

ارزیابی روش‌های مختلف تحلیل در پیش‌بینی پاسخ لرزه‌ای سازه‌های بتن مسلح نامنظم در پلان و ارتفاع، تقویت‌شده با مهاربند فولادی

پیام طهرانی*^۱، مهدی سالاری^۲

^۱ استادیار دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

^۲ دانش‌آموخته گرایش سازه، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

(دریافت: ۹۸/۷/۲۲، پذیرش: ۹۹/۱۲/۲۳، نشر آنلاین: ۹۹/۱۲/۲۳)

چکیده

یکی از روش‌های بهسازی لرزه‌ای در سازه‌های بتن‌آرمه، استفاده از مهاربندهای فولادی می‌باشد. در این پژوهش چهار سازه بتن‌آرمه با دو پلان متفاوت در دو حالت ۱۰ و ۱۵ طبقه مورد بررسی قرار می‌گیرند. سازه‌های مورد نظر به‌صورت هم‌زمان دارای نامنظمی هندسی در پلان و همچنین نامنظمی در ارتفاع از نوع طبقه نرم می‌باشند. رفتار لرزه‌ای سازه‌های دارای ترکیبی از انواع نامنظمی‌ها به‌صورت هم‌زمان کم‌تر در گذشته مورد توجه قرار گرفته است که در این تحقیق مورد مطالعه قرار می‌گیرد. با توجه به پیچیدگی رفتار سازه‌های نامنظم در برابر زلزله و همچنین الزام آیین‌نامه‌ای، در طراحی و ارزیابی مدل‌های اولیه از تحلیل‌های استاتیکی خطی، دینامیکی خطی، استاتیکی غیرخطی و دینامیکی غیرخطی استفاده شده است و نتایج حاصل از روش‌های مختلف تحلیل در پیش‌بینی پاسخ لرزه‌ای سازه‌های اولیه و همچنین سازه‌های بهسازی شده مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفته است. مقایسه نتایج به‌دست‌آمده از سازه‌های اولیه و سازه‌های تقویت‌شده، حاکی از آن است که استفاده از هر دو نوع مهاربند فولادی زیگزاگی و ضربدری موجب ارتقای قابل توجه عملکرد لرزه‌ای سازه‌ها شده است که البته در حالت استفاده از مهاربندهای زیگزاگی عملکرد لرزه‌ای مناسب‌تری در سازه بهسازی شده مشاهده گردید. مقایسه نتایج آنالیزهای خطی و غیرخطی روشن نمود اگرچه روش‌های خطی تا حدودی در پیش‌بینی حداکثر تغییر مکان در بام سازه موفق عمل می‌نمایند، تغییر مکان طبقات میانی سازه‌ها و همچنین الگوی تغییر شکل سازه را ممکن است به‌صورت صحیح پیش‌بینی ننمایند.

کلیدواژه‌ها: ارزیابی عملکرد لرزه‌ای، سازه بتن‌آرمه، نامنظمی در پلان و ارتفاع، مهاربند فولادی، تحلیل‌های غیرخطی.

۱- مقدمه

لرزه‌ای ساختمان‌ها در سطوح مختلف عملکرد، آیین‌نامه‌ها و دستورالعمل‌های مختلفی از جمله (ASCE 41، ۲۰۱۷) منتشر شده است. در ایران برای این منظور از دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌های موجود (نشریه ۳۶۰، ۱۳۹۲) استفاده می‌گردد. مقایسه روش‌های مختلف مقاوم‌سازی ساختمان‌های بتن مسلح (Sugano، ۱۹۸۹؛ Park و Rodriguze، ۱۹۹۱) نشان می‌دهد که بادبندهای ضربدری بیشتر از سایر طرح‌ها مقاومت سازه را افزایش داده‌اند و مؤثر واقع شده‌اند. همچنین آزمایش‌های انجام‌شده روی قاب‌های بتن مسلح مقاوم شده با انواع مهاربندهای فولادی نقش بسیار مؤثر مهاربندی را در کاهش آسیب‌های وارده به قاب بتن مسلح و کاهش تغییر مکان نسبی طبقات را به اثبات رسانید (Javidi و Yamakawa، ۲۰۱۳؛ Xiong و همکاران، ۲۰۱۹؛ Kheiroddin و همکاران، ۲۰۱۹). در سال ۲۰۰۷،

ساختمان‌های با سازه بتن مسلح که عموماً از سیستم قاب خمشی استفاده نموده‌اند، به‌علت تغییر در آیین‌نامه‌ها ممکن است نیاز به ارزیابی آسیب‌پذیری و احتمالاً بهسازی داشته باشند. این مسئله در حین زمین‌لرزه‌های هرچند ضعیف گذشته، به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای مشاهده شده است. سیستم‌های بهسازی مختلفی برای ساختمان‌های بتنی موجود می‌باشد، که در این بین می‌توان به مقاوم‌سازی لرزه‌ای قاب‌های بتن‌آرمه با استفاده از مهاربندهای فولادی اشاره کرد. این روش علاوه بر اجرای آسان و اقتصادی، مزایای دیگری از جمله اعمال وزن اندک به سازه و امکان ایجاد بازشو در قاب‌ها را نیز داراست. در این روش با افزایش ظرفیت باربری جانبی و سختی، تغییر شکل‌های سازه کاهش یافته و در نتیجه عملکرد لرزه‌ای سازه بهبود می‌یابد. جهت ارزیابی و بهسازی

* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۲۱-۶۴۵۴۳۰۸۰

بررسی و مقایسه کردند. نتایج نشان می‌دهد که مقاومت و شکل-پذیری قاب‌های مجهز به مهاربند فولادی نزدیک به حدود دو برابر نسبت به قاب بتنی ساده افزایش می‌یابد. همچنین استفاده از مهاربند واگرا تا حدودی تأثیر بیشتری بر افزایش شکل‌پذیری و قابلیت جذب انرژی قاب نشان داد.

Kafi و همکاران (۲۰۲۰) رفتار لرزه‌ای شش قاب بتنی تقویت‌شده با انواع و شکل‌های مختلف مهاربندهای فولادی را بررسی کردند. نتایج نشان‌دهنده کارایی خوب این مهاربندها در افزایش عملکرد قاب‌ها بود. از بین انواع مهاربندهای بررسی‌شده مهاربند فولادی واگرا با المان‌های تیر پیوند (لینک) فولادی بهترین عملکرد را از خود نشان داد. علاوه بر مهاربندهای واگرا به شکل معمول در سال‌های اخیر استفاده از مهاربندهای فولادی واگرا با المان‌های پیوند (لینک) عمودی نیز در بهسازی سازه‌های بتنی مورد بررسی قرار گرفته‌اند که نتایج نشان‌دهنده تأثیر خوب آن‌ها بر عملکرد سازه‌های بتنی می‌باشد (مظلوم و احمدی‌نژاد، ۱۳۹۶؛ Karimi و Rahimi، ۲۰۱۹).

از جمله نوآوری‌های تحقیق حاضر که کم‌تر در طراحی و ارزیابی سازه‌های نامنظم مورد توجه قرار گرفته لحاظ اثر وجود هم-زمان انواع مختلف نامنظمی‌ها در یک سازه می‌باشد. در آئین‌نامه-های طراحی در حال حاضر معمولاً نامنظمی‌های سازه به انواع مختلفی تقسیم‌بندی می‌شوند که شامل نامنظمی در پلان و نامنظمی در ارتفاع سازه می‌باشند که صرفاً به صورت مستقل مورد نظر قرار می‌گیرند و اثر ترکیبات انواع نامنظمی در رفتار لرزه-ای سازه مورد نظر قرار نمی‌گیرد. با توجه به پیچیدگی‌های ایجادشده در رفتار لرزه‌ای این‌گونه سازه‌ها با نامنظمی هم‌زمان در قسمت‌های مختلف سازه و احتمال تأثیرات افزاینده انواع نامنظمی‌ها بر یکدیگر و به‌نوعی ایجاد اندرکنش در حین رفتار غیرخطی سازه، صحت پیش‌بینی رفتار و طراحی این‌گونه سازه‌ها با استفاده از روش‌های تحلیل خطی که در آئین‌نامه‌های طراحی استفاده می‌شود را با تردید مواجه می‌نماید. به همین منظور برای بررسی این عامل در این پژوهش مدل‌های مورد نظر با ۲ پلان متفاوت و در دو حالت ۱۰ و ۱۵ طبقه که همگی به صورت هم‌زمان دارای نامنظمی هندسی در پلان و نامنظمی در ارتفاع از نوع طبقه نرم در محل طبقه اول می‌باشند در نظر گرفته می‌شوند. مدل‌های نام‌برده در مرحله نخست با استفاده از چهار نوع تحلیل شامل استاتیکی خطی، دینامیکی خطی، استاتیکی غیرخطی و دینامیکی غیرخطی تحلیل شده و مورد ارزیابی قرار می‌گیرند تا کفایت انواع مختلف تحلیل‌ها در ارزیابی پاسخ سازه بررسی شود. در مرحله بعد پس از مقاوم‌سازی مدل‌ها با مهاربند فولادی در دو الگوی ضربدری و زیگزاگی، با استفاده از تحلیل‌های استاتیکی غیرخطی و

Youssef و همکاران دو سازه مشابه، یکی تقویت‌شده با سیستم مهاربند فولادی هم‌محور و دیگری بدون مهاربند را تحت بارگذاری جانبی مشابه قرار دادند. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد در حالی که سازه تقویت نشده نیز براساس آیین‌نامه‌های موجود طراحی و اجرا شده است، لیکن سازه مقاوم‌سازی شده از شکل-پذیری و مقاومت بسیار بالاتری برخوردار است. در تحقیق انجام‌شده توسط Akbari و Maheri (۲۰۱۱) ضریب رفتار (R) و اضافه مقاومت سیستم دوگانه قاب‌های بتن مسلح و مهاربند فولادی برای سازه‌های ۴، ۸ و ۱۲ طبقه با استفاده از آنالیز پوش‌آور تعیین و ارائه شده است. نتایج نشان‌دهنده حصول شکل‌پذیری بالا و رفتار لرزه‌ای مناسب برای این‌گونه سیستم‌های دوگانه می‌باشد. همچنین در موردی مشابه، در سال ۲۰۱۷ Sukrawa نشان داد که رفتار لرزه‌ای قاب‌های بتنی با مهاربندهای شورون^۱ و ضربدری بسیار سخت‌تر و قوی‌تر از قاب خمشی بتنی است. همچنین نحوه توزیع مناسب مهاربند در قاب بتن مسلح برای دستیابی به عملکرد بهتر توسط (Qiao و همکاران، ۲۰۱۶) بررسی شده است.

اثر مهاربندهای فولادی در بهسازی سازه‌های بتن مسلح نامنظم در موارد محدودی توسط محققین بررسی شده است. این موارد محدود به نامنظمی در ارتفاع و یا پلان بوده و اثر هم‌زمانی نامنظمی در پلان و ارتفاع بررسی نشده است. رفتار کلی سازه‌های بتن مسلح با نامنظمی سختی و مقاومت و همچنین ترکیب آن‌ها در ارتفاع توسط (Chopra و Chintanapakdee، ۲۰۰۴) بررسی شده است. نتایج نشان داد تأثیر نامنظمی از نوع مقاومت بیشتر از نامنظمی از نوع سختی و تأثیر نامنظمی از نوع ترکیب سختی و مقاومت از همه موارد بیشتر می‌باشد.

