همه‌ی شتاب‌نگاشت‌های انتخابی طوری مقیاس شده‌اند، که شتاب بیشینه‌ی آنها (PGA) به  $g \times 0.7$  برسد. در شکل ۲، نمودار طیف میانگین رکوردهای زلزله انتخابی نشان داده شده است. با توجه به کاربرد روزافزون تحلیل‌های استاتیکی غیرخطی و به منظور بررسی دقت این روش‌ها در سازه‌های نامنظم دارای پس‌رفتگی، تحلیل‌های بار افزون ارتقاء یافته (ارجاع به بخش دوم) روی سازه‌های ذکر شده انجام شده است. برای انجام تحلیل‌های استاتیکی و دینامیکی غیرخطی نیز از نرم‌افزار SAP۲۰۰۰ [26] استفاده شده است.

## ۵. ویژگی‌های دینامیکی قاب‌ها

به منظور تعیین مشخصه‌های ارتعاشی شامل بسامدها و شکل مودهای طبیعی سازه از حل مسئله‌ی مقدار ویژه استفاده شده است. در جدول ۲ و شکل‌های ۳ و ۴،

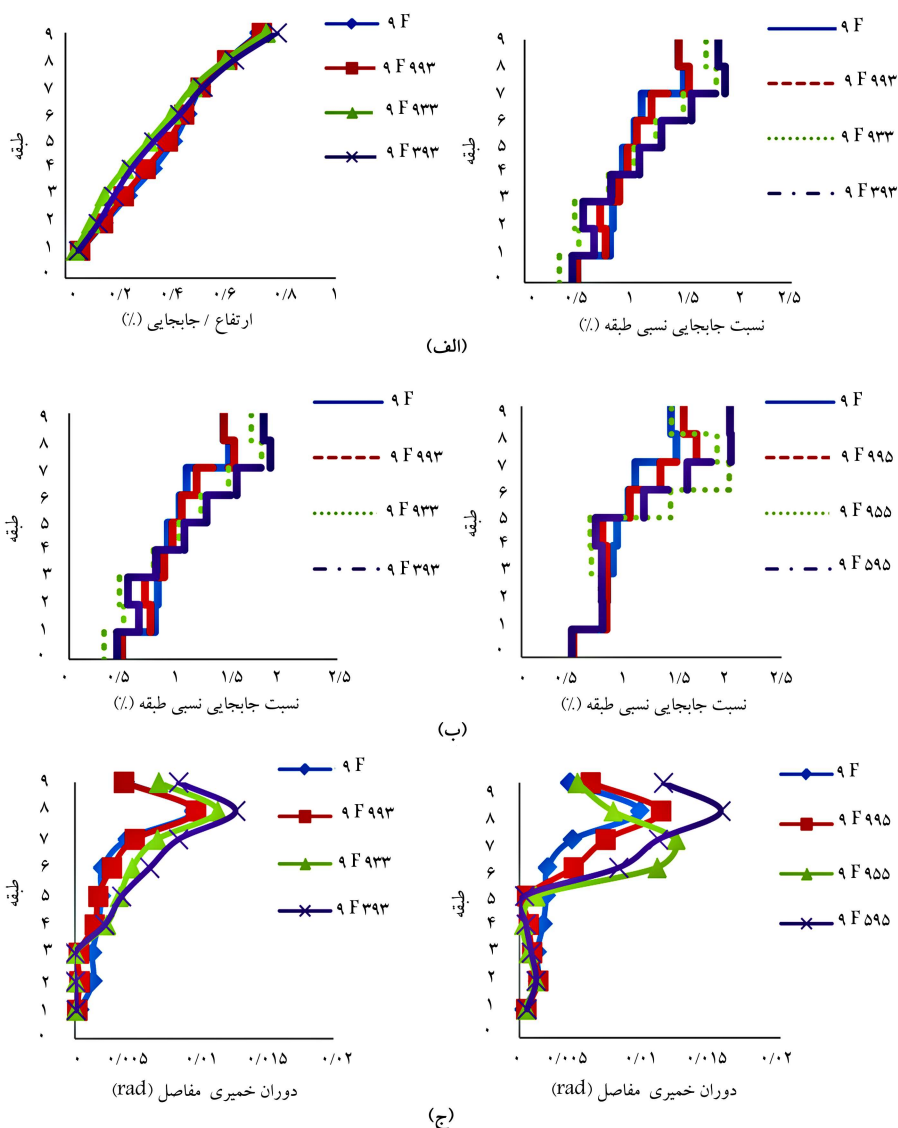
جدول ۲. مشخصات دینامیکی سازه‌های ۹ طبقه.

