

چکیده

با توجه به عدم وجود روابط و ضوابطی مشخص در مورد سازه‌های فولادی دارای قاب خمشی و مهاربند همراه با سیستم باربر ناموازی در آیین‌نامه‌های ایران، لزوم بررسی رفتار این گونه سازه‌ها مورد توجه محققین قرار گرفته است. در این مقاله با مدل‌سازی سه‌بعدی سازه‌های فولادی با شش نوع پلان که هر کدام بیانگر مقداری از ناموازی بودن سیستم باربر هستند در مجموع ۱۸ مدل آماده شده، سازه‌ها تحت دو نوع بارگذاری دینامیکی خطی و بار افزون مورد بررسی و مطالعه قرار گرفتند. نتایج حاکی از آن است که با افزایش ناموازی بودن سیستم باربر، پیچش سازه‌ها نیز افزایش می‌یابد. این افزایش برای سازه‌های کوتاه‌تر به تا ۱۸ برابر و برای سازه‌های میان‌مرتبه تا پنج برابر بیشتر از سازه‌های موازی است. اعمال بارگذاری در امتداد سیستم باربر ناموازی نتایج غیر قابل انتظاری را موجب می‌شود. افزایش ارتفاع سازه باعث کاهش پیچش در دیافراگم می‌شود. بیشترین پیچش دیافراگم مربوط به طبقه‌ای است که در ارتفاع ۶۰ الی ۷۰ درصد از تراز پایه ساختمان قرار دارد. در بارگذاری‌هایی که در راستای عمود بر سیستم باربر ناموازی صورت می‌گیرد، پیچش دیافراگم‌ها در حالت الاستیک و غیر الاستیک تفاوت چندانی با یکدیگر ندارند، در صورتی که با بارگذاری در جهت دیگر این تغییرات برای حالت غیر الاستیک گاهی تا بیش از ۵۰ برابر حالت الاستیک است.

واژگان کلیدی: سیستم باربر ناموازی، قاب خمشی فولادی، مهاربند همگرا، پیچش دیافراگم، تحلیل دینامیکی خطی، تحلیل بار افزون.

ارزیابی اثرات پیچش در سازه‌های فولادی دارای سیستم باربر جانبی ناموازی با پلان نامتقارن

محمد خوش‌نام

دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی عمران - زلزله، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

علی خیرالدین

استاد مهندسی سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

محمد ایمان خداکرمی (نویسنده مسئول)

استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان،
 khodakarami@semnan.ac.ir

۱- مقدمه

پلان و ساختمان‌های نامنظم در ارتفاع می‌باشد. تعریف بدین شکل بیان می‌شود که از نظر استاندارد ۲۸۰۰ ویرایش چهارم تمامی ساختمان‌ها منظم محسوب می‌شوند مگر اینکه دارای یکی از شرایط ذکر شده طبق تعریف استاندارد ۲۸۰۰ ویرایش چهارم باشند. تعریف نامنظمی سیستم‌های باربر در استاندارد ۲۸۰۰ ویرایش چهارم بدین صورت ارائه شده است: «در مواردی که بعضی اجزای قائم باربر جانبی به موازات محورهای متعامد اصلی ساختمان نباشند [۱]». همچنین آیین‌نامه بارگذاری ایالات متحده آمریکا نیز تعریفی را برای سازه‌های دارای سیستم باربر ناموازی بیان نموده است. تعریف سیستم باربر ناموازی در آیین‌نامه مذکور بدین صورت ارائه شده است: «سیستم نامنظم ناموازی زمانی وجود دارد که اجزای مقاوم در برابر نیروی جانبی به

زلزله خطری طبیعی است که می‌تواند موجب خرابی‌های ویران‌کننده‌ای در ساختمان‌های اطراف ما گردد. زلزله‌های متوسط و قوی در چند دهه اخیر، مناطق زیادی از دنیا را مورد لرزش قرار داده‌اند. فلسفه طراحی مناسب سازه این است که سازه در مقابل زلزله‌های خفیف با عملکرد خطی مقاومت کند و در مقابل زلزله‌های متوسط یا بزرگ آسیب ببیند و وارد محدوده غیرخطی شود. ساختمان‌ها بر اساس استاندارد ۲۸۰۰ به دو دسته کلی منظم و نامنظم طبقه‌بندی می‌شوند که ساختمان‌های نامنظم خود نیز به دو دسته ساختمان‌های نامنظم در پلان و ساختمان‌های نامنظم در ارتفاع دسته‌بندی می‌شوند. استاندارد ۲۸۰۰ ویرایش چهارم تعریفی را برای سازه‌های نامنظم ارائه کرده است، این تعریف شامل دو قسمت ساختمان‌های نامنظم در

موازات محورهای متعامد اصلی مقاوم در برابر نیروی لرزه‌ای نباشند [۲]، به دلیل رفتار متفاوت ساختمان‌های نامنظم، آسیب‌پذیری آنها نسبت به ساختمان‌های منظم بیشتر است و نیروی بیشتری را از زلزله جذب کرده و رو به تخریب می‌روند. از سوی دیگر با توجه به علاقه معماری معاصر به طراحی ساختمان‌های نامنظم لزوم تمرکز و تحقیقات بیشتر در این نوع ساختمان‌ها بیشتر دیده می‌شود. به همین منظور در این مقاله سعی شده است تا با افزایش نامنظمی (ناموازی بودن سیستم باربر) در سازه‌های ۲، ۶ و ۱۲ طبقه، تأثیرات نامنظمی و عملکرد لرزه‌ای در آنها مورد مطالعه و بررسی قرار گیرد.