علاوه بر استفاده از مهاربندهای همگرا، استفاده از مهاربندهای واگرا نیز توسط برخی محققین مورد مطالعه قرار گرفته است که نتایج آزمایشات و تحلیل‌های عددی نشان می‌دهد که از نظر شکل‌پذیری و ضریب کاهش مقاومت، مهاربندهای واگرا کارایی بهتر و از نظر سختی، مقاومت و بازشدگی ترک‌ها مهاربندهای ضربدری کارایی بهتری در مقاوم‌سازی قاب‌های بتن مسلح از خود نشان می‌دهند (TahamouliRoudsari و همکاران، ۲۰۱۷).

Ahmad و Masoudi (۲۰۲۰) برای طراحی سازه‌های بتنی با مهاربندهای فولادی واگرا روش ساده‌شده‌ای با استفاده از آنالیز استاتیکی خطی ارائه کردند و کفایت آن را با استفاده از انجام آزمایش و انجام تحلیل‌های استاتیکی و دینامیکی غیرخطی به اثبات رساندند. Hemmati و همکاران (۲۰۲۰) رفتار لرزه‌ای سه قاب بتن مسلح شامل قاب بتنی ساده، قاب بتنی تقویت‌شده با مهاربند فولادی همگرا و قاب بتنی تقویت‌شده با مهاربند واگرا را

از این پس سازه‌های مورد بررسی در این پژوهش به صورت Sn-m نام برده می‌شوند که در آن n نشان‌دهنده نوع پلان و m نشان‌دهنده تعداد طبقات سازه است. به‌طور مثال S2-10 ساختمان ۱۰ طبقه با پلان نوع ۲ می‌باشد. با توجه به جدول (۳-۴) از ویرایش چهارم استاندارد ۲۸۰۰ (۱۳۹۳) و ارتفاع بالای ۳۵ متر به‌ویژه در مدل‌های ۱۵ طبقه، ساختمان‌های مورد بررسی از نوع قاب خمشی بتن مسلح ویژه در نظر گرفته شده‌اند. همچنین با توجه به بند (۱-۷-۱) از این استاندارد، فرورفتگی در گوشه ساختمان‌ها در دو جهت به‌طور هم‌زمان از ۲۰٪ طول پلان در آن امتداد بیشتر بوده، لذا ساختمان‌ها دارای نامنظمی در پلان از نوع نامنظمی هندسی می‌باشند. با توجه به بند (۱-۷-۲) از این استاندارد، افزایش ارتفاع در طبقه اول موجب کاهش سختی تا حد کم‌تر از ۶۰٪ سختی طبقه فوقانی شده، لذا کلیه مدل‌های مورد نظر دارای نامنظمی در ارتفاع از نوع نامنظمی سختی جانبی (طبقه نرم) می‌باشند.

۳- طراحی سازه‌های مورد بررسی

ساختمان‌های مورد نظر همگی مسکونی، در منطقه‌ای با خطر نسبی زلزله بسیار زیاد و از نوع قاب خمشی بتن مسلح ویژه در نظر گرفته شده‌اند. بنابراین بر اساس ویرایش چهارم استاندارد ۲۸۰۰ ایران ضریب اهمیت ساختمان برابر ۱، ضریب شتاب مبنای طرح برابر ۰/۳۵، ضریب رفتار برابر ۷/۵، ضریب اضافه مقاومت برابر ۳ و ضریب بزرگ‌نمایی تغییر مکان جانبی به‌علت رفتار غیرخطی برابر ۵/۵ در نظر گرفته شده است.

۴- تحلیل طیفی سازه‌های مورد بررسی

با توجه به نامنظمی‌های موجود در سازه‌های مورد بررسی، بر اساس استاندارد ۲۸۰۰ ایران باید از تحلیل‌های دینامیکی خطی که دقت بیشتری دارند استفاده شود. همان‌طور که می‌دانیم در تحلیل استاتیکی خطی معادل سهم هر طبقه از نیروی برش پایه به وزن و ارتفاع طبقه از تراز پایه بستگی دارد. درحالی‌که در تحلیل‌های دینامیکی علاوه بر وزن و ارتفاع هر طبقه، تأثیر سختی نسبی طبقات و همچنین اثر موده‌های بالاتر به‌طور دقیق‌تری در توزیع نیروهای زلزله دخیل خواهند بود. در تحلیل طیفی مدل‌های این پژوهش تعداد موده‌های ارتعاش سه برابر تعداد طبقات در نظر گرفته شده است و برای ترکیب آثار موده‌ها از روش CQC^۲ استفاده شده است.

۵- تحلیل پوش‌آور سازه‌های مورد بررسی

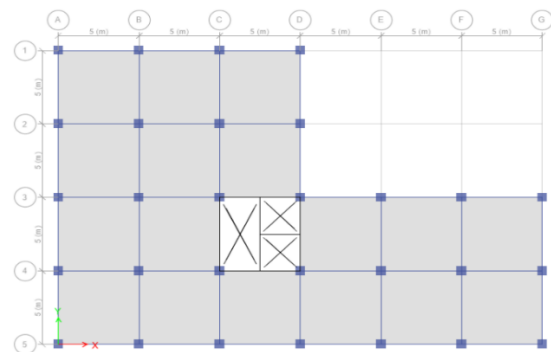
۵-۱- فرضیات مدل‌سازی

در این پژوهش پارامترهای مدل‌سازی و معیارهای پذیرش بر

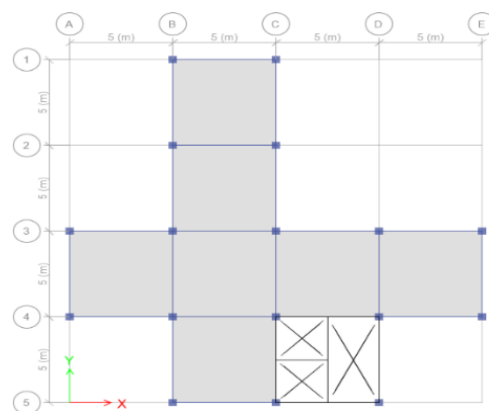
دینامیکی غیرخطی مجدداً سازه‌ها مورد ارزیابی قرار می‌گیرند و پیش‌بینی‌های حاصل از روش‌های مختلف تحلیل با هم مقایسه می‌گردند. از دیگر نتایج مهم این پژوهش ارزیابی کفایت روش‌های مختلف تحلیل، به‌خصوص روش‌های خطی که در آئین‌نامه‌های طراحی استفاده می‌شوند، برای ارزیابی و پیش‌بینی پاسخ لرزه‌ای سازه‌های با نامنظمی هم‌زمان در ارتفاع و پلان می‌باشد که در گذشته کم‌تر در مورد این‌گونه سازه‌ها مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- معرفی سازه‌های مورد بررسی

سازه‌های مورد مطالعه مشتمل بر چهار ساختمان با دو پلان متفاوت (شکل‌های (۱) و (۲)) از نوع نامنظم هندسی می‌باشند که در همگی موارد ارتفاع طبقه اول بیش از سایر طبقات است. به‌گونه‌ای که این اختلاف ارتفاع منجر به ایجاد نامنظمی در ارتفاع از نوع طبقه نرم شده است. سازه‌های مورد نظر در هر پلان در دو حالت ۱۰ و ۱۵ طبقه انتخاب شده‌اند. فواصل ستون‌ها در کلیه دهانه‌ها ۵ متر، ارتفاع طبقه اول ۴/۵ متر، ارتفاع سایر طبقات ۳/۲ متر و ارتفاع خرپشته ۲/۸ متر می‌باشد.

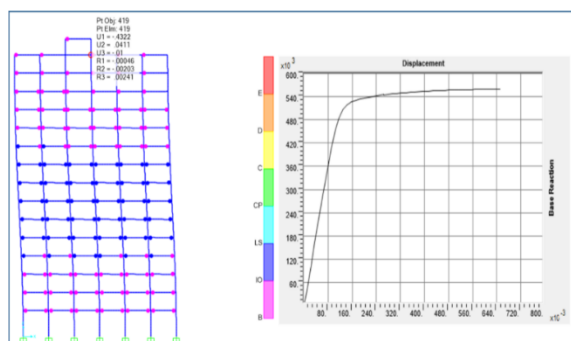


شکل ۱- پلان نوع یک (S1)



شکل ۲- پلان نوع دو (S2)

ولی تیرهای طبقات میانی در محدوده LS^۱ قرار می‌گیرند (شکل ۳). این امر نیز به دلیل تغییر مکان‌های نسبی بیشتر در طبقات میانی می‌باشد. تا محدوده تغییر مکان هدف، ستون‌ها عموماً وارد ناحیه غیرخطی نشده، ولی با افزایش این تغییر مکان‌ها اولین مفاصل ستون‌ها از نوع IO و در طبقه اول مشاهده می‌شود. بنابراین با توجه به نتایج به دست آمده از تحلیل استاتیکی غیرخطی، می‌توان گفت در سازه‌های طراحی شده با استاندارد ۲۸۰۰، هدف این استاندارد که حفظ ایمنی جانی ساکنین می‌باشد تأمین شده است.



شکل ۳- منحنی ظرفیت و وضعیت مفاصل پلاستیک سازه S1-15 در تغییر مکان هدف

۶- تحلیل دینامیکی غیرخطی مدل‌ها

در این پژوهش جهت تهیه شتاب‌نگاشت‌ها از لینک دسترسی پیر برکلی^۵ آمریکا استفاده شده است (PEER Ground Motion Database، ۲۰۱۸). جهت انتخاب زلزله‌ها از سایت پیر، بزرگای زلزله‌ها در محدوده ۶/۵ تا ۷/۵ ریشتر و فاصله از گسل بیشتر از ۱۰ کیلومتر در نظر گرفته شده است. هفت زوج شتاب‌نگاشت انتخاب شده مربوط به زلزله‌های داده شده در جدول (۲) می‌باشند.

جدول ۲- زلزله‌های انتخاب شده از سایت PEER

نام زلزله	PGA (g)	
	X	Y
Manjil - 1990 - Abbar	۰/۵۱۵	۰/۴۹۷
NewZealand - 1987 - Matahina Dam	۰/۲۸۴	۰/۲۴۱
Northridge - 1994 - Castaic	۰/۵۶۸	۰/۵۱۴
Tabas - 1978 - Dayhook	۰/۳۲۴	۰/۴۰۹
Kobe - KJMA	۰/۸۳۴	۰/۶۳۰
Bam - Bam	۰/۸۰۸	۰/۶۲۹
Imperial Valley - Elcentro	۰/۳۱۷	۰/۲۹۸

5. Peer Berkeley

اساس دستورالعمل بهسازی (نشریه ۳۶۰) در نظر گرفته شده، همچنین رفتار غیرخطی سازه‌ها با تعریف مفاصل پلاستیک خمشی (M) در تیرها و اندرکنشی خمشی- محوری (P-M-M) در ستون‌ها در دو نقطه از ابتدا و انتهای اعضا در فواصل ۰/۵ و ۰/۹۵ از طول آن‌ها، در نظر گرفته شده است. دیافراگم طبقات و همچنین گره اتصال تیر به ستون‌ها به صورت صلب و یکپارچه در نظر گرفته شده است.

۵-۲- تغییر مکان هدف

بر اساس دستورالعمل بهسازی، مرکز جرم بام به عنوان نقطه کنترل تغییر مکان سازه‌ها انتخاب شده است. همچنین بر اساس این دستورالعمل باید جهت درک بهتر از رفتار سازه‌ها و رابطه بین برش پایه و تغییر مکان نقطه کنترل، هر گام از افزایش نیروی جانبی را تا ۱/۵ برابر تغییر مکان هدف ثبت نمود. در ادامه با توجه به روابط ارائه شده در دستورالعمل بهسازی تغییر مکان هدف در تمامی مدل‌ها در جهات X و Y محاسبه و در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول ۱- تغییر مکان هدف سازه‌ها

سازه	جهت	تغییر مکان هدف (m)
S1-10	X	۰/۲۹۲
	Y	۰/۳۰۷
S1-15	X	۰/۴۳۳
	Y	۰/۴۶۱
S2-10	X	۰/۳۰۵
	Y	۰/۳۰۹
S2-15	X	۰/۴۶۳
	Y	۰/۴۶۷

۵-۳- تحلیل پوش‌آور

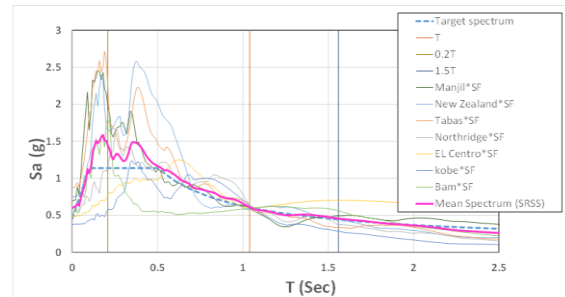
برای انجام تحلیل پوش‌آور حالت‌های مختلف اعمال بار شامل خروج از محوریت نیروها برای در نظر گرفتن اثرات پیچش تصادفی و همچنین اثر اعمال هم‌زمان مؤلفه‌های زلزله با در نظر گرفتن ۱۰۰٪ اثر زلزله در جهت اصلی همراه با ۳۰٪ اثر زلزله در جهت دیگر مطابق دستورالعمل بهسازی در نظر گرفته شده است و پس از بررسی حالت‌های مختلف اعمال بار گذاری بحرانی‌ترین حالت‌ها برای ارزیابی آسیب‌پذیری سازه مورد استفاده قرار گرفته است. پس از تحلیل پوش‌آور در کلیه مدل‌ها، با بررسی وضعیت مفاصل پلاستیک در تغییر مکان هدف، مشاهده می‌شود که تقریباً تیرهای تمامی مدل‌ها در تمام طبقات وارد ناحیه غیرخطی شده به طوری- که در طبقات پایینی و بالایی سازه‌ها در محدوده IO^۲ باقی مانده

3. Immediate Occupancy

4. Life Safety

تقسیم نمی‌شوند. دلیل این امر تغییرشکل قاب خمشی بتنی در مود برشی و تغییرشکل قاب‌های مهاربندی‌شده در مود خمشی می‌باشد (Sugano, ۱۹۸۹). در ساختمان‌های بلند مرکب از دو سیستم قاب خمشی و مهاربندی، هر سیستم باعث اصلاح نقاط ضعف دیگری شده، سختی و مقاومت جانبی سازه افزایش خواهد داشت. از سوی دیگر اختلاف عملکرد دو سیستم به توزیع غیریکنواخت نیروی برشی بین آن‌ها می‌انجامد، به‌گونه‌ای که هنگام تغییرشکل جانبی سازه، قاب خمشی در طبقات پایین به سیستم بادبندی تکیه کرده و در طبقات بالا خود به‌صورت تکیه‌گاهی از تغییرشکل سیستم مهاربندی جلوگیری می‌کند (Tasimi, ۲۰۱۸). با توجه به مطالعات Sugano (۱۹۸۹)، همچنین کنترل بهتر پیچش سازه‌ها، در این پژوهش از دو نوع مهاربند زیگزاگی (B1) و ضربدری (B2) در دهانه‌های خارجی استفاده شده است (شکل‌های (۵) و (۶)). پروفیل مهاربندهای استفاده شده به‌صورت ناودانی جفت و از فولاد نوع S235 می‌باشند. پس از تحلیل‌های خطی و طراحی اولیه با توجه به ظرفیت محدود تیرها و ستون‌های موجود، در حالت کلی مقاطع مهاربندها در هر دو حالت به‌صورت مقاطع دابل ناودانی ۸۰ تا ۱۲۰ در طبقات مختلف به‌دست‌آمده است که جزئیات در (سالاری، ۱۳۹۷) موجود است.

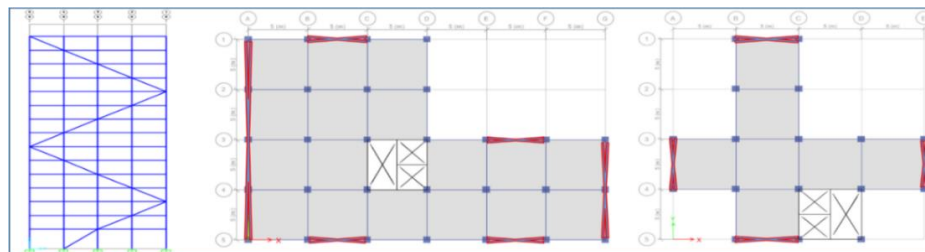
در این پژوهش از روش پیشنهادی آیین‌نامه بارگذاری آمریکا ASCE-7 (۲۰۱۰) مشابه روش پیشنهادشده در آیین‌نامه ۲۸۰۰ ایران (۱۳۹۳) برای مقیاس کردن شتاب‌نگاشت‌ها استفاده شده است. نمونه‌ای از طیف‌های پاسخ و طیف میانگین مقیاس شده با این روش در شکل (۴) مشاهده می‌شود.



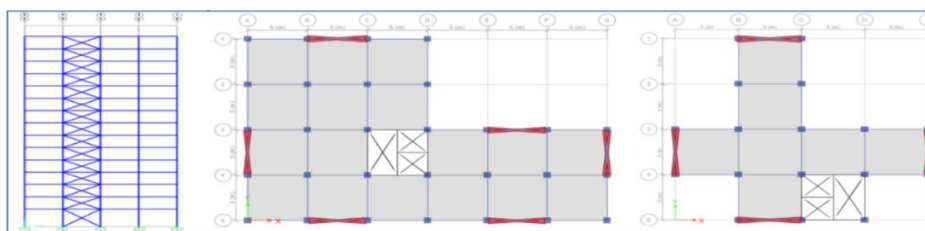
شکل ۴- طیف‌های پاسخ و طیف میانگین مقیاس شده در سازه‌های ۱۰ طبقه

۷- بهسازی مدل‌ها

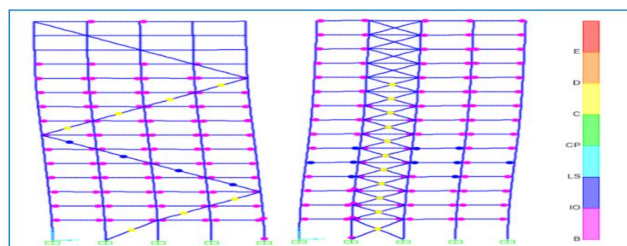
در صورت تقویت قاب‌های خمشی بتنی با مهاربند فولادی، رفتار سازه در برابر نیروهای جانبی پیچیده شده، چراکه نیروهای جانبی وارد بر سازه به نسبت سختی بین این دو سیستم متفاوت،



شکل ۵- جانمایی مهاربندهای زیگزاگی در پلان S1 و S2 به همراه یک نمونه در پلان S1

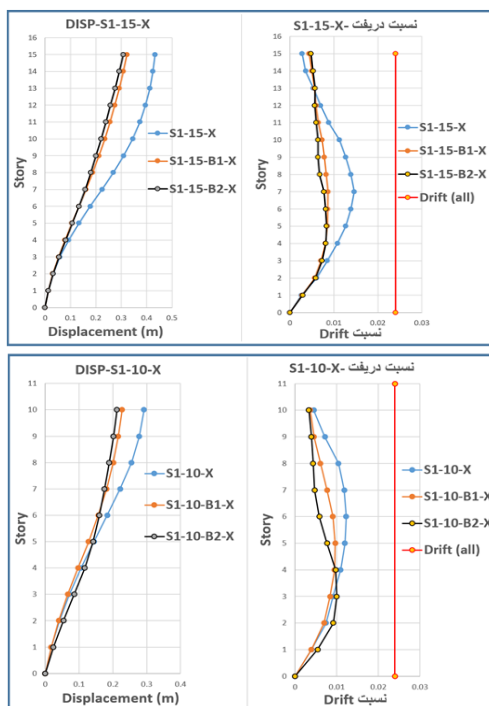


شکل ۶- جانمایی مهاربندهای ضربدری در پلان S1 و S2 به همراه یک نمونه در پلان S1



شکل ۷- نمونه وضعیت مفاصل پلاستیک در تغییر مکان هدف سازه‌های بهسازی شده

از بررسی حالت‌های مختلف اعمال بارگذاری بحرانی‌ترین حالت‌ها برای ارزیابی و پیش‌بینی پاسخ‌های سازه مورد استفاده قرار گرفته است. با استفاده از آنالیز استاتیکی غیرخطی پس از محاسبه تغییرمکان مطلق و تغییرمکان نسبی (دریفت) در تمام طبقات سازه‌ها، قبل و بعد از مقاوم‌سازی، می‌توان دریافت که پس از مقاوم‌سازی سازه‌ها با مهارندهای فولادی، تغییرمکان‌های حداکثر در طبقات فوقانی کاهش قابل توجهی داشته است (شکل‌های (۸) تا (۱۱)). اما نکته قابل توجه آن است که افزودن مهارندها در برخی حالات در طبقات پایین سازه‌ها برخلاف طبقات فوقانی تأثیر زیادی در کاهش تغییرمکان‌ها نداشته و به‌ویژه در سازه‌های ۱۰ طبقه با مهارند ضربدری مطابق با آنچه در شکل‌های (۸) تا (۱۱) دیده می‌شود در محدوده طبقات ۱ تا ۵ حتی منجر به کمی افزایش تغییرمکان‌ها نیز شده است.



شکل ۸- تغییرمکان و نسبت دریفت سازه‌های ۱۰ و ۱۵ طبقه با پلان S1 تحت آنالیز پوش آور در جهت X

همچنین با افزودن مهارندها به سازه‌های اولیه، نسبت دریفت ماکزیمم سازه‌ها کاهش قابل توجهی را نشان می‌دهد. اما نکته مهم دیگر آن است که نسبت دریفت طبقات فوقانی سازه‌ها تغییر چندانی نداشته و در طبقات پایین سازه‌ها، به‌ویژه در سازه‌های ۱۰ طبقه با مهارند ضربدری مطابق با آنچه به‌طور مثال در شکل (۸) دیده می‌شود در محدوده طبقات ۱ تا ۴ افزایش دریفت نیز مشاهده می‌شود.

۷-۱- نتایج تحلیل پوش آور مدل‌های بهسازی شده

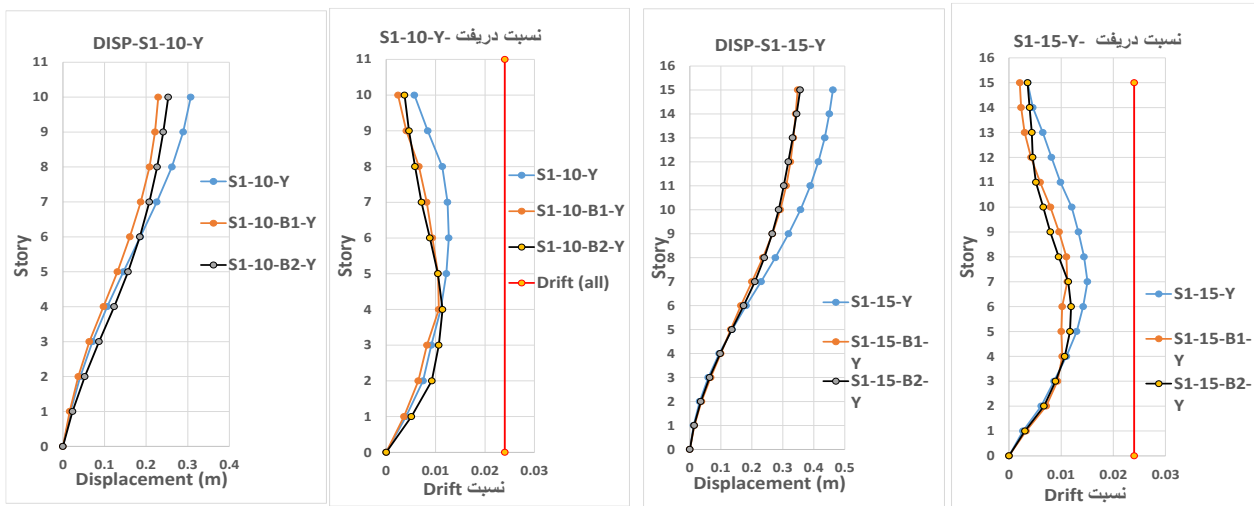
با توجه به تغییر ویژگی‌های مودی و زمان تناوب سازه‌ها به دلیل اضافه کردن مهارندها، باید تغییرمکان‌های هدف جدید برای سازه‌های مقاوم‌سازی شده محاسبه شود. نمونه‌ای از وضعیت مفاصل پلاستیک در تغییر مکان هدف سازه برای سازه‌های مقاوم‌سازی شده با دو نوع مختلف مهارند در شکل (۷) ارائه شده است. پس از انجام آنالیزهای پوش آور و بررسی نتایج موارد زیر مشاهده گردید:

الف) در سازه‌های با مهارند زیگزاگی، نتایج تحلیل پوش آور نشان می‌دهد سازه‌ها تا مرحله تغییرمکان هدف در محدوده IO باقی‌مانده و عموماً تیرها در تمام طبقات وارد ناحیه غیرخطی شده‌اند. با صرف نظر از وضعیت مهارندها که کماتش آن‌ها در هر نوع مقاوم‌سازی اجتناب‌ناپذیر به نظر می‌رسد، می‌توان گفت وضعیت کلیه تیرها و ستون‌های سازه با مهارند زیگزاگی از سطح عملکرد LS به سطح عملکرد IO ارتقاء یافته است.

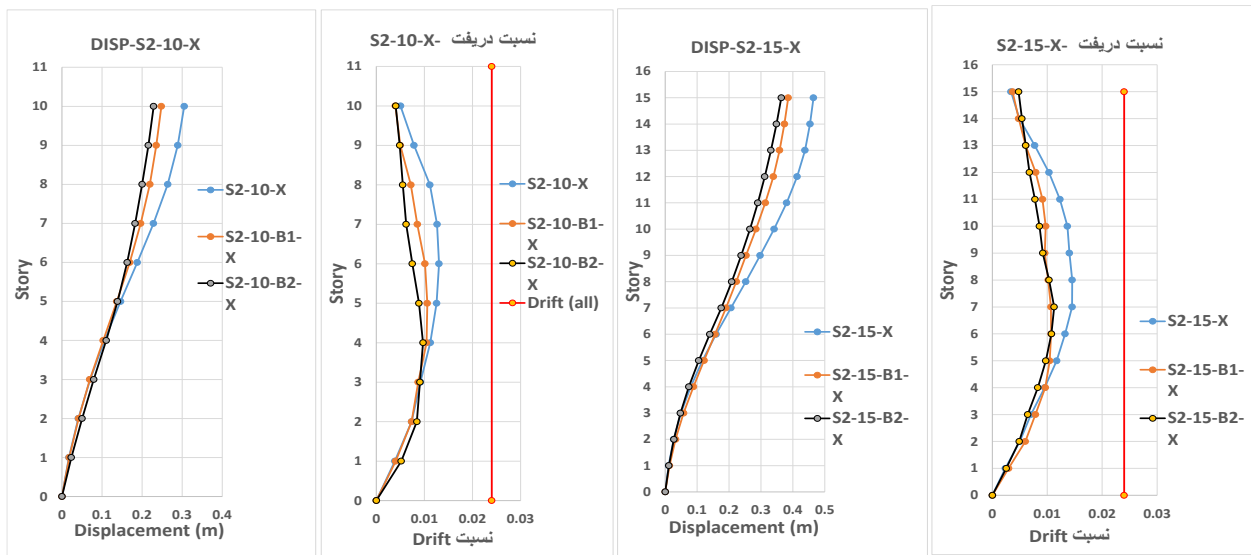
ب) در سازه‌های با مهارند ضربدری، نتایج تحلیل پوش آور نشان می‌دهد سازه‌ها تا مرحله تغییرمکان هدف وضعیت بسیار مطلوب‌تری نسبت به سازه‌های مقاوم‌سازی نشده دارند. در این سازه‌ها تیرها در تمام طبقات وارد ناحیه غیرخطی شده، عموماً در محدوده سطح عملکرد IO می‌باشند و فقط تعداد محدودی از تیرها در طبقات میانی همچنان سطح عملکرد LS را دارند. همچنین ستون‌ها فقط در طبقه اول وارد ناحیه غیرخطی و البته با سطح عملکرد IO شده‌اند. با صرف نظر از وضعیت مهارندها که کماتش آن‌ها در هر نوع مقاوم‌سازی اجتناب‌ناپذیر به نظر می‌رسد، می‌توان گفت وضعیت کلیه تیرها و ستون‌های سازه با مهارند ضربدری اگرچه به‌طور کامل به سطح عملکرد IO ارتقاء پیدا نکرده، اما وضعیت بسیار بهتری در مقایسه با سازه‌های اولیه دارد. نتایج بیشتر در مورد ارزیابی آسیب‌پذیری سازه و میزان ارتقاء عملکرد لرزه‌ای ساختمان‌های مورد بررسی در (سالاری، ۲۰۱۸) ارائه شده است. در این مقاله موضوع استفاده از روش‌های مختلف تحلیل در پیش‌بینی پاسخ لرزه‌ای سازه‌های در نظر گرفته شده قبل و بعد از بهسازی بررسی می‌شود.

۷-۲- مقایسه تغییرمکان و نسبت دریفت^۶ طبقات در تحلیل پوش آور

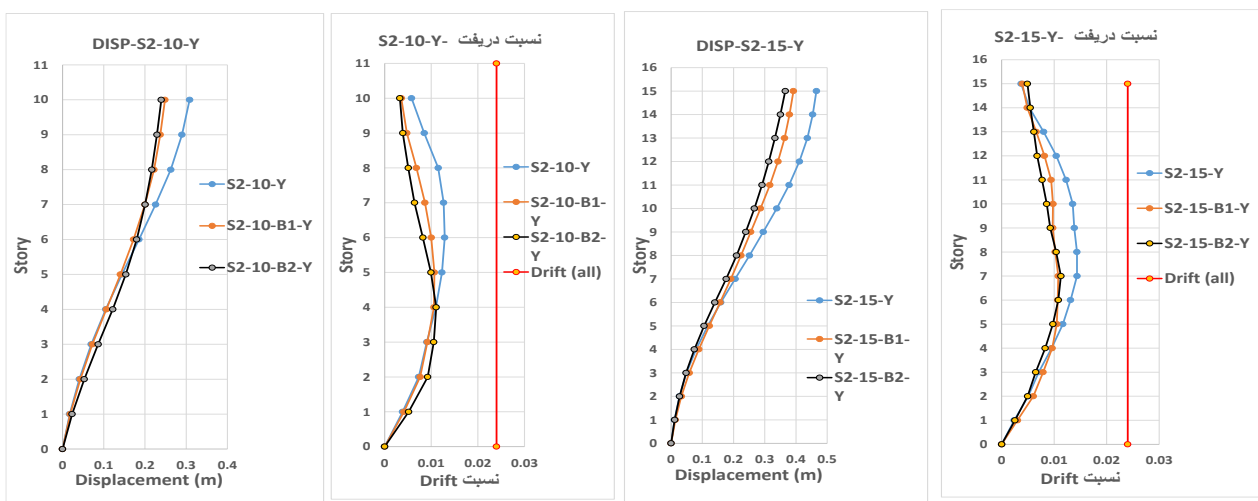
برای انجام تحلیل پوش آور حالت‌های مختلف اعمال بار شامل خروج از محوریت نیروها برای در نظر گرفتن اثرات پیچش تصادفی و همچنین اثر اعمال هم‌زمان مؤلفه‌های زلزله با در نظر گرفتن ۱۰۰٪ اثر زلزله در جهت اصلی همراه با ۳۰٪ اثر زلزله در جهت دیگر مطابق دستورالعمل بهسازی در نظر گرفته شده است و پس



شکل ۹- تغییرمکان و نسبت دریفت سازه‌های ۱۰ و ۱۵ طبقه با پلان S1 تحت آنالیز پوش آور در جهت Y



شکل ۱۰- تغییرمکان و نسبت دریفت سازه‌های ۱۰ و ۱۵ طبقه با پلان S2 تحت آنالیز پوش آور در جهت X



شکل ۱۱- تغییرمکان و نسبت دریفت سازه‌های ۱۰ و ۱۵ طبقه با پلان S2 تحت آنالیز پوش آور در جهت Y

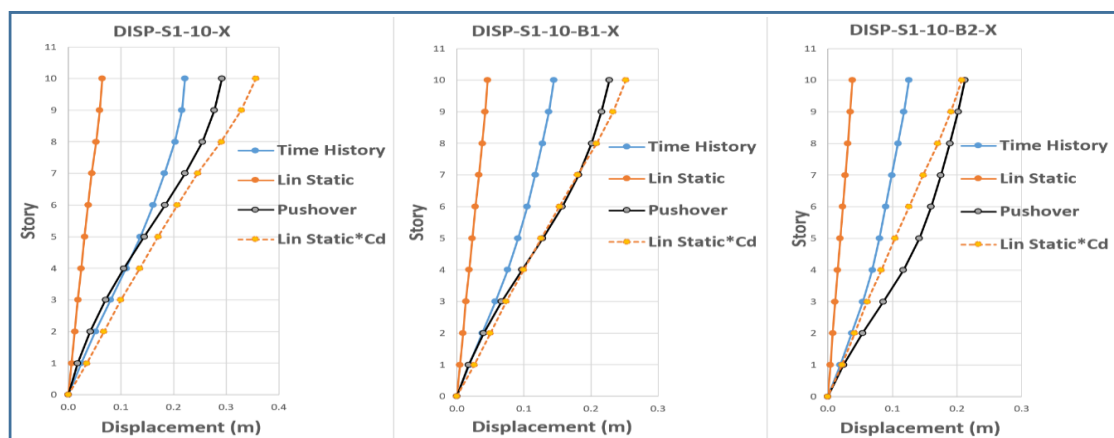
به دست آمده از ۷ شتاب‌نگاشت در شکل ارائه شده است. همان‌طور که در این تصاویر مشاهده می‌شود، مقدار پیشنهادی آیین‌نامه برای این ضریب در سازه‌های اولیه در جهت اطمینان بوده و تغییر مکان‌های جانبی سازه‌ها را کمی بزرگ‌تر از تغییر مکان‌های ناشی از تحلیل‌های غیرخطی سازه نشان می‌دهد. اما در سازه‌های بهسازی شده مقدار این ضریب نیاز به اصلاح دارد، چراکه در طبقات میانی سازه‌ها مقادیر تغییر مکان‌های حاصل از تحلیل‌های خطی کم‌تر از تغییر مکان‌های حاصل از تحلیل استاتیکی غیرخطی می‌باشند. البته در این حالات حداکثر پاسخ سازه با استفاده از آنالیز خطی با دقت مناسبی پیش‌بینی شده است ولی تغییر شکل سایر طبقات و الگوی تغییر شکل سازه به‌درستی توسط آنالیز خطی پیش‌بینی نشده است. استفاده از آنالیز خطی در این حالات می‌تواند منجر به ارزیابی نادرست در طبقات میانی و پایینی سازه گردد. این مشکل به‌خصوص در مورد سازه‌های ۱۰ طبقه مشاهده می‌شود که مخصوصاً بعد از اضافه شدن مهاربندها اتفاق افتاده است (به‌طور مثال به شکل‌های (۱۲) و (۱۳) و (۱۶) و (۱۷) مراجعه نمایید). البته در مورد سازه‌های ۱۵ طبقه بررسی شده در تمامی حالات نتایج تحلیل استاتیکی خطی و غیرخطی انطباق مناسبی داشته‌اند. اگرچه در صورتی که نتایج آنالیز دینامیکی غیرخطی مورد نظر قرار گیرد، که متوسط پاسخ‌های به دست آمده از ۷ رکورد انتخابی می‌باشد، مشاهده می‌گردد که در تمامی موارد بررسی شده تقاضای تغییر مکان طبقات مقدار کم‌تری در مقایسه با آنالیز استاتیکی غیرخطی می‌باشد. این مورد می‌تواند به محافظه‌کارانه بودن روش استاتیکی خطی برگردد و نحوه اعمال ترکیب ۱۰۰-۳۰ که به‌نظر می‌رسد در مورد سازه‌های نامنظم می‌تواند تا حدودی موجب افزایش تأثیر پیچش یا سایر نیروها و تغییر شکل‌های ایجاد شده در اثر نامنظمی سازه در پلان و ارتفاع گردد.

به‌رحال با توجه به نتایج ارائه شده مشاهده می‌گردد که استفاده از مهاربندهای همگرا با شکل‌های متفاوت در تمامی حالات در کاهش تغییر مکان حداکثر و دریافت حداکثر سازه بسیار مؤثر بوده است.

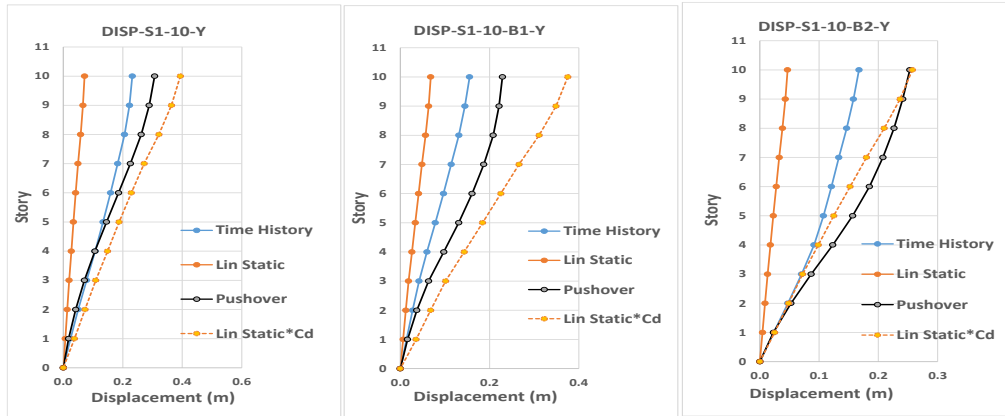
۷-۳- مقایسه نتایج به دست آمده از روش‌های مختلف تحلیل سازه

آیین‌نامه‌ها انجام تحلیل‌های غیرخطی برای به دست آوردن تغییر مکان‌های جانبی را در اکثر سازه‌ها لازم نمی‌دانند و تلاش می‌کنند تا با اعمال یک ضریب اصلاح در تغییر مکان‌های حاصل از تحلیل خطی تغییر مکان‌های واقعی سازه با لحاظ رفتار غیرخطی سازه‌ها را به دست آورند. در ویرایش چهارم استاندارد ۲۸۰۰ (۱۳۹۳) برای تخمین تغییر مکان‌های غیرخطی سازه، از ضریب بزرگنمایی تغییر مکان C_d استفاده می‌شود. مقدار این ضریب برای سازه‌های قاب خمشی بتن مسلح ویژه که مورد بررسی در این پژوهش نیز می‌باشند، عدد ۵/۵ می‌باشد. البته باید توجه شود که ضریب C_d برای حالت استفاده از مهاربند فولادی در قاب‌های بتن مسلح می‌تواند متفاوت باشد که در آیین‌نامه‌های طراحی ارائه نشده است.

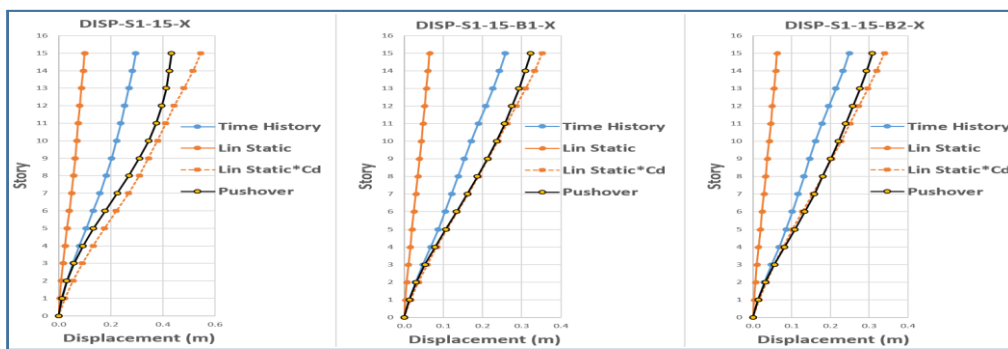
در ادامه در شکل‌های (۱۲) تا (۱۹) تغییر مکان طبقات در تمامی سازه‌های بررسی شده (هم قبل از بهسازی و هم بعد از بهسازی) با استفاده از روش‌های مختلف تحلیل‌های خطی و غیرخطی و در جهات اصلی سازه‌ها (x و y) ارائه شده است که می‌تواند برای مقایسه روش‌های مختلف تحلیل در پیش‌بینی پاسخ سازه‌ها مورد استفاده قرار گیرد. می‌توان ضریب پیشنهادی آیین‌نامه را در خصوص سازه‌های با قاب خمشی بتن مسلح ویژه نیز بررسی نمود. در تحلیل دینامیکی غیرخطی متوسط حداکثر پاسخ‌های



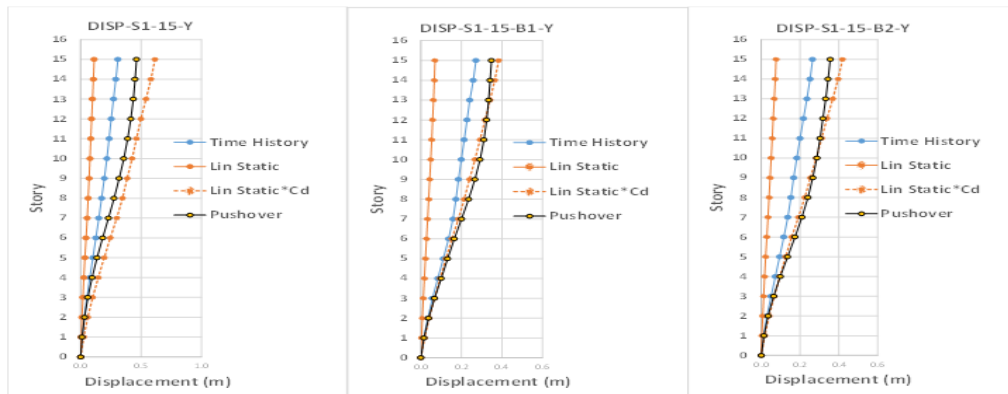
شکل ۱۲- مقایسه تغییر مکان طبقات ناشی از تحلیل‌های خطی و غیرخطی سازه S1-10 در جهت X



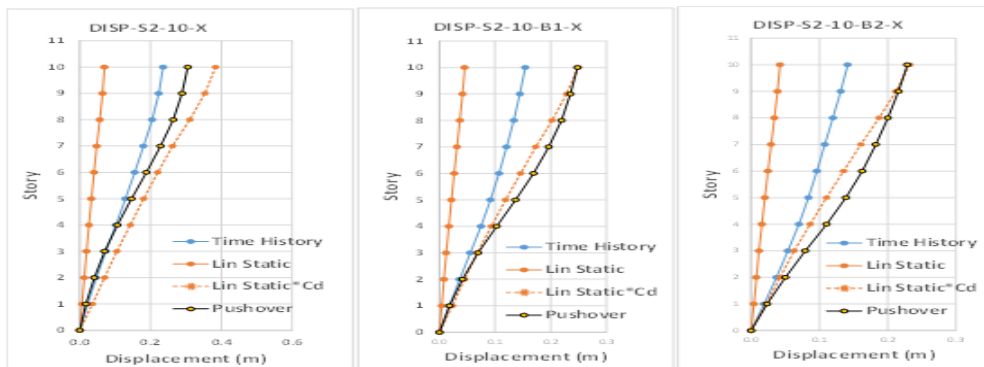
شکل ۱۳- مقایسه تغییر مکان طبقات ناشی از تحلیل‌های خطی و غیرخطی سازه S1-10 در جهت Y



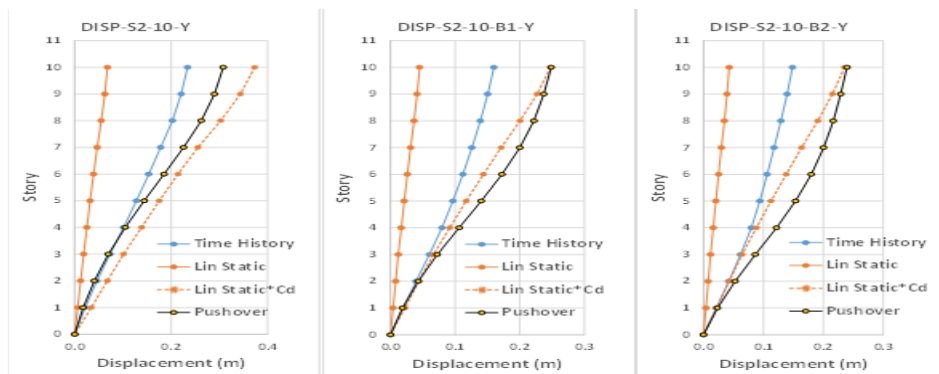
شکل ۱۴- مقایسه تغییر مکان طبقات ناشی از تحلیل‌های خطی و غیرخطی سازه S1-15 در جهت X



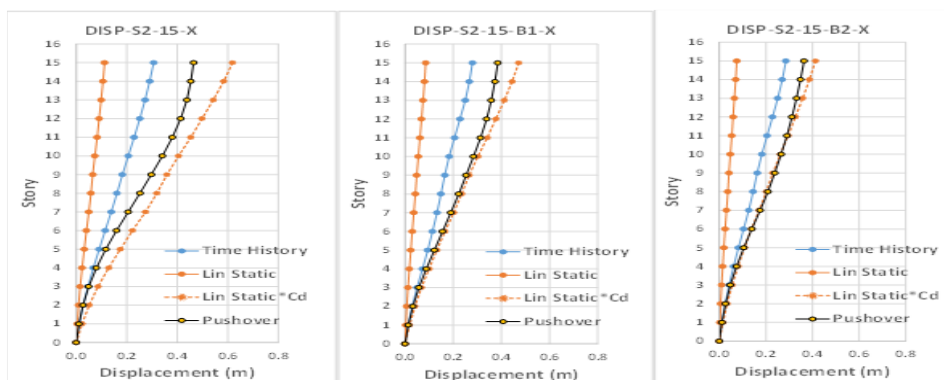
شکل ۱۵- مقایسه تغییر مکان طبقات ناشی از تحلیل‌های خطی و غیرخطی سازه S1-15 در جهت Y



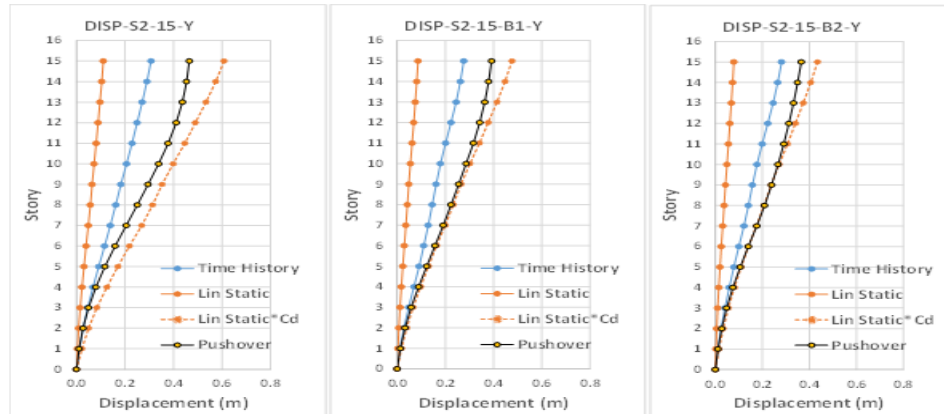
شکل ۱۶- مقایسه تغییر مکان طبقات ناشی از تحلیل‌های خطی و غیرخطی سازه S2-10 در جهت X



شکل ۱۷- مقایسه تغییر مکان طبقات ناشی از تحلیل‌های خطی و غیر خطی سازه S2-10 در جهت Y



شکل ۱۸- مقایسه تغییر مکان طبقات ناشی از تحلیل‌های خطی و غیر خطی سازه S2-15 در جهت X



شکل ۱۹- مقایسه تغییر مکان طبقات ناشی از تحلیل‌های خطی و غیر خطی سازه S2-15 در جهت Y

۴-۷- بررسی پیش سازه‌ها قبل و بعد از مقاوم‌سازی

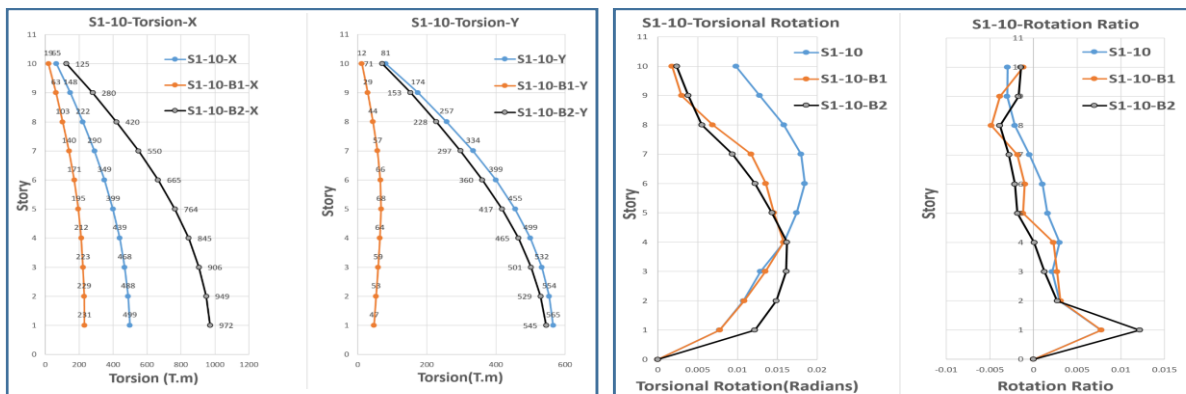
در بهسازی لرزه‌ای سازه‌های دارای نامنظمی در پلان باید توجه گردد که ممکن است به دلیل نامنظمی‌های موجود در پلان (مانند سازه‌های مورد بررسی در این تحقیق) استفاده از سیستم مهاربند به صورت متقارن در سازه امکان‌پذیر نباشد که همین عامل می‌تواند در مواردی سبب ایجاد پیش بیشتر در سازه گردد که باید مورد بررسی قرار گیرد. از طرفی محدودیت ظرفیت تیرها و ستون‌های سازه‌های قاب خمشی بتنی موجود منجر به محدودیت انتخاب مقاطع برای مهاربندهای فولادی جهت مقاوم‌سازی شده

است. این دو موضوع منجر به آن شده است که الزاماً پس از مقاوم‌سازی سازه‌ها، لنگر پیشی سازه‌ها در تمام جهات و در تمام مدل‌ها کاهش نداشته باشد. در شکل‌های (۲۰) تا (۲۳) میزان لنگر پیشی ایجاد شده در طبقات مختلف سازه‌های بررسی شده در صورت اعمال زلزله در جهات X و Y، میزان دوران پیشی ایجاد شده در طبقات مختلف و همچنین میزان دوران پیشی نسبی در ارتفاع سازه ارائه شده است (منظور از دوران پیشی نسبی، دوران هر طبقه نسبت به طبقه زیرین آن می‌باشد). با توجه به شکل (۱۵) همان‌طور که در نتایج حاصل از تحلیل پوش‌آور

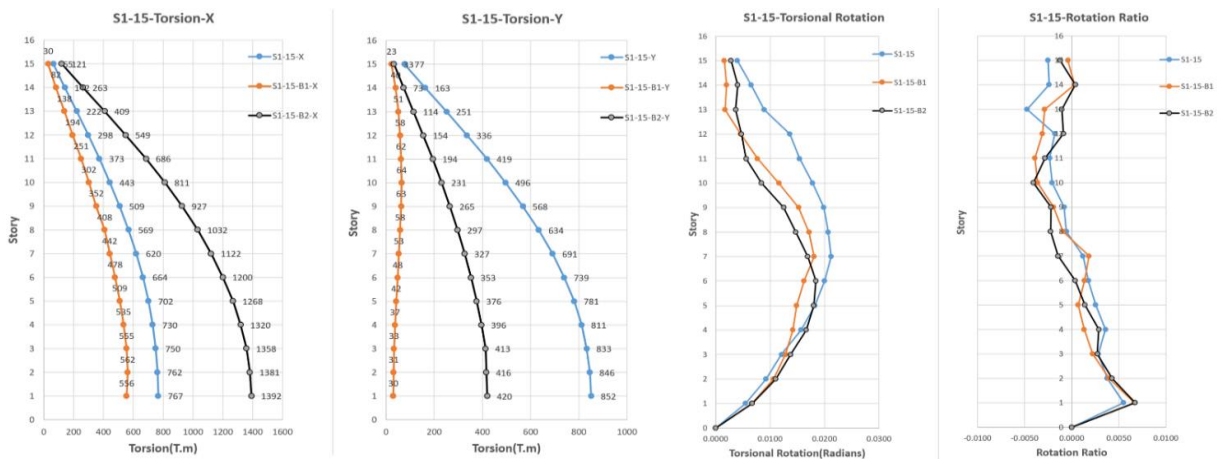
مهاربند) سبب افزایش لنگر پیچشی وارد به طبقات برای حالت زلزله در جهت X شده است. البته لنگرهای پیچشی برای زلزله در جهت Y در این حالت کاهش یافته است. این نتیجه با توجه به پلان خاص S2 که در نظر گرفتن مهاربندها در محورهای کناری سبب ایجاد عدم تقارن و افزایش فاصله مرکز سختی و مرکز جرم سازه می‌گردد دور از انتظار نمی‌باشد. بنابراین نوع نامنظمی در پلان ممکن است استفاده از مهاربندها در بهسازی را محدود نماید. در این حالت نیز از نظر دوران پیچشی طبقات نتایج مشابه حالت پلان S1 می‌باشد. نکته قابل توجه دیگر آن است که با وجود افزایش یا کاهش کلی لنگر پیچشی، در تمام مدل‌ها پیچش یا دوران ناشی از لنگر پیچشی به جز در سازه‌های ۱۰ طبقه و در محدوده طبقات ۱ تا ۳، در تمامی طبقات کاهش یافته است. این موضوع با توجه به شکل (۸) و (۲۰) مشابه نتایج دریافت طبقات ناشی از تحلیل پوش‌آور می‌باشد. نکته دیگر که در نتایج مشاهده می‌گردد، اثر طبقه نرم در پیچش سازه‌ها است. به‌طور مثال با توجه به شکل (۲۰) و مشاهده نسبت پیچش یا دوران نسبی پیچشی می‌توان دریافت که در تمامی مدل‌ها، دوران نسبی پیچشی در طبقه اول آن‌ها (طبقه نرم) بیشتر از سایر طبقات است.

مشاهده می‌شود، پس از مقاوم‌سازی با مهاربندهای فولادی در برخی سازه‌ها لنگر پیچشی کاهش یافته و در برخی موارد نیز افزایش داشته است. به‌طور مثال در شکل (۲۰) برای سازه S1-10 مشاهده می‌گردد که استفاده از مهاربند از نوع B1 سبب کاهش لنگر پیچشی سازه بهسازی شده در طبقات مختلف سازه برای هر دو حالت زلزله در جهات X و Y شده است در حالی که استفاده از مهاربند از نوع B2 سبب افزایش لنگر پیچشی در حالت زلزله در جهت X شده است. از نظر دوران پیچشی نیز هر دو نوع مهاربند میزان دوران پیچشی در طبقات بالایی کاهش داده‌اند. البته استفاده از مهاربند نوع B2 در این حالت در طبقات پایینی سبب افزایش میزان دوران پیچشی طبقات شده است در حالی که مهاربند B1 در دوران این طبقات تأثیر زیادی نداشته است. در سازه ۱۵ طبقه با پلان مشابه (S1-15) نیز با مراجعه به شکل (۲۱) تقریباً روند مشابهی مشاهده می‌گردد با این تفاوت که عملکرد مهاربند B2 در مهار دوران‌های پیچشی در این حالت اندکی ارتقاء می‌یابد.

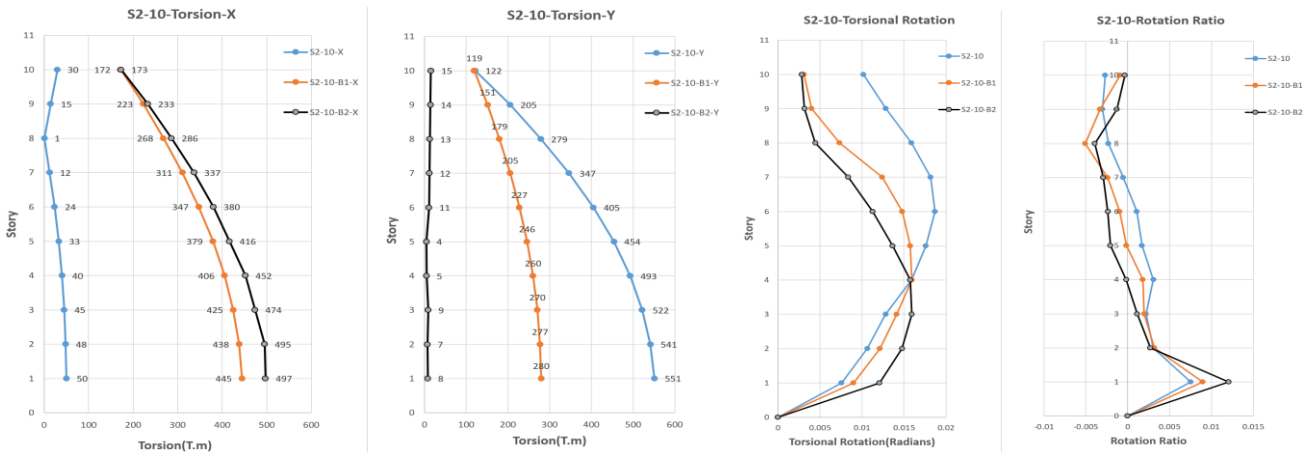
در مورد سازه‌های بررسی شده با پلان S2 با توجه به شکل‌های (۲۲) و (۲۳) مشاهده می‌شود که وجود مهاربندها (هر دو نوع



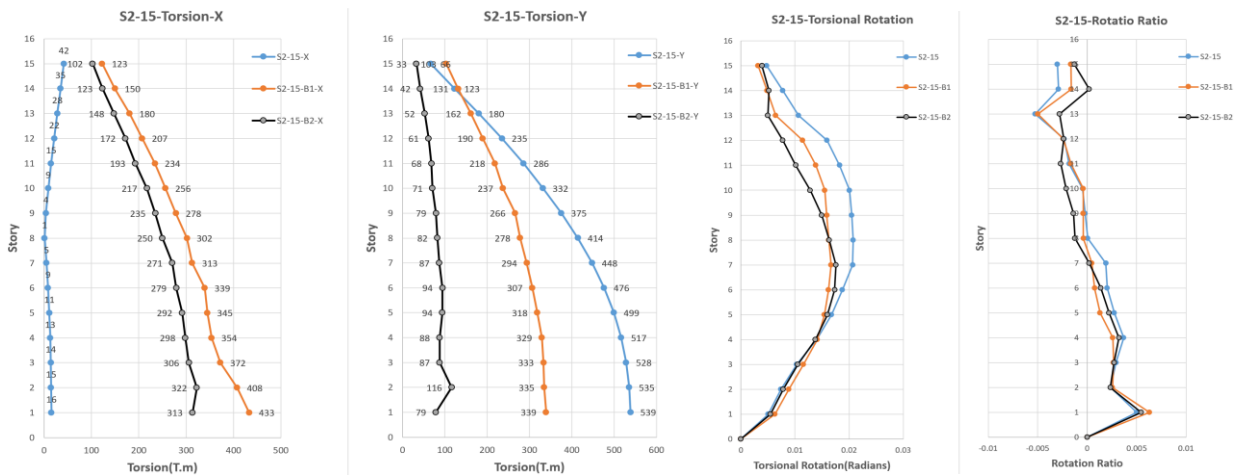
شکل ۲۰- لنگر پیچشی، پیچش و نسبت پیچش سازه‌های S1-10



شکل ۲۱- لنگر پیچشی، پیچش و نسبت پیچش سازه‌های S1-15



شکل ۲۲- لنگر پیچشی، پیچش و نسبت پیچش سازه‌های S2-10



شکل ۲۳- لنگر پیچشی، پیچش و نسبت پیچش سازه‌های S2-15

(LS) با زلزله سطح خطر یک را تأمین نموده‌اند. نتایج حاصل از تحلیل پوش‌آور سازه‌ها نشان می‌دهد که افزودن مهاربندها در طبقات پایین سازه‌ها برخلاف طبقات فوقانی تأثیر زیادی در کاهش تغییرمکان نداشته و به‌ویژه در سازه‌های ۱۰ طبقه با مهاربند ضربدری در محدوده طبقات ۱ تا ۵ حتی منجر به کمی افزایش تغییرمکان‌ها نیز شده است. به‌نظر می‌رسد اختلاف عملکرد دو سیستم به توزیع غیریکنواخت نیروی برشی بین آن‌ها می‌انجامد، لذا توصیه می‌شود برای تصمیم‌گیری قطعی در این خصوص مدل‌های منظم و نامنظم بیشتری مورد بررسی قرار گیرند.

نتایج حاصل از تحلیل پوش‌آور نشان می‌دهد که با افزودن مهاربندها به سازه‌های اولیه، دررفت ماکزیمم سازه‌ها کاهش قابل توجهی را نشان می‌دهد. اما نکته قابل توجه آن است که دررفت طبقات فوقانی سازه‌ها کاهش چندانی نداشته و در طبقات پایین سازه‌ها، به‌ویژه

این موضوع اثر منفی وجود طبقه نرم در پیچش سازه‌ها را به‌خوبی نشان می‌دهد و به‌نوعی مبین تأثیر متقابل نامنظمی در ارتفاع و نامنظمی در پلان بر روی یکدیگر می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود وجود طبقه نرم در سازه‌های ۱۰ طبقه تأثیر مهمی در دوران پیچشی طبقات پایین‌تر داشته است و در سازه‌های ۱۵ طبقه تأثیر طبقه نرم بر روی پیچش طبقات پایینی کاهش داشته است.

۸- نتیجه‌گیری

نتایج زیر در مورد سازه‌های بررسی‌شده در این تحقیق به‌دست آمد:

(۱) با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل‌های غیرخطی مشاهده شد سازه‌های بتن مسلح در نظر گرفته‌شده در این تحقیق که دارای نامنظمی هم‌زمان در پلان و ارتفاع بودند و بر اساس ویرایش چهارم استاندارد ۲۸۰۰ ایران طراحی شدند، هدف این آیین‌نامه یعنی سطح عملکرد ایمنی جانی

۱۳۹۳.

سالاری م، "ارزیابی عملکرد لرزه‌ای سازه‌های بتن آرمه نامنظم در پلان و ارتفاع، تقویت شده با مهاربند فولادی"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، گرایش سازه، دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ۱۳۹۷.

دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌های موجود، نشریه شماره ۳۶۰، تهران، ویرایش اول، ۱۳۹۲.

مظلوم م، احمدی‌نژاد س ع، "تأثیر تیر پیوند برشی قائم در ساختمان‌های بتنی بهسازی شده بر عملکرد اجزای سازه و ضریب رفتار"، نشریه مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تبریز، ۱۳۹۶، ۴۷ (۴)، ۸۵-۹۶.

Ahmad N, Masoudi M, "Eccentric steel brace retrofit for seismic upgrading of deficient reinforced concrete frames", *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2020, 19, 1-35.

Akbari R, Maheri MR, "Analytical investigation of response modification (behaviour) factor, R, for reinforced concrete frames rehabilitated by steel chevron bracing", *Structure and Infrastructure Engineering*, 2013, 9 (6), 507-15.

ASCE-07, "Minimum Design Loads for Buildings and other Structures", American Society of Civil Engineers, 2010.

ASCE standard ASCE/SEI 41-17, "seismic evaluation and retrofit of existing buildings", American Society of Civil Engineers, 2017.

Badoux M, Jirsa JO, "Steel bracing of RC frames for seismic retrofiting", *Journal of Structural Engineering*, 1990, 116 (1), 55-74.

Chintanapakdee C, Chopra A, "Seismic Response of Vertically Irregular Frames: Response History and Modal Pushover Analyses", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 2004, 1177-1185.

Hemmati A, Kheyroddin A, Farzad M, "Experimental Study of Reinforced Concrete Frame Rehabilitated by Concentric and Eccentric Bracing", *Journal of Rehabilitation in Civil Engineering*, 2020, 8 (1), 97-108.

Jamnani HH, Abdollahzadeh G, Faghihmaleki H, "Seismic fragility analysis of improved RC frames using different types of bracing", *Journal of Eng. Science and Technology*, 2017, 12 (4), 913-934.

Javadi P, Yamakawa T, "Retrofitting of RC Frames by Steel Braced Frames Utilizing a Hybrid Connection Technique", *Journal of Advanced Concrete Technology*, 2013, 11 (3), 89-107.

Kafi M, Kheyroddin A, Omrani R, "New Steel Divergent Braced Frame Systems for Strengthening of Reinforced Concrete Frames", *International Journal of Engineering*, 2020, 33 (10), 1886-1896.

Karimi R, Rahimi S, "Performance-based plastic design for seismic rehabilitation of high rise frames with eccentric bracing and vertical link", *Earthquakes and Structures*, 2019, 17 (6), 623.

Kheyroddin A, Sepahrad R, Saljoughian M, Kafi MA, "Experimental evaluation of RC frames retrofitted by steel jacket, X-brace and X-brace having ductile ring as a structural fuse", *Journal of Building*

در سازه‌های ۱۰ طبقه با مهاربند ضربدری در محدوده طبقات ۱ تا ۴ افزایش دریغ نیز مشاهده شده است.

(۴) مقایسه نتایج تحلیل‌های استاتیکی خطی و تحلیل‌های غیرخطی در تمامی مدل‌های اولیه و مقاوم‌سازی شده نشان می‌دهد که ضریب بزرگ‌نمایی تغییرمکان‌های خطی (Cd) که در ویرایش چهارم استاندارد ۲۸۰۰ ایران ارائه شده، برای سازه‌های اولیه در جهت اطمینان بوده و تغییرمکان‌های جانبی طبقات سازه‌ها را کمی بزرگ‌تر از تغییرمکان‌های ناشی از تحلیل‌های غیرخطی سازه نشان می‌دهد. اما نکته قابل توجه آن است که در مورد سازه‌های مقاوم‌سازی شده تغییرمکان‌های تحلیل خطی در بعضی طبقات (به‌خصوص طبقات میانی) از تغییرمکان‌های ناشی از تحلیل پوش‌آور کوچک‌تر است. این موضوع نشان می‌دهد در خصوص سازه‌های مقاوم‌سازی شده آنالیز خطی ممکن است نتایج مناسبی ارائه ندهد. این مورد به‌خصوص در مورد سازه‌های ۱۰ طبقه بررسی شده مشهودتر بود.

(۵) نتایج تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی با استفاده از ۷ شتاب‌نگاشت معرفی شده، نشان می‌دهد که زلزله طیس در مقایسه با دیگر زلزله‌ها تغییرمکان بیشتری را در سازه‌ها ایجاد نموده و به‌ویژه در مقایسه با تحلیل پوش‌آور منجر به ایجاد مفاصل پلاستیک بیشتری در طبقات فوقانی سازه‌ها شده است. البته در مجموع نتایج تحلیل دینامیکی غیرخطی نشان می‌دهد که متوسط تغییرمکان طبقات در تمامی مدل‌ها در مقایسه با تحلیل پوش‌آور مقادیر کم‌تری را نشان می‌دهد.

(۶) نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که به‌دلیل داشتن پلان‌های نامتقارن و عدم امکان استفاده از مهاربندهای متقارن در پلان، اگرچه پس از مقاوم‌سازی در برخی مدل‌ها لنگر پیچشی سازه‌ها کاهش داشته اما در مواردی نیز منجر به افزایش لنگر پیچشی سازه‌ها شده است. همچنین با بررسی نسبت پیچش (دوران هر طبقه نسبت به طبقه زیرین) می‌توان اثر منفی طبقات نرم را بر روی پیچش سازه‌های نامنظم در پلان مشاهده نمود. بنابراین اثر وجود هم‌زمان انواع نامنظمی‌ها و تأثیر متقابل آن‌ها بر یکدیگر در سازه‌ها موردی است که کم‌تر مورد توجه قرار گرفته و می‌تواند رفتار لرزه‌ای سازه‌ها را تحت تأثیر قرار دهد.

۹- مراجع

آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله (استاندارد ۲۸۰۰)، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، ویرایش چهارم،

- Pathology and Rehabilitation, 2019, 4 (1), 11.
- PEER Ground Motion Database, available at <http://peer.berkeley.edu>, Accessed March 2018.
- Qiao S, Han X, Zhou K, "Bracing configuration and seismic performance of reinforced concrete frame with brace", *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 2017, 26 (14), 1381.
- Rodriguze M, Park R, "Repair and Strengthening of Reinforced Concrete Buildings for Seismic Resistance", *Earthquake Spectra*, 1991, 7 (3), 439-459.
- Sugano S, "Study of the Seismic Behaviour of Retrofitted Reinforced Concrete Building", *Proceedings ASCE, 89 Structures Congr. Sanfrancisco, CA, U.S.A*, 1989.
- Sukrawa M, "Staged analysis of RC frame retrofitted with steel braces in low and medium-rise buildings", *Journal of procedia Engineering*, 2017, 171, 1002-1009.
- TahamouliRoudsari M, Entezari A, Hadidi M, Gandomian O, "Experimental assessment of retrofitted RC frames with different steel braces", *Structures*, 2017, 11, 206-217.
- Xiong Z, Chen X, Wang Y, Zhang C, Zhuge Y, "Shaking table tests on braced reinforced concrete frame structure across the earth fissure under earthquake", *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 2019, 28 (1), 1559.
- Youssef MA, Ghaffarzadeh H, Nehdi M, "Seismic performance of RC frames with concentric internal steel bracing", *Engineering Structures*, 2007, 29 (7), 1561-1568.

EXTENDED ABSTRACT

Assessment of Different Analysis Methods for Seismic Evaluation of RC Buildings with Irregularities in Plan and Height, Retrofitted Using Steel Bracing

Payam Tehrani*, Mehdi Salari

Department of Civil and Environmental Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

Received: 15 October 2019; **Accepted:** 14 March 2021

Keywords:

Seismic performance assessment, Reinforced concrete structure, Plan and elevation irregularities, Steel brace, Non-linear analyses.

1. Introduction

One of the seismic retrofitting methods in concrete structures is the use of steel bracing. The present paper attempts to investigate the seismic response of 4 reinforced concrete structures with 10 and 15 stories and two different plans. The structural models are geometrically irregular in plan and they also have vertical structural irregularities due to the soft story. In this study, the seismic response predicted using different linear and nonlinear analysis methods are compared for the case of structures with combinations of irregularities in plan and height. The effect of combinations of irregularities has not been studied in the past and is not considered in current seismic design provisions.

2. Methodology

With respect to the complexity of the seismic behavior of irregular structures and based on the building codes requirements, linear and non-linear static analyses, as well as, linear and non-linear dynamic analyses have been performed for the design and evaluation of the primary structural models. In the first step, by conducting non-linear static and dynamic analyses, the process of plastic-hinge formation and structural performance levels are evaluated. Subsequently, the structures are strengthened with steel braces in X and zigzag configurations and their seismic performance is determined using different analysis methods. The predictions obtained using different methods of analysis are compared for all the primary and rehabilitated structures.

3. Results and discussion

The comparison between the results obtained from the analyses of the primary structures and the retrofitted models with different plan types (e.g., plans S1 and S2, as shown in Fig. 1) indicates that employing both types of steel braces, X and zigzag configurations, leads to significant improvement in the seismic performance level of the structures (Fig. 2). Predictions obtained using different methods of analysis were compared for all structural models and the results indicated that the predictions obtained using the linear dynamic analysis method, that is permitted in the current design codes, were not appropriate for some cases (e.g., Fig. 3).

* Corresponding Author

E-mail addresses: payam.tehrani@aut.ac.ir (Payam Tehrani), mehdisalari330@yahoo.com (Mehdi Salari).

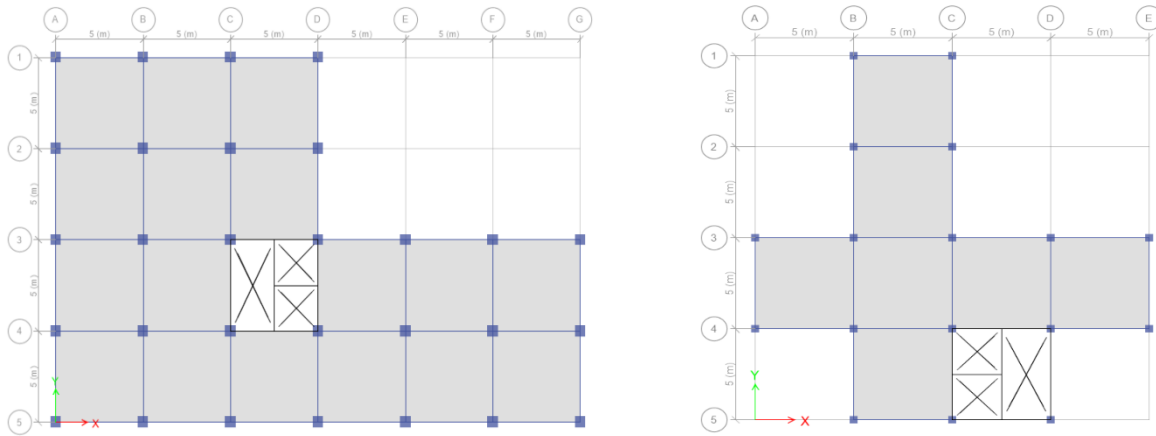


Fig. 1. Plan S1 (left) and S2 (right) considered in this study

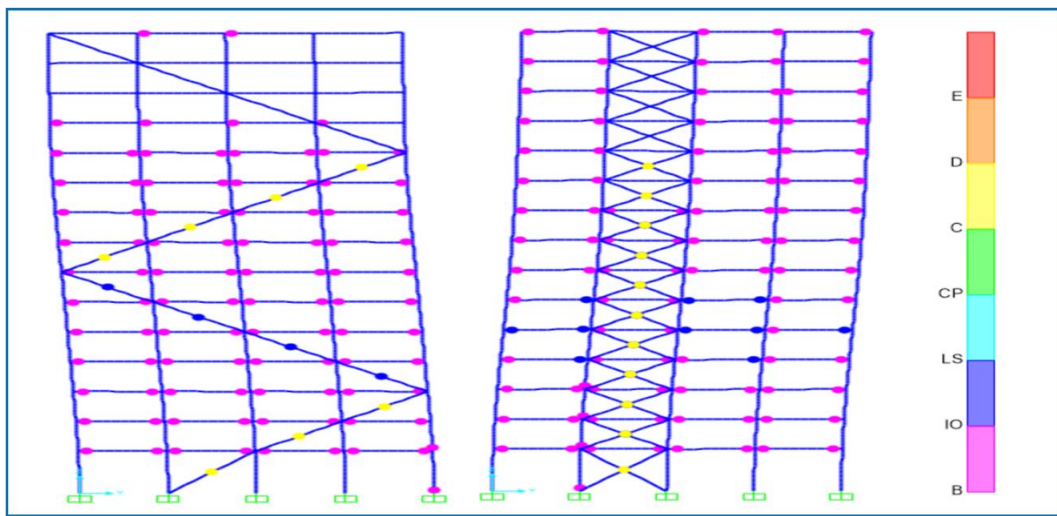


Fig. 2. Example of the condition of the plastic hinges at the target displacement for the rehabilitated structures

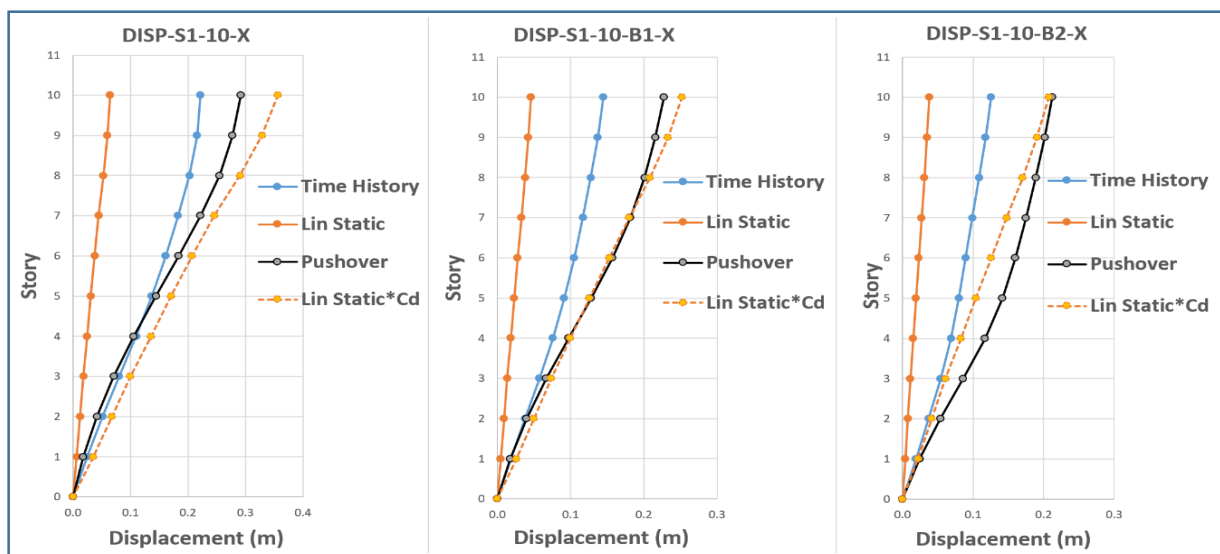


Fig.3. Comparison of the floor displacements predicted using linear and nonlinear analyses for the S1-10 structure in X direction

4. Conclusions

According to the results obtained from the nonlinear analysis, it was observed that the reinforced concrete structures considered in this study, that had simultaneous irregularities in plan and height and were designed according to the fourth edition of the Iranian Standard 2800, achieved life safety (LS) performance level at the design earthquake level.

A comparison of the results from linear static analysis and nonlinear analysis in all primary and rehabilitated models shows that although the linear analysis can typically predict the maximum displacements with sufficient accuracy, it is not capable of predicting the overall displacement pattern of the structure particularly the displacements at the middle floors.

By examining the relative torsion at different floors (i.e., rotation of each floor relative to the lower floor), the negative effect of the soft story irregularity on the torsion of the structures with irregularity in the plan was observed. Therefore, the effect of the simultaneous existence of different types of irregularities and their interaction is a case that can adversely affect the seismic behavior of structures and needs more investigation.

5. References

- ASCE standard ASCE/SEI 41-17, American Society of Civil Engineers: Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings, 2017.
- Maheri MR, Kousari, R, Razazan, M, "Pushover Tests on Steel X-Braced and Knee-Braced RC Frames", *Journal of Engineering Structures*, 2003, 25, 1697-1705.
- Masri AC, Goel SC, "Seismic Design and Testing of an RC Slab-Column Frame Strengthened by Steel Bracing", *Earthquake Spectra*, 1996, 12, 4, 645-666.
- Qiao S, Han X, Zhou K, "Bracing configuration and seismic performance of reinforced concrete frame with brace", *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 2017, 26 (14), 1381.