شماره قاب	نام قاب	$T_1$ (sec)	$T_2$ (sec)	$T_3$ (sec)	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$T_2/T_1$
۱	۹F	۱٫۱۷۳۸	۰٫۴۲۱	۰٫۲۴۶۸	۰٫۷۵۶	۰٫۱۱۸	۰٫۰۵۴	۰٫۴۰۷۶
۲	۹F۹۹۷	۱٫۰۸۱	۰٫۴۰۹۹	۰٫۲۵۱۶	۰٫۷۵۳	۰٫۱۰۸	۰٫۰۶۱	۰٫۴۷۹۸
۳	۹F۹۹۵	۱٫۰۴۴۷۷	۰٫۴۳۳۷	۰٫۲۳۸۵	۰٫۷۰۷	۰٫۱۵۱	۰٫۰۵۹	۰٫۴۷۲۵
۴	۹F۹۹۳	۱٫۰۸۱۶۱	۰٫۴۰۸۱	۰٫۲۴۹۴	۰٫۶۶۱	۰٫۱۷۸	۰٫۰۷۶	۰٫۴۹۱۵
۵	۹F۹۹۱	۱٫۱۴۳۱۳	۰٫۴۰۵	۰٫۲۳۵۴	۰٫۷۰۱	۰٫۱۲۳	۰٫۰۶۷	۰٫۴۲۳۶
۶	۹F۹۷۷	۰٫۹۵۱۹	۰٫۳۸۱	۰٫۲۴۴۸	۰٫۷۶۷	۰٫۰۸۱	۰٫۰۷	۰٫۵۸۸۸
۷	۹F۹۷۵	۰٫۹۲۶۵	۰٫۴۱۱	۰٫۲۴۵۹	۰٫۷۱۹	۰٫۱۲۲	۰٫۰۶۵	۰٫۶۰۴۴
۸	۹F۹۷۳	۰٫۹۴۶	۰٫۳۹۳	۰٫۲۵۷۳	۰٫۶۶	۰٫۱۵۶	۰٫۰۸۸	۰٫۶۵
۹	۹F۹۷۱	۱٫۰۰۳۱۳	۰٫۳۸۹۲	۰٫۲۴۳	۰٫۶۹۳	۰٫۱۰۵	۰٫۰۷۸	۰٫۵۵۸۴
۱۰	۹F۹۵۵	۰٫۸۵۹۱	۰٫۴۲۸۶	۰٫۲۰۵۱	۰٫۶۴۸	۰٫۱۹۶	۰٫۰۶۱	۰٫۵۶
۱۱	۹F۹۵۳	۰٫۹۰۶۴	۰٫۴۲۶۴	۰٫۲۳۵۴	۰٫۵۶۲	۰٫۲۵۲	۰٫۰۸۴	۰٫۶۰۳۷
۱۲	۹F۹۵۱	۰٫۹۵	۰٫۴۲۶۷	۰٫۲۲۲	۰٫۶۰۵	۰٫۱۸۲	۰٫۰۷۶	۰٫۵۳۹
۱۳	۹F۹۳۳	۰٫۹۳	۰٫۳۷	۰٫۲۳۷۹	۰٫۴۶۱	۰٫۲۹۶	۰٫۱۲۲	۰٫۶۴۵۳۸
۱۴	۹F۹۳۱	۱٫۰۱۸۳۷	۰٫۳۸۱۲	۰٫۲۳۷۲	۰٫۵۲۵	۰٫۲۲۱	۰٫۱۱۲	۰٫۵۷۴۲
۱۵	۹F۹۱۱	۱٫۱۰۳۳۷	۰٫۳۷۹۵	۰٫۲۱۳۱	۰٫۵۸	۰٫۱۱۶	۰٫۰۷۵	۰٫۴۳۹۱
۱۶	۹F۹۸۷	۱٫۰۲۶۷	۰٫۳۷۶۷	۰٫۲۴۱۶	۰٫۷۶۱	۰٫۱۰۷	۰٫۰۵۲	۰٫۵۷۰۹
۱۷	۹F۷۹۷	۰٫۹۸۰۹	۰٫۳۸۶۷	۰٫۲۵۹۴	۰٫۷۵۹	۰٫۰۸۶	۰٫۰۶۹	۰٫۶۱۸۴
۱۸	۹F۵۹۵	۰٫۸۸۴۴۷	۰٫۴۵۸۳	۰٫۲۲۳۹	۰٫۶۳۴	۰٫۲	۰٫۰۶۹	۰٫۵۸۱۹
۱۹	۹F۳۹۳	۰٫۹۴۲۱	۰٫۳۸۷۷	۰٫۲۴۵۵	۰٫۴۸۳	۰٫۳۱۶	۰٫۰۹۴	۰٫۶۳۲۴
۲۰	۹F۱۹۱	۱٫۱۱۰۶	۰٫۳۸۱۸۷	۰٫۲۱۵۴۹	۰٫۵۸۷	۰٫۱۲۲	۰٫۰۸۴	۰٫۴۴۷۷

## ۶. بررسی نتایج تحلیل دینامیکی غیرخطی NLRHA برای سازه‌های نامنظم

در شکل‌های ۵ الی ۷، جابه‌جایی کف‌ها، دررفت بین طبقات و دوران خمیری مفاصل که از تحلیل‌های تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی حاصل شده‌اند، در سازه‌های نامنظم دارای پس‌رفتگی در ارتفاع و سازه‌ی منظم مرجع مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. همان‌طور که در شکل‌ها مشاهده می‌شود، پاسخ سازه‌های نامنظم (جابه‌جایی، دررفت و دوران مفاصل) در طبقات پایین از سازه‌ی منظم کمتر و در طبقات بالا از سازه‌ی منظم بیشتر است.<sup>[۹]</sup> با مقایسه‌ی نمودارهای ارائه‌شده در شکل‌های ۵ و ۶ مشاهده می‌شود که به‌طور مثال برای سازه‌های (با سطح پس‌رفتگی یکسان ۳۳٪) ۹F۹۹۱، ۹F۹۹۳، ۹F۹۹۵ و ۹F۹۹۷ پاسخ‌ها به ترتیب در حالتی که پس‌رفتگی در یک دوم و یک سوم ارتفاع رخ می‌دهد، یعنی مدل‌های ۹F۹۹۳ و ۹F۹۹۵، بیشترین مقدار را دارد؛ یعنی در این مدل‌ها نسبت به مدل‌های با همین میزان کاهش سطح

پس‌رفتگی در یک سوم ارتفاع (۹F۹۹۳، ۹F۳۹۳) افزایش می‌یابد، به طوری که در مدل ۹F۳۹۳ حتی به ۳۱٪ می‌رسد و درصد جرم مؤثر مودی برای مود سوم  $\alpha_3$  در سازه‌های نامنظم نیز افزایش می‌یابد. همچنین مطابق شکل‌های ۳ و ۴، 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. مطابق شکل ۴ نیز نسبت جرم مؤثر مودی سازه‌ی نامنظم به مدل سازه‌ی منظم حاکی از اثر قابل توجه مودهای دوم و سوم در این سازه‌هاست. بنابراین مشارکت مودهای بالاتر در ارزیابی لرزه‌ی این سازه‌ها ضروری است. همچنین در یک تراز یکسان با کاهش سطح پس‌رفتگی، دوره‌ی تناوب اصلی سازه کاهش یافته است. این کاهش وقتی که سطح پس‌رفتگی در میانه‌ی ارتفاع است، بیشتر است. به‌طور مثال، در مدل‌های ۹F۹۳۳ و ۹F۹۹۳ یا در مدل‌های ۹F۹۵۵ و ۹F۹۹۵، هر چه کاهش سطح پس‌رفتگی بیشتر شده است، یعنی مدل‌های ۹F۹۳۳ و ۹F۹۵۵، دوره‌ی تناوب کمتر شده است.

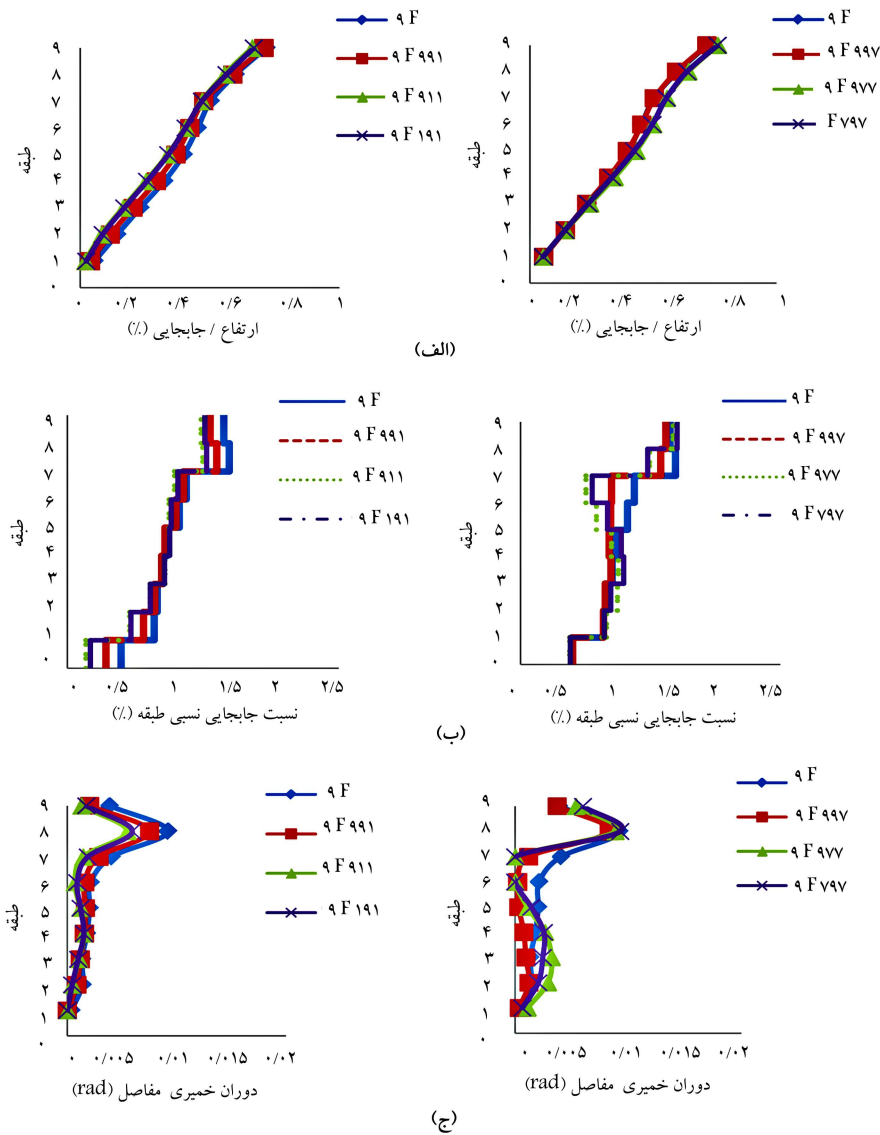


شکل ۵. مقایسه‌ی نمودارهای: الف) جابجایی کف؛ ب) تغییر مکان نسبی طبقه؛ ج) دوران مفاصل خمیری برای قاب‌های دارای پس رفتگی در ترازهای بالاتر از طبقات سوم و پنجم با استفاده از تحلیل NLRHA.

همچنین نمودار نتایج تمامی پاسخ‌های لرزه‌ی سازه‌های ۹F۱۹۱، ۹F۹۱۱ و ۹F۹۹۳، ۹F۹۳۳، ۹F۵۹۵، ۹F۹۵۵، ۹F۹۵۵ و ۹F۹۹۵، پاسخ‌های ۵ و ۶ دو به دو با هم مشابه هستند، که به دلیل جرم و سختی کاهش یافته‌ی مشابه در تراز یکسان انتظار می‌رود نتایج مشابه باشند و البته مقداری تفاوت به دلیل تفاوت موقعیت پیکربندی هندسی وجود دارد. در سازه‌های ۹F۹۵۵ و ۹F۵۹۵ در شکل ۵ که تراز پس رفتگی در میانه‌ی ارتفاع است، بیشترین جابه‌جایی و دررفت وجود دارد. همچنین در مدل ۹F۹۵۳ در شکل ۷ پاسخ‌های لرزه‌ی بیشینه در طبقات بالای پس رفتگی رخ داده است و در سازه‌های ۹F۹۳۳ و ۹F۳۹۳ در شکل ۵، یعنی برای پس رفتگی در یک سوم ارتفاع نیز مقادیر پاسخ، دررفت، و دوران مفاصل، در طبقات بالای پس رفتگی زیاد است. به دلیل نبودن نیاز لرزه‌ی جابه‌جایی و دررفت در بعضی مدل‌ها پیشنهاد می‌شود از آن پیکربندی‌های اجتناب شود و یا در صورت استفاده، ظرفیت و شکل‌پذیری لازم برای جابه‌جایی و دررفت فراهم شود، مانند سازه‌های ۹F۹۳۳، ۹F۹۵۵، ۹F۹۵۳. در یک سطح پس رفتگی یکسان،

پس رفتگی درصد جرم مؤثر مودی، مود دوم یا سوم بیشتر است. همچنین از میان سازه‌های با تراز پس رفتگی یکسان مانند: ۹F۵۹۵، ۹F۹۵۵ و ۹F۹۹۵ پاسخ‌های لرزه‌ی در سازه‌هایی که میزان سطح پس رفتگی بیشتری دارد، بیشتر است، یعنی در ۹F۵۹۵ و ۹F۹۵۵ پاسخ‌ها بیشتر از ۹F۹۹۵ است.

در شکل‌های ۵ الی ۷ مشاهده می‌شود که به ازاء پس رفتگی در هر تراز در نمودار دررفت آن طبقه و طبقات مجاور پرش بزرگی (اختلاف دررفت) ایجاد می‌شود. البته بسته به پیکربندی ایجاد شده در طبقات دیگر هم پرش (اختلاف دررفت) وجود دارد، ولی در این ترازها میزان جهش بزرگ‌تر است. به‌عنوان مثال در مدل‌های ۹F۷۹۷، ۹F۵۹۵، ۹F۳۹۳ و ۹F۱۹۱ به ترتیب در ترازهای هفتم، پنجم، سوم، و اول در نمودار دررفت پرش بزرگ‌تری نسبت به سازه‌ی منظم رخ داده است. در مدل‌های ۹F۹۷۷، ۹F۹۵۵، ۹F۹۳۳ و ۹F۹۱۱ هم به ترتیب در ترازهای هفتم، پنجم، سوم، و اول در نمودار دررفت پرش بزرگی رخ داده است، که این پرش‌ها به طور کلی ناشی از تغییر ناگهانی در سختی طبقات بالا و پایین پس رفتگی است.



شکل ۶. مقایسه‌ی نمودارهای: الف) جابجایی کف؛ ب) تغییرمکان نسبی طبقه؛ ج) دوران مفاصل خمیری برای قاب‌های دارای پس رفتگی در ترازهای بالاتر از طبقات اول و هفتم با استفاده از تحلیل NLRHA.

نتایج حاصل از تحلیل‌های یادشده در شکل‌های ۸ و ۹ نشان داده شده است. در سازه‌های مورد بررسی چون زمان تناوب مود غالب کمتر از ۲/۲ ثانیه است، برای تحلیل بار افزون مودال متوالی (CMP) از تجزیه و تحلیل بار افزون دو مرحله‌یی استفاده شده است. همچنین یک تحلیل بار افزون براساس الگوی مود اول در سازه‌ها انجام شده است. به منظور بهبود دقت روش بار افزون مودال (MPA) از سه مود ارتعاشی جهت محاسبه‌ی نیازهای لرزه‌یی سازه‌ها استفاده شده است. در روش بار افزون ارتقاء یافته کران بالا (UB)، تغییرمکان هدف برابر با میانگین تغییرمکان‌های حاصل از تحلیل تاریخی زمانی NLRHA در نظر گرفته شده است. در انجام روش N2 توسعه یافته (EN2) برای تحلیل طیف پاسخ کشسان در سازه‌های ۹ طبقه، از ۵ مود ارتعاش استفاده شده است. برای محاسبه‌ی تغییرمکان نسبی در تحلیل مودال کشسان، که نرم‌افزار مستقیماً قادر به محاسبه‌ی آن نیست، و همچنین محاسبه‌ی آن از مقادیر جابه‌جایی ترکیب یافته درست نیست<sup>[۲۷]</sup> بسته به روش ترکیب انتخاب شده (SRSS یا CQC) با داشتن

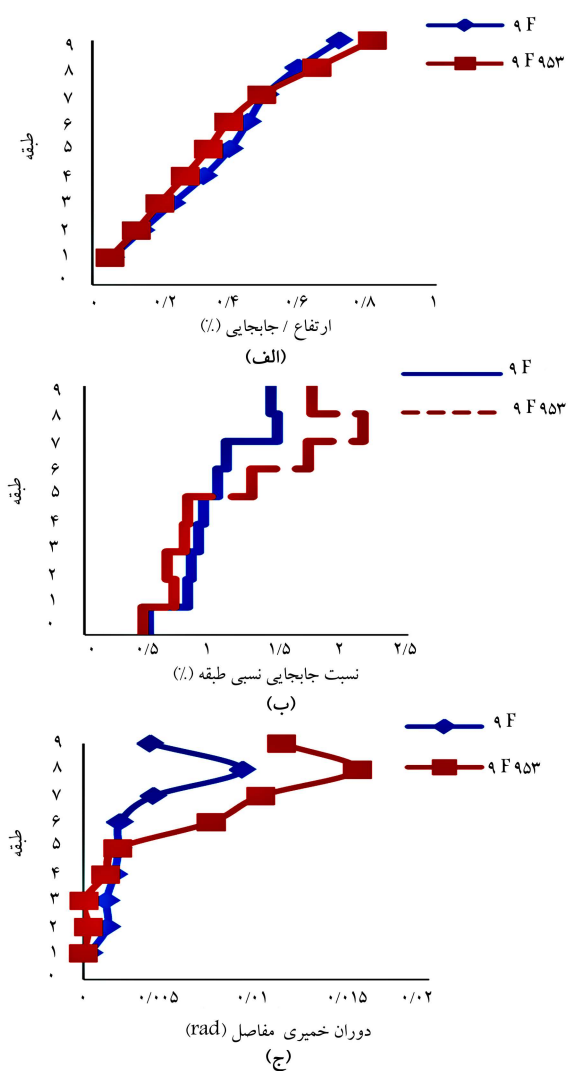
پاسخ‌های لرزه‌یی به ترتیب در تراز پس رفتگی طبقه‌های پنجم، سوم، اول، و هفتم بیشتر هستند، یعنی همان سازه‌هایی که درصد جرم مؤثر مودی آنها در مودهای دوم و سوم به مقدار بیشینه است.

## ۷. دقت روش‌های بار افزون ارتقاء یافته در تخمین نیازهای لرزه‌یی سازه‌های نامنظم در ارتفاع دارای پس رفتگی

پاسخ‌های لرزه‌یی (جابه‌جایی بیشینه‌ی کف‌ها، جابه‌جایی نسبی بین طبقات، دوران خمیری مفاصل) برای قاب‌های نامنظم ۹ طبقه با استفاده از تحلیل‌های ارتقاء یافته‌ی بار افزون (MPA, CMP, EN2, UB) به دست آمده و با نتایج حاصل از تحلیل دینامیکی غیرخطی تاریخی زمانی (NLRHA) مورد مقایسه قرار گرفته‌اند، که

در این روش است. بیشترین خطا در روش MPA در محاسبه‌ی دررفت در مدل ۹F۹۵۵ (سازه دارای نامنظمی زیادی است) حدود ۴۵٪ در طبقه‌ی هفتم است. در سازه با سطح پس‌رفتگی و تراز پس‌رفتگی یکسان، در مواردی که مقادیر نسبت جرم مؤثر مودی مودهای دوم و سوم به مود اول بیشتر باشد، دقت روش CMP در محاسبه‌ی دررفت رضایت‌بخش خواهد بود. این مفهوم نشان‌دهنده‌ی این موضوع است که با توجه به دو مرحله‌ی 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 بارافزون دو مرحله‌ی است. به طور مثال، پیشینه‌ی خطای روش CMP در محاسبه‌ی دررفت در مدل ۹F۹۹۳ مطابق شکل ۹، ۷٪ است و برای مدل ۹F۹۹۵ در شکل ۸، ۱۳٪ است. بیشترین خطای روش CMP در محاسبه‌ی دررفت در مدل ۹F۹۵۱ در طبقه‌ی ششم بوده و حدود ۳۷٪ است، که در این مدل در میانه‌ی ارتفاع و در تراز طبقه‌ی اول پس‌رفتگی رخ داده است.

در سازه با تراز پس‌رفتگی در طبقه‌های اول، سوم، پنجم، و هفتم و برای کاهش سطح پس‌رفتگی به میزان ۳۳٪ و ۶۶٪، هر چه نسبت جرم مؤثر مودی برای مود اول بیشتر باشد، دقت روش EN۲ بیشتر می‌شود. به طور مثال، دقت این روش در شکل‌های ۸ و ۹ در مدل ۹F۹۹۵ از مدل ۹F۹۵۵ بیشتر است، که پیشینه‌ی خطا در این مدل‌ها به ترتیب ۸٪ و ۳۰٪ است و مطابق جدول ۲ نسبت جرم مؤثر مودی برای مود اول مدل ۹F۹۹۵ از مدل ۹F۹۵۵ بیشتر است و در تراز طبقه‌ی اول پس‌رفتگی در مدل ۹F۹۵۵ از مدل ۹F۹۳۳ بیشتر است، که پیشینه‌ی خطا در این مدل‌ها به ترتیب ۳۰٪ و ۳۷٪ است و مطابق جدول ۲، نسبت جرم مؤثر مودی برای مود اول مدل ۹F۹۵۵ از مدل ۹F۹۳۳ بیشتر است. به طور کلی، بیشترین خطا در روش EN۲ در محاسبه‌ی دررفت در مدل ۹F۹۳۳ و در طبقه‌ی هشتم حدود ۳۷٪ است، که به دلیل ترکیب مناسب تحلیل طیفی و تحلیل بارافزون در روش EN۲، مودهای بالاتر به طور مناسب در نظر گرفته می‌شود. اما این روش در محاسبه‌ی دوران مفصل خمیری به خصوص در طبقات بالا، دقت کافی نیست، که علت آن به دلیل ترکیب تحلیل بارافزون و تحلیل دینامیکی طیفی در روش EN۲ به منظور محاسبه‌ی ضرایب اصلاح است که تحلیل طیفی قادر به نمایش رفتار غیر خطی اعضا نیست. نتایج نشان می‌دهد که در سازه با تراز پس‌رفتگی در طبقه‌های اول، سوم، پنجم، و هفتم و برای کاهش سطح پس‌رفتگی به میزان ۳۳٪ و ۶۶٪، هر چه نسبت مشارکت مودی برای مود دوم به مود اول کمتر باشد، دقت روش UB در محاسبه‌ی دررفت در طبقات بالا بیشتر و در طبقات پایین کمتر می‌شود و برعکس هر چه این نسبت بیشتر باشد، دقت روش UB در طبقات پایین بیشتر و در طبقات بالا کمتر می‌شود. این نسبت در الگوی باروش UB منظور شده و تأییدکننده‌ی این مفهوم است که چون روش UB، نتایج را در طبقات بالا قدری بیشتر و در طبقات پایین کمتر تخمین می‌زند، کاهش و افزایش نسبت مشارکت مودی برای مود دوم به مود اول باعث افزایش دقت نتایج به ترتیب در طبقات بالا و پایین می‌شود. به طور مثال با توجه به شکل ۹، دقت روش UB در محاسبه‌ی دررفت در مدل ۹F۹۹۳ از مدل ۹F۹۳۳ در طبقات بالا بیشتر است و دقت روش در مدل ۹F۹۳۳ از مدل ۹F۹۹۳ در طبقات پایین بیشتر است که علت آن کم‌بودن نسبت مشارکت مودی برای مود دوم به مود اول در مدل ۹F۹۹۳ از مدل ۹F۹۳۳ مطابق جدول ۲ است. همچنین در مدل‌های ۹F۹۳۳ و ۹F۹۵۵ با توجه به شکل‌های ۸ و ۹، دقت نتایج حاصل از روش UB در مدل ۹F۹۳۳ در طبقات پایین و دقت نتایج در مدل ۹F۹۵۵ در طبقات بالا بیشتر است، که نسبت مشارکت مودی برای مود دوم به مود اول در مدل ۹F۹۳۳ بیشتر است. بیشترین خطای روش UB در محاسبه‌ی دررفت در طبقات پایین بیش از ۹۰٪ است، در حالی که در طبقات بالا بیشترین خطا در مدل

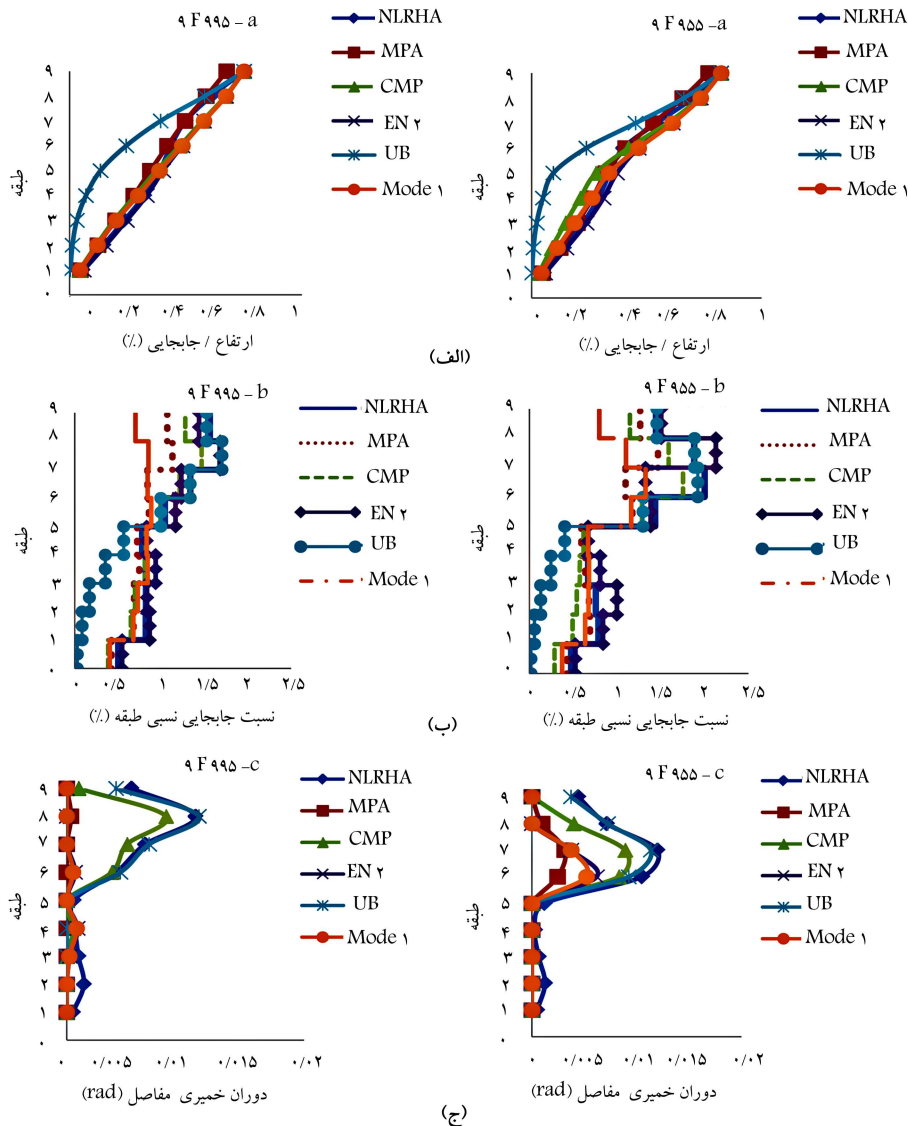


شکل ۷. مقایسه‌ی نمودارهای: الف) جابه‌جایی کف؛ ب) تغییر مکان نسبی طبقه؛ ج) دوران مفصل خمیری برای قاب‌های ۹F و ۹F۹۵۳ سازه‌ها با استفاده از تحلیل NLRHA.

جابه‌جایی ترکیب‌یافته در پایان هر مود و با حل یک معادله‌ی درجه دو، تغییر مکان نسبی هر مود به صورت معکوس محاسبه شده است. لازم به ذکر است که به منظور ترکیب پاسخ‌های مودی در تحلیل مودال کشسان برای سازه‌ی منظم از روش SRSS و برای سازه‌های نامنظم از روش CQC استفاده شده است. روش‌های CMP، EN۲ و MPA نتایج خوبی از جابه‌جایی کف طبقات ارائه می‌کنند که نتایج روش MPA به نتایج تحلیل دینامیکی غیرخطی نزدیک‌تر است، اما روش UB تغییر مکان طبقات را در طبقات پایین خیلی کمتر تخمین می‌زند. این تذکر لازم است که در ارزیابی آسیب‌های لرزه‌ای سازه‌ها تغییر مکان کف‌ها شاخص مناسبی نیست. در ادامه، به بررسی دقت روش‌های بارافزون ارتقاء یافته در تخمین پاسخ دررفت طبقات پرداخته شده است.

برای سازه‌های با تراز پس‌رفتگی در طبقات اول، سوم، پنجم، و هفتم و برای کاهش سطح پس‌رفتگی به میزان ۳۳٪ و ۶۶٪، در مواردی که مقادیر نسبت جرم مؤثر مودی برای مودهای سوم و دوم به مود اول بیشتر باشد، دقت روش MPA رضایت‌بخش خواهد بود، که این موضوع نشان‌دهنده‌ی در نظر گرفتن اثر مودهای بالاتر





شکل ۸. الف) مقایسه‌ی نمودار جابه‌جایی کف؛ ب) تغییر مکان نسبی طبقه؛ ج) دوران مفاصل خمیری سازه‌های ۹F۹۵۵ و ۹F۹۹۵ در روش‌های ارتقاء یافته‌ی UB، EN۲، CMP و MPA با نتایج تحلیل NLRHA.

شامل تحلیل استاتیکی غیرخطی مودال (MPA)، روش تحلیل بار افزون کران بالا (UBPA)، روش تحلیل بار افزون مودال متوالی (CMP) و روش EN۲ (N۲) توسعه یافته) ارزیابی و این نتایج حاصل شده است:

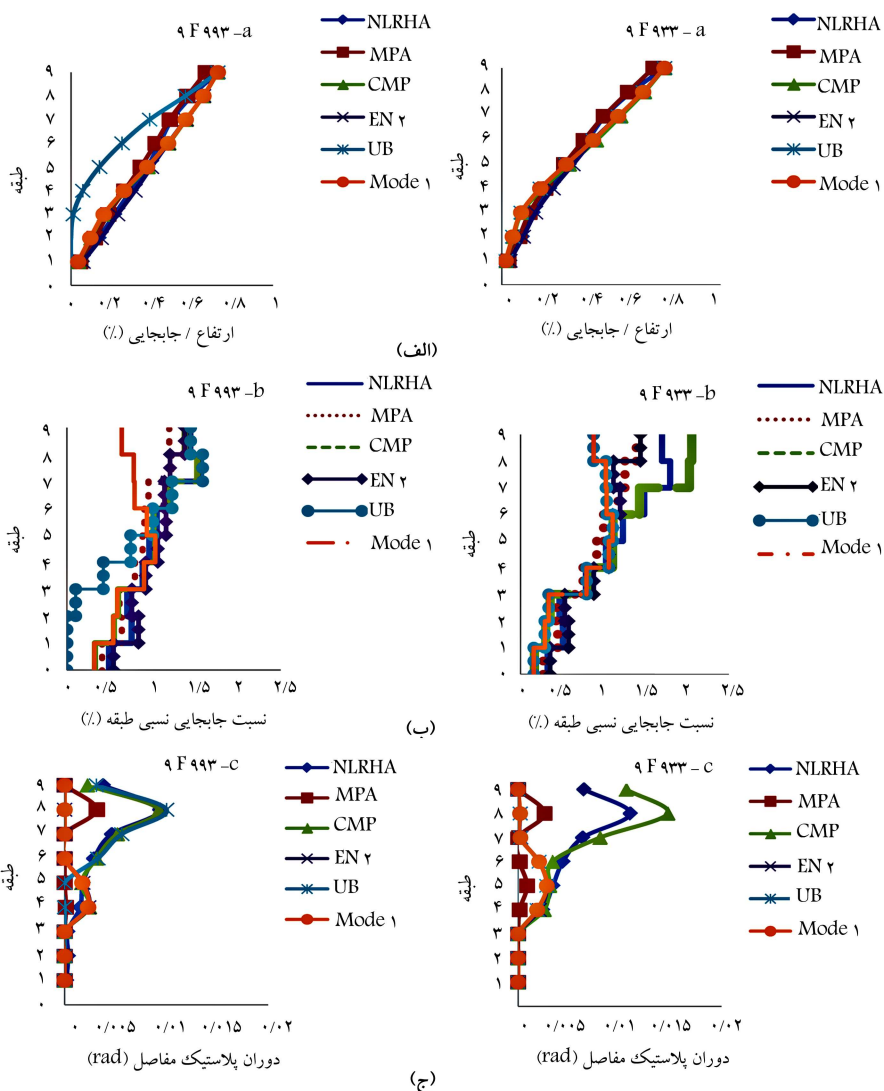
۱. با توجه به ویژگی‌های مودال، در سازه‌های دارای پس‌رفتگی در ارتفاع، درصد مشارکت مؤثر مودی در مودهای بالاتر افزایش می‌یابد. نسبت درصد جرم مؤثر مودی برای مودهای دوم و سوم به مود اول سازه‌ها  $\left(\frac{\alpha_2}{\alpha_1}, \frac{\alpha_3}{\alpha_1}\right)$  نشان می‌دهد که در سازه‌های نامنظم هندسی دارای پس‌رفتگی اثر مودهای بالاتر قابل توجه است. همچنین در یک تراز یکسان با کاهش سطح پس‌رفتگی، دوره‌ی تناوب اصلی سازه کاهش می‌یابد.

۲. پاسخ‌های لرزه‌ی قاب‌های دارای پس‌رفتگی در ارتفاع، در قسمت پایه کمتر از پاسخ‌های قاب منظم متناظر و در قسمت برج بیشتر از پاسخ‌های لرزه‌ی قاب منظم است و با افزایش سطح پس‌رفتگی پاسخ‌ها افزایش می‌یابد.

۹F۹۳۳ به وجود آمده و حدود ۴۲٪ است. از میان سازه‌ها، در مدل‌های ۹F۵۹۵، ۹F۹۳۳ و ۹F۹۵۱ تحلیل‌های ارتقاء یافته‌ی بار افزون، نیازهای لرزه‌ی این سازه‌ها را با دقت کافی محاسبه نکرده‌اند، یعنی سازه‌هایی که پس‌رفتگی در میانه و ثلث ارتفاع آن‌ها رخ داده است.

## ۸. نتیجه‌گیری

در این نوشتار، ۲۰ قاب خمشی فولادی ویژه‌ی ۹ طبقه دارای پس‌رفتگی در ارتفاع با پیکربندی‌های هندسی مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است؛ ویژگی‌های دینامیکی آنها با استفاده از نتایج تحلیل مقدار ویژه و همچنین رفتار لرزه‌ی سازه‌های مذکور با استفاده از تجزیه و تحلیل تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی بررسی شده است. همچنین، پاسخ‌های لرزه‌ی سازه‌های انتخابی با استفاده از روش‌های بار افزون ارتقاء یافته



شکل ۹. الف) مقایسه‌ی نمودار جابه‌جایی کف؛ ب) تغییر مکان نسبی طبقه؛ ج) دوران مفاصل خمیری سازه‌های ۹F۹۹۳ و ۹F۹۹۳ در روش‌های ارتقاء یافته‌ی UB، EN۲، CMP و MPA با نتایج تحلیل NLRHA.

۶. پاسخ لرزه‌ی سازه‌های دارای پس‌رفتگی در ارتفاع و دقت روش‌های بارافزون ارتقاء یافته به ویژگی دینامیکی این سازه‌ها بستگی دارد.

در قاب‌های دارای پس‌رفتگی که نسبت جرم مؤثر مودی دوم و سوم به مود اول بیشتر باشد، دقت روش MPA و CMP رضایت‌بخش است. دقت روش EN۲ به نسبت جرم مؤثر مودی برای مود اول وابسته است؛ به طوری که هر چه این نسبت بیشتر می‌شود، دقت روش بیشتر می‌شود. دقت روش UB به نسبت مشارکت مودی برای مود دوم به مود اول  $\left(\frac{F_2}{F_1}\right)$  وابسته است. به طور کلی می‌توان علت موفقیت روش‌های بارافزون ارتقاء یافته را در نظر گرفتن ویژگی‌های دینامیکی سازه در محاسبات الگوی بار دانست. در سازه‌های نامنظم هندسی، روش‌های CMP و UB دوران‌های خمیری را با دقت مناسب محاسبه می‌کنند، اما روش EN۲ دقت مناسب ندارد. چون دوران‌های خمیری مفاصل که از تحلیل بارافزون پایه حاصل می‌شوند، در طبقات بالاتر کم (و حتی صفر) است و با اعمال ضریب تصحیح در ارتفاع، تغییر و بهبود قابل توجهی در دوران‌های خمیری ایجاد نمی‌شود.

