

DOI: 10.48303/bese.2024.2031961.1169

### چکیده

خروج از مرکزیت تصادفی در آیین‌نامه لرزه‌ای ایران (استاندارد ۲۸۰۰) عاملی کلیدی برای کنترل اثرات نامطلوب پیچشی در سازه‌های نامنظم در پلان شناخته می‌شود. با این حال، شناخت مناسبی از اثر آن بر عملکرد فروریزش ساختمان‌های نامنظم با رفتار نرم پیچشی در دست نیست. برای این منظور، مطالعه حاضر اهمیت این عامل را در ساختمان‌های قاب خمشی بتنی ویژه مورد بررسی قرار می‌دهد. نسبت حاشیه فروریزش، معیار سنجش عملکرد فروریزش مدل‌ها فرض می‌شود. ساختمان‌های نمونه، در چهار حالت از توزیع سختی طراحی و عملکرد فروریزش آنها در حالات مختلفی از خروج از مرکزیت مورد بررسی قرار می‌گیرد. جابه‌جایی مرکز جرم، در دو سوی مرکز صلبیت نسبت به آن مرکز در نظر گرفته می‌شود. مدل‌سازی و تحلیل در نرم‌افزار اپنسیس صورت گرفته و رفتار خمیری اعضا با روش مفصل پلاستیک متمرکز شبیه‌سازی شده است. مکانیسم فروریزش این مدل‌ها در حالات مختلف خروج از مرکزیت، برای درک بهتر رفتار سازه‌ها استخراج می‌گردد. بر اساس نتایج، با تغییر موقعیت مرکز جرم در مدل‌ها، حاشیه ایمنی فروریزش به‌طور متوسط ۱۰ درصد بهبود می‌یابد و این بهبود مستقل از مکان مرکز جرم نسبت به مرکز صلبیت در پلان است. این مشاهدات، اهمیت ضوابط پیچش تصادفی در این دسته از سازه‌ها را به زیر سؤال می‌برد.

**واژگان کلیدی:** نسبت حاشیه فروریزش، ساختمان نرم پیچشی، خروج از مرکزیت تصادفی، عملکرد لرزه‌ای.

## اهمیت خروج از مرکزیت تصادفی در رفتار فروریزشی ساختمان‌های نرم پیچشی کوتاه مرتبه

### اسحاق تراب‌پور

دانش‌آموخته کارشناسی ارشد عمران، گرایش سازه، گروه مهندسی عمران، واحد آذرشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، آذرشهر، ایران

### رامین کتابفروش بدری (نویسنده مسئول)

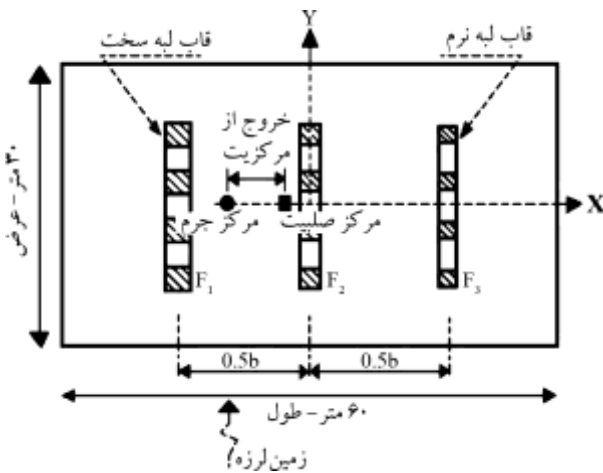
استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد آذرشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، آذرشهر، ایران، [ramin.badri@iau.ac.ir](mailto:ramin.badri@iau.ac.ir)

### ۱- مقدمه

مقاومت اعضای باربر در این دو لبه، نیاز شکل‌پذیری یکنواختی در کلیه اعضا به دست آورند. هان و همکارانش (Han et al., 2017)، با اصلاح ضابطه کنترل جابه‌جایی نسبی در آیین‌نامه (ASCE/SEI7-10, 2013) توانستند احتمال فروریزش یکنواختی را در اعضای باربر ساختمان‌های قاب خمشی فولادی با توزیع نامتقارن سختی فراهم آورد. اغلب این مطالعات با مدل‌هایی با رفتار سخت پیچشی انجام شده‌اند. در حالی که عملکرد لرزه‌ای ساختمان‌های نامنظم تابعی از انعطاف‌پذیری پیچشی آنها است (Badri et al., 2016). عملکرد لرزه‌ای ساختمان‌های نرم پیچشی به اندازه انواع سخت پیچشی آنها شناخته شده نیست. نیازهای لرزه‌ای این

در چند دهه گذشته، مطالعات متعددی به بررسی رفتار ساختمان‌های نامنظم در پلان پرداخته است (Das et al., 2021; De Stefano & Pintucchi, 2008). نامنظمی منجر به نیازهای شکل‌پذیری مختلف در اعضای باربر جانبی می‌شود که به مصرف غیر بهینه مصالح در آن اعضا منتهی می‌گردد (Kyrkos & Anagnostopoulos, 2011). همچنین تلاش‌های ناشی از بارهای لرزه‌ای در اثر نامنظمی در اعضای باربر جانبی متفاوت است. روش‌هایی برای ایجاد نیازهای لرزه‌ای مناسب در ساختمان‌های نامنظم ارائه شده است. برای نمونه، کایرکس و آناگنوستپولس (Kyrkos & Anagnostopoulos, 2011, 2013) با اصلاح

نیز طراحی شده است تا حجم مناسبی از فضای ساختمان‌های نامنظم ایجاد گردد. گروه‌های ساختمانی  $D_0$ ،  $D_{10}$ ،  $D_{20}$  و  $D_{25}$  در جدول (۱)، نماینده‌ی این دسته از طراحی‌ها هستند. اعداد مقطع برای تیر و ستون در این جدول، به ترتیب ارتفاع و عرض مقطع را بر حسب سانتی‌متر نشان می‌دهد. مقطع تیر در قاب میانی (قاب  $F_2$ ) در کلیه نمونه‌های ساختمانی،  $B50 \times 45$  و مقطع ستون،  $C50 \times 50$  بوده است.



شکل (۱): آرایش اعضای باربر و مراکز جرم و سختی ساختمان‌های مورد مطالعه.

جدول (۱): مشخصات طراحی قاب‌ها (ابعاد بر حسب سانتی‌متر).

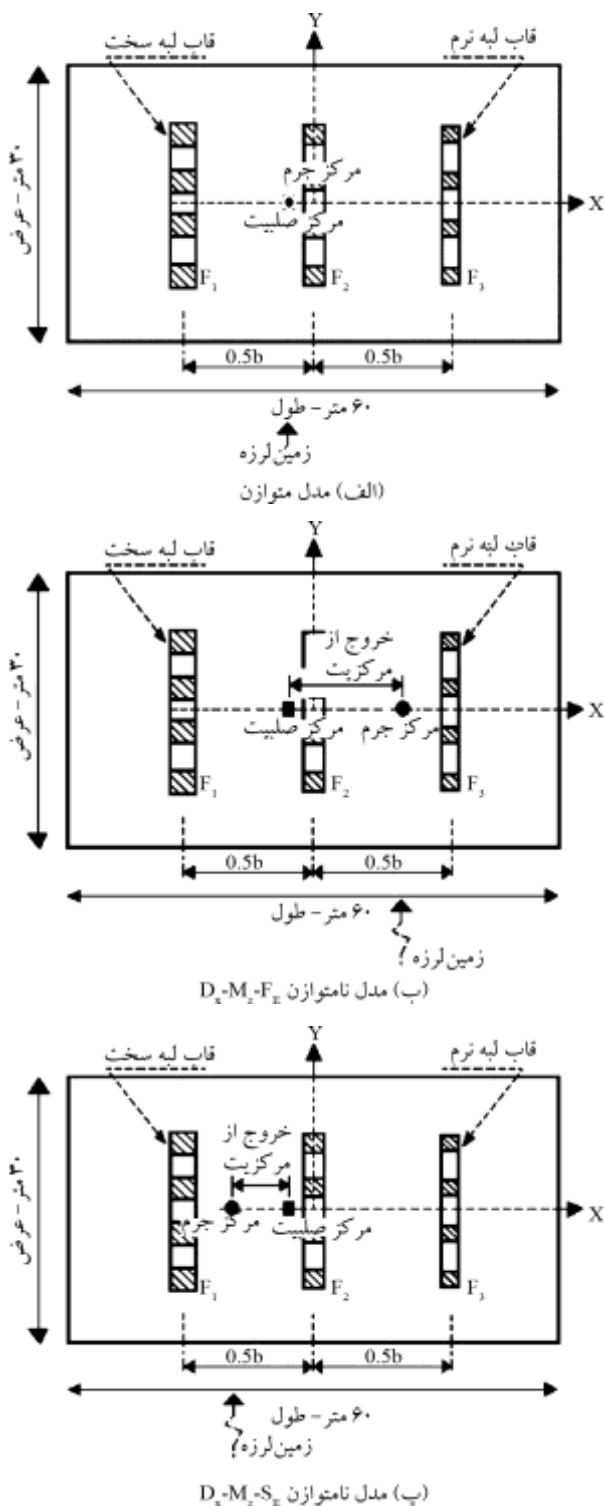
گروه ساختمانی	ستون (فولاد مصرفی)	تیر	قاب
$D_0$	$C50 \times 50$ (%1)	$B50 \times 45$	قاب لبه نرم
	$C50 \times 50$ (%1)	$B50 \times 45$	قاب لبه سخت
$D_{10}$	$C50 \times 50$ (%1)	$B50 \times 45$	قاب لبه نرم
	$C60 \times 60$ (%1/1)	$B50 \times 45$	قاب لبه سخت
$D_{20}$	$C45 \times 45$ (%1/2)	$B35 \times 45$	قاب لبه نرم
	$C60 \times 60$ (%1/1)	$B55 \times 45$	قاب لبه سخت
$D_{25}$	$C40 \times 40$ (%2)	$B35 \times 40$	قاب لبه نرم
	$C60 \times 60$ (%1/1)	$B55 \times 45$	قاب لبه سخت

مدل‌های ساختمانی در پهنه‌ای با خطر نسبی خیلی زیاد که ریسک فروریزش لرزه‌ای بالایی در آن وجود دارد، قرار دارند. بر اساس طبقه‌بندی استاندارد ۲۸۰۰، ساختمان‌های مورد مطالعه بر روی خاک نوع دو در نظر گرفته می‌شوند و برای طراحی قاب‌ها، مقدار بار مرده و زنده طبقات به ترتیب ۵/۵ و

دسته از سازه‌ها متفاوت از انواع سخت پیچشی آنها است (Kyrkos & Anagnostopoulos, 2013). همچنین نظر واحدی در مورد تأثیر ضوابط پیچشی بر روی عملکرد آنها وجود ندارد. برخی معتقدند که ضوابط موجود در استاندارد ۲۸۰۰ (Standard-2800, 2017) برای کنترل جابه‌جایی نسبی در سیستم‌هایی با سختی پیچشی کم، کافی نیست (Haj Seiyed, 2014). در مقابل، برخی از محققین ضوابط پیچش تصادفی موجود را در تأمین شکل‌پذیری و حاشیه ایمنی مناسب در برابر فروریزش برای این دسته از سازه‌ها ضروری می‌دانند (DeBock et al., 2014). علی‌رغم وجود نتایج متناقض، بررسی‌ها نشان می‌دهد که روند تغییر حاشیه نسبی فروریزش در ساختمان‌های نرم پیچشی به ازای افزایش خروج از مرکزیت متفاوت از روند معمول در ساختمان‌های سخت پیچشی است (Badri & Torabpour, 2024). این مطالعات نشان می‌دهد که در حوزه ساختمان‌های نرم پیچشی نیاز به بررسی عملکرد فروریزش سازه‌ها امری ضروری است. برای جلوگیری از بروز عملکرد نامناسب ساختمان‌ها در پهنه‌هایی با خطر لرزه‌ای بسیار زیاد، شناخت رفتار آنها در زمین‌لرزه‌های شدید ضروری است. فروریزش یک ساختمان در حین زلزله، به‌عنوان یک عملکرد نامطلوب شناخته می‌شود و نشان از ناتوانی کل یا قسمتی از سیستم سازه‌ای در حفظ باربری ثقلی تحت بارهای دینامیکی زلزله است. برای رفع کمبود مطالعاتی در حوزه عملکرد فروریزش ساختمان‌های نرم پیچشی، این مطالعه تأثیر رفتار نرم پیچشی را در عملکرد فروریزش مدل‌های نامتقارن در چارچوب دستورالعمل (FEMA-P695, 2009) بررسی و اهمیت پیچش تصادفی را در تغییر عملکرد مفروض ارزیابی می‌نماید.

## ۲- روش تحقیق و یافته‌ها

ساختمان‌های نمونه، مجموعه‌ای از ساختمان‌های بتنی پنج طبقه هستند. این ساختمان‌ها مطابق شکل (۱)، شامل سه قاب باربر جانبی از نوع خمشی ویژه داشتند. در کنار ساختمانی با توزیع متقارن سختی ( $D_0$ ) ساختمان‌هایی با توزیع نامتقارن سختی



شکل (۲): موقعیت مرکز جرم نسبت به مرکز صلبيت در مدل‌های مورد مطالعه.

مدل‌سازی رفتار غیرارتجاعی اعضا، در نرم‌افزار OpenSEES (Mazzoni, 2009) و با استفاده از روش مفصل خمیری متمرکز صورت می‌گیرد. برای شبیه‌سازی دقیق‌تر رفتار غیرارتجاعی در اعضای سازه و افزایش کارایی و سرعت محاسبات غیرخطی،

۲ کیلو نیوتن بر متر مربع فرض می‌شود. برای توزیع این بارها، سقف‌ها از نوع دال دو طرفه در نظر گرفته شده است. مقادیر مقاومت تسلیم آرماتورهای فولادی و مقاومت فشاری بتن به ترتیب ۴۰۰ و ۳۵ مگاپاسکال فرض می‌شود. زمان تناوب تجربی برای مود اصلی جانبی، ۰/۶۵ ثانیه است.

## ۲-۱- شبیه‌سازی مدل‌های ساختمانی و تحلیل آنها

نامنظمی در مدل‌های ساختمانی ناشی از تغییر موقعیت مرکز جرم نسبت به مرکز صلبيت است. مدل‌های حاصل دارای خروج از مرکزیتی به مقدار ۰/۱b، ۰/۲b و ۰/۳b هستند و مدل‌های نامتوازن پیچشی نامیده می‌شوند ( $D_x-M(z \neq 0)$ ). برای نمونه،  $M_{30}$  نشان‌دهنده خروج از مرکزیت ۳۰ درصد در ساختمان است؛ به عبارت ساده‌تر، فاصله مرکز جرم از مرکز صلبيت در این حالت به ۳۰ درصد فاصله دو قالب برابر  $F_1$  و  $F_3$  (یا ۰/۳b) می‌رسد. در مقابل، مدل‌هایی با پسوند  $M_0$  معرف ساختمان‌های متوازن پیچشی هستند.

مطابق شکل (۲-الف)، در این مدل‌ها مراکز جرم و صلبيت در هر طبقه بر هم منطبق هستند و از آنها رفتاری پیچشی انتظار نمی‌رود (Correnza et al., 1994; Duan & Chandler, 1993). کلیه مدل‌های مورد مطالعه، جزو مدل‌های نرم پیچشی طبقه‌بندی می‌شوند که در آنها بسامد مود غالب پیچشی کمتر از بسامد مود غالب انتقالی است (DeBock et al., 2014). در این مطالعه، فاصله قالب‌های لبه نرم و سخت به صورت  $b/L = 0/5$  انتخاب شده است تا مدل‌های ساختمانی در دسته‌بندی مذکور قرار گیرند.

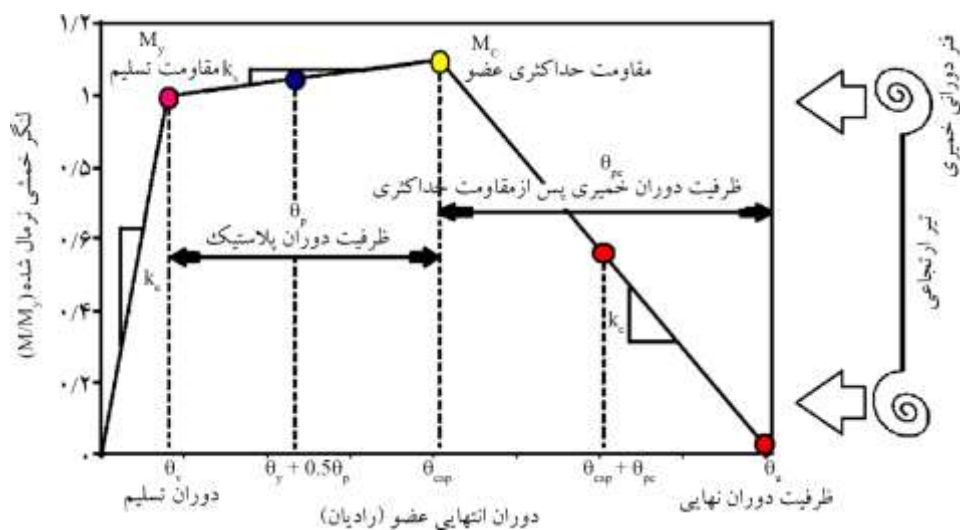
مدل‌های نامتوازن پیچشی با توجه به نحوه آرایش مراکز جرم و سختی، به دو دسته تقسیم می‌شوند. مطابق شکل (۲-ب)،  $D_x-M_z-F_E$  نشان‌دهنده آرایشی است که در آن مرکز جرم برای ایجاد خروج از مرکزیتی به اندازه  $z$  درصد فاصله قالب‌های لبه نرم و سخت، به سمت لبه نرم (قالب  $F_3$ ) جابه‌جا می‌شود. آرایش دیگر در این شکل،  $D_x-M_z-S_E$  است و نشان می‌دهد که برای ایجاد همان میزان خروج از مرکزیت، مرکز جرم به سمت لبه سخت (قالب  $F_1$ ) جابه‌جا می‌گردد.

به‌طور غیر صریح با استفاده از کاهش ظرفیت خمشی مقطع اعمال می‌شود. برای این منظور، مقدار توان خمشی مقطع به ازای بار محوری معادل محاسبه می‌شود (Kim & Han, 2022; Skoulidou et al., 2019; Zareian et al., 2010). اعمال اندرکنش لنگرهای خمشی از محدودیت‌های روش مفصل پلاستیک متمرکز در نرم‌افزار OpenSEES محسوب می‌شود. با این حال، تأثیر این اندرکنش با افزایش زمان تناوب سازه به دلیل زوال سختی کاهش می‌یابد (De Stefano & Faella, 1996; Sengupta et al., 2016).

شکل (۳) منحنی پشتواره این مدل را به همراه پارامترهای اصلی آن نشان می‌دهد. تعیین مقدار این پارامترها برای یک عضو، نیازمند استفاده از روابط تخمینی تجربی است که بر اساس مطالعات آزمایشگاهی و کالیبره‌سازی نتایج آنها، توسط محققان ارائه شده است. در این مطالعه، از روابط ارائه شده توسط هسلتن و همکاران (Haselton et al., 2008) و پاناگیوتاکوس و فاردیس (Panagiotakos & Fardis, 2001) برای تعیین مقدار پارامترهای رفتاری اعضای بتنی استفاده می‌شود. در روش مفصل خمیری متمرکز برای شبیه‌سازی مناسب میرایی در محدوده رفتار غیرارتجاعی ساختمان‌ها، از میرایی رابلی با نسبت میرایی ۵ درصد و متناسب با ماتریس‌های جرم و سختی اولیه سازه استفاده می‌شود (Zareian & Medina, 2010).

روش مورد نظر مناسب است (Kim & Han, 2022; Ricci et al., 2018).

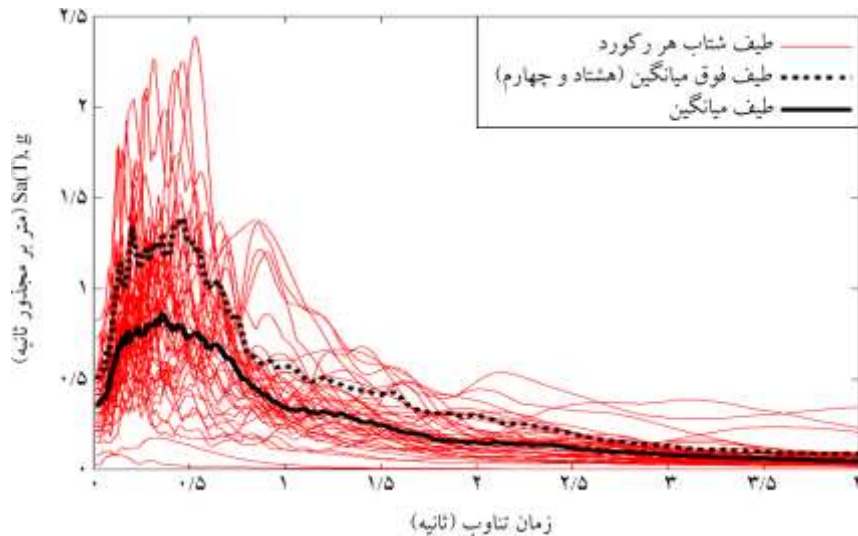
در این روش، رفتار غیر ارتجاعی یک عضو تنها در محل‌هایی که موقعیت احتمالی تشکیل مفاصل خمیری در عضو هستند، تعریف می‌شود. برای اعضای اصلی قاب‌های خمشی (تیرها و ستون‌ها)، از فرهای دورانی برای شبیه‌سازی مفاصل خمیری در دو انتهای اعضا استفاده می‌گردد. این فرها به‌طور سری به یک المان تیر ارتجاعی متصل هستند. تیر ارتجاعی با استفاده از المان ElasticBeamColumn و فرهای انتهایی با استفاده از المان‌های بدون طول<sup>۱</sup> در نرم‌افزار قابل تعریف هستند (Blasone et al., 2022; Kim & Han, 2022). رفتار خمیری در این فرها با مدل سه خطی ایبارا و همکاران (Ibarra et al., 2005) ارائه می‌شود. این مدل رفتاری یکی از پیشرفته‌ترین مدل‌های رفتاری ارائه شده برای شبیه‌سازی رفتار غیر ارتجاعی تیرها و ستون‌های بتنی و فولادی است که در اغلب مطالعات مرتبط با فروریزش ساختمان‌ها نظیر مطالعات گولت و همکاران (Goulet et al., 2007)، لیل و همکاران (Liel et al., 2011) و کریمیان و همکاران (Karimiyan et al., 2017) مورد استفاده قرار گرفته است. با این حال، در این روش مدل‌سازی، اندرکنش بار محوری و لنگر خمشی به‌طور مستقیم قابل اعمال نیست. اندرکنش نیروی محوری و لنگرهای خمشی در ستون‌ها



شکل (۳): پشتواره‌ی سه خطی مورد استفاده برای تعریف رفتار غیر ارتجاعی اعضا بر اساس مدل ایبارا و همکاران (Ibarra et al., 2005).

(IDA)<sup>۲</sup>، شتاب طیفی در زمان تناوب مود انتقالی است و شتاب طیفی نظیر ناپایداری دینامیکی سازه، ظرفیت فروریزش<sup>۴</sup> ( $S_{a,Collapse}$ ) آن نامیده می‌شود. تشکیل هم‌زمان مفاصل خمیری در انتهای اعضای اصلی قاب در یک یا چند طبقه (مکانیسم طبقه)، یکی از معیارهای وقوع ناپایداری در مدل‌های ساختمانی فرض می‌شود.

عملکرد فروریزش مدل‌های ساختمانی، تحت رکوردهای دور از گسل جدول (۲) ارزیابی شده است و طیف شتاب این رکوردها در شکل (۴) مشاهده می‌شود. با انجام تحلیل دینامیکی فزاینده (Vamvatsikos & Cornell, 2002) برای هر مدل سازه‌ای معیار نسبت حاشیه فروریزش (CMR)<sup>۲</sup> محاسبه می‌گردد. معیار شدت لرزه‌ای در تحلیل‌های دینامیکی فزاینده



شکل (۴): طیف شتاب رکوردهای مفروض

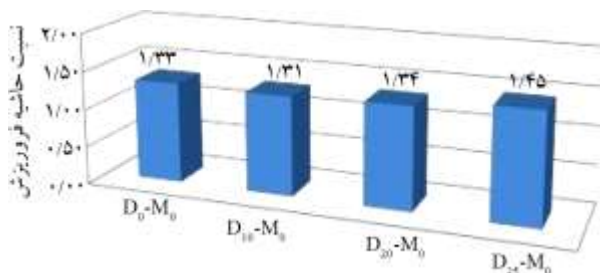
جدول (۲): مشخصات کلی مجموعه رکوردهای مورد استفاده.

مشخصات زمین لرزه‌ها		مشخصات محل احداث		مشخصات زلزله		
PGV <sub>max</sub>	PGA <sub>max</sub>	V <sub>s30</sub> (متر بر ثانیه)	فاصله تا گسل (کیلومتر)	نوع گسل	نام زلزله	ردیف بزرگا
۶۶/۷۱	۰/۴۹	۳۵۶	۹/۴	Blind thrust	Northridge	۱
۴۴/۳۹	۰/۴۷	۳۰۹	۱۱/۴	Blind thrust	Northridge	۲
۶۵/۸۷	۰/۸۰	۳۲۶	۱۲/۰	Strike-slip	Duzce, Turkey	۳
۴۴/۷۸	۰/۳۳	۶۸۵	۱۰/۴	Strike-slip	Hector Mine	۴
۳۳/۰۰	۰/۳۵	۲۷۵	۲۲/۰	Strike-slip	Imperial Valley	۵
۴۴/۶۰	۰/۳۸	۱۹۶	۱۲/۵	Strike-slip	Imperial Valley	۶
۴۶/۸۲	۰/۴۸	۶۰۹	۷/۱	Strike-slip	Kobe, Japan	۷
۳۱/۳۳	۰/۲۳	۲۵۶	۱۹/۱	Strike-slip	Kobe, Japan	۸
۵۸/۸۷	۰/۳۶	۲۷۶	۱۳/۶	Strike-slip	Kocaeli, Turkey	۹
۴۰/۰۴	۰/۲۱	۵۲۳	۱۰/۶	Strike-slip	Kocaeli, Turkey	۱۰
۲۹/۰۴	۰/۲۴	۳۵۴	۲۳/۶	Strike-slip	Landers	۱۱
۴۳/۴۱	۰/۴۲	۲۷۱	۱۹/۷	Strike-slip	Landers	۱۲
۳۸/۰۴	۰/۵۱	۲۸۹	۸/۷	Strike-slip	Loma Prieta	۱۳
۴۵/۴۴	۰/۵۶	۳۵۰	۱۲/۲	Strike-slip	Loma Prieta	۱۴
۵۰/۷۵	۰/۵۱	۷۲۴	۱۲/۶	Strike-slip	Manjil, Iran	۱۵

جدول (۲): مشخصات کلی مجموعه رکوردهای مورد استفاده

مشخصات زمین لرزه‌ها		مشخصات محل احداث		مشخصات زلزله		
PGV <sub>max</sub>	PGA <sub>max</sub>	V <sub>s30</sub> (متر بر ثانیه)	فاصله تا گسل (کیلومتر)	نوع گسل	نام زلزله	بزرگا
۴۸/۶۰	۰/۳۶	۱۸/۲	۱۹۲	Strike-slip	Superstition Hills	۶/۵
۴۱/۲۱	۰/۴۷	۱۱/۲	۲۰۸	Strike-slip	Superstition Hills	۶/۵
۱۰۹/۲۱	۰/۴۰	۱۰/۰	۲۵۹	Thrust	Chi-Chi, Taiwan	۷/۶
۵۰/۰۸	۰/۵۱	۲۶/۰	۷۰۵	Thrust	Chi-Chi, Taiwan	۷/۶
۲۱/۷۰	۰/۲۲	۲۲/۸	۳۱۶	Thrust	San Fernando	۶/۶
۰/۵۲	۰/۳۶	۱۵/۰	۴۲۵	Thrust	Friuli, Italy	۶/۵

متوازن تغییر ناچیزی دارد و توزیع نامتقارن سختی تأثیر اندکی بر روند تغییرات حاشیه ایمنی آنها دارد. به طور نمونه، نسبت حاشیه فروریزش در مدل D25-M0 تنها ۹ درصد اختلاف با مقدار این نسبت در مدل D0-M0 دارد.



شکل (۵): حاشیه ایمنی در مدل‌های متوازن پیچشی.

مرحله دوم شامل بررسی مدل‌های نامتوازن پیچشی است که در اثر خروج از مرکزیت، دچار رفتارهای پیچشی می‌شوند. مطابق شکل (۶)، نسبت حاشیه فروریزش در اغلب گروه‌های ساختمانی (D<sub>0</sub> تا D<sub>25</sub>) با افزایش خروج از مرکزیت (از صفر به ۳۰ درصد) بیشتر می‌شود.

این افزایش به طور متوسط ۱۰ درصد است و نشان می‌دهد که در مدل‌های ساختمانی نرم پیچشی، مدل‌های نامتوازن در مقایسه با مدل‌های متوازن وضعیت مناسب‌تری به لحاظ عملکرد فروریزش دارند. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهند، بهبود حاشیه ایمنی مستقل از مسیر جابه‌جایی مرکز جرم نسبت به مرکز صلبیت است.

برای درک بهتر روند تغییر حاشیه‌ی ایمنی فروریزش در مدل‌های نرم پیچشی، توجه به توزیع خرابی در اعضای سازه‌ای

کنترل وقوع مکانیسم طبقه توسط پردازشگری که در متلب (MATLAB, 2019) برنامه‌نویسی شده است، صورت می‌گیرد. این پردازشگر بر اساس یک الگوی رنگ‌بندی از پیش تعریف شده وضعیت مفاصل را در سطوح مختلف شدت لرزه‌ای معین می‌کند. بر اساس مطالعات موجود (Haselton & Deierlein, 2008; Vamvatsikos & Cornell, 2002)، تغییر مکان‌های نسبی بین طبقه‌ای معادل با ۱۰ درصد ارتفاع طبقه، به عنوان معیار دوم فروریزش در مدل‌های ساختمانی فرض می‌شود. با اتمام تحلیل دینامیکی فزاینده، میانه ظرفیت فروریزش (SCT)، مطابق رابطه (۱) با فرض توزیع لوگ نرمال برای داده‌ها به دست می‌آید.

حاشیه ایمنی مدل ساختمانی با استفاده از معیار نسبت حاشیه‌ی فروریزش تخمین زده می‌شود که مطابق رابطه‌ی (۲) تعریف می‌گردد. در این رابطه، SMT شتاب طیفی نظیر بزرگ‌ترین زمین‌لرزه‌های مورد انتظار (MCE) برای منطقه است. برای مطالعه حاضر، مقادیر شتاب طیفی مذکور به طور تقریبی ۱/۵ برابر مقادیر طیف طرح فرض می‌شود.

$$S_{CT} = \exp\left(\ln\left(\prod_{i=1}^n Sa_{collapse,i}\right)^{1/n}\right) \quad (1)$$

$$CMR = \frac{S_{CT}}{S_{MT}} \quad (2)$$

## ۲-۲- بررسی حاشیه ایمنی مدل‌ها

مرحله اول شامل بررسی حاشیه ایمنی مدل‌های متوازن پیچشی است. مطابق شکل (۵)، حاشیه ایمنی در بین مدل‌های

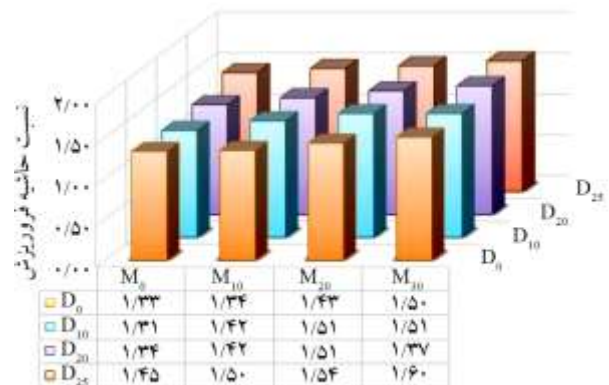
به شیب نزولی در منحنی رفتاری، فرض می‌شود که اعضای که مفاصل خمیری در آنها با رنگ زرد تا قرمز مشخص می‌شوند، دیگر قادر به تحمل بارهای اضافی نیستند و نشانه‌ای از خرابی عضو است. از این رو، مکانیسم طبقه بر اساس رنگ زرد و رنگ‌های بعد از آن مشخص می‌شود.

شکل (۷)، نحوه گسترش رفتار خمیری در قاب‌های سازه را نشان می‌دهد. مکانیسم نمایش داده شده ناشی از رکورد نورثریج است. با این حال، برای سایر رکوردها نیز نتایج مشابه است که برای اختصار آورده نشده است. همچنین، تشریح مسئله فقط با دو گروه مدل‌ها ساختمانی  $D_0$  و  $D_{25}$  صورت می‌پذیرد. برای تشریح نحوه توزیع مفاصل پلاستیک در سازه‌های نامتوازن پیچشی از مدل‌هایی با خروج از مرکزیت ۳۰ درصد به عنوان نماینده این دسته از سازه‌ها استفاده شده است. توضیحات این قسمت، برای پلانی مطابق با شکل (۲-ب) ارائه می‌شود که در آن خروج از مرکزیت، با جابه‌جایی مرکز جرم به سمت قاب لبه سخت به وجود می‌آید.

در مدل‌های متوازن - مدل‌های بدون خروج از مرکزیت که با پسوند  $M_0$  در شکل (۷) مشخص است - مود حرکتی غالب، انتقالی است و از این رو، تشابه محسوسی بین مشاهدات این مطالعه با نتایج مطالعه کریمیان و همکاران (Karimiyan et al., 2017) مشاهده می‌شود. به عبارت دیگر، تجمع آسیب‌ها به طور عمده در قاب‌های نزدیک به مرکز جرم شکل می‌گیرد. با این حال، نتیجه مذکور قابل تعمیم به رفتار مدل‌های نرم پیچشی نامتوازن نیست، زیرا با حضور خروج از مرکزیت، مود غالب ارتعاش در سازه‌ای با رفتار نرم پیچشی متفاوت از سازه سخت پیچشی است. برای نمونه، اگر مدل  $D_0-M_{30}$  دارای رفتار سخت پیچشی باشد، مطابق نتایج مطالعه مذکور باید شدت آسیب‌ها و تمرکز مفاصل پلاستیک در قاب‌های لبه سخت و مرکزی، به دلیل نزدیکی آنها به مرکز جرم، بیشتر باشد. ولی مطابق شکل (۷)، چنین وضعیتی در مدل  $D_0-M_{30}$  نمایان نیست و در عوض، این قاب لبه نرم است که بیشتر از قاب لبه سخت آسیب دیده است. در مدل  $D_{25}-M_{30}$  نیز رفتار خمیری در قاب لبه نرم شدیدتر از قاب لبه سخت است.



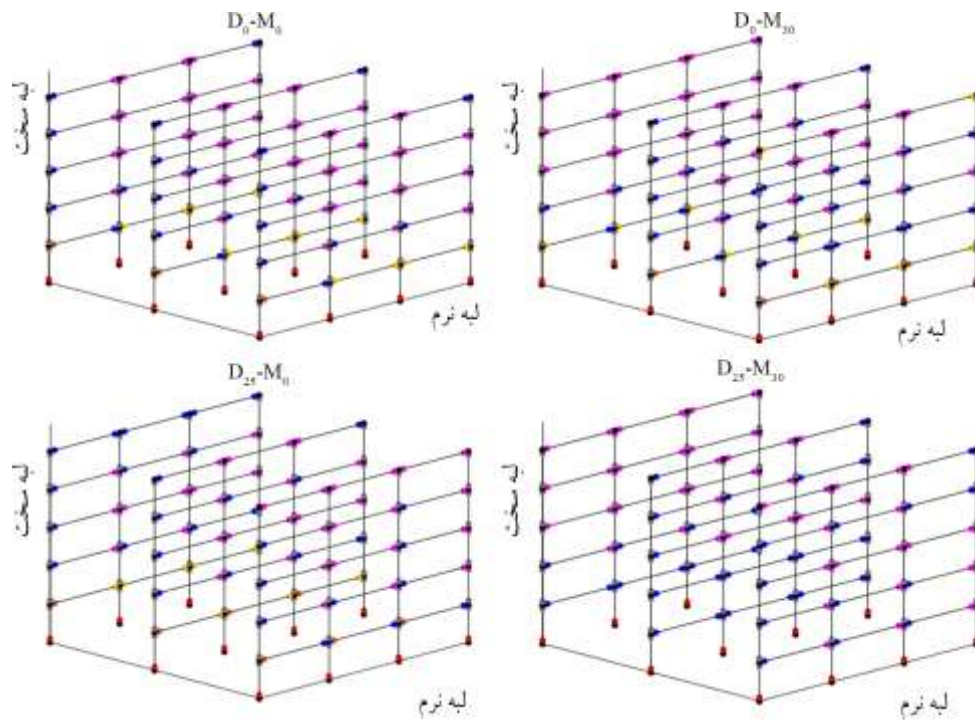
الف) مدل‌های Dx-Mz-FE



ب) مدل‌های Dx-Mz-SE

شکل (۶): مقایسه حاشیه ایمنی مدل‌های ساختمانی در خروج از مرکزیت‌های مختلف

ضروری است. از آنجا که انتظار می‌رود اعضای قاب‌های لبه سخت و نرم (قاب‌های  $F1$  و  $F3$ ) بیشتر تحت تأثیر مود پیچشی قرار بگیرند، توزیع خرابی در آن اعضا مورد توجه قرار می‌گیرد. برای تعیین نحوه تشکیل مکانیسم در مدل‌های تحلیل شده، الگویی رنگی مطابق با شکل (۳) برای توصیف وضعیت رفتار خمیری اعضای سازه تعریف می‌شود. این الگو بر اساس پاسخ تاریخیچه زمانی لنگر-دوران، برای فنرهای دورانی دو انتهای عضو میزان پیشرفت رفتار غیر ارتجاعی را مشخص می‌کند. در محل فنرهای دورانی و با استفاده از این الگو، شدت آسیب‌پذیری عضو با یک رنگ مشخص می‌شود. رنگ قرمز نشان از خرابی کامل عضو است. رنگ زرد مشخص می‌کند که عضو به حداکثر مقاومت خمشی ( $M_c$ ) خود رسیده است و در ادامه با زوال شدید مقاومت مواجه خواهد شد. رنگ صورتی نشان از وقوع تسلیم خمشی در عضو است و رنگ مفصل قبل از تسلیم، خاکستری است. با توجه



شکل (۷): نحوه‌ی توزیع مفاصل خمیری در مدل‌های نرم پیچشی با توزیع متقارن ( $D_0$ ) و نامتقارن ( $D_{25}$ ) سختی، در دو حالت متوازن ( $M_0$ ) و نامتوازن ( $M_{30}$ ) پیچشی.

آیین‌نامه‌های لرزه‌ای برای جلوگیری از تبعات منفی ناشی از این جابه‌جایی تصادفی، استفاده از خروج از مرکزیت تصادفی را در طراحی توصیه کرده‌اند. در این بررسی، مدل‌های ساختمانی به جز حالت متوازن، در سه حالت خروج از مرکزیت ۱۰، ۲۰، ۳۰ درصد نیز مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. می‌توان این خروج از مرکزیت‌ها را نتیجه عوامل تصادفی در نظر گرفت. با توجه به نتایج حاصل، می‌توان تأثیر جابه‌جایی تصادفی مرکز جرم بر حاشیه ایمنی فروریزش ساختمان‌های نرم پیچشی را نادیده گرفت.

### ۲-۳- بررسی تغییر مکان جانبی نسبی مدل‌ها

این بخش به مطالعه ارتباط تغییر مکان جانبی نسبی و فرم تشکیل مکانیسم فروریزش در مدل‌های ساختمانی با رفتار نرم پیچشی می‌پردازد. برای اختصار، فقط تغییر مکان‌های نسبی مدل‌های مطرح در شکل (۷) ارائه می‌شود. مطابق توصیه استاندارد ۲۸۰۰، برای مناطق پر خطر لرزه‌ای مقدار تغییر مکان جانبی نسبی واقعی هر طبقه که از تحلیل‌های غیرخطی به دست می‌آید، با در

شکل (۷) به نحوه تغییر شدت آسیب‌ها در مدل ساختمانی  $D_0$  و  $D_{25}$  نیز اشاره دارد و نشان می‌دهد که شدت آسیب‌ها با افزایش خروج از مرکزیت در لبه نرم و سخت کاهش می‌یابد. این نتیجه بدین معنی است که در ساختمان‌های نرم پیچشی، افزایش نامنظمی به معنای کاهش حاشیه ایمنی آنها در برابر فروریزش نیست. چنین استنباط می‌شود که مود غالب حرکتی (مود پیچشی) در ساختمان‌های مذکور با افزایش خروج از مرکزیت، برتری حرکتی بیشتری خواهد داشت و در نتیجه، نقش آن مود در جذب انرژی زلزله بیشتر از مودهای انتقالی خواهد بود. بر اساس این استدلال، آسیب‌هایی که به طور مستقیم ناشی از تغییر مکان‌های نسبی در جهت زلزله است، با افزایش فاصله‌ی مرکز جرم از مرکز صلبیت، کمتر می‌شود و این مسئله سبب افزایش شاخص ایمنی است.

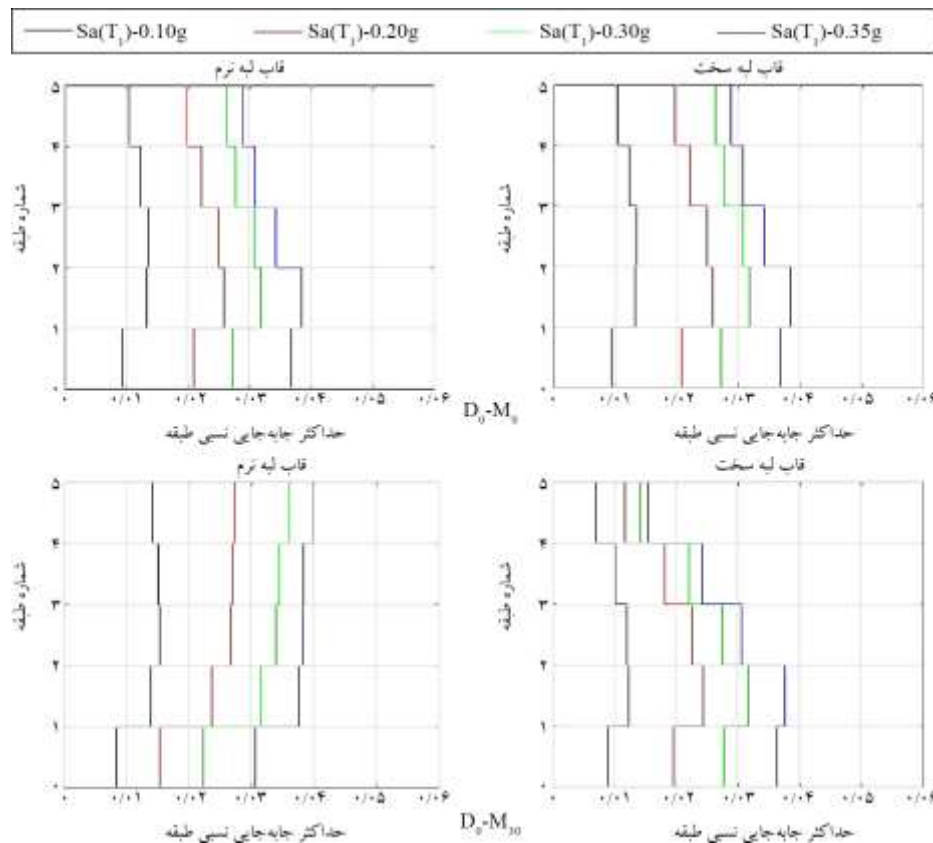
تغییر موقعیت مرکز جرم در طبقات ممکن است به طور اتفاقی رخ دهد. تغییر در استفاده از فضاها داخلی ساختمان، عدم قطعیت در مکان بارهای زنده و عوامل مشابه، باعث جابه‌جایی مرکز جرم نسبت به مرکز صلبیت خواهد شد.

تحلیل‌های دینامیکی فزاینده در گروه ساختمانی D0، ظرفیت فروریزش برای مدل‌های منظم و نامنظم (با خروج از مرکزیت ۳۰ درصد) به ترتیب ۰/۴g و ۰/۴۶g محاسبه شده است که بیشتر از شتاب مبنای ۰/۳۵g است. از این رو، دیدگاه‌های نوین طراحی سازه‌ها بر اساس عملکرد (ASCE/SEI41-17)، بر مبنای جابه‌جایی (Priestley & Kowalsky, 2000) و بر اساس فروریزش (Jaberi, 2024) امکان بهره‌گیری بهینه‌تری از ظرفیت سازه را فراهم می‌آورند.

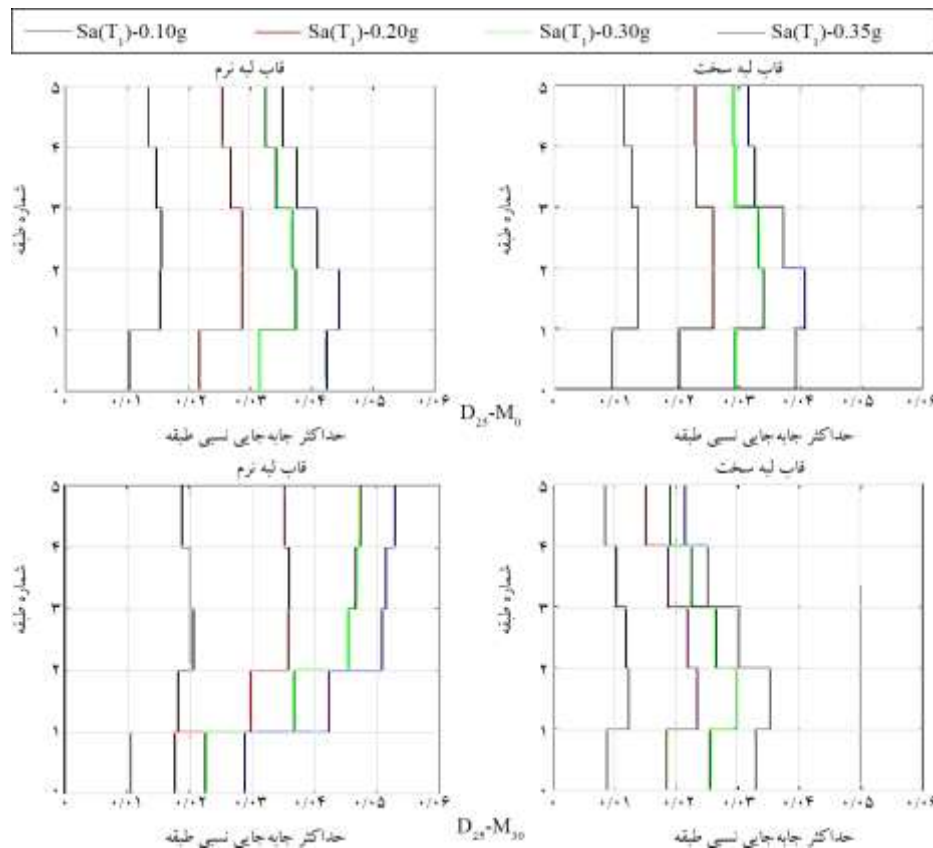
بررسی پروفیل‌های تغییر مکان جانبی نسبی نشان می‌دهد که انطباق مناسبی بین نحوه‌ی تغییر شکل و توزیع مفاصل خمیری در ساختمان‌های نرم پیچشی وجود دارد. برای نمونه، در شکل‌های (۸) و (۹)، بررسی مدل‌ها در دو گروه ساختمانی D0 و D25 نشان می‌دهد که فارغ از میزان نامنظمی، در سطوح لرزه‌ای شدید (۰/۳g و ۰/۳۵g)، تغییر مکان جانبی نسبی در دو طبقه پایین قاب لبه سخت فراتر از تغییر مکان نسبی بحرانی است. با این حال، وقوع خروج از مرکزیت، از میزان تغییر مکان جانبی نسبی در

نظرگیری اثرات لنگر ثانویه، نباید از مقدار تغییر مکان جانبی نسبی بحرانی فراتر برود. این مقدار بحرانی برای ساختمان‌هایی که تا ۵ طبقه احداث می‌شوند، ۲/۵ درصد توصیه می‌شود.

با توجه به اینکه برای ساختمان‌های نامنظم تغییر مکان جانبی نسبی باید در محورهای کناری ساختمان محاسبه شود، شکل‌های (۸) و (۹) در قاب‌های لبه سخت و نرم برای گروه‌های ساختمانی D0 و D25 ارائه شده است. پروفیل‌های جابه‌جایی نسبی در این شکل‌ها، از میانگین تغییر مکان جانبی نسبی طبقات تحت رکوردهای مفروض به دست آمده است. این پروفیل‌ها در چند سطح از شتاب لرزه‌ای محاسبه می‌شود تا روند تغییرات پاسخ در سطوح مختلف خطر لرزه‌ای نیز قابل ارزیابی باشد. مطابق نتایج، تغییر مکان نسبی مدل‌های نرم پیچشی به ازای شتاب زلزله طرح - برای مناطق پر خطر لرزه‌ای ۰/۳۵g فرض می‌شود - در هر دو گروه ساختمانی از ۲/۵ درصد فراتر رفته است. با این حال، وقوع این حالت در هر دو گروه، به معنی وقوع ناپایداری در مدل‌های سازه‌ای نیست. برای نمونه، بر اساس نتایج



شکل (۸): پروفیل تغییر مکان جانبی نسبی برای گروه ساختمانی D0 در دو حالت منظم و نامنظم.



شکل (۹): پروفیل تغییر مکان جانبی نسبی برای گروه ساختمانی  $D_{25}$  در دو حالت منظم و نامنظم.

پیچشی است و برای تعمیم نتایج به انواع سیستم‌های سازه‌ای و با طبقات مختلف، بررسی‌های بیشتر ضروری است. بر اساس نتایج: در ساختمان‌های نرم پیچشی، تغییر در توزیع سختی در پلان، تأثیر محسوسی بر حاشیه ایمنی آنها در برابر فروریزش ندارد. با تغییر موقعیت مرکز جرم در ساختمان‌های نرم پیچشی، روند کلی تغییر نسبت حاشیه‌ی فروریزش آنها کاهش‌ی نیست. برای مدل‌های مورد مطالعه میزان تغییر در مقدار حاشیه ایمنی به ازای افزایش خروج از مرکزیت، به‌طور متوسط ۱۰ درصد تخمین زده می‌شود.

نحوه توزیع تغییر مکان‌های جانبی نسبی در مدل‌های نرم پیچشی با نحوه توزیع مفاصل خمیری انطباق دارد. تأثیر وقوع خروج از مرکزیت تصادفی در عملکرد فروریزش مدل‌های ساختمان‌های نرم پیچشی مورد مطالعه قابل چشم‌پوشی است. ارائه یک توصیه آیین‌نامه‌ای برای این منظور، نیازمند بررسی‌های بیشتر است.

طبقات فوقانی قاب لبه سخت کاسته است. این مشاهده با کاهش شدت آسیب‌ها در طبقات فوقانی مدل  $D_0-M_{30}$  و  $D_{25}-M_{30}$  در مقایسه با مدل‌های بدون خروج از مرکزیت انطباق دارد. با بروز خروج از مرکزیت ۳۰ درصد، قاب لبه نرم در کل ارتفاع با تغییر مکان‌های جانبی نسبی بزرگ‌تر از ۲/۵ درصد مواجه شده است که این مشاهده با گسترش مفاصل خمیری در ارتفاع قاب لبه نرم سازگار است.

### ۳- نتیجه‌گیری

این مطالعه تلاش نموده است تا با بررسی رفتار لرزه‌ای ساختمان‌های بتنی قاب خمشی و با استفاده از تحلیل‌های غیرخطی، اهمیت بروز خروج از مرکزیت را در حاشیه‌ی ایمنی ساختمان‌های نرم پیچشی در برابر فروریزش ارزیابی نماید. اعتبار نتایج در محدوده مفروضات و محدودیت‌های مطرح در بررسی حاضر است. تأکید اصلی بر عملکرد فروریزش ساختمان‌های نرم

collapse capacity. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 43(6), 831-850. doi: 10.1002/eqe.2375

Duan, X., & Chandler, A. (1993). Inelastic seismic response of code-designed multistorey frame buildings with regular asymmetry. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 22(5), 431-445. doi: 10.1002/eqe.4290220506

FEMA-P695. (2009). *Quantification of Building Seismic Performance Factors*. In. United States, Department of Homeland Security: Applied Technology Council.

Goulet, C. A., Haselton, C. B., Mitrani-Reiser, J., Beck, J. L., Deierlein, G. G., Porter, K. A., & Stewart, J. P. (2007). Evaluation of the seismic performance of a code-conforming reinforced-concrete frame building—from seismic hazard to collapse safety and economic losses. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 36(13), 1973-1997. doi: 10.1002/eqe.694

Haj Seiyed Taghia, S., Moghadam, A., & Ghafory Ashtiany, M. (2014). Seismic performance of torsionally stiff and flexible multi-story concentrically steel braced buildings. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 23(2), 146-160. doi: 10.1002/tal.1031

Han, S. W., Kim, T.-O., Kim, D. H., & Baek, S.-J. (2017). Seismic collapse performance of special moment steel frames with torsional irregularities. *Engineering Structures*, 141, 482-494. doi: 10.1016/j.engstruct.2017.03.045

Haselton, C., & Deierlein, G. (2008). *Assessing seismic Collapse Safety of Modern Reinforced Concrete Moment-Frame Buildings* (PEER Report 2007/08) University of California.

Haselton, C. B., Goulet, C. A., Mitrani-Reiser, J., Beck, J. L., Deierlein, G. G., Porter, K. A., Stewart, J. P., & Taciroglu, E. (2008). *An Assessment to Benchmark the Seismic Performance of a Code-Conforming Reinforced Concrete Moment-Frame Building*. PEER Report (2007/1). [https://peer.berkeley.edu/sites/default/files/web\\_peer712\\_curt\\_b\\_haselton\\_christine\\_a\\_goulet\\_judith\\_mitrani-reiser.pdf](https://peer.berkeley.edu/sites/default/files/web_peer712_curt_b_haselton_christine_a_goulet_judith_mitrani-reiser.pdf)

Ibarra, L. F., Medina, R. A., & Krawinkler, H. (2005). Hysteretic models that incorporate strength and stiffness deterioration. *Earthquake Engineering &*

## References

## مراجع

ASCE/SEI7-10. (2013). *In Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*: American Society of Civil Engineers.

ASCE/SEI41-17. (2017). *In Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings*: American Society of Civil Engineers.

Badri, R. K., Moghadam, A., & Nekooei, M. (2016). The influence of deterioration parameters on the response of low-rise symmetric and asymmetric RC buildings. *International Journal of Civil Engineering*, 14, 547-560. doi:10.1007/s40999-016-0038-x

Badri, R. K. & Torabpour, I. (2024). Examining the collapse behavior of low-rise structures with torsional flexibility. *Proceeding in: 9<sup>th</sup> International Conference on Seismology and Earthquake Engineering*, Tehran. (in Persian).

Blasone, V., Basaglia, A., De Risi, R., De Luca, F., & Spacone, E. (2022). A simplified model for seismic safety assessment of reinforced concrete buildings: framework and application to a 3-storey plan-irregular moment resisting frame. *Engineering Structures*, 250, 113348. doi: 10.1016/j.engstruct.2021.113348

Correnza, J., Hutchinson, G., & Chandler, A. (1994). Effect of transverse load-resisting elements on inelastic earthquake response of eccentric-plan buildings. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 23(1), 75-89. doi: 10.1002/eqe.4290230107

Das, P. K., Dutta, S. C., & Datta, T. K. (2021). Seismic behavior of plan and vertically irregular structures: state of art and future challenges. *Natural Hazards Review*, 22(2), 04020062.

De Stefano, M., & Faella, G. (1996). An evaluation of the inelastic response of systems under biaxial seismic excitations. *Engineering Structures*, 18(9), 724-731. doi: 10.1016/0141-0296(95)00216-2

De Stefano, M., & Pintucchi, B. (2008). A review of research on seismic behaviour of irregular building structures since 2002. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 6(2), 285-308. doi: 10.1007/s10518-007-9052-3

DeBock, D. J., Liel, A. B., Haselton, C. B., Hooper, J. D., & Henige Jr, R. A. (2014). Importance of seismic design accidental torsion requirements for building

C., Celano, F., De Risi, M. T., Camata, G., Franchin, P., & Magliulo, G. (2018). Modeling and seismic response analysis of Italian code-conforming reinforced concrete buildings. *Journal of Earthquake Engineering*, 22(sup2), 105-139. doi: 10.1080/13632469.2018.1527733

Sengupta, A., Quadery, L., Sarkar, S., & Roy, R. (2016). Influence of Bidirectional Near-Fault Excitations on RC Bridge Piers. *Journal of Bridge Engineering*, 21(7), 04016034. doi: 10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000836

Skoulidou, D., Romao, X., & Franchin, P. (2019). How is collapse risk of RC buildings affected by the angle of seismic incidence? *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 48(14), 1575-1594. doi: 10.1002/eqe.3214

Standard-2800. (2017). *Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings*. In (ver. 4.0): Building and Housing Research Center, Tehran, Iran, Permanent Committee for Revising the Standard 2800.

Vamvatsikos, D., & Cornell, C. A. (2002). Incremental dynamic analysis. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 31(3), 491-514. doi: 10.1002/eqe.141

Zareian, F., Lignos, D., & Krawinkler, H. (2010). Evaluation of seismic collapse performance of steel special moment resisting frames using FEMA P695 (ATC-63) methodology. *Structures Congress*.

Zareian, F., & Medina, R. A. (2010). A practical method for proper modeling of structural damping in inelastic plane structural systems. *Computers & structures*, 88(1-2), 45-53. doi: 10.1016/j.compstruc.2009.08.001

### واژه‌نامه

- ۱- بدون طول Zero-Length
- ۲- نسبت حاشیه فروریزش Collapse Margin Ratio (CMR)
- ۳- تحلیل دینامیکی فزاینده Incremental Dynamic Analysis (IDA)
- ۴- ظرفیت فروریزش Collapse Capacity
- ۵- بزرگ‌ترین زلزله مورد انتظار Maximum Considered earthquake (MCE)

### علائم اختصاری

- $K_e$  سختی مؤثر
- $\theta_p$  ظرفیت دوران خمیری عضو

*Structural Dynamics*, 34(12), 1489-1511. doi: 10.1002/eqe.495

Jaberi, V. (2024). Collapse-based seismic design method. *Advances in Structural Engineering*. doi: 10.1177/13694332241291249

Karimiyan, S., Moghadam, A. S., Husseinzadeh Kashan, A., & Karimiyan, M. (2017). Evaluation of collapse distribution in three-story RC moment-resisting asymmetric buildings due to earthquake loads. *International Journal of Civil Engineering*, 15(5), 809-825. doi: 10.1007/s40999-017-0197-4

Kim, T., & Han, S. W. (2022). New seismic design method to improve collapse performance of steel ordinary moment frames. *Journal of Building Engineering*, 50, 104183. doi: 10.1016/j.jobee.2022.104183

Kyrkos, M. T., & Anagnostopoulos, S. A. (2011). Improved earthquake resistant design of torsionally stiff asymmetric steel buildings. *Earthquakes and Structures*, 2(2), 127-147. doi: 10.12989/eas.2011.2.2.127

Kyrkos, M. T., & Anagnostopoulos, S. A. (2013). Improved earthquake resistant design of eccentric steel buildings. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 47, 144-156. doi: 10.1016/j.soildyn.2012.07.011

Liel, A. B., Haselton, C. B., & Deierlein, G. G. (2011). Seismic collapse safety of reinforced concrete buildings. II: Comparative assessment of nonductile and ductile moment frames. *Journal of Structural Engineering*, 137(4), 492-502. doi: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000275

MATLAB. In. (2019). (*Version Version: 9.7.0. (R2019)*) *The MathWorks Inc.*

Mazzoni S., M. F., Scott M. H. & Fenves G. L. (2009). *OpenSees, Open System for Earthquake Engineering Simulation*. In Pacific Earthquake Engineering Research Center.

Panagiotakos, T. B., & Fardis, M. N. (2001). Deformations of reinforced concrete members at yielding and ultimate. *Structural Journal*, 98(2), 135-148.

Priestley, M., & Kowalsky, M. (2000). Direct displacement-based seismic design of concrete buildings. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 33(4), 421-444.

Ricci, P., Manfredi, V., Noto, F., Terrenzi, M., Petrone,

$\theta_{pc}$	ظرفیت دوران خمیری عضو پس از رسیدن به مقاومت نهایی
$\theta_u$	ظرفیت دوران نهایی
$M_y$	مقاومت خمشی عضو
$M_c$	مقاومت نهایی عضو
$PGA_{max}$	بیشینه شتاب زمین لرزه
$PGV_{max}$	بیشینه سرعت زمین لرزه
$V_{s-30}$	سرعت موج برشی
$S_{CT}$	میانه ظرفیت فروریزش
$S_{MT}$	شتاب نظیر بزرگ‌ترین زلزله محتمل

## Accidental Eccentricity Importance in the Collapse Behavior of Torsionally-Flexible Low-Rise Buildings

Isaac Torabpour<sup>1</sup> and Ramin Ketabforoush Badri<sup>2\*</sup>

1. M.Sc. Graduate, Department of Civil Engineering, Aza.C., Islamic Azad University, Azarshahr, Iran

2. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Aza.C., Islamic Azad University, Azarshahr, Iran,

\*Corresponding Author, email: ramin.badri@iau.ac.ir

The collapse of a building during an earthquake event signifies that some of the existing structural systems designed in compliance with the current code requirements are still unable to withstand the dynamic loads induced by earthquakes. Hence, understanding the behavior of buildings in high seismic hazard areas during severe earthquakes is crucial for preventing structural failures.

Numerous studies over the past few decades have delved into the behavior of irregular buildings, highlighting that the irregularity of a building can lead to varied demands depending on its ductile deformation capacity under lateral loads, potentially resulting in suboptimal use of materials in load-resisting members. Additionally, seismic loads may affect the lateral load-bearing members differently due to the building's irregularity.

For high seismic hazard regions, Iran's Seismic Code (Standard 2800) specifies the significant impact of accidental eccentricity in mitigating the adverse effects of torsion on the collapse of irregular buildings. However, the influence of accidental torsion on the collapse performance of torsionally flexible buildings requires further exploration. To this aim, the present study investigates the collapse performance of asymmetric models with flexible torsional behavior in accordance with FEMA-P695 guidelines, particularly in special reinforced concrete moment frame (SMF) buildings. The collapse margin ratio (CMR) is applied as a measure of the models' collapse performance. The proposed SMF buildings are designed considering various conditions of stiffness distribution. Then, the collapse behavior of asymmetric models is assessed by implementing an eccentricity that characterizes the accidental torsion effects.

The modeling and the analysis are carried out using OpenSEES software, in which the plastic behavior of the members is simulated using the concentrated plasticity method developed by Ibarra et al. The collapse mechanism of the models is scrutinized for different states of eccentricity to offer a comprehensive understanding of the accidental torsion effects on the collapse of torsionally flexible models. Utilizing the incremental dynamic analysis (IDA), the proposed collapse criterion is calculated, where the seismic intensity measure in dynamic analyses is the spectral acceleration at the fundamental lateral mode period. The commencement of instability in the building models is recognized by the concurrent formation of plastic hinges at the ends of the frame components in one or more floors. This instability criterion is overseen and managed by a processor programmed in MATLAB. The second criterion of the collapse occurrence is the inter-story drift ratio of building models, which is considered to be 10% of the story height.

The results demonstrate that by altering the position of the center of mass in the models, the safety margin against the collapse is bolstered by an average of 10%. This enhancement appears to be independent of the location of the center of mass relative to the center of rigidity in the plan. These findings raise pertinent questions about the significance of design accidental torsion criteria in this specific category of structures. However, there is a need to conduct additional studies before making any regulatory recommendations. For torsionally flexible models, the dominant mode of motion (i.e., the torsional mode) will have a great kinetic superiority with increasing eccentricity. As a result, the role of that mode in absorbing earthquake energy will be greater than that of the translational modes. Accordingly, the damages that are directly caused by relative displacements in the direction of earthquake load will decrease with increasing distance of the center of mass from the center of rigidity, resulting in an increase in the safety index.

The results also demonstrate that the distribution of relative lateral displacements in torsionally flexible models is consistent with the distribution of plastic hinges. Interestingly, a distinct pattern of failure propagation has been identified for these structures, contrasting with torsionally stiff buildings.

**Keywords:** Collapse Margin Ratio, Torsionally-Flexible Building, Accidental Eccentricity, Seismic Performance.