علی و کراوینکلر [۳] اثرات نامنظمی عمودی را با در نظر گرفتن تغییرات نامنظمی در طول ارتفاع سازه، روی نیازهای لرزه‌ای مورد بررسی و ارزیابی قرار دادند. آنها در طی تحقیقاتشان به این نتیجه رسیدند که نامنظمی جرمی روی پاسخ‌های لرزه‌ای سازه‌های نامنظم در ارتفاع، کمترین اثر را دارد و اثر نامنظمی مقاومتی بزرگ‌تر از اثر نامنظمی سختی است. خوش‌نام و خیرالدین [۴-۶] با بررسی سه‌بعدی سازه‌های دارای سیستم باربر ناموازی به این نتیجه رسیدند که این سازه‌ها از اولین مود خود در پیچش قرار می‌گیرند، در صورتی که این اتفاق برای سازه‌های منظم تا قبل از مود سوم رخ نمی‌دهد. آنها همچنین به این نتیجه رسیدند که اعمال بارگذاری در یک راستا، باعث ایجاد جابه‌جایی نسبی بیشتر در راستای دیگر می‌شود. از دیگر نتایج آنها این بود که افزایش ناموازی شدن سیستم باربر باعث کاهش زمان تناوب اصلی نوسان سازه می‌شود. آراندا [۷] مقایسه‌ای از نیازهای شکل‌پذیری میان سازه منظم و پس‌رفته با استفاده از زلزله رکورد شده روی خاک نرم انجام داد. او مشاهده کرد که نیازهای شکل‌پذیری بالاتری برای سازه پس‌رفته نسبت به سازه منظم به دست می‌آید و این افزایش بیشتر در بخش برج سازه پس‌رفته دیده می‌شود. آتاناسیادو [۸] عملکرد لرزه‌ای دو قاب بتنی مسلح ۱۰ طبقه را با پس‌رفتگی در طبقات بالاتر ارزیابی کرد. این قاب‌ها مطابق با مقررات EC8 2004 و برای درجات شکل‌پذیری بالا و متوسط طراحی شدند. او پس از مطالعات تحلیلی نتیجه گرفت که نسبت‌های جابه‌جایی نسبی داخل طبقه قاب‌های نامنظم،

در مقایسه با قاب‌های منظم حتی برای زلزله‌های با شدت دو برابر زلزله‌ی طرح پایین‌تر می‌باشند. چیتاناپاکدی و چوپرا [۹] اثرات نامنظمی در توزیع سختی و مقاومت در طول ارتفاع سازه را به‌منظور ارزیابی تقاضای جابه‌جایی نسبی طبقات (جابه‌جایی نسبی طبقات) و پاسخ‌های جابه‌جایی نسبی طبقات مطالعه کردند. آنها به این نتیجه رسیدند که با در نظر گرفتن یک طبقه ضعیف (مقاومت پایین) و یا نرم (سختی پایین)، نیازهای جابه‌جایی نسبی طبقه در طبقات مجاور افزایش یافته و نیازهای جابه‌جایی نسبی طبقه در دیگر طبقات کاهش می‌یابد. داس و ناتو [۱۰] در مورد تعریف سازه‌های نامنظم در ارتفاع مختلف از قبیل سازه‌های با توزیع ناپیوسته‌ی جرم، سختی و مقاومت در طول ارتفاع سازه و اینکه همین عامل، چنانکه در دستورالعمل‌های سازه‌ها معین شده است، باعث حضور انباشته‌های بنایی غیر سازه‌ای می‌شود، تحقیق کردند. آنها به این نتیجه رسیدند که حضور نامنظمی، پاسخ غیر الاستیک سازه را تغییر می‌دهد و نشانه‌های افزایش در جابه‌جایی نسبی طبقه غیر الاستیک در مجاورت نامنظمی دیده می‌شود. برای مورد سختی افزایش یافته، سختی‌های همه‌ی اعضای آن طبقه در ۲ ضرب می‌شود؛ در حالی که برای مورد سختی کاهش یافته، سختی‌های همه‌ی اعضای آن طبقه بر ۲ تقسیم می‌شود. لذا موارد نامنظمی سختی به‌وسیله KI و موارد نامنظمی مقاومتی به‌وسیله SI مشخص می‌شود [۱۱]. هاشمی و مفید [۱۲] روش تحلیل بار افزون مودال بر اساس انرژی را جهت تخمین نیازهای لرزه‌ای قاب‌های بتنی نامنظم در ارتