

## بررسی اثر مهار بازویی-کلاهیک خرپایی بر رفتار سازه‌های بلند فولادی با هسته بتنی و پلان دایره ای

علی خیرالدین<sup>۱</sup>، ربابه عمرانی<sup>۲\*</sup>

۱- استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران و استاد مدعو، دانشگاه تگزاس، تگزاس، امریکا

۲- دانشجوی دکتری سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

### چکیده

یکی از مهمترین پارامترهای کنترل کننده طراحی در سازه های بلند، تغییر مکان جانبی سازه است. سیستم‌های مقاوم مختلف سازه ای جهت تحمل بارهای جانبی و ثقلی پیشنهاد شده است. یکی از مدل‌های مناسب در طراحی سازه‌های بلند مدل سازه‌ای با هسته بتنی است که در آنها هسته بتنی عامل اصلی تحمل بار جانبی و کنترل کننده تغییر مکان جانبی سازه می‌باشد. با افزایش ارتفاع سازه به علت کاهش شدید سختی هسته، تاثیر هسته به تنهایی در طبقات بالاتر در کنترل تغییر مکان جانبی کاهش می‌یابد. برای رفع این ضعف مهم از مهار بازویی و کلاهیک خرپایی علاوه بر هسته بتنی استفاده می‌گردد. در این مقاله سه سازه فولادی ۳۰ و ۴۰ و ۵۰ طبقه با ارتفاع های ۹۰، ۱۲۰ و ۱۵۰ متر با پلان دایره ای به شعاع ۱۶ متر مورد بررسی قرار گرفت و مدل‌های قاب فولادی با هسته بتنی، مهار بازویی و کلاهیک خرپایی مدل‌سازی، تحلیل خطی، طراحی و بررسی شد. نتایج نشان می‌دهد با استفاده از مهار بازویی و کلاهیک خرپایی در سازه فولادی با هسته بتنی، زاویه دررفت سازه به طور قابل ملاحظه ای کاهش می‌یابد در حالیکه وزن مصالح مصرفی تغییر نمی‌کند. همچنین تنش در سازه کنترل و تعدیل شده و تعداد مفاصل پلاستیک و سطح عملکرد سازه افزایش یافت.

**کلمات کلیدی:** قاب فولادی، هسته بتنی، کلاهیک خرپایی، مهار بازویی، پلان دایره ای

\*نویسنده مسئول: ربابه عمرانی.

پست الکترونیکی: [omrani.robab@yahoo.com](mailto:omrani.robab@yahoo.com)

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۱۰/۰۹، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۳/۱۶

## ۱- مقدمه

ساخت ساختمان‌های بلندمرتبه در سراسر دنیا به سرعت در حال افزایش است و این روند به رشد سریع اقتصادی و گسترش روزافزون شهرها و افزایش تقاضا برای فضا در مناطق پر جمعیت، سرعت بیشتری بخشیده است. همانطور که آسمان‌خراش‌ها به ارتفاع بلندتری می‌رسند، تبدیل به نمادی از قدرت و برتری، پیشرفت تکنولوژی و توسعه اقتصادی کشورها می‌شوند. از این رو استفاده از سیستم‌های جدید سازه‌ای و تکنولوژی نوین ساخت با هدف دستیابی به ساختمان‌هایی با ارتفاع هر چند بلندتر مدنظر طراحان و مهندسان قرار گرفته است. مطالعه تغییر مکان جانبی و رفتار ساختمان‌های بلند مرتبه از جمله زمینه‌های مورد تحقیق مهندسان سازه است. در طراحی سازه‌های بلند، تغییر مکان جانبی تحت اثر نیروی باد یا زلزله از جمله پارامترهای اساسی کنترل کننده طرح است. یکی از سیستم‌های متداول در ساختمان‌های بلند، بکارگیری هسته بتن مسلح به دلیل سرعت و سهولت اجرای آن است همچنین انواع سیستم‌های مهار جانبی از جمله مهار بازویی<sup>۱</sup> و کلاهک خرپایی<sup>۲</sup> در ترکیب با هسته بتنی در سازه‌های بلند مرتبه می‌تواند قابل توجه قرار گیرد [1].

## ۲- تاریخچه تحقیقات

قاب مهاربندی شده و یا ساختمان‌های مرکب از قاب و دیواربرشی یا مهاربند، برای ساختمان‌های با بیش از ۴۰ طبقه بازده‌ای مناسبی ندارند، زیرا برای این که مهاربندی به قدر کافی سخت و قوی باشد، مقادیر زیادی مصالح لازم می‌گردد. استفاده از مهارهای بازویی افقی که قاب را به هسته می‌بندد می‌تواند کارایی سازه را حدود ۳۰ درصد افزایش دهد. سیستم با مهار بازویی، شکل اصلاح شده قاب‌های با مهاربند و قاب‌های با دیوار برشی می‌باشد و در سازه‌های فولادی و مرکب استفاده می‌گردد. به عنوان یک سیستم موثر و ابتکاری، سیستم با مهار بازویی متشکل از یک هسته مرکزی (مهاربندی یا دیوار برشی) با خرپاهای بازویی یا شاه تیرهایی است که هسته را به ستون‌های خارجی متصل می‌کند [2]. علاوه بر آن ستون‌هایی در انتهای مهارها جای داده شده، که دیگر ستون‌های پیرامونی را برای کمک به محدود کردن چرخش مهارها با یک دیوار عمیق در ساختمان‌های بتنی و یا با مهاربندهای قطری به ارتفاع یک یا دو طبقه در ساختمان‌های فولادی، به یکدیگر اتصال می‌دهد که به آن کمربند خرپایی گفته می‌شود، در این حالت اگر سازه تحت بارگذاری جانبی قرار گیرد، مجموعه قیود بازوها و ستونها در برابر دوران هسته ممانعت میکند. اولین ساختمانی که با استفاده از این سیستم سازه‌ای ساخته شده است، ساختمان فرست ویسکانسین ستر واقع در میلوکی در شهر نیویورک، با سازه فلزی در سال ۱۹۷۴ می‌باشد (شکل ۱). این ساختمان با ۴۲ طبقه و ارتفاع ۱۸۳ متر، کاربری بانک و اداری، دارای سه کمربند خرپایی در پایین، وسط و بالای ساختمان است.



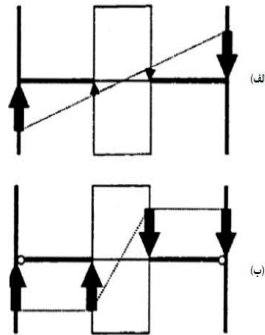
شکل ۱: نمای خارجی ساختمان فرست ویسکانسین ستر [1].

1- Outrigger  
2- Belt truss

ساختمان وان هوستون ستر در شهر هوستن دارای ۴۸ طبقه با ارتفاع کلی ۲۰۷/۵ متر، دارای یک مهار بازویی دو طبقه ای بین سی و سومین و سی و پنجمین طبقه می باشد. ساختمان پلیس و ویکتوریا در شهر مونترآل با ۴۷ طبقه در سال ۱۹۶۴ ساخته شده است. ارتفاع ساختمان ۱۹۰ متر است و اولین ساختمان بتنی به مهار بازویی است مهار بازویی در ۴ تراز با مهاربندهای ضربدری اجرا شده است که این مهارهای بازویی هسته را به ستون خارجی متصل می کنند [3]. شکل ۲ ساختمان مرکب ۸۸ طبقه جین مائو، ساخته شده در سال ۱۹۹۹ در چین را نشان می دهد. مهاربازویی را می توان با اتصالات مفصلی و یا اتصالات صلب به ستون های پیرامونی متصل کرد. نمودارهای تنش در شکل ۳ برتری اتصالات مفصلی را نسبت به اتصالات صلب نشان می دهد. اگر مهارها به ستون ها به صورت صلب متصل باشند، تمام سیستم به صورت واحد عمل می کند و در نتیجه فقط درصد کمی از ظرفیت تحمل لنگر هسته مورد استفاده قرار می گیرد، زیرا هسته مقاوم نزدیک تار خشی مقطع ساختمان قرار دارد. این نکته در نمودار الف شکل ۳ با اتصال صلب که در آن تنش ها پیوسته می باشد، مشاهده می گردد. ظرفیت تحمل لنگر هسته را به نحو بهتری قابل استفاده می سازد و از ستون های خارجی نیز مانند سیستم صلب استفاده می شود (نمودار ب شکل ۳) چون اتصالات مفصلی فقط نیروی برش را انتقال می دهند در حالی که لنگر خمشی در ستون ها ایجاد نگردیده است و بدین لحاظ، ظرفیت بار محوری ستون ها افزایش می یابد.



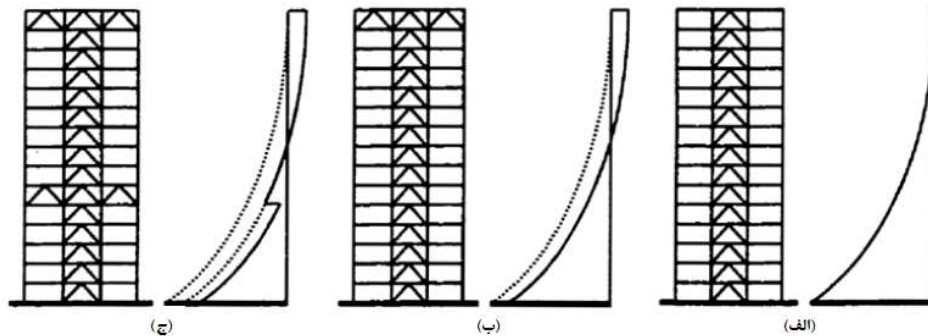
شکل ۲: نمای خارجی ساختمان جین مائو [1].



شکل ۳: توزیع تنش در اعضای کناری و هسته مقاوم: الف) مهارهای بازویی با اتصالات صلب، ب) مهارهای بازویی با اتصالات مفصلی [1].

رفتار یک سازه مرکب از هسته و مهارهای بازویی تحت بارگذاری جانبی در شکل ۴ مشاهده می گردد. هنگامی که ستونهای پیرامونی به هسته سازه با اتصال مفصل متصل شده باشد شکل (۴-الف)، هسته همانند یک تیر طره ای عمل نموده و انتهای آن به آزادی دوران می نماید. در این حالت ستونهای پیرامونی دوران ناچیزی را تحمل می کنند، اما اگر ستونهای پیرامونی به وسیله یک مهار بازویی به هسته بسته شده باشند شکل (۴-ب)، از هر گونه دورانی در بالای سیستم جلوگیری می شود، زیرا نیروهای قائم ایجاد شده در ستونهای پیرامونی، هسته را توسط مهار بازویی مهار می کنند. گیرداری جزئی که در بالای سیستم ایجاد می شود، در منحنی لنگر منعکس گردیده است. در این حالت رفتار این سیستم مشابه یک تیر طره ای خالص نبوده، زیرا در بالا و در پایین دارای گیرداری می باشد. لنگر خمشی در پای ساختمان کمتر

از سیستم شکل (۴-الف) میگردد که این نیز از مزایای استفاده از مهارهای بازویی می باشد. با افزودن مهاربازویی در طبقات میانی ساختمان، مقاومت و سختی سیستم افزایش بیشتری پیدا میکند [2,4].



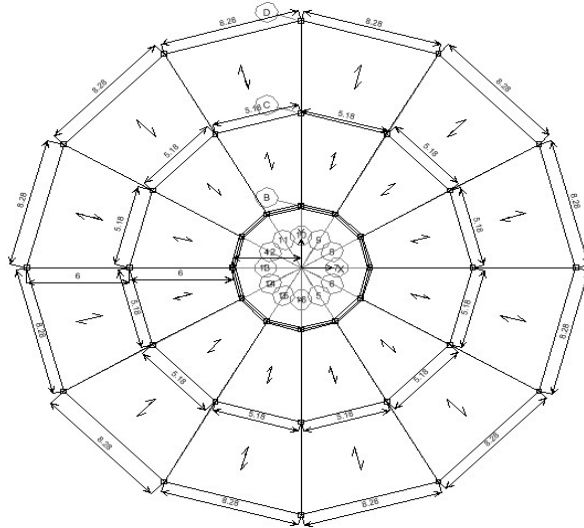
شکل ۴: عملکرد هسته مرکزی و مهارهای بازویی [1].

در سال ۲۰۱۰ تغییر شکل جانبی یک ساختمان ۶۰ طبقه با کاربرد یک، دو و سه مهار بازویی در ارتفاع سازه مورد بررسی قرار گرفت و به ترتیب کاهش ۳۴، ۴۲ و ۵۱ درصد تغییر شکل جانبی را در مقایسه با سازه بدون مهار جانبی مشاهده گردید [5]. در سال ۲۰۱۳ موقعیت بهینه کمر بند خرابایی در ساختمان بلند بر اساس ماکزیمم انرژی کرنشی کمر بند خرابایی مورد بررسی قرار گرفت. اثر کمر بند، کلاهی خرابایی و سیستم هسته بتنی در سیستم لوله‌ای تحت بارگذاری جانبی با مدلسازی فنر چرخشی در موقعیت مهار بازویی بر اساس روش انرژی بررسی شد. موقعیت بهینه سیستم کمر بند خرابایی برای بار متمرکز در بالای سازه، توزیع یکنواخت و مثالی بار جانبی در ارتفاع سازه به ترتیب در ۰/۶۶۷، ۰/۴۴۱ و ۰/۴۹۰ ارتفاع از تراز پایه نتیجه شد [6]. همچنین موقعیت بهینه سیستم مهار بازویی در سازه برای ساختمان بتن مسلح تحت بار باد و زلزله بررسی و موقعیت بهینه مهار بازویی در وسط ارتفاع سازه مشاهده شد [7]. در راستای مطالعات انجام شده در سال ۲۰۱۳ موقعیت بهینه مهار بازویی جهت افزایش عملکرد سازه ای ساختمان فولادی بلند مرتبه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که موقعیت بهینه برای سیستم مهار بازویی جهت کنترل تغییر مکان جانبی در بالای یک سوم ارتفاع سازه است. همچنین موقعیت بهینه برای مهاربازویی جهت مقاومت در برابر انهدام پیش رونده، نزدیکترین موقعیت محتمل به شکست ناگهانی ستون و در پایین یک سوم ارتفاع سازه نتیجه شد. جهت کنترل و مقاومت در برابر هر دو پارامتر تغییر مکان جانبی و انهدام پیش رونده توزیع مهار بازویی در پایین و بالای یک سوم ارتفاع سازه پیشنهاد شد [8]. همچنین نتایج مطالعات موقعیت بهینه مهاربازویی در ساختمان‌های بلند مرتبه بتنی، نشان داد که استفاده از مهار بازویی در فواصل منظم از بالای ساختمان در کاهش تغییر مکان جانبی کلی موثر است و موقعیت بهینه در ارتفاع ۰/۴۶ از پایین ساختمان می باشد، موقعیتی که نیروی محوری و ممان‌های ساختمان نسبت به بقیه موقعیتها حداقل است [9].

### ۳- مدلسازی

مدل‌های سازه ای مورد مطالعه سازه‌های فولادی با ۳۰، ۴۰ و ۵۰ طبقه با هسته بتنی در نظر گرفته شده است. سیستم مقاوم اصلی در برابر بار جانبی هسته بتنی بوده و اتصال قاب فولادی در اطراف هسته بتنی دایره ای شکل به هسته بتنی، مفصلی است پلان مدل‌های سازه ای مورد مطالعه با تعداد طبقات ۳۰، ۴۰ و ۵۰ طبقه بر اساس شکل ۵ در نظر گرفته شده است. شعاع هسته بتنی ۴ متر در مرکز پلان و دهانه‌های قاب‌های فولادی ۶ متری بوده و در اطراف هسته بتنی مرکزی با زاویه ۳۰ درجه نسبت به هم قرار گرفته‌اند. ارتفاع هر طبقه ۳ متر در نظر گرفته شده است. بارگذاری سازه برای بار مرده بر اساس جزئیات سقف عرشه فولادی برابر ۳۸۰ کیلوگرم در واحد سطح و برای بار زنده با کاربری مسکونی و اعمال بار معادل تیغه بر اساس مبحث ۶ مقررات ملی ساختمان برابر ۳۵۰ کیلوگرم در واحد سطح در نظر گرفته شد. بارگذاری جانبی سازه بر اساس ضوابط استاندارد ۲۸۰۰ ویرایش چهارم انجام شد [10]. در مقایسه برش پایه ناشی از بار جانبی باد و

زلزله، برش پایه ناشی از بار زلزله بیشتر از بار باد نتیجه شد. بدلیل ارتفاع مدل‌های سازه‌ای بالاتر از ۵۰ متر، بارگذاری جانبی بر اساس طیف طرح ایران و تحلیل دینامیکی طیفی انجام شد. مدلسازی، تحلیل و طراحی مدل‌های سازه‌ای مورد مطالعه توسط نرم افزار ETABS v9.7.4 انجام شد.



شکل ۵: پلان تیرریزی مدل‌های سازه‌ای.

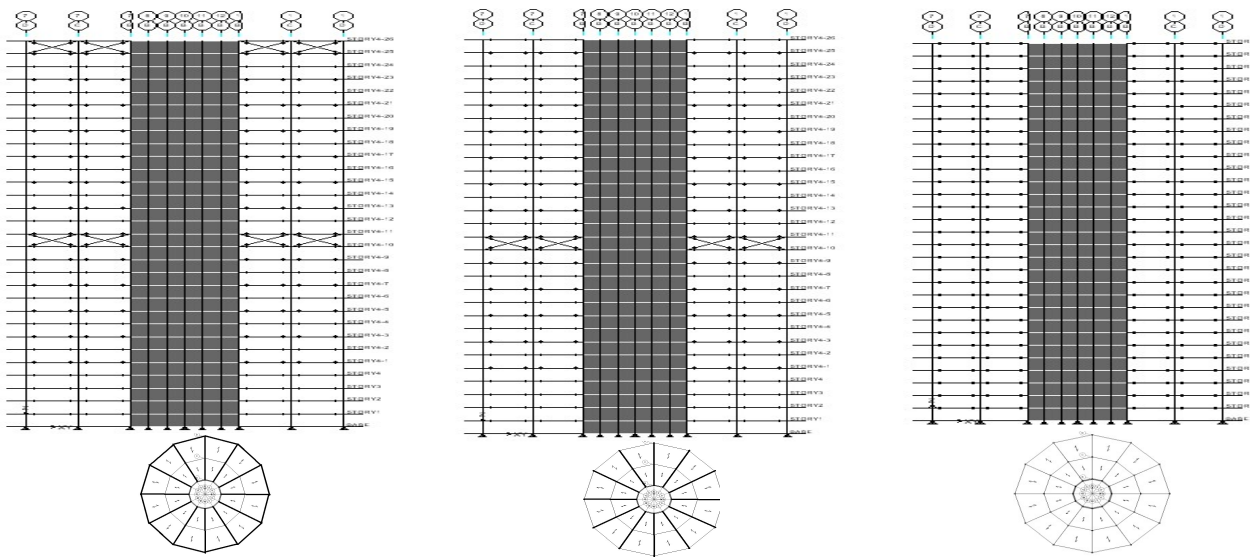
ضریب رفتار مدل‌های سازه‌ای برابر ۱۰ برای حالت تنش مجاز در نظر گرفته شد. ساختمان با اهمیت متوسط در زمین نوع ۲ در نظر گرفته شد. براساس استاندارد ۲۸۰۰ با توجه به ارتفاع ساختمان، تحلیل سازه با روش تحلیل طیفی انجام و به علت نزدیکی ضوابط آیین نامه UBC97-LRFD به مبحث دهم مقررات ملی ساختمان از آیین نامه مذکور جهت طراحی سازه در نرم افزار استفاده شد. فولاد مصرفی از نوع فولاد نرمه (ST37) با مقاومت تسلیم ۲۴۰۰ کیلوگرم بر سانتیمترمربع و مدول الاستیسیته  $۱۰^۶ * ۲/۱$  کیلوگرم بر سانتیمترمربع و ضریب پواسن ۰/۳ در نظر گرفته شد. مدل‌های سازه‌ای با فرضیات مذکور تحلیل و براساس مقاومت مقاطع طراحی شدند [11,12]. جداول شماره ۱ و ۲ مدل‌های سازه‌ای مورد مطالعه شامل مشخصات سازه فولادی و هسته بتنی مرکزی را نشان می‌دهد. جدول ۱ تیپ بندی مدل‌های سازه‌ای مورد مطالعه را نشان می‌دهد. براساس جدول ۱ تعداد یک کلاهدک خرابایی در موقعیت معرفی شده در نظر گرفته شده است. همچنین جدول ۲ ضخامت هسته مرکزی بتنی در ارتفاع سازه را نشان می‌دهد. شکل ۶ مدل‌های سازه‌ای مورد مطالعه در سازه ۳۰ طبقه را نشان می‌دهد.

جدول ۱: معرفی مدل‌های سازه‌ای مورد مطالعه

Mi-j (i: شماره مدل و j: تعداد طبقات)	تعداد طبقات	تعداد مهار بازویی	موقعیت مهار بازویی در طبقه	موقعیت کلاهدک خرابایی در طبقه
M1-30	۳۰	---	---	---
M2-30	۳۰	۱	۱۵	---
M3-30	۴۰	۲	۳۰-۱۵	۳۰
M1-40	۴۰	---	---	---
M2-40	۴۰	۱	۲۰	---
M3-40	۴۰	۲	۴۰-۲۰	۴۰
M1-50	۵۰	---	---	---
M2-50	۵۰	۲	۴۰-۲۰	---
M3-50	۵۰	۳	۵۰-۴۰-۲۰	۵۰

جدول ۲: معرفی موقعیت و ضخامت هسته بتنی

Mi-j	ضخامت هسته (cm)	موقعیت در طبقات	Mi-j	ضخامت هسته (cm)	موقعیت در طبقات	Mi-j	ضخامت هسته (cm)	موقعیت در طبقات
	۵۰	۱ تا ۵		۵۰	۱ تا ۵		۵۰	۱ تا ۵
	۴۵	۶ تا ۱۰		۴۵	۶ تا ۱۰		۴۵	۱۰ تا ۱۵
M1-30	۴۰	۱۱ تا ۱۵	M1-40	۴۰	۱۵ تا ۱۱	M1-50	۴۰	۱۵ تا ۱۱
M2-30	۳۵	۱۶ تا ۲۰	M2-40	۳۵	۲۰ تا ۱۶	M2-50	۳۵	۲۰ تا ۱۶
M3-30	۳۰	۲۱ تا ۲۵	M3-40	۳۰	۲۵ تا ۲۱	M3-50	۳۰	۲۵ تا ۲۱
	۲۵	۲۶ تا ۳۰		۲۵	۲۶ تا ۳۰		۲۵	۳۰ تا ۲۶



شکل ۶: مدل‌های سازه با هسته مرکزی، مهار بازویی و کلاهک خرپایی در قاب ۳۰ طبقه (ارتفاع ۹۰ متر).

#### ۴- وزن اسکلت و برش پایه

جداول شماره ۳، ۴ و ۵ نتایج بدست آمده از طراحی مدل‌های سازه‌ای معرفی شده در وزن کل اسکلت سازه و برش پایه را نشان می‌دهد. در این جداول در هر سری از مدل‌های سازه‌ای مورد مطالعه وزن کل اسکلت سازه و برش پایه مدل شماره ۱ آن مدل به عنوان مبنا در نظر گرفته شده و با مدل‌های مهار شده با مهار بازویی و کلاهک خرپایی مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که در قاب‌های ۳۰، ۴۰ و ۵۰ طبقه با اضافه شدن مهار بازویی و کلاهک خرپایی به سازه با هدف کنترل تغییر مکان جانبی، تغییر قابل توجهی در وزن اسکلت سازه و برش پایه ایجاد نمی‌شود به طوری که حداکثر این تغییرات کمتر از ۱۰ درصد است. بنابراین با اضافه شدن مهار بازویی و کلاهک خرپایی به سازه و طراحی مقاطع سازه‌ای بر اساس مقاومت، بدون افزایش قابل توجه وزن، میتوان تغییر مکان جانبی را کنترل کرد.

جدول ۳: وزن کل سازه و برش پایه در مدل‌های سازه ای ۳۰ طبقه نسبت به مدل M1-30

مدل مورد مطالعه	برش پایه نسبت به M1	وزن کل			وزن کل نسبت به M1
		وزن نسبی تیر	وزن نسبی ستون	وزن نسبی مهار	
M1-30	۱/۰۰۰	۰/۶۰	۰/۴۰	---	۱/۰۰۰
M2-30	۱/۰۱۰	۰/۶۰	۰/۴۰	۰/۰۳	۰/۹۶۵
M3-30	۰/۹۹۴	۰/۶۰	۰/۴۰	۰/۰۵	۰/۹۶۵

جدول ۴: وزن کل سازه و برش پایه در مدل‌های سازه ای ۴۰ طبقه نسبت به مدل M1-40

مدل مورد مطالعه	برش پایه نسبت به M1	وزن کل			وزن کل نسبت به M1
		وزن نسبی تیر	وزن نسبی ستون	وزن نسبی مهار	
M1-40	۱/۰۰۰	۰/۴۶	۰/۵۴	---	۱/۰۰۰
M2-40	۱/۰۰۴	۰/۴۵	۰/۵۳	۰/۰۲	۱/۰۱۶
M3-40	۱/۰۱۷	۰/۴۵	۰/۵۳	۰/۰۳	۱/۰۳۲

جدول ۵: وزن کل سازه و برش پایه در مدل‌های سازه ای ۵۰ طبقه نسبت به مدل M1-50

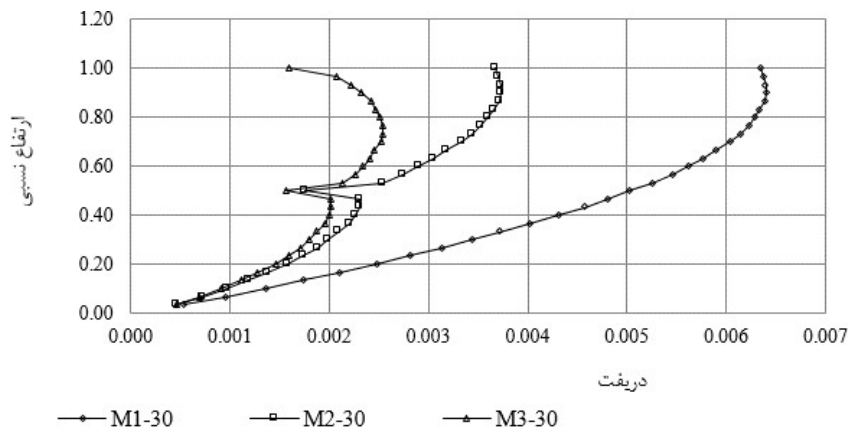
مدل مورد مطالعه	برش پایه نسبت به M1	وزن کل			وزن کل نسبت به M1
		وزن نسبی تیر	وزن نسبی ستون	وزن نسبی مهار	
M1-50	۱/۰۰۰	۰/۴۵	۰/۵۵	---	۱/۰۰۰
M2-50	۰/۹۹۸	۰/۴۴	۰/۵۴	۰/۰۱	۱/۰۱۴
M3-50	۱/۰۱۷	۰/۴۴	۰/۵۴	۰/۰۳	۱/۰۲۷

## ۵- زاویه دررفت جانبی

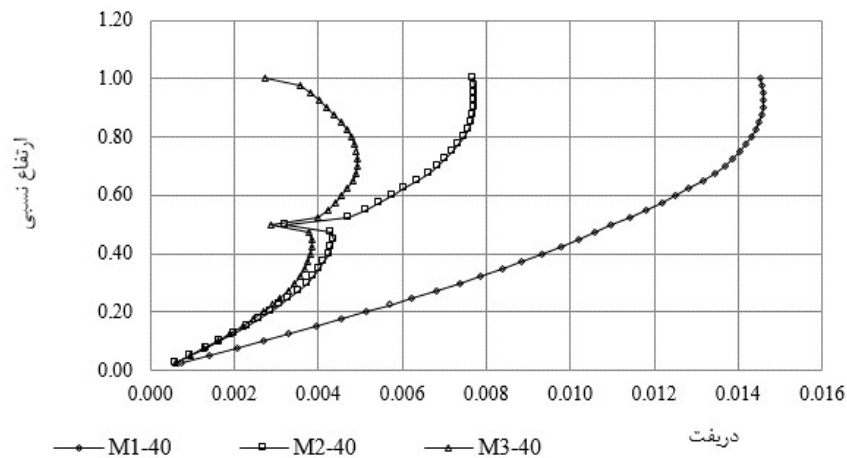
اصلی ترین پارامتر کنترل کننده طراحی سازه، مخصوصا در سازه های بلند کنترل تغییر مکان جانبی سازه است. با توجه به این مهم در این بخش نتایج زاویه دررفت سازه (تغییر مکان جانبی نسبی دو طبقه متوالی تقسیم بر ارتفاع طبقه مورد نظر) در شکل های شماره ۷ تا ۹ مربوط به مدل های سازه ای ۳۰، ۴۰ و ۵۰ طبقه نشان داده شده است. شکل شماره ۷ زاویه دررفت مدل های سازه ای ۳۰ طبقه را نشان میدهد. از مقایسه سه مدل مورد نظر در سازه ۳۰ طبقه در این شکل کاهش قابل توجه زاویه دررفت سازه در استفاده از مهار بازویی در طبقه میانی مدل M2-30 در کلیه طبقات حاصل می شود، مخصوصا در طبقه ۱۵ که مهار بازویی در نظر گرفته شده است. همچنین در مدل M3-30 با اضافه شدن کلاهک خریابی و مهار بازویی در طبقه ۳۰ علاوه بر طبقه ۱۵ کاهش زاویه دررفت در همه طبقات نسبت به مدل M2-30 مخصوصا در طبقه ۳۰ ملاحظه می شود. در طبقه انتهایی مدل M2-30 حدود ۳۰ درصد کاهش زاویه دررفت سازه نسبت به مدل M1-30 و مدل M3-30 حدود ۷۰ درصد کاهش نسبت به مدل M1-30 را نشان میدهد. همچنین در طبقات میانی با استفاده از مهار بازویی کاهش قابل توجه زاویه دررفت در سازه حدود ۷۰ درصد کاهش زاویه دررفت مشاهده می شود.

شکل ۸ زاویه دررفت مدل های سازه ای ۴۰ طبقه شامل M1-40 و M2-40 و M3-40 را نشان می دهد. از مقایسه سه مدل مورد نظر در سازه ۴۰ طبقه در این شکل کاهش قابل توجه زاویه دررفت سازه در استفاده از مهار بازویی در طبقه میانی در مدل M2-40 در کلیه طبقات حاصل می شود خصوصا در طبقه ۲۰ که مهار بازویی در نظر گرفته شده است. همچنین در مدل M3-40 با اضافه شدن کلاهک

خرپایی و مهار بازویی در طبقه ۴۰ علاوه بر طبقه ۲۰ کاهش زاویه دررفت در همه طبقات نسبت به مدل M2-40 خصوصا در طبقه ۴۰ نتیجه می‌شود. در مقایسه ۳ مدل سازه ۴۰ طبقه در طبقه انتهایی در مدل M2-40 حدود ۶۳ درصد کاهش و در مدل M3-40 حدود ۸۳ درصد کاهش زاویه دررفت نسبت به مدل M1-40 نتیجه شد. همچنین در طبقه میانی سازه در مدل M2-40 و M3-40 حدود ۷۵ درصد کاهش زاویه دررفت نسبت به مدل M1-40 مشاهده شد که کاهش قابل توجه زاویه دررفت با عدم کاهش وزن قابل توجه نتیجه شده از بخش قبل میتواند بسیار اقتصادی باشد.



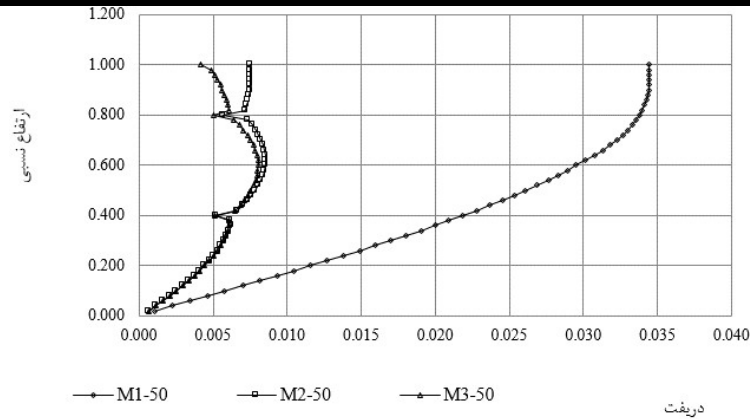
شکل ۷: مقایسه زاویه دررفت مدل‌های سازه‌ای ۳۰ طبقه.



شکل ۸: مقایسه زاویه دررفت مدل‌های سازه‌ای ۴۰ طبقه.

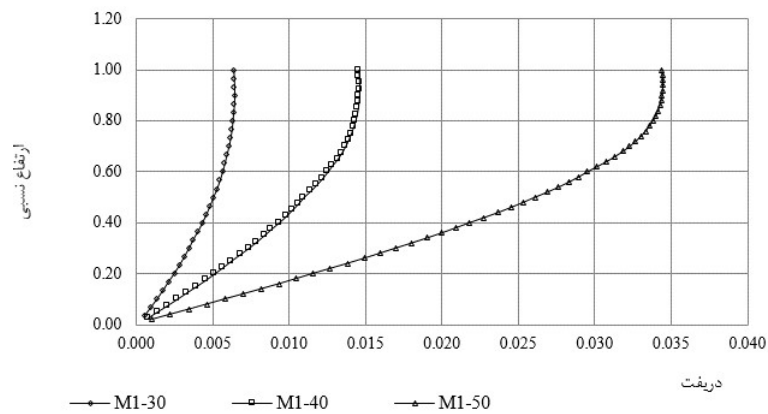
شکل ۹ مدل‌های سازه ای ۵۰ طبقه شامل M1-50، M2-50 و M3-50 را نشان میدهد. در این شکل کاهش قابل توجه زاویه دررفت در مدل‌های M2-50 و M3-50 نسبت به مدل M1-30 اهمیت کاربرد مهار بازویی و کلاهک خرپایی را در کاهش زاویه دررفت نشان میدهد. از مقایسه سه مدل مورد نظر در سازه ۵۰ طبقه در این شکل کاهش قابل توجه زاویه دررفت سازه در همه طبقات در استفاده از مهار بازویی در طبقات ۲۰ و ۴۰ مدل M2-50 مشاهده می‌شود. همچنین در مدل M3-50 با اضافه شدن کلاهک خرپایی و مهار بازویی در طبقه ۵۰ علاوه بر مهار بازویی در طبقات ۲۰ و ۴۰ کاهش زاویه دررفت در همه طبقات نسبت به مدل M2-50 ملاحظه می‌شود. بطوریکه به طور متوسط حدود ۷۵ درصد کاهش زاویه دررفت در مدل‌های M2-50 و M3-50 در همه طبقات نسبت به مدل M1-50 مشاهده شد.



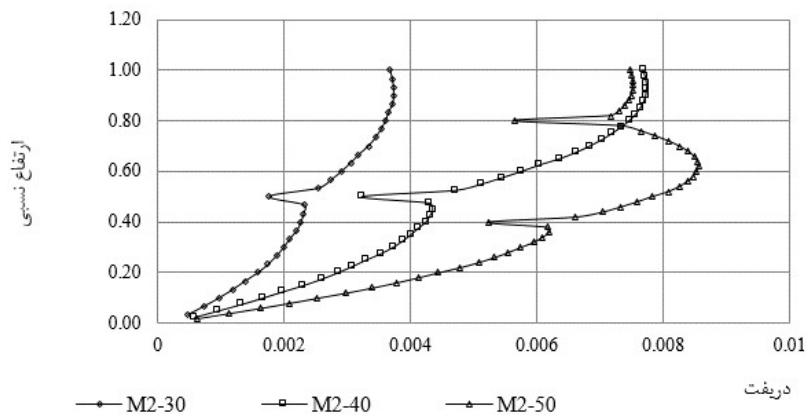


شکل ۹: مقایسه زاویه دریفت مدل‌های سازه ای ۵۰ طبقه.

شکل های ۱۰، ۱۱ و ۱۲ سیستم مورد مطالعه را در مدل‌های سازه ای مورد نظر با افزایش ارتفاع سازه نشان می‌دهد. شکل ۱۰ مدل M1 را در سازه های ۳۰، ۴۰ و ۵۰ طبقه نشان می‌دهد. از این نمودار این طور نتیجه می‌شود که با افزایش ارتفاع سازه سیستم مقاوم سازه ای در این مدل، که تنها هسته مرکزی عمل می‌کند، مانند تیر طره بوده و با افزایش تعداد طبقات و ارتفاع سازه زاویه دریفت جانبی افزایش می‌یابد. به طوریکه در طبقه انتهای با حداکثر زاویه دریفت افزایش حدود ۵۷ درصد در مقدار زاویه دریفت در مدل ۵۰ طبقه نسبت به مدل ۴۰ طبقه و در مدل ۴۰ طبقه افزایش حدود ۶۰ درصد در مقدار زاویه دریفت جانبی نسبت به مدل ۳۰ طبقه مشاهده شد.

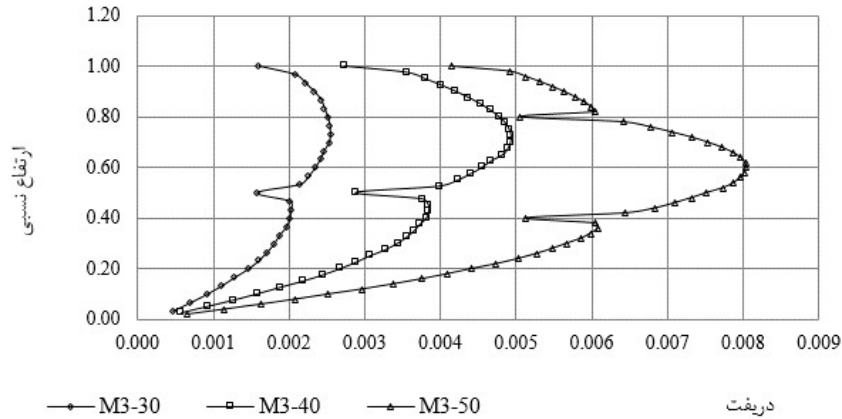


شکل ۱۰: مقایسه زاویه دریفت مدل سازه ای M1 در ارتفاع.



شکل ۱۱: مقایسه زاویه دریفت مدل سازه ای M2 در ارتفاع.

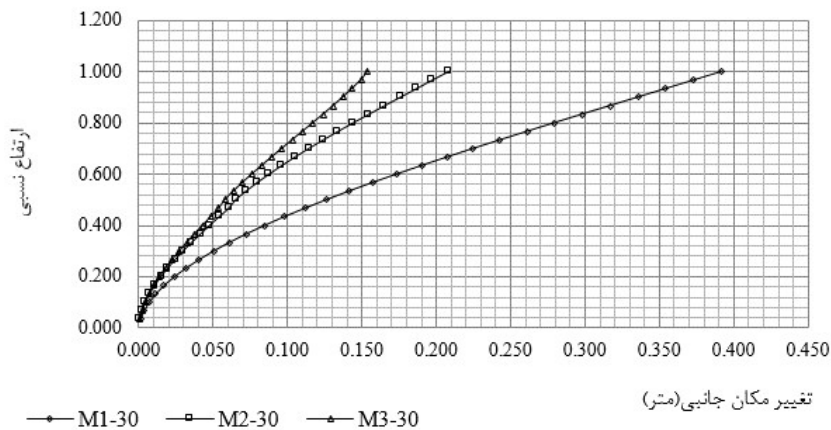
همچنین شکل ۱۱ تغییرات زاویه دریفت سازه در مدل M2 مدل‌های سازه ای ۳۰، ۴۰ و ۵۰ طبقه نشان می‌دهد بر اساس نمودارهای این شکل حداکثر اختلاف زاویه دریفت مدل ۵۰ طبقه ۲۵ درصد افزایش زاویه دریفت را نسبت به مدل ۴۰ طبقه را نشان می‌دهد و زاویه دریفت مدل ۴۰ طبقه حدود ۵۰ درصد افزایش نسبت به مدل ۳۰ طبقه را نشان می‌دهد. بر اساس شکل ۱۲ در مدل سازه ۵۰ طبقه حداکثر ۴۰ درصد افزایش زاویه دریفت جانبی نسبت به مدل ۴۰ طبقه و حدود ۵۰ درصد افزایش زاویه دریفت در مدل ۴۰ طبقه نسبت به مدل ۳۰ طبقه مشاهده می‌شود.



شکل ۱۲: مقایسه زاویه دریفت مدل سازه‌ای M3 در ارتفاع.

## ۶- تغییر مکان جانبی

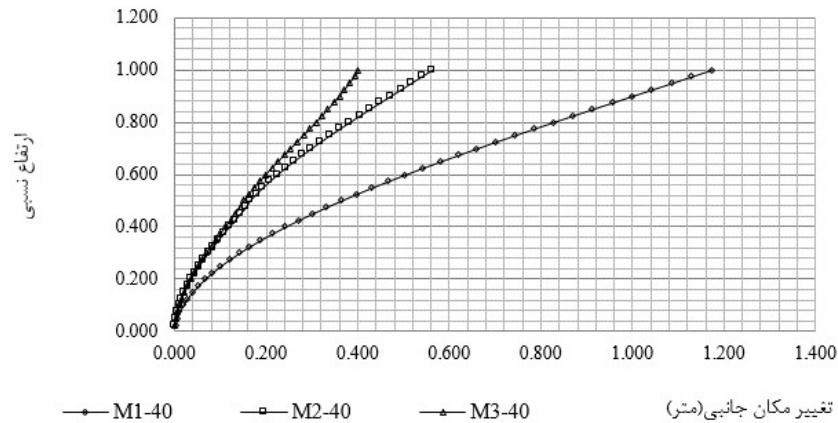
شکل‌های ۱۳، ۱۴ و ۱۵ تغییر مکان جانبی مدل‌های سازه ای ۳۰، ۴۰ و ۵۰ طبقه را در ارتفاع نشان می‌دهد. کاهش تغییر مکان جانبی بدلیل استفاده از مهاربازویی و کلاهدک خرپایی در شکل ۱۳ مشهود است، به طوری که حداکثر تغییر مکان جانبی سازه که در طبقه آخر مدل ۳۰ طبقه اتفاق می‌افتد با استفاده از مهار بازویی تقریباً ۵۰ درصد و در استفاده از مهار بازویی و کلاهدک خرپایی حدود ۶۰ درصد کاهش می‌یابد.



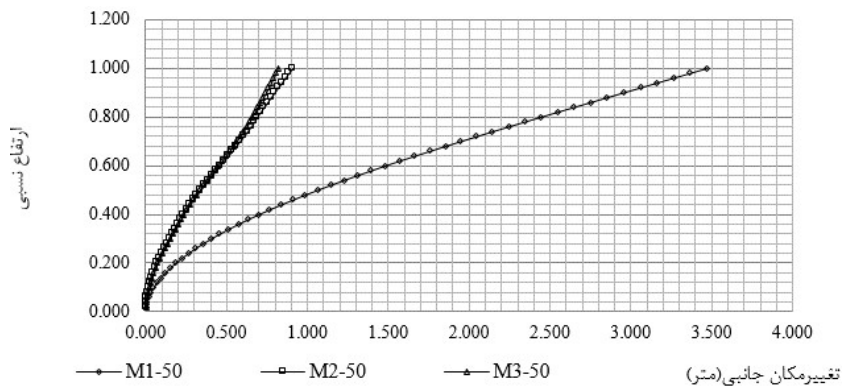
شکل ۱۳: تغییر مکان جانبی مدل‌های ۳۰ طبقه در ارتفاع.

همچنین در شکل ۱۴ در مدل سازه‌ای ۴۰ طبقه نیز استفاده از مهار بازویی کاهش ۵۲ درصد و مهار بازویی و کلاهدک خرپایی حدود ۷۰ درصد کاهش تغییر مکان جانبی طبقه آخر را نشان می‌دهد در بقیه طبقات مدل سازه ای ۴۰ طبقه نیز مدل‌های M3- و M2-40 حدود ۵۰ درصد تغییر مکان جانبی را نسبت به مدل M1-40 کاهش می‌دهد. نتایج مذکور در کاهش تغییر مکان جانبی در مدل سازه ای

۵۰ طبقه نیز مشهود و قابل توجه‌تر از دو مدل ۳۰ و ۴۰ طبقه است به طوری‌که در طبقه بام حدود ۸۰ درصد کاهش تغییر مکان جانبی در مدل‌های M2-50 و M3-50 نسبت به مدل M1-50 نتیجه شده است. در بقیه طبقات نیز به طور متوسط ۷۰ درصد کاهش تغییر مکان جانبی در مدل‌های M2-50 و M3-50 نسبت به مدل M1-50 مشاهده شده است.



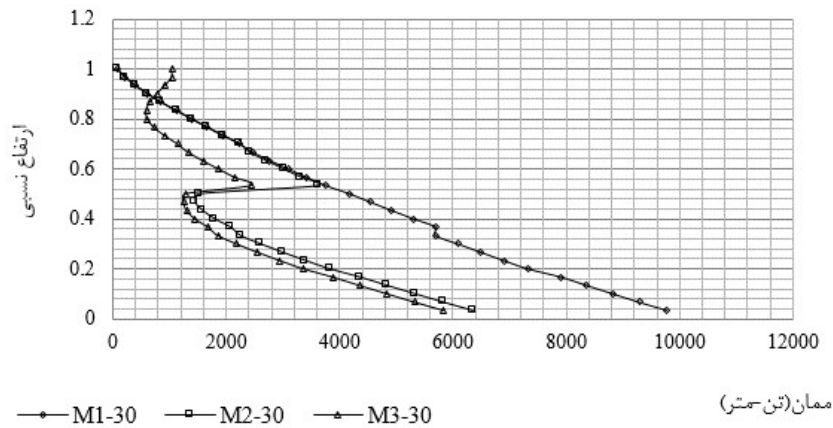
شکل ۱۴: تغییر مکان جانبی مدل‌های ۴۰ طبقه در ارتفاع.



شکل ۱۵: تغییر مکان جانبی مدل‌های ۵۰ طبقه در ارتفاع.

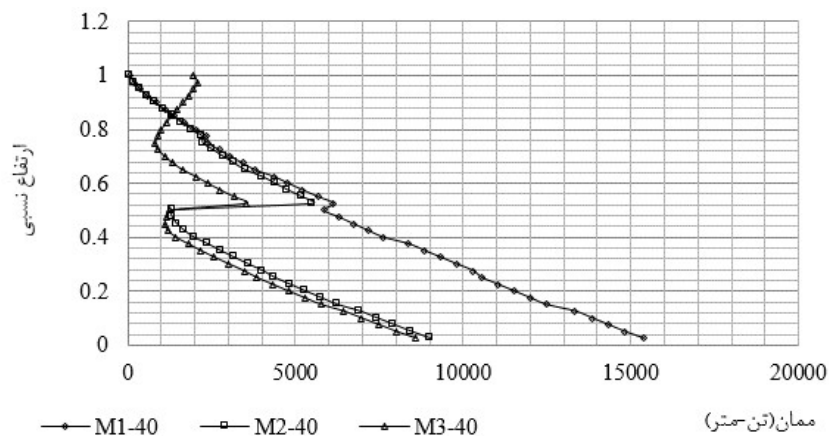
#### ۷- بررسی ممان و تنش در هسته مرکزی

شکل ۱۶ ممان خمشی وارد بر هسته بتنی را در مدل‌های M1-30، M2-30 و M3-30 مربوط به مدل‌های سازه‌ای ۳۰ طبقه نشان می‌دهد. از این شکل مشاهده می‌شود هسته بتنی مرکزی مانند تیر طره عمل کرده و حداکثر ممان ناشی از بار جانبی در پای هسته بوجود می‌آید و مدل‌های با مهار جانبی و کلاهی خرابایی بر مقدار این ممان موثر بوده و آن را کاهش می‌دهند، به طوری‌که در طبقه‌ای که مهار بازویی وجود دارد کاهش ناگهانی در حدود ۵۰ درصد در مقدار ممان مشاهده می‌گردد. در مقایسه نمودارهای M2-30 با M1-30 در ۵۰ درصد فوقانی سازه که ممان‌های وارد بر هسته بتنی دقیقاً بر هم منطبق هستند و در محل وجود مهار بازویی، در طبقه ۱۵ (وسط سازه ۳۰ طبقه)، کاهش ۵۰ درصدی مقدار ممان اتفاق افتاده و موجب کاهش ممان وارد بر هسته در ۵۰ درصد تحتانی سازه شده است.

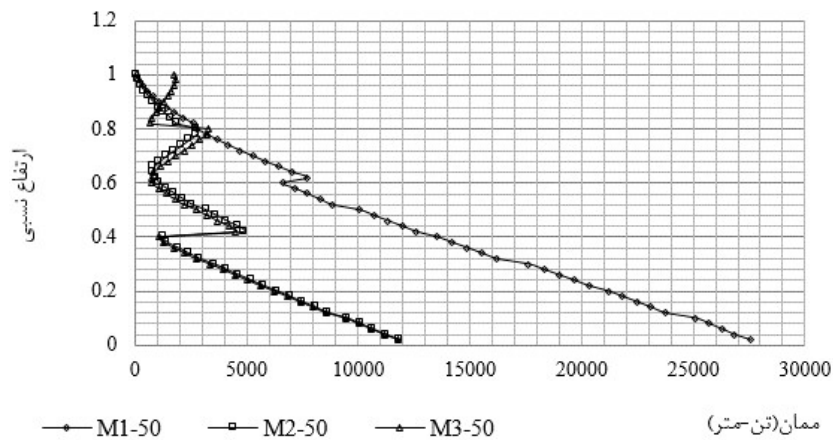


شکل ۱۶: ممان خمشی هسته بتنی مدل‌های ۳۰ طبقه در ارتفاع.

همچنین از مقایسه نمودار M3-30 با نمودارهای M1-30 و M2-30 در شکل ۱۶ نتیجه میشود که کلاهیک خرابایی در طبقه انتهایی، ممان منفی کمی به سازه اعمال میکند ولی در حالت کلی با وجود کلاهیک خرابایی و مهار بازویی در طبقه آخر علاوه بر مهار بازویی در طبقه میانی، ممان وارد بر هسته بتنی را در همه طبقات تا ۵۰ درصد کاهش میدهد.



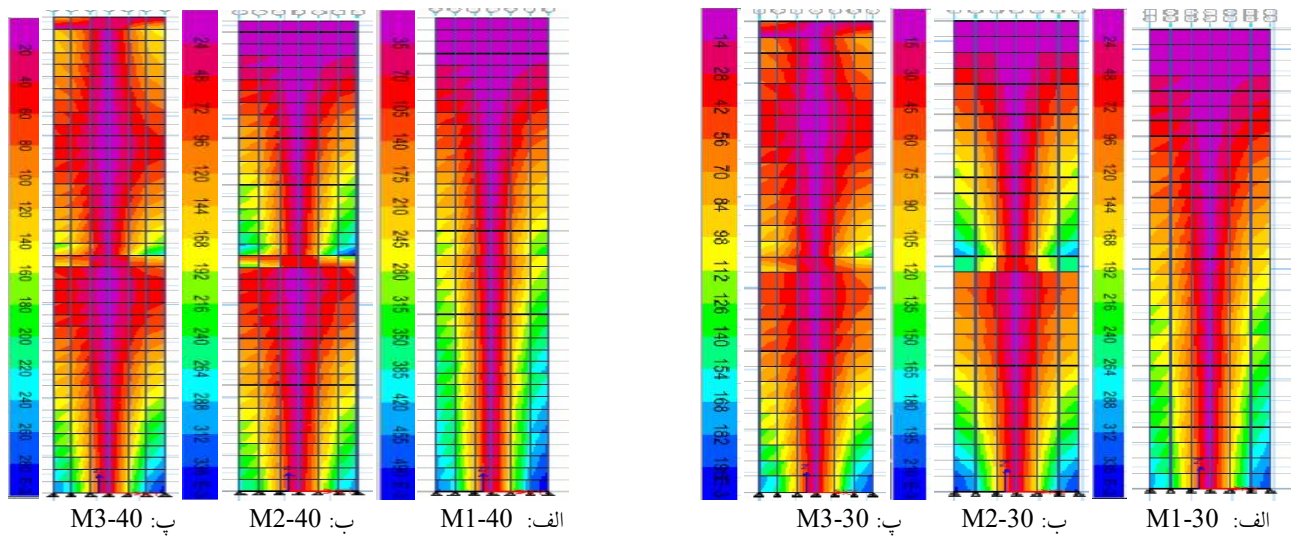
شکل ۱۷: ممان خمشی هسته بتنی مدل‌های ۴۰ طبقه در ارتفاع.



شکل ۱۸: ممان خمشی هسته بتنی مدل‌های ۵۰ طبقه در ارتفاع.

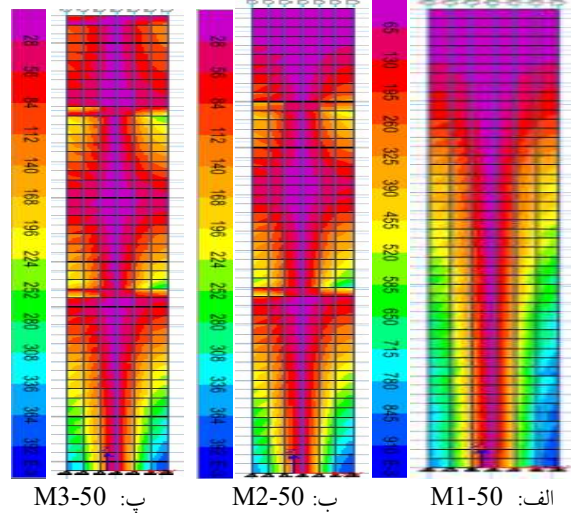
بر اساس شکل ۱۷ در مدل‌های سازه‌ای ۴۰ طبقه اثرات استفاده از مهار بازویی در مدل M2-40 و مهار بازویی و کلاهک خرپایی در مدل M3-40 بر ممان خمشی هسته بتنی نسبت به مدل هسته بتنی تنها در مدل M1-40 کاملاً مشهود است. به طوریکه در مقایسه ممان خمشی هسته بتنی M1-40 و M2-40 در کل ارتفاع سازه، در ۵۰ درصد تحتانی سازه تا ۸۰ درصد کاهش ممان هسته بتنی با استفاده از مهار بازویی در طبقه میانی سازه در مدل M2-40 نسبت به مدل M1-40 مشاهده می‌شود. این نتیجه برای مدل M3-40 نیز در ۵۰ درصد تحتانی بر قرار بوده و شرایط ۵۰ درصد فوقانی نیز در این مدل بدلیل وجود کلاهک خرپایی و مهار بازویی در طبقه آخر تا ۶۰ درصد ممان هسته بتنی را در ۵۰ تا ۸۰ درصد فوقانی سازه کاهش می‌دهد. نتایج ممان خمشی هسته بتنی مطابق با شکل ۱۸، در مدل ۵۰ طبقه در ارتفاع سازه نیز کاهش ممان وارد بر هسته بتنی در مدل‌های با مهار بازویی و کلاهک خرپایی را نشان می‌دهد، بطوریکه ممان خمشی وارد بر هسته بتنی در مدل‌های M2-50 و M3-50 تقریباً بر هم منطبق بوده و به طور متوسط ۶۵ درصد کاهش ممان خمشی در ۸۰ درصد ارتفاع واضح است.

شکل‌های ۱۹، ۲۰ و ۲۱ حداکثر تنش‌های وارد بر هسته مرکزی ناشی بار جانبی را نشان می‌دهد. در این شکل‌ها حداکثر تنش‌های ایجاد شده در هسته بتنی از ماکزیمم تا مینیمم مقدار تنش به ترتیب با رنگ‌های آبی پررنگ، آبی، آبی کمرنگ، سبز، زرد، قرمز و بنفش نشان داده شده است. همچنین مقادیر تنش مربوط به هر رنگ جهت مقایسه بهتر نشان داده شده است. در مقایسه کلی تنش مربوط به ۳ مدل سازه ای ۳۰ طبقه در شکل ۱۹ مشاهده می‌شود در مدل M3-30 حداکثر طیف رنگ قابل مشاهده بنفش و قرمز است و در مدل‌های M2-30 و M1-30 این رنگ‌ها بترتیب در طبقات فوقانی و طبقه میانی مشاهده می‌شود. از نوع توزیع تنش در طبقات میتوان در مدل M1-30 حداکثر تنش را در پای هسته و محل تشکیل مفصل پلاستیک را در این ناحیه پیش بینی کرد در حالیکه با استفاده از مهار بازویی در مدل M2-30 حداکثر تنش در طبقه ۱۵ نیز مشاهده می‌شود که نشان دهنده تعدیل تنش و افزایش شکل پذیری سازه است. موارد مذکور در مدل‌های سازه ای ۴۰ و ۵۰ طبقه نیز مطابق با شکل‌های ۲۰ و ۲۱ کاملاً واضح و قابل نتیجه‌گیری است.



شکل ۱۹: تنش هسته مرکزی در مدل‌های ۳۰ طبقه در ارتفاع.

شکل ۲۰: تنش هسته مرکزی در مدل‌های ۴۰ طبقه در ارتفاع.



شکل ۲۱: تنش هسته مرکزی در مدل‌های ۵۰ طبقه در ارتفاع.

## ۸- نتیجه گیری

از مقایسه نتایج تغییر مکان جانبی در طبقات در مدل‌های سازه ای ۳۰، ۴۰ و ۵۰ طبقه مشاهده می‌شود که با استفاده از مهاربازویی و کلاهدک خرپایی در سیستم سازه فولادی با هسته بتنی کاهش قابل توجهی در تغییر مکان جانبی در همه طبقات سازه ایجاد می‌شود. با توجه به اینکه سیستم سازه‌ای قاب فولادی با اتصالات مفصل به هسته بتنی است، در این سیستم سازه مقاوم اصلی در برابر بار جانبی، هسته بتنی است که همانند تیر طره با اتصال گیردار در پای سازه عمل کرده و حداکثر تغییر مکان جانبی را در طبقه فوقانی سازه دارد. در این نوع سازه‌ها استفاده از کلاهدک خرپایی و مهار بازویی بدلیل ایجاد سختی بالا در طبقه فوقانی سازه، به شدت تغییر مکان جانبی سازه را کاهش داده و عاملی موثر در کنترل تغییر مکان جانبی سازه است. نتایج بررسی تغییرات وزن سازه با مهار بازویی و کلاهدک خرپایی در مدل‌های سازه‌ای مورد مطالعه، عدم تغییر قابل توجه وزن سازه همراه با کاهش محسوس زاویه دررفت، اقتصادی و بهینه بودن سازه با استفاده از مهار بازویی و کلاهدک خرپایی نسبت به سازه بدون مهار بازویی و کلاهدک خرپایی را نشان می‌دهد. همچنین نتایج تحلیل مدل‌های سازه ای در این مقاله حداقل ۵۰ درصد کاهش در تغییر مکان جانبی سازه در طبقات، تا ۸۰ درصد کاهش ممان خمشی وارد بر هسته مرکزی بتنی در استفاده از مهار بازویی و کلاهدک خرپایی نسبت به حالت بدون مهار بازویی و کلاهدک خرپایی نشان داد. بررسی نتایج توزیع تنش وارد بر هسته در موارد استفاده از مهار بازویی و کلاهدک خرپایی نشان داد در استفاده از این سیستم ها تنش ماکزیمم علاوه بر پای هسته، در طبقات دارای مهار بازویی و کلاهدک خرپایی با کاهش حداکثر مقدار تنش، بوجود می‌آید و توزیع تنش در طبقات یکنواخت‌تر و امکان افزایش تعداد مفاصل پلاستیک در ارتفاع هسته و افزایش شکل پذیری سازه، نسبت به حالت بدون مهار بازویی و کلاهدک خرپایی نتیجه شد.

## مراجع

- [1] استنفرد اسمیت، ب؛ کول، ا؛ حاجی کاظمی، ح (مترجم)؛ «آنالیز و طراحی سازه های بلند»؛ انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد، سال ۱۳۹۲.
- [2] خیرالدین، ع؛ آرامش، س؛ «سیستم های مقاوم سازه ای در ساختمان های بلند»؛ انتشارات دانشگاه سمنان، چاپ دوم، ۱۳۹۴.
- [3] حاجی میر اسمعیل، س.م؛ «بررسی رفتار دینامیکی ساختمان های بلند مهاربندی شده با کمربند خرپایی»؛ پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران دانشگاه سمنان، شهریور ماه ۱۳۸۹.
- [4] گانگ شولر، و؛ عادل، ح (مترجم)؛ «سازه های ساختمان بلند»؛ انتشارات دهخدا، چاپ پنجم، ۱۳۷۶.
- [5] Fawzia, S. and Fatima, T.; "Deflection Control in Composite Building by Using Belt Truss and Outriggers Systems"; International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering Vol:4, No:12, 2010.

- [6] Jahanshahi, M.R. and Rahgozar.R. ; "Optimum Location of Outrigger-belt Truss in Tall Buildings Based on Maximization of the Belt Truss Strain Energy"; International Journal of Engineering, Vol. 26, No. 7, (July 2013) 693-700.
- [7] Raj Kiran Nanduri, P.M.and Suresh, B. and Ihtesham Hussain, MD. ; "Optimum Position of Outrigger System for High-Rise Reinforced Concrete Buildings Under Wind And Earthquake Loadings"; American Journal of Engineering Research (AJER), e-ISSN : 2320-0847 p-ISSN : 2320-0936 Volume-02, Issue-08, pp-76-89-2013.
- [8] Eltobgy, H.; "Optimum belt truss locations to enhance the structural performance of high-rise steel buildings";WULFENIA JOURNAL KLAGENFURT.AUSRIA. Vol 20, No. 6;Jun 2013.
- [9] Moinuddin, M.I and Afroz Khan, M.; "A Study for The Optimum Location of Outriggers for High-Rise Concrete Buildings "; International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering, Vol.2 , No.1, Pages : 628 - 633 (2013).
- [10] وزارت راه و شهرسازی، « آیین نامه طراحی ساختمانها در برابر زلزله- ویرایش چهارم، ۱۳۹۳.
- [11] UBC, 1997, Uniform Building Code, International Conference of Building Officials, Whittier, California, 1997.