۳. برای سطح پس‌رفتگی یکسان در سازه، برای پس‌رفتگی در یک دوم و یک سوم ارتفاع، به ترتیب بیشترین پاسخ‌های لرزه‌ی به دست آمده است. در سازه‌های با ترازهای پس‌رفتگی مشابه هر چه میزان سطح پس‌رفتگی بیشتر باشد، پاسخ‌های لرزه‌ی بیشتر خواهد بود. بنابراین دو پارامتر موقعیت تراز پس‌رفتگی و میزان سطح پس‌رفتگی در پاسخ لرزه‌ی سازه‌های مذکور تأثیر دارد، که خود بیانگر اثر مهم پیکربندی سازه در رفتار لرزه‌ی این سازه‌هاست و تقاضای جابه‌جایی و تغییر شکل وابسته به پیکربندی هندسی قاب است.

۴. در هر تراز پس‌رفتگی در نمودار دریافت در آن طبقه، یعنی محل اتصال برج به پایه، پرش بزرگ‌تری نسبت به سازه‌ی منظم مشاهده می‌شود، که می‌تواند ناشی از سخت‌تر بودن طبقه‌ی زیرین در مقایسه با طبقه‌ی بالایی و تفاوت سختی قابل توجه در دو طبقه‌ی مجاور باشد.

۵. در سازه‌های نامنظم هندسی در ارتفاع، که جرم مؤثر مودی مدهای دوم و سوم بیشتر است، پاسخ‌های لرزه‌ی آنها هم بیشتر است.

1. upper-bound

### منابع (References)

1. Krawinkler, H. and Seneviratna, G.D.P.K. "Pros and cons of a pushover analysis of seismic performance evaluation", *Engineering Structures*, **20**(4-6), pp. 452-464 (1998).
2. Chopra, A.K. and Goel, R.K. "A modal pushover analysis procedure to estimate seismic demands for unsymmetric-plan buildings", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **33**(8), pp. 903-927 (2004).
3. Jan, T.S., Liu, M.W. and Kao, Y.C. "An upper-bound pushover analysis procedure for estimating the seismic demands of high-rise buildings", *Engineering Structures*, **26**(1), pp. 117-128 (2004).
4. Dr. N. Nallusamy, "Energy Management through PCM Based Thermal Storage System for Building Air-Conditioning - Tidel Park, Chennai", Proc. of the International Symposium on Renewable energy-Environment Protection & Energy Solution for Sustainable Development, Kuala Lumpur, Malaysia, 14 - 17, pp. 623-631, (september 2003).
5. Mao, J., Zhai, C. and Xie, L. "An improved modal pushover analysis procedure for estimating seismic demands of structures", *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, **7**(1), pp. 25-31 (2008).
6. Fazilati, M.A., and Alemrajabi, A.A. "Improvement of solar water heater using phase change material (PCM)", Proceedings of the 17th International Conference on Mechanical engineering, Tehran University, Iran, **2**, May 19-21, (2009).
7. Kreslin, M. and Fajfar, P. "The extended N2 method taking into account higher mode effects in elevation", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **40**(14), pp. 1571-1589 (2011).
8. Le-Trung, K., Lee, K., Lee, J. and Lee, D.H. "Evaluation of seismic behaviour of steel special moment frame buildings with vertical irregularities", *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, **21**(3), pp. 215-232 (2012).
9. Humar, J. and Wright, E. "Earthquake response of steel framed multistorey buildings with setbacks", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **5**(1), pp. 15-39 (1977).
10. Aranda, G. "Ductility demands for R/C frames irregular in elevation", in *Proceedings of the 8th World Conference on Earthquake Engineering*, San Francisco, USA (1984).
11. Shahrooz, B.M. and Moehle, J.P. "Seismic response and design of setback buildings", *Journal of Structural Engineering*, **116**(5), pp. 1423-1439 (1990).
12. Wong, C.M. and Tso, W.K. "Seismic loading for buildings with setbacks", *Canadian Journal of Civil Engineering*, **21**(5), pp. 863-871 (1994).
13. Pinto, D. and Costa, A.G. "Influence of vertical irregularities on seismic response of buildings", *Proceedings of the 10th European Conference on Earthquake Engineering*, A.A. Balkema, Rotterdam, **2** (1995).
14. Mazzolani, F.M. and Piluso, V., *Theory and Design of Seismic Resistant Steel Frames*, London, New York, FN & SPON an Imprint of Chapman & Hall (1996).
15. Moghadam, A. and Tso, W. "Pushover analysis for asymmetric and set-back multi-story buildings", *Proc. of the 12th World Conference on Earthquake Engineering* (2000).
16. Romão, X., Costa, A. and Delgado, R. "Seismic behaviour of reinforced concrete frames with setbacks", in *Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering*, CD ROM, Vancouver (2004).
17. Soni, D.P. and Mistry, B.B. "Qualitative review of seismic response of vertically irregular building frames", *ISET Journal of Earthquake Technology*, **43**(4), pp. 121-132 (2006).
18. Tena-Colunga, A. and Zambrana-Rojas, C. "Dynamic torsional amplifications of base isolated structures with an eccentric isolation system", *Eng. Struct.*, **28**(1), pp. 72-83 (2006).
19. Karavasilis, T.L., Bazeos, N. and Beskos, D. "Seismic response of plane steel MRF with setbacks: Estimation of inelastic deformation demands", *Journal of Constructional Steel Research*, **64**(6), pp. 644-654 (2008).
20. Athanassiadou, C.J. "Seismic performance of R/C plane frames irregular in elevation", *Engineering Structures*, **30**(5), pp. 1250-1261 (2008).
21. Sarkar, P., Prasad, A.M. and Menon, D. "Vertical geometric irregularity in stepped building frames", *Engineering Structures*, **32**(8), pp. 2175-2182 (2010).
22. The 10th Issue of National Building Regulations, *Building and Housing Research Cente*, Ministry of Roads and Urban Development (2008).
23. *Design of Buildings for Earthquakes*, Standard 2800, Institute of Standards and Industrial Research of Iran, 3ed Edition (2005).
24. *First Draft of 4th Edition Standard 2800*, Institute of Standards and Industrial Research of Iran (2012).
25. *Strong Ground Motion Database*, Pacific Earthquake Engineering Research Centre (PEER) (2013). <http://peer.berkeley.edu/>
26. SAP2000, Integrated Software for Structural Analysis and Design, Version 11.0.8. Berkeley, (California): Computers & Structures.
27. Chopra, Anil K., *Dynamics of Structures*, 4th Edition, Prentice-Hall (2011).