

# ارزیابی بیشینه‌ی نیاز شکل‌پذیری دورانی تیر مستقر در قاب خمشی فولادی با نگاه به اثر مودهای بالاتر

محسن گراهی\* (دانشیار)

گروه مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

فرهاد دانشجو (استاد)

دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

نوید سیاه‌پلو (استادیار)

گروه مهندسی عمران، موسسه آموزش عالی جهاد دانشگاهی خوزستان

مهندسی عمران شریف، (تابستان ۱۳۹۵)  
دوری ۲ - ۳۲، شماره ۲/۲، ص. ۱۰۶-۹۷ (یادداشت فنی)

افزایش آگاهی از پاسخ دینامیکی غیرارتجاعی قاب‌های خمشی فولادی (SMRF) و پیشنهاد روش‌هایی برای اندازه‌گیری بیشینه‌ی نیازهای لرزه‌ی موضعی این سازه‌ها با استفاده از اطلاعات مربوط به بیشینه‌ی نیازهای سراسری و طبقه‌ی (قابل تخمین از نیازهای سیستم SDOF معادل) اصلی‌ترین هدف این پژوهش است. محاسبه‌ی بیشینه‌ی نیازهای موضعی تیرها به کمک ضریب شکل‌پذیری کلی با توجه به اثر مودهای بالاتر از دیگر اهداف این پژوهش است. بدین منظور تعدادی سازه‌ی SMRF کوتاه، میان و بلند مرتبه با طبقات و دهانه‌های مختلف در نرم‌افزار DRAIN-2DX مدل‌سازی و با تحلیل تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی (NTHA) و پوش‌آور (CPA) تحلیل شده‌اند. کلیه‌ی مقادیر محاسبه‌شده براساس میانگین نتایج تحلیل تاریخچه‌ی زمانی ارائه شده‌اند. مطالعات نشان داده است که مقادیر شکل‌پذیری تیر به مراتب بیشتر از شکل‌پذیری طبقه‌ی و کلی است. همچنین تأثیر مودهای بالاتر در افزایش شکل‌پذیری دورانی در طبقات فوقانی در ساختمان‌های بلند کاملاً محسوس است. از طرفی هر چه تقاضای شکل‌پذیری هدف افزایش یابد، بیشینه‌ی شکل‌پذیری دورانی تیر بیش از پیش از شکل‌پذیری کلی فاصله می‌گیرد. به علاوه دوره‌های کوتاه، تفاوت شکل‌پذیری دورانی تیر و شکل‌پذیری کلی مشهودتر است. با افزایش دوره‌ی تناوب (نرم‌تر شدن سازه) برای سطوح مختلف تقاضای شکل‌پذیری کلی، شکل‌پذیری دورانی تیر تقریباً ثابت و مستقل از دوره‌ی تناوب است. این موضوع بر روند توزیع نیازهای نیرویی و تغییرشکلی در دو حالت تحلیل CPA و NTHA ملاحظه شده است.

**واژگان کلیدی:** شکل‌پذیری دورانی، اثر مودهای بالاتر، شکل‌پذیری هدف، تحلیل بارافزون، تحلیل تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی.

## ۱. مقدمه

هم‌زمان با طرح موضوع زلزله به‌عنوان یک نیروی جانبی غیرتعین‌ی قابل توجه، بحث استفاده از انواع سیستم‌های ساختمان مقاوم در برابر بارهای ثقلی و جانبی نیز مطرح شده است. در این بین سیستم‌های متکی بر اتصالات صلب یا نیمه‌صلب بین تیر و ستون به‌عنوان یک راهکار برای تحمل مجموعه بارهای ثقلی و جانبی توسط مشارکت تمامی تیرها و ستون‌ها مطرح شده است، که در کدهای لرزه با قاب خمشی (MRF) نام‌گذاری شده است.

تجربه نشان داده است که رفتار فرا ارتجاعی سازه‌ی MRF در اثر عواملی همچون: تعداد طبقات، تعداد دهانه، شکل‌پذیری هدف، نوع نداشت ورودی، زمان نام‌گذاری شده است.

در یک تقسیم‌بندی ساده، شکل‌پذیری سیستم قاب خمشی فولادی که از این پس با SMRF شناخته می‌شود، به ۴ فرم شکل‌پذیری کلی (شکل‌پذیری طبقه‌ی بام)، شکل‌پذیری طبقه‌ی (شکل‌پذیری محلی)، شکل‌پذیری عضو (شکل‌پذیری موضعی)، و شکل‌پذیری مقطع تعریف می‌شود. شکل‌پذیری عضو معمولاً به دو شکل دورانی (سازه‌ی فولادی) و انحنایی (سازه‌ی بتنی) تعریف می‌شود. برای محاسبه‌ی تقاضای شکل‌پذیری عضو، دوران یا انحنای نهایی به‌کمک تحلیل تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی محاسبه و بر دوران یا انحنای تسلیم تقسیم می‌شود. در طراحی

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۲/۱۲/۲۴، اصلاحیه ۱۳۹۳/۷/۱۴، پذیرش ۱۳۹۳/۹/۲۴.

mgerami@semnan.ac.ir  
danesh\_f@modares.ac.ir  
n.siahpolo@mjdkh.ac.ir

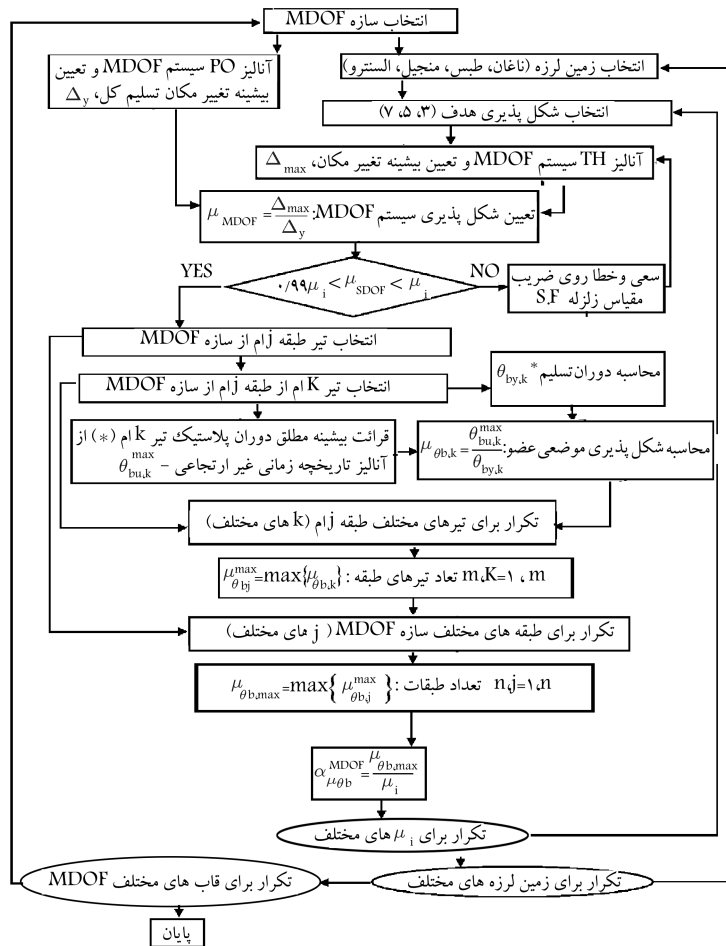
براساس عملکرد، غالباً تقاضای شکل‌پذیری با ظرفیت شکل‌پذیری عضو مقایسه می‌شود. ظرفیت شکل‌پذیری به‌کمک مطالعات آزمایشگاهی محاسبه می‌شود. در سیستم‌های چند درجه آزادی (MDOFs) ظرفیت شکل‌پذیری کلی سازه با استفاده از پاسخ کلی سیستم و یا از سیستم یک درجه آزادی معادل ( $SD-OFs$ ) قابل محاسبه است و با توجه به اینکه شکل‌پذیری کلی سیستم ارتباط مستقیم با شکل‌پذیری اعضا آن دارد، لذا برقراری ارتباط میان شکل‌پذیری موضعی به شکل‌پذیری کلی از موضوعات جالب توجهی بوده است، که فقدان پژوهش‌های علمی کافی در این خصوص، انگیزه‌ی این پژوهش بوده است. به همین جهت هدف اصلی این پژوهش، ارائه‌ی روشی برای اندازه‌گیری پیش‌بینی نیازهای لرزه‌ی موضعی این سازه‌ها با استفاده از اطلاعات مربوط به پیش‌بینی نیازهای شکل‌پذیری کلی است. در این مطالعه، ضمن مروری بر نیازهای لرزه‌ی SMRF، خصوصیات رفتاری محلی و نیازهای تغییرشکل‌المانی مورد بررسی ویژه قرار گرفته و تلاش در راستای برقراری ارتباط میان این دو صورت پذیرفته است.

تمرکز این پژوهش بر رفتار و نیازهای موضعی سازه‌های SMRF بدون کاهندگی سختی و مقاومت در خصوصیات المان و بدون در نظر گرفتن نوع رفتار اتصال بوده است. همچنین ضمن بررسی نیازهای تغییرشکل خمیری اعضا، برقراری ارتباط میان شکل‌پذیری کلی سازه و پیش‌بینی نیازهای موضعی تیرها از دیگر اهداف بنیادین این نوشتار بوده است. برای نیل به این هدف، تعداد ۳۶ قاب خمشی فولادی با شکل‌پذیری متوسط دوطبقه متناظر با ۳ سطح تقاضای شکل‌پذیری کلی (۳، ۵ و ۷) در نظر گرفته شده‌اند. برای تنظیم شکل‌پذیری قاب‌ها با مقدار از پیش تعیین شده، سعی و خطا بر ضریب مقیاس زلزله صورت گرفته است. به‌علاوه رابطه‌ی بین شکل‌پذیری دورانی تیر با شکل‌پذیری کلی نیز به‌صورت یک ضریب اصلاح پیشنهاد شده است. با استفاده از این ضریب می‌توان بدون نیاز به NTHA، پیش‌بینی دوران نهایی بحرانی‌ترین تیر را محاسبه کرد، تا به کمک آن تخمین سریعی از سطح عملکردی قابل انتظار سازه به‌دست آورد. استفاده از ضریب مذکور برای ارزیابی سازه‌های موجود یا طراحی اولیه‌ی سازه‌های جدید قابل استفاده است. از طرفی برای دست‌یابی به یک درک مناسب از ظرفیت اجزاء سازه و روند تشکیل مفاصل خمیری، نیازهای نیرویی و دورانی به کمک CPA با الگوی بارگذاری آیین‌نامه‌ی نیز محاسبه و گزارش شده است. اما برای تعیین رابطه‌ی بین شکل‌پذیری دورانی تیر و طبقه از NTHA در کنار CPA استفاده شده است. مطالعات مذکور برای پارامترهای اصلی شامل: مقادیر مختلف دوره‌ی تناوب T (قاب‌های با ارتفاع مختلف)، مقادیر متفاوت در تعداد دهانه‌ها b (قاب‌های با دهانه‌های متفاوت)، و مقادیر مختلف شکل‌پذیری هدف ( $\mu$ ) انجام و به تأثیرات آن مستقیماً در ارزیابی‌ها توجه شده است. شایان ذکر است از آنجا که در انتهای پژوهش حجم قابل توجهی از گراف‌ها به‌دست آمده است، که ارائه‌ی همگی آنها خارج از حوصله‌ی این نوشتار است، در ادامه فقط نتایج مربوط به قاب‌های ۲، ۷، ۱۵ و ۲۵ طبقه‌ی ۳ دهانه ارائه شده است.

## ۲. مروری بر ادبیات فنی

لرزم بررسی رفتار MDOFs در سازه‌های واقعی به لحاظ کیفی، مورد تأکید بسیاری از پژوهشگران بوده است. توجه به تفاوت رفتار سازه‌های واقعی MDOFs در مقایسه با فرض استفاده از سیستم یک درجه آزادی (SDOFs) معادل، یکی از محورهای مطالعات پیشین است.<sup>[۱]</sup> ارزیابی قاب‌های خمشی، تحت زمین‌لرزه‌ی نورتریج<sup>۱</sup>

نیز یکی دیگر از موارد مطالعات گذشته بوده است.<sup>[۲]</sup> همچنین اندازه‌گیری نیازهای سازه تحت اثر زمین‌لرزه‌های مختلف، مورد بررسی بعضی پژوهشگران قرار گرفته است.<sup>[۳-۶]</sup> ارتباط بین پاسخ سیستم‌های SDOFs و MDOFs برای اولین بار در سال ۱۹۷۱ مورد مطالعه قرار گرفته است.<sup>[۴]</sup> نتایج حاصل از مطالعه‌ی در سال ۱۹۹۱ بر وجود تفاوت کیفی در نتایج حاصل از نیاز مقاومت سازه‌ی MDOFs نسبت به سیستم SDOFs دلالت دارد.<sup>[۵]</sup> در پژوهش دیگری در سال ۱۹۹۲، برای تخمین رابطه میان نیازهای شکل‌پذیری موضعی و کلی سازه، بر استفاده از تحلیل استاتیکی غیرخطی تأکید و چنین نتیجه‌گیری شده است که به‌منظور احتساب مشارکت مودهای بالاتر و به علت تمرکز اتلاف انرژی در بعضی المان‌های حساس سازه لازم است روش دست‌یابی به نیاز مقاومت سیستم SDOFs مورد اصلاح قرار گیرد.<sup>[۶]</sup> در پژوهش دیگری در سال ۱۹۹۵ نشان داده شده است که به استثناء سازه‌های با دوره‌های تناوب خیلی کوتاه، پیش‌بینی نیاز شکل‌پذیری طبقه‌ی قاب MDOFs از شکل‌پذیری سیستم SDOFs معادل مود اول بیشتر است.<sup>[۷]</sup> در مطالعه‌ی دیگری نیز نشان داده شده است که برای سطوح شکل‌پذیری زیاد، نیاز شکل‌پذیری جابه‌جایی در بسیاری از طبقات سازه‌ی MDOFs می‌تواند نسبت به شکل‌پذیری سیستم SDOFs معادل، افزایش قابل توجهی داشته باشد. همچنین در مطالعه‌ی مذکور نتیجه گرفته شده است که پایین‌ترین طبقه در اغلب سازه‌ها، طبقه‌ی بحرانی است. هر چند که طبقات بالاتر نیز می‌توانند در اثر دخالت مودهای بالاتر، مقادیر نیاز شکل‌پذیری بیشتری از خود نشان دهند.<sup>[۸]</sup> برخی پژوهشگران (۲۰۰۲) نیز رابطه‌ی را برای محاسبه‌ی طیف دریافت تعریف کرده و نشان داده‌اند که ضوابط طیف پاسخ و مود اصلی تیر برشی را می‌توان با یکدیگر ترکیب کرد و به کمک آن دریافت طبقه‌ی را با خطای  $\pm 10\%$  برای قاب‌های برشی با دوره‌ی تناوب اصلی کمتر از ۲ ثانیه در اثر زلزله‌ی نزدیک گسل محاسبه کرد.<sup>[۹]</sup> همچنین در پژوهش دیگری (۲۰۰۰) ضمن مطالعه‌ی نیازهای فرا ارتجاعی سیستم با دو ابزار تحلیل استاتیکی غیرخطی (بارافزون) و تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی در یک هدف اولیه، ارتباط بین نیاز دریافت طبقه‌ی با نیاز دریافت خمیری طبقه به چالش کشیده شده و در هدف دوم ارتباط بین نیازهای کلی، طبقه‌ی موضعی (در سطح المان) مطرح شده است.<sup>[۱۰، ۱۱]</sup> در مطالعه‌ی دیگری (۲۰۰۴) نیز به مطالعه‌ی پارامترهای نیاز مهندسی برای کمیته‌سازی نیازهای لرزه‌ی پرداخته شده است.<sup>[۱۲]</sup> پژوهشگران دیگری (۲۰۱۰) نیز برای تخمین نیازهای غیرارتجاعی سیستم SMRF به منظور اعمال اثر مودهای بالاتر، روش بارافزون تطبیقی براساس نیروی برش طبقه یا SSAP را پیشنهاد کرده و نتایج پژوهش ایشان نشان داده است که دقت استفاده از این روش در تخمین پیش‌بینی و میانگین دریافت بین طبقه‌ی هم‌زمان با افزایش تأثیر مودهای بالاتر افزایش می‌یابد.<sup>[۱۳]</sup> همچنین مطالعات پژوهشگران دیگری (۲۰۱۲) نشان داده است که روش بارافزون مرسوم فقط برای سازه‌های کوتاه مرتبه، که در مود اول نوسان می‌کنند، به نتایج قابل قبولی می‌انجامد. در حالی که برای سازه‌های نامنظمی در سختی در ارتفاع سازه، به دلیل مشارکت مودهای بالاتر در پاسخ نهایی سازه استفاده از این روش نتایج درستی را به دنبال ندارد.<sup>[۱۴]</sup> بنابراین مرور اجمالی ادبیات فنی در سال‌های اخیر نشان داده است که بیشتر تمرکز مطالعات انجام‌شده بر نیازهای شکل‌پذیری طبقه‌ی تمرکز داشته است. همچنین موضوع تقریب نیاز شکل‌پذیری عضو به کمک شکل‌پذیری کلی و طبقه‌ی کمتر مورد توجه بوده است. همچنین محاسبه‌ی نیاز شکل‌پذیری غیرارتجاعی سازه‌ی MDOFs، اثرات مودهای بالاتر، تعداد دهانه، تعداد طبقات، زمان تناوب، و شکل‌پذیری هدف کمتر مورد توجه قرار گرفته است. اینها همه عواملی هستند که انگیزه‌ی انجام این مطالعه را تعریف کرده است.



شکل ۱. فلوچارت محاسبه ضریب اصلاح  $\alpha_{\mu_{\theta b}}^{MDOF}$  جهت تخمین بیشینه نیاز شکل پذیری دورانی تیر.

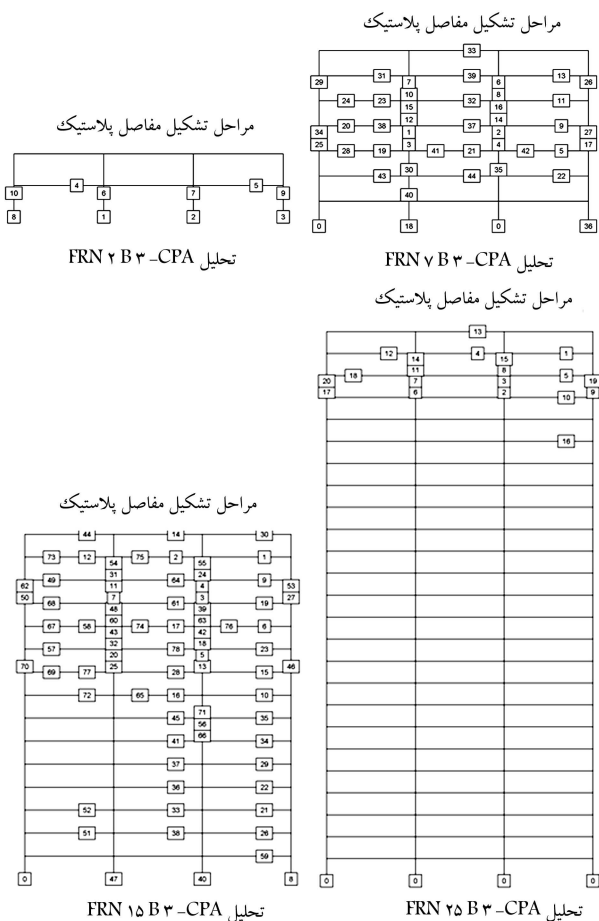
### ۳. معرفی مدل‌ها و شتاب‌نگاشت‌ها

برای انجام پژوهش، استفاده از قاب‌های دوبعدی فولادی با سیستم قاب خمشی در تعداد طبقات ۱، ۲، ۳، ۴، ۵، ۷، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ و با تعداد دهانه‌های ۱، ۲، ۳ و ۵ انتخاب شده است. جزئیات طراحی مدل‌ها در پژوهش گرامی (۲۰۰۲) [۱] قابل پی‌گیری است. طراحی هر یک از قاب‌های مذکور براساس ضوابط طراحی آیین‌نامه‌ی فولاد ایران (مبحث ۱۰ مقررات ملی ساختمان) و بارگذاری ثقلی آن براساس مبحث ۶ مقررات ملی ساختمان و بارگذاری لرزه‌ی بر مبنای استاندارد ۲۸۰۰ ایران (ویرایش سوم) صورت پذیرفته است. برای مود اول و کلیه مودهایی که ضریب مشارکت جرمی جمع‌ی آنها بیشتر از ۹۵٪ است، میرایی رایلی معادل ۵٪ تعریف شده است. رفتار چرخه‌ی تنش - کرنش فولاد به صورتی دوخطی با سخت‌شدگی کرنش ۳٪ مدل‌سازی شده است. جهت تعیین پاسخ دینامیکی غیرارتجاعی سازه‌ها از زمین‌لرزه‌های طیس، ناغان، منجیل و السنترو استفاده کرده و رکورد شتاب‌نگاشت آنها توسط آنالیز تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی و با نرم‌افزار Drain۲Dx [۱۶] [۱۵] به سازه‌های مورد مطالعه اعمال شده است. برای طراحی سازه‌های مورد مطالعه از نرم‌افزار ETABS ۹.۵.۰ استفاده شده و در این خصوص آیین‌نامه‌ی AISC-ASD ۸۹ مد نظر قرار گرفته است. [۱۷] این تذکر لازم است از آنجا که تراز شکل‌پذیری قاب‌ها متوسط فرض شده‌اند، لذا نیازی به کنترل ضابطه‌ی «تیر ضعیف - ستون قوی» نیست، اما برای بررسی تأثیر پذیری مودهای

بالتر در این ضابطه، در کلیه قاب‌ها ضابطه‌ی مذکور رعایت شده است. به منظور پردازش رکورد‌های مورد استفاده و ترسیم طیف‌های پاسخ کشسان و غیرکشسان و سایر پارامترهای جنبش نیرومند زمین، از نرم‌افزار Seismosignal استفاده شده است. [۱۸]

### ۴. روش پژوهش

طبق تعریف، نیاز شکل‌پذیری محلی تیر عبارت از بیشینه‌ی دوران انتهایی تیر به دست آمده از تحلیل تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی به دوران تسلیم تیر است. پس از محاسبه‌ی بیشینه‌ی ضریب شکل‌پذیری محلی برای تیرهای بحرانی کلیه مدل‌ها، ضریب تخمین بیشینه‌ی شکل‌پذیری موضعی تیر،  $\alpha_{\mu_{\theta b}}^{MDOF}$  یا  $\alpha_{\mu_{\theta b}}^{SDOF}$  برای کلیه مدل‌ها محاسبه شده است. این ضریب ارتباط‌دهنده‌ی بیشینه‌ی ضریب شکل‌پذیری دورانی تیر به ضریب شکل‌پذیری کلی بوده و وابسته به دوره‌ی تناوب، تقاضای شکل‌پذیری، و تعداد دهانه‌ی قاب تعریف شده است. برای آشنایی بهتر و درک عمیق‌تر از مراحل محاسبه‌ی بیشینه‌ی شکل‌پذیری موضعی تیر یک قاب  $(\mu_{\theta b}^{MDOF})$  و ضریب اصلاح جهت تخمین بیشینه‌ی شکل‌پذیری موضعی تیر یک قاب از شکل‌پذیری هدف  $(\alpha_{\mu_{\theta b}}^{MDOF})$ ، فلوچارت مورد استفاده در شکل ۱ نمایش داده شده است. در این الگوریتم، براساس نتایج به دست آمده از انجام تحلیل بارافزون و تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی قاب MDOFs پایه‌ریزی شده



شکل ۲. ترتیب ایجاد مفاصل خمیری در اثر CPA در قاب‌های ۲، ۷، ۱۵ و ۲۵ طبقه‌ی ۳ دهانه.

مودهای بالاتر در نیازهای نیرویی طبقات فوقانی در ساختمان‌های بلند است.

## ۶. بیشینه‌ی نیاز موضعی دوران خمیری المان‌ها در تحلیل بارافزون (CPA)

نیاز تغییرشکل در سطح اعضاء سازه‌ی توسط دوران در دو سطح کشسان و خمیری تعریف می‌شود. البته مرز بین این دو نوع دوران توسط دوران تسلیم قابل تشخیص است. به عبارت ساده‌تر، دوران خمیری مقطع از یک عضو سازه‌ی  $(\theta_p)$ ، مطابق رابطه‌ی ۱ برابر است با تفاصل بیشینه‌ی دوران نهایی المان  $(\theta_u)$ ، از دوران تسلیم المان  $(\theta_y)$ :

$$\theta_p = \theta_u - \theta_y \quad (1)$$

که در آن،  $\theta_u$  بیشینه‌ی نیاز دوران مقطع است که با استفاده از تحلیل بارافزون یا تحلیل دینامیکی تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی محاسبه می‌شود و  $\theta_y$  دوران تسلیم مقطع عضو است. براساس پیشنهاد آیین‌نامه‌ی FEMA ۳۵۶ برای سازه‌های فولادی، اگر نقطه‌ی عطف تغییرشکل سازه در میانه‌ی ارتفاع سازه فرض شود، رابطه‌ی پیشنهادی محاسبه‌ی دوران تسلیم تیر به صورت رابطه‌ی ۲ است:

$$\theta_y = \frac{M_y^T L}{3(M_y + M_T) EI} \quad (2)$$

است. از آنجا که نحوه‌ی انتخاب رکوردهای زمین‌لرزه می‌تواند تأثیر زیادی در نتایج حاصل از مطالعات آماری پاسخ‌های دینامیکی داشته باشد، در این پژوهش از روش پیشنهادی تنظیم شکل‌پذیری کلی سازه‌ی MDOFs با شکل‌پذیری هدف، از طریق سعی و خطا روی ضریب مقیاس زمین‌لرزه استفاده شده است. بدین منظور برای هر سازه و رکورد انتخابی، با چندین سعی و خطا بر ضریب مقیاس زلزله، بیشینه‌ی تغییرمکان بام به نحوی محاسبه شده است که شکل‌پذیری کلی (بام) با شکل‌پذیری هدف از پیش تعریف شده یکی شود. در مطالعات پژوهشگران پیشین، عموماً از روش تساوی مقاومت تسلیم روش بارافزون و تاریخچه‌ی زمانی برای دست‌یابی به سطح شکل‌پذیری مشخص استفاده شده است. این تذکر لازم است که در این نوشتار از آنجا که پارامترهای مرتبط با تحلیل تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی به صورت نسبت نیازهای MDOF به SDOF بیان شده‌اند، لذا روش مقیاس‌سازی پیشنهادی به نوعی تأثیر محتوای رکورد زلزله را کم‌رنگ‌تر می‌سازد. در مجموع برای تنظیم شکل‌پذیری هدف، ۳۰۲۴ تحلیل تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی انجام شده است. برای بررسی روند تشکیل مفاصل خمیری، توزیع نیازهای نیرویی و تغییرشکل کلیه‌ی مدل‌ها با کمک روش بارافزون و براساس الگوی بارگذاری آیین‌نامه‌ی (استاندارد ۲۸۰۰ ویرایش ۳) تحلیل شده‌اند. استفاده از روش بارافزون در این پژوهش فقط برای آشنایی بهتر با روند غیرخطی شدن قاب‌های خمشی فولادی است و نتایج ارائه‌شده از منظر کیفی قابل رهگیری هستند. بدیهی است که مزیت استفاده از روش بارافزون، سرعت در تحلیل و سادگی در فرضیات مدل‌سازی است. اما برای دست‌یابی به رفتار واقعی سازه، لازم است تحلیل تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی انجام پذیرد.

## ۵. روند تشکیل مفصل خمیری در تحلیل بارافزون (CPA)

هدف اصلی و رایج در طراحی لرزه‌ی سازه‌های با SMRFs، تعیین مقاومت نسبی اعضا به گونه‌ی است که مفاصل خمیری عمدتاً در تیرها شکل گرفته و حتی‌الامکان از تشکیل مفاصل خمیری در ستون‌ها جلوگیری به عمل آید. تجربه نشان داده است که در صورت ممانعت از تشکیل مفاصل خمیری در ستون‌ها، هیچ اطمینانی وجود نخواهد داشت که کل انرژی زلزله طی یک زمین‌لرزه قوی از طریق ایجاد مفاصل خمیری در تیرها مستهلک شود. از طرفی در بسیاری از سازه‌های طرح‌شده، مشاهده شده است که هسته‌ی اتصال قبل از اینکه تیرها به مقاومت تسلیم خود برسند، در برش جاری شده است. به منظور آشنایی با روند تشکیل مفاصل خمیری، تحلیل CPA بر روی قاب‌های مورد استفاده در این بخش از پژوهش انجام شده است. کلیه‌ی مدل‌ها تا رسیدن به مکانیزم پوش داده شده‌اند (این مقدار تقریباً معادل زاویه‌ی دریافت کلی ۱۰٪ است). در شکل ۲، ترتیب و توالی تشکیل مفاصل خمیری در تیرها و ستون‌ها برای قاب‌های ۲، ۷، ۱۵ و ۲۵ طبقه‌ی ۳ دهانه نمایش داده شده است. نتایج مربوط به تحلیل قاب‌ها نشان می‌دهد که کنترل ضابطه‌ی «تیر ضعیف - ستون قوی» مانع از شکل‌گیری مفاصل خمیری در ستون‌ها نشده است. با افزایش تعداد طبقات سازه، روند خمیری شدن به تیرهای مستقر در طبقات نیز سرایت کرده است، که این موضوع مؤید تأثیرپذیری نیازهای نیرویی اجزاء قاب از ارتفاع سازه است. همچنین افزایش تعداد طبقات باعث شده است تا تجمع تشکیل مفاصل خمیری در ستون‌های میانی سازه واقع شود و نیازهای نیرویی تحمیل‌شده به ستون‌های کناری کاهش یابد. از طرفی با افزایش تعداد طبقات، تجمع تشکیل مفاصل خمیری به سمت طبقات فوقانی سوق داده شده است، که خود مؤید تأثیر

نیازهای بیشینه به طبقات فوقانی قابل توجه است. همچنین با افزایش تعداد طبقات و تعداد دهانه‌ها، دوران خمیری ستون‌های میانی به شکل قابل توجهی افزایش می‌یابد. از طرفی در ساختمان‌های کوتاه مرتبه (تا ۴ طبقه)، دوران خمیری بیشتر در طبقات تحتانی سازه تمرکز داشته و نیازهای ارزیابی شده در تیرهای پیرامونی سازه بیشتر از تیرهای مستقر در دهانه‌های میانی است. نکته‌ی دیگر اینکه هم‌زمان با افزایش تعداد دهانه، مشارکت تیرهای کناری در دوران خمیری اعضاء متصل به گره افزایش می‌یابد. به عبارتی افزایش تعداد دهانه باعث شده است که نیاز تغییرشکل دوران خمیری توزیع شود. همچنین به دلیل تأثیر بارهای ثقلی، نیاز دوران خمیری به صورت قرینه در تیرها و ستون‌های سازه شکل نمی‌گیرد، که باعث افزایش این نیازها در یک سمت و کاهش آنها در طرف دیگر عضو می‌شود. از طرفی در طبقات تحتانی، نیاز دوران خمیری در پای ستون است، اما با حرکت به سمت طبقات فوقانی، موقعیت قرارگیری بیشینه‌ی نیاز دوران خمیری به سمت بالای ستون حرکت می‌کند. در نهایت اینکه در مدل‌های با ارتفاع کم، بیشتر تیرها تسلیم و وارد ناحیه‌ی خمیری شده‌اند، در حالی که با افزایش تعداد طبقات، تعداد تیرهای تسلیم شده کاهش یافته است.

## ۷. نیاز دوران خمیری موضعی المان‌ها بر حسب تغییرات زاویه‌ی دریافت طبقه در اثر تحلیل بارافزون (CPA)

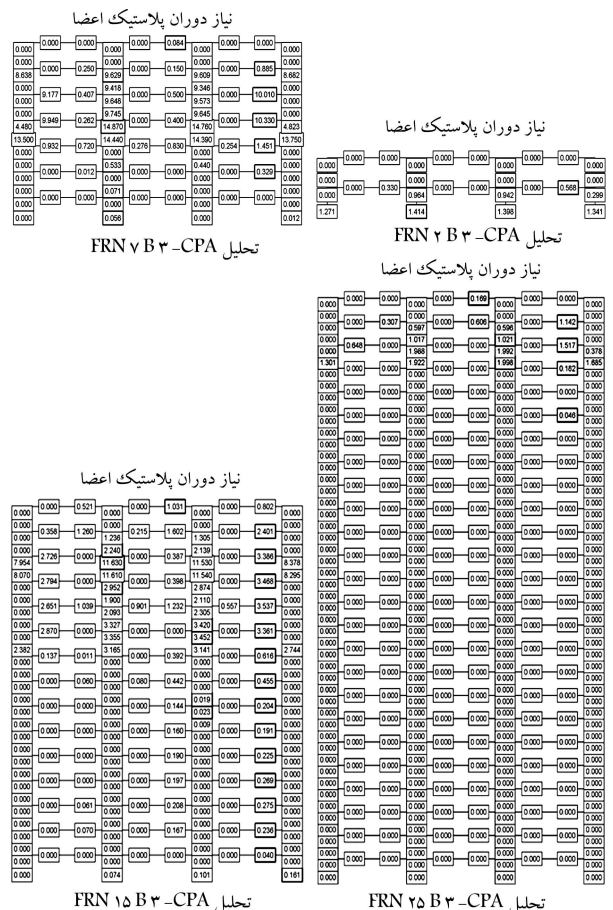
محاسبه‌ی نیازهای سازه در برابر بارگذاری قائم و جانبی به دو فرم نیرویی و تغییرشکل تعریف می‌شود. نیاز نیرویی در سطح المان (مقطع عضو) تعریف می‌شود، در حالی که نیاز تغییرشکل در ۳ سطح کلی، طبقه‌یی و عضو قابل تعریف است. از آنجا که نیاز تغییرشکل کلی وابسته به نیاز تغییرشکل طبقه و المان است، به دنبال آن شکل‌پذیری کلی سازه نیز متأثر از شکل‌پذیری طبقه‌یی و شکل‌پذیری عضو است. بدین ترتیب برای ایجاد ارتباط بین نیاز تغییرشکل المان و نیاز تغییرشکل کلی، ابتدا باید درک صحیحی از ارتباط بین نیاز تغییرشکل طبقه‌یی و المان به دست آورد.

بدین منظور در این بخش از پژوهش، در ابتدا با انجام یک تحلیل بارافزون، مقادیر تغییرشکل المان و زاویه‌ی دریافت بین طبقه‌یی (دریافت طبقه‌یی همپایه شده نسبت به ارتفاع طبقه) محاسبه شده است. سازه تا دریافت سراسری ۴٪ پوش داده شده است. سپس مقادیر تغییرشکل خمیری المان در برابر زاویه‌ی دریافت ترسیم شده است. از آنجا که برای هر المان دو گره در ابتدا و انتهای آن تعریف شده است، بنابراین بیشینه‌ی تغییرشکل دو گره به عنوان بیشینه‌ی دوران خمیری گره تعریف شده است. به منظور قابلیت شناسایی موقعیت هر یک از نتایج ارائه شده برای هر گره از المان، یک نام‌گذاری تعریف شده است، که مشخصات و جزئیات نام‌گذاری برای تیرها و ستون‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. به عنوان نمونه، منظور از N\B\I، المان تیر است که در طبقه‌ی اول با شماره‌ی ۱ و گره‌ی متناظر با بیشینه‌ی دوران در سمت چپ تیر قرار گرفته است.

شکل ۴، مقادیر پوش نیازهای دوران خمیری اعضاء را در دریافت سراسری ۴٪ برای مدل‌های ۲، ۷، ۱۵ و ۲۵ طبقه‌ی ۳ دهانه نمایش می‌دهد. این منحنی‌ها نشان می‌دهند که ارتباط میان تغییرشکل خمیری در پای ستون و مقادیر دریافت طبقه، نسبت به نوع مدل در تحلیل حساس هستند. با افزایش تعداد طبقات در سازه، تغییرشکل‌های خمیری به سمت طبقات فوقانی حرکت می‌کنند، که این موضوع به جهت تأثیر موده‌های بالاتر است و فقط المان‌های مستقر در طبقات فوقانی هستند که به تسلیم می‌رسند و از سهم دوران خمیری طبقات تحتانی سازه به شدت کاسته

که در آن،  $\theta_y$  دوران تسلیم،  $M_T$  بیشینه‌ی لنگر انتهای دیگر عضو ( $M_T < M_y$ )،  $L$  طول عضو،  $E$  مدول کشسانی،  $I$  ممان اینرسی تیر حول محور قوی، و  $M_y$  لنگر تسلیم است، که از طریق حاصل ضرب اساس مقطع خمیری عضو ( $Z$ ) در تنش تسلیم فولاد ( $F_y$ ) محاسبه می‌شود. در آیین‌نامه‌ی FEMA ۳۵۶ فرض شده است که  $M_T$  با  $M_y$  مساوی است. این فرض برای تیرهای مستقر در قاب خمشی صحیح و منطقی است. البته این تذکر لازم است که رابطه‌ی ۲ در خلال تحلیل تاریخیچه‌ی زمانی غیرخطی به مقادیر غیرمحافظة کارانه‌یی برای نیاز شکل‌پذیری می‌انجامد. چنین انتظار می‌رود که اختلاف اساسی پاسخ‌ها بین مدل‌های با تعداد دهانه‌ها و طبقات مختلف در سطح اعضاء رخ دهد، جایی که توزیع نیازها بین تیرها و ستون‌ها می‌تواند بسته به مقاومت نسبی اعضایی که در یک گره به هم می‌رسند، تغییرات عمده‌یی نسبت به یکدیگر داشته باشند. مقادیر (بیشینه‌ی مقادیر به دست آمده در آنالیز) مربوط به نیازهای تغییرشکل خمیری اعضاء که از یک آنالیز بارافزون در دریافت سراسری ۴٪ برای سازه‌های مورد مطالعه در این پژوهش به دست آمده‌اند و نتایج هر یک به تفکیک در شکل ۳ نمایش داده شده است. اعدادی که دور آنها کادر پرنگ تر ترسیم شده است، نماینده‌ی بیشینه‌ی نیاز دوران خمیری ستون و تیر هستند.

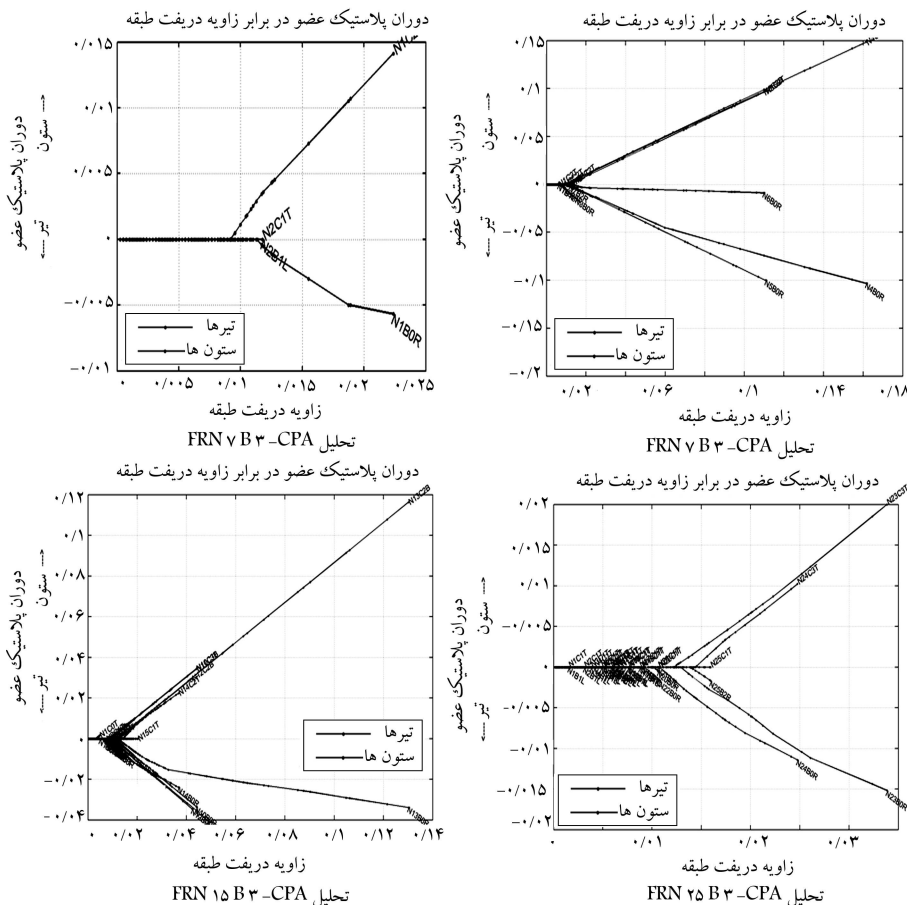
نتایج به دست آمده از بررسی دوران خمیری هر یک از اعضاء سازه‌یی نشان می‌دهد که با افزایش تعداد طبقات، تجمع نیازهای دوران خمیری المان در طبقات فوقانی سازه قرار می‌گیرند، که این موضوع به دلیل مشارکت موده‌های بالاتر در انتقال



شکل ۳. بیشینه‌ی نیاز موضعی دوران خمیری المان‌ها تحت آنالیز بارافزون در قاب‌های ۲، ۷، ۱۵ و ۲۵ طبقه‌ی ۳ دهانه در دریافت سراسری ۴٪ (کلیه‌ی مقادیر در ۱۰۰ ضرب شده‌اند).

جدول ۱. شناسایی موقعیت گره‌های تیر و ستون که دوران خمیری آنها گزارش شده است.

شناسایی تیر		شناسایی ستون	
N	i	B	j
طبقه	شماره‌ی طبقه‌ی تیر انتخابی	تیر	شماره‌ی المان تیر
NiBjP			
شناسایی تیر		شناسایی ستون	
N	i	C	j
طبقه	شماره‌ی طبقه‌ی ستون انتخابی	ستون	شماره‌ی المان ستون
NiCjP			
P	L	P	T
چپ	موقعیت	بالا	موقعیت
R	R	B	B
راست		پایین	



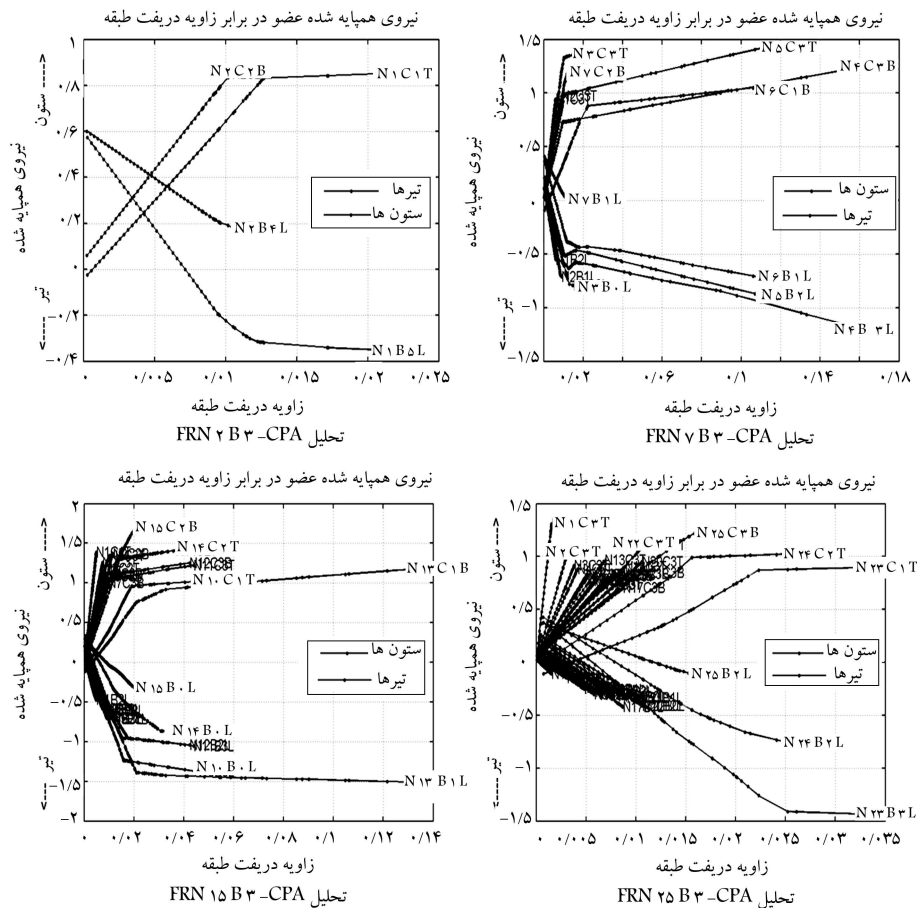
شکل ۴. نیاز دوران خمیری موضعی المان‌ها (به تفکیک برای ستون‌ها ↑ و تیرهای ↓ بحرانی) بر حسب تغییرات زاویه‌ی دررفت طبقه‌ی مربوطه، تحت آنالیز بارافزون CPA.

تسلیم مربوط) بر حسب تابعی از زاویه‌ی دررفت طبقه برای بحرانی‌ترین تیر و ستون مستقر در طبقه‌ی موردنظر محاسبه شده است. به‌طور نمونه نتایج به‌دست‌آمده برای قاب‌های ۲، ۷، ۱۵ و ۲۵ طبقه‌ی ۳ دهانه در شکل ۵ نمایش داده شده‌اند. در این شکل‌ها نیازهای لنگر برای مقطع بالا یا پایین ستون (با توجه به موقعیت قرارگیری نیازهای لنگر بحرانی) و بحرانی‌ترین گره تیر مستقر در محل اتصال به قسمت فوقانی ستون ارائه شده است. کلیه‌ی نتایج برای دررفت سراسری ۴٪ به کمک تحلیل بارافزون ارائه شده‌اند. در مدل دو طبقه، نیازهای نیرویی هم‌پایه‌شده‌ی ستون‌ها در تعداد دهانه‌های مختلف نزدیک به هم برآورد شده است. از طرفی نیاز نیرویی هر دو ستون مستقر در طبقات اول و دوم از یک مقدار دررفت مشخص به بعد ثابت باقی مانده است. درخصوص تیرها نیز با افزایش زاویه‌ی دررفت بین طبقه‌ی، نسبت نیاز هم‌پایه‌شده افزایش یافته است. در مدل ۷ طبقه، وقوع تسلیم در ستون در دررفت

می‌شود. همچنین نتایج نشان می‌دهند که با افزایش ارتفاع سازه و هم‌زمان افزایش تعداد دهانه‌های قاب، بیشینه‌ی دوران خمیری ستون و تیر در یک طبقه‌ی مشابه روی می‌دهد. به‌عبارتی دیگر، توزیع تغییرشکل خمیری در یک طبقه‌ی خاص قرار می‌گیرد و بیشینه‌ی دوران خمیری تیر و ستون نیز فقط در یک طبقه تجمع می‌کند.

## ۸. نیاز لنگر اعضاء بر حسب تغییرات زاویه‌ی دررفت طبقه تحت آنالیز بارافزون CPA

در این بخش از پژوهش ارتباط بین نیازهای نیرویی (لنگر خمشی) و دررفت بین طبقه‌ی بررسی شده است. به عبارتی تغییرات نیروهای اعضا (نرمال‌شده به مقادیر



شکل ۵. نیاز لنگر اعضا (به تفکیک برای ستون‌ها ↑ و تیرهای ↓ بحرانی) بر حسب تغییرات زاویه‌ی دررفت طبقه‌ی مربوطه، تحت آنالیز بارافزون CPA.

هدف، تعریف ضریب اصلاحی است که به کمک آن بتوان پیشینه‌ی شکل‌پذیری در سطح المان را به کمک ضریب شکل‌پذیری سازی SDOFs معادل محاسبه کرد. به این جهت هدف اصلی در این بخش ارزیابی ضریب نیاز شکل‌پذیری موضعی از نوع دورانی برای المان تیر در سطوح مختلف شکل‌پذیری هدف است. در این خصوص پیشینه‌ی ضریب شکل‌پذیری دورانی تیر برای بحرانی‌ترین طبقه و در مدل‌های با تعداد طبقات ۲، ۷، ۱۵ و ۲۵ طبقه‌ی ۳ دهانه محاسبه شده است.

از آنجا که نیازهای طبقه‌ی می‌توانند منعکس‌کننده‌ی رفتار المان‌های آن طبقه باشند، منطقی است که انتظار داشته باشیم که بین نیازهای محلی و نیازهای طبقه‌ی ارتباط منطقی وجود داشته باشد. چنین به نظر می‌رسد که نیاز drift بین طبقه‌ی قاب‌های خمشی، که بر حسب زاویه‌ی drift طبقه  $(\delta/h)$  (که  $\delta$  دررفت بین طبقه‌ی  $h$  ارتفاع طبقه است) بیان می‌شود، بهترین معیار عملکرد در سطح طبقه‌ی است. زاویه‌ی drift طبقه می‌تواند یک پارامتر سراسری باشد، در صورتی که به زاویه‌ی drift بام و بنابراین به نیاز تغییرمکانی طیفی ربط داده شود، همچنین می‌تواند یک پارامتر موضعی باشد، چرا که تخمین خوبی از نیازهای تغییرشکل و نیروی اعضا ارائه می‌دهد. در مقابل منظور از نیازهای تغییرشکلی تحمیل شده به المان‌های هر طبقه (بحرانی‌ترین تیر و ستون هر طبقه)، دوران خمیری هر المان در مقطع بحرانی آن است، که از تحلیل تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی به دست می‌آید. برای محاسبه‌ی ضریب شکل‌پذیری دورانی تیر، پیشینه‌ی دوران ایجادشده در مقطع بحرانی تیر در هر طبقه با  $\theta_{b,i,k}^{max}$  تعریف شده است، جایی که اندیس  $k$  معرف شماره‌ی تیر بحرانی در هر طبقه است. بدین ترتیب ضریب شکل‌پذیری دورانی برای

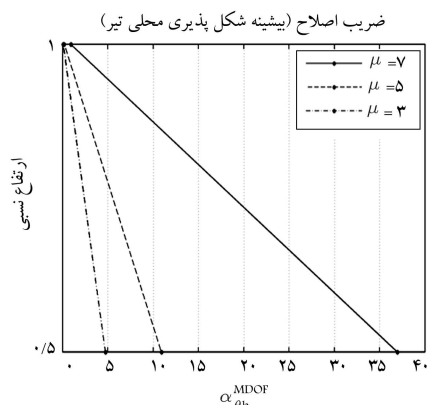
کمتری نسبت به تیر مشاهده شده است. از طرفی نیاز لنگر خمشی تسلیم هم‌پایه شده در ستون به مراتب بیشتر از تیرهاست. با افزایش تعداد طبقات در سازه‌ی ۱۵ طبقه نیز نیاز نیرویی ستون‌ها به مراتب بیشتر از تیرهاست به نحوی که تعداد قابل توجهی از ستون‌ها در ترازهای مختلف در زاویه‌ی دررفت کمتری تسلیم شده‌اند. این در حالی است که در این سازه فقط دو تیر از طبقات بالای سازه تسلیم شده‌اند. بیشتر بودن نیاز نیرویی ستون‌ها نسبت به تیرها در سازه‌ی ۲۵ طبقه نیز مشهود است، اما نکته‌ی قابل ذکر این است که در سازه‌ی مذکور تعداد ستون‌های تسلیم شده نسبت به مدل‌های قبلی کمتر بوده و در آن فقط یک تیر تسلیم شده است.

## ۹. تغییرات پیشینه‌ی نیاز شکل‌پذیری موضعی تیرها

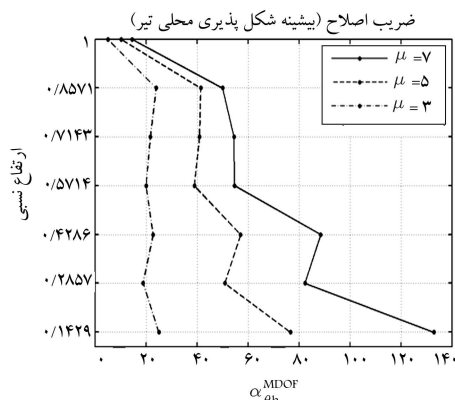
### $(\mu_{\theta b}^{MDOF})$ در اثر NTHA

سومین سطح شکل‌پذیری در سازه، شکل‌پذیری المان است، که اصطلاحاً به شکل‌پذیری موضعی (دورانی) معروف است. این شکل‌پذیری در سازه‌های قابی شکل برای تیرها و ستون‌های هر طبقه به طور مجزا قابل محاسبه است. به عبارت ساده‌تر ضریب شکل‌پذیری دورانی وابسته به پیشینه‌ی دوران محاسبه شده در تیر یا ستون متأثر از تحلیل تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی (NTHA) است.

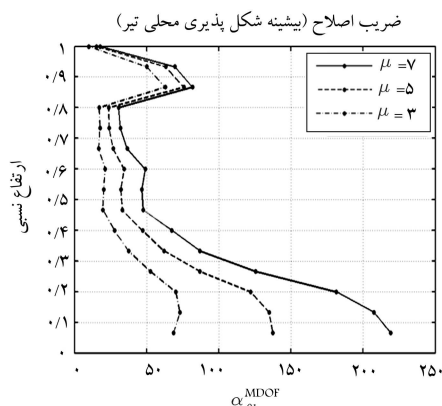
یکی دیگر از موارد قابل بحث، ایجاد یک ارتباط ساده و منطقی بین ضریب شکل‌پذیری موضعی با شکل‌پذیری انتقالی سازی SDOFs معادل است. در حقیقت



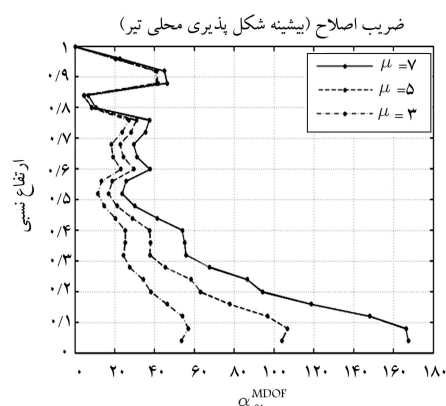
تحلیل تاریخچه زمانی غیر خطی قاب ۲ B ۳ FRN، مقادیر میانگین



تحلیل تاریخچه زمانی غیر خطی قاب ۳ B ۷ FRN، مقادیر میانگین



تحلیل تاریخچه زمانی غیر خطی قاب ۳ B ۱۵ FRN، مقادیر میانگین



تحلیل تاریخچه زمانی غیر خطی قاب ۳ B ۲۵ FRN، مقادیر میانگین

شکل ۶. تغییرات بیشینه‌ی نیاز شکل‌پذیری موضعی تیرهای هر طبقه ( $\mu_{\theta_b}^{MDOF}$ ) بر حسب ارتفاع نسبی.

تیر و ستون، روند توزیع نیاز شکل‌پذیری از حالت یکنواخت خارج و بعضاً به سمت طبقات فوقانی سازه متمایل می‌شود.

از طرفی همچنان بیشینه‌ی نیاز شکل‌پذیری دورانی، در طبقات پایین است و با حرکت به سمت طبقات فوقانی، اختلاف بین مقادیر نیاز شکل‌پذیری دورانی برای سطوح مختلف شکل‌پذیری هدف کاهش می‌یابد و مقادیر نیاز شکل‌پذیری دورانی در طبقات فوقانی به مراتب کمتر از طبقات پایین است.

از آنجا که ضریب شکل‌پذیری می‌تواند نماینده‌ی تغییر مکان یا دوران سازه باشد، در این پژوهش ضریب شکل‌پذیری انتقالی سازه‌ی SDOFs معادل و بیشینه‌ی ضریب شکل‌پذیری دورانی تیر در بحرانی‌ترین طبقه‌ی سازه‌ی MDOFs به کمک ضریب اصلاح  $\alpha_{\mu_{\theta_b}}^{MDOF}$  مرتبط شده‌اند. در حقیقت، ضریب اصلاح  $\alpha_{\mu_{\theta_b}}$  نسبت بیشینه‌ی ضریب شکل‌پذیری دورانی MDOFs به مقدار متناظر حاصل از تحلیل سازه‌ی SDOFs معادل (همان شکل‌پذیری هدف) است. بدین منظور تغییرات این ضریب در شکل ۷، در برابر زمان تناوب ارائه شده است. این تذکر لازم است که در ارائه‌ی این ضریب، نتایج مربوط به قاب‌های با تعداد دهانه‌های ۱، ۲، ۳ و ۵ مد نظر قرار گرفته است.

با استناد به شکل‌های مذکور، روند تغییرات  $\alpha_{\mu_{\theta_b}}^{MDOF}$  برای تعداد دهانه‌های مختلفی تا دوره‌ی تناوب نزدیک به ۲/۶ ثانیه به‌صورت افزایشی است. بیشینه‌ی این ضریب در دوره‌ی تناوب ۲/۶ ثانیه برای انواع دهانه‌های مختلف ایجاد شده است (به‌جز قاب تک‌دهانه). پس از این دوره‌ی تناوب، روند تغییرات  $\alpha_{\mu_{\theta_b}}^{MDOF}$  در برابر دوره‌ی تناوب ابتدا کاهش آنی و سپس تقریباً با شیب ملایم کاهش می‌یابد. در واقع

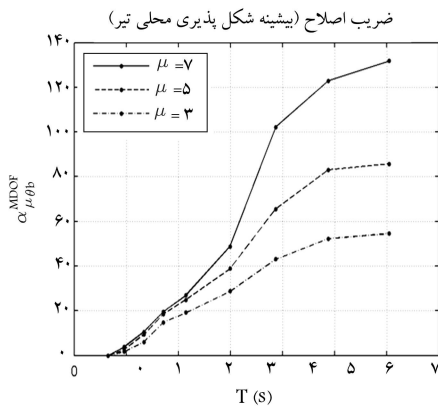
تیر از رابطه‌ی ۳ به‌دست می‌آید:

$$\mu_{\theta_b, k} = \frac{\theta_{bu, k}^{max}}{\theta_{b, y, k}} \quad (3)$$

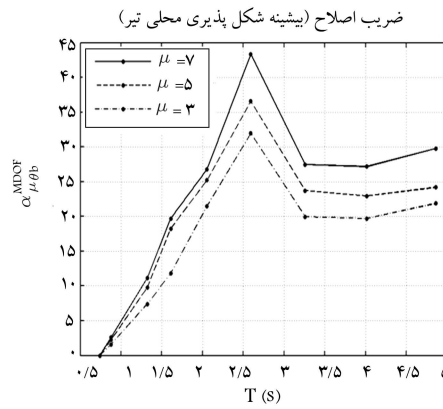
یادآور می‌شویم که  $\theta_{b, y, k}$  دوران تسلیم تیر است، که با استفاده از رابطه‌ی ۲ به‌دست می‌آید. در ادامه، میانگین توزیع شکل‌پذیری دورانی تیر در ارتفاع سازه برای مدل‌های این پژوهش در شکل ۶ ارائه شده است. محور افقی در این نمودارها، بیشینه‌ی نیاز شکل‌پذیری تیر در طبقه است، که از رابطه‌ی ۳ محاسبه شده است. ارزیابی نمودارها نشان می‌دهد که با افزایش شکل‌پذیری هدف، مقدار نیاز شکل‌پذیری دورانی برای تمامی مدل‌ها (با تعداد طبقات مختلف) در تراز هر طبقه افزایش می‌یابد. از طرفی مقادیر شکل‌پذیری المان به مراتب بزرگ‌تر از ضریب شکل‌پذیری کلی است. مثلاً برای شکل‌پذیری هدف مساوی ۷، بیشینه‌ی  $\mu_{\theta_b}^{MDOF}$  مربوط به قاب ۲۰ طبقه است، که نزدیک به ۲۲۰ برآورد شده است.

با حرکت به سمت طبقات فوقانی سازه، از مقدار  $\mu_{\theta_b}^{MDOF}$  کاسته می‌شود. اما همچنان تجمع بیشینه‌ی نیازهای دورانی تیر در طبقات پایین سازه قرار دارد. این موضوع به این صورت قابل توجیه است که در سازه‌های با دوره‌های تناوب کم، مود رفتار جانبی آنها از مود اصلی (مود اول ارتعاشی) تبعیت می‌کند. بنابراین تجمع نیازهای تغییرشکلی در تراز طبقات پایینی سازه قرار دارد. به عبارتی دیگر، در چنین سازه‌هایی اثرات مودهای بالاتر چندان قابل توجه نیست. اما با افزایش تعداد طبقات، به جهت مشارکت مودهای بالاتر در توزیع نیازهای دررفت محلی بین المان‌های

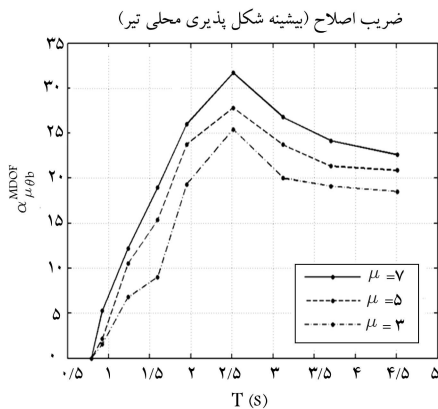




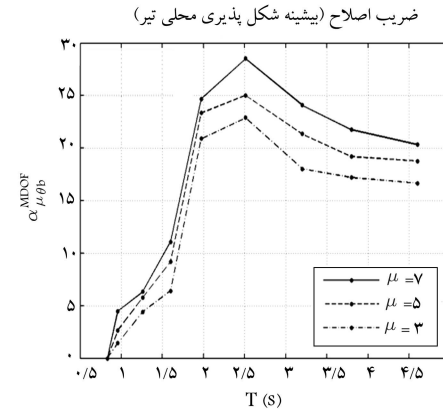
تحلیل تاریخچه زمانی غیر خطی قاب ۱ FRNiB، مقادیر میانگین



تحلیل تاریخچه زمانی غیر خطی قاب ۲ FRNiB، مقادیر میانگین



تحلیل تاریخچه زمانی غیر خطی قاب ۳ FRNiB، مقادیر میانگین



تحلیل تاریخچه زمانی غیر خطی قاب ۵ FRNiB، مقادیر میانگین

شکل ۷. تغییرات ضریب تخمین بیشینه‌ی شکل‌پذیری موضعی تیر ( $\alpha_{\mu\theta_b}^{MDOF}$ ) بر حسب دوره‌ی تناوب، شکل‌پذیری سراسری هدف ( $\mu_{MDOF} = 3, 5, 7$ ).

قوی» به هیچ‌وجه مانع از شکل‌گیری مفاصل خمیری در ستون‌ها نشده است. با افزایش تعداد طبقات سازه، روند خمیری‌شدن به تیرهای مستقر در طبقات نیز سرایت کرده است، که این موضوع مؤید تأثیرپذیری نیازهای نیرویی قاب از ارتفاع سازه است. از طرفی تجمع تشکیل مفاصل خمیری به سمت طبقات فوقانی سوق داده شده است، که خود مؤید تأثیر مودهای بالاتر در نیازهای غیرارتجاعی طبقات فوقانی در ساختمان‌های بلند است. همچنین به دلیل تأثیر بارهای ثقلی، نیاز دوران خمیری به‌صورت قرینه در تیرها و ستون‌های سازه شکل نگرفته است، که این امر باعث افزایش نیازهای مذکور در یک سمت و کاهش آنها در طرف دیگر سازه شده است.

پس از محاسبه‌ی بیشینه‌ی ضریب شکل‌پذیری محلی برای تیرهای بحرانی کلیه‌ی مدل‌ها، ضریب تخمین بیشینه‌ی شکل‌پذیری موضعی تیر ( $\alpha_{\mu\theta_b}^{SDOF}$ )، برای کلیه‌ی مدل‌ها محاسبه شده است. همچنین نرخ تغییرات ضریب شکل‌پذیری دورانی تیر، برای هر یک از رکوردها و مدل‌های سازه‌ی در ارتفاع هر سازه محاسبه شده است. مهم‌ترین نتایج به‌دست‌آمده از این بخش نشان داده است که در حوزه‌ی مدل‌های این پژوهش، بیشینه‌ی نیازهای تغییرشکل خمیری تیر در طبقات تحتانی قرار دارد. این موضوع با افزایش تراز تقاضای شکل‌پذیری تشدید می‌یابد. بنابراین در طراحی یا بهسازی، سرمایه‌گذاری اصلی بر تیرهای تحتانی سازه است. همچنین نیاز شکل‌پذیری دورانی در طبقات فوقانی مستقل از تقاضای شکل‌پذیری هدف است. اگرچه تأثیر مودهای بالاتر باعث شده است تا علاوه بر طبقات تحتانی، در طبقات فوقانی سازه نیز در ضریب شکل‌پذیری دورانی افزایش مشاهده شود، اما

برای  $\alpha_{\mu\theta_b}^{MDOF}$ ، افزایش دوره‌ی تناوب باعث کاهش ضریب  $\alpha_{\mu\theta_b}^{MDOF}$  می‌شود. از طرفی همواره با افزایش شکل‌پذیری هدف، ضریب  $\alpha_{\mu\theta_b}^{MDOF}$  در یک دوره‌ی تناوب ثابت افزایش یافته است. از دیگر موارد قابل ذکر در دوره‌های تناوب کم، کوچک‌تر از  $2/6$  ثانیه، ضریب  $\alpha_{\mu\theta_b}^{MDOF}$  برای شکل‌پذیری ۵ و ۷ اختلاف چندانی ندارد. البته با افزایش تعداد دهانه به نظر می‌رسد که این اختلاف افزایش می‌یابد. از طرفی برای یک دوره‌ی تناوب ثابت، افزایش تعداد دهانه‌ی قاب باعث شده است که  $\alpha_{\mu\theta_b}^{MDOF}$  کاهش یابد.

## ۱۰. نتیجه‌گیری

آنچه به‌عنوان هدف اصلی از این پژوهش تعریف شده است، ارزیابی نیازهای دوران خمیری و نیرویی تحمیل‌شده به تیرها و ستون‌ها در محل اتصال به یکدیگر یا در مرز اتصال ستون به فونداسیون است. از دیگر موارد ارزیابی‌شده، ترتیب روند تشکیل مفصل خمیری متأثر از تعداد طبقات و تعداد دهانه‌ها در مدل‌هاست. از آنجا که نیاز تغییرشکل کلی وابسته به نیاز تغییرشکل طبقه و المان است، به دنبال آن شکل‌پذیری کلی سازه نیز متأثر از شکل‌پذیری طبقه‌ی و شکل‌پذیری عضو است. نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل بارافزون مدل‌ها نشان داده است که ستون‌های میانی به دلیل داشتن سهم بیشتری از نیروی محوری و اندرکنش نیروی محوری با لنگر خمشی زودتر به تسلیم رسیده‌اند. همچنین کنترل ضابطه‌ی «تیر ضعیف - ستون

به‌علاوه افزایش تقاضای شکل‌پذیری باعث افزایش ضریب  $\alpha_{\mu\theta b}^{MDOF}$  شده است. این بدین معناست که با افزایش تقاضای شکل‌پذیری کلی، نیاز شکل‌پذیری دورانی به‌مراتب بیشتر از شکل‌پذیری کلی می‌شود. از طرفی همواره با افزایش شکل‌پذیری هدف، ضریب  $\alpha_{\mu\theta b}^{MDOF}$  در یک دوره‌ی تناوب ثابت افزایش یافته است. در مقابل، برای یک دوره‌ی تناوب ثابت، افزایش تعداد دهانه‌ی قاب باعث شده است که ضریب  $\alpha_{\mu\theta b}^{MDOF}$  کاهش یابد.

همچنان پیشینه‌ی این ضریب در ۳۰٪ پایین‌سازه قرار دارد. همچنین با افزایش تعداد دهانه‌ها، بر نیاز شکل‌پذیری طبقات فوقانی نیز افزوده شده است. همچنین نرخ تغییرات ضریب تخمین  $\alpha_{\mu\theta b}^{MDOF}$  بر حسب زمان تناوب برای تمامی رکوردها و مدل‌های سازه‌یی بررسی شده است. ارزیابی نتایج نشان داده است که ضریب اصلاح  $\alpha_{\mu\theta b}^{MDOF}$  برای دوره‌های تناوب کوتاه، حساسیت بیشتری دارد، به‌نحوی که تغییر در دوره‌ی تناوب سازه به‌شدت در اندازه‌ی این ضریب تأثیرگذار است.

## پانویس

1. Northridge

## منابع (References)

1. Gerami, M. "The effect of higher modes on ductility demand and seismic strength of SMRF", Ph.D Dissertation, University of Tarbiat-e-Modarres, Tehran, Iran (May 2002).
2. SAC 95-06, *Technical Report: Surveys and Assessment of Damage to Buildings Affected by the Northridge Earthquake of July 17, 1994*, Part of FEMA Phase I SAC Project, Report No. 95-06 (1995).
3. Miranda, E. and Bertero, V. "Evaluation of strength reduction factors for earthquake-resistant design", *Earthquake Spectra*, **10**(2), pp. 357-379 (1994).
4. Veletsos, A.S. and Vann, P. "Response of ground-excited elastoplastic systems", *Journal of the Structural Division, ASCE*, **97**(4), pp. 1257-1281 (1971).
5. Nassar, A. and Krawinkler, K., *Seismic Demands for SDOF and MDOF Systems*, Report No. 95, Dept. Of Civil Engineering, Stanford University, Stanford, California (1991).
6. Nassar, A.A., Osteraas, J.D. and Krawinkler, H. "Seismic design based on strength and ductility demands", *Earthquake Engineering, 10th World Conference* (1992).
7. Seneviratna, G.D.P.K. "Evaluation of inelastic MDOF effects for Seismic design", Ph.D. Dissertation to be Submitted to the Dept. of Civil Engineering, Stanford University (1995).
8. Humar, J.L. and Rahgozar, M.A. "Application of inelastic response spectral derived from seismic hazard spectral ordinates for Canada", *Canadian Journal of Civil Engineering*, **23**(5), pp. 1051-1063 (1996).
9. Güllkan, P. and Akkar, S. "A simple replacement for the drift spectrum", *Eng. Struct.*, **24**(11), pp. 1477-1484 (2002).
10. Gupta, A. and Krawinkler, H. "Behavior of ductile SMRFs at various seismic hazard levels", *Journal of Structural Engineering*, **126**(1), pp. 98-107 (2000).
11. Gupta, A. and Krawinkler, H. "Estimation of seismic demands for frame structures", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **29**(9), pp. 1287-1305 (2000).
12. Grecea, D., Dinu, F. and Dubina, D. "Performance criteria for MR steel frames in seismic zones", *J. of Constructional Steel Research*, **60**(3-5), pp. 739-749 (2004).
13. Shakeri, K., Shayanfar, M.A. and Kabeyasawa T. "A story shear-based adaptive pushover procedure for estimating seismic demands of buildings", *Journal of Engineering Structures*, **32**(4), pp. 174-183 (2010).
14. Tarta, G. and Pintea, A. "Seismic evaluation of multi-storey moment-resisting steel frames with stiffness irregularities using standard and advanced pushover methods", *Journal of Procedia Engineering*, **40**, pp. 445-450 (2012).
15. Prakash, V. and Powell, G., *Drain-2DX, Version 1.10*, Department of Civil Engineering, University of California at Berkeley, Berkeley, California (1993).
16. Allahabadi, R. and Powell, G.H., *Drain-2DX User Guide*, Report No. UCB/EERC-88/06, Earthquake Engineering Research Center (EERC), University of California at Berkeley (1988).
17. Computers and Structures, *ETABS Ver 9.50. Berkeley (CA)*, Computers and Structures Inc. (2008).
18. Seismosoft, *Seismosignal Ver. 5.0.0* (www.seismosoft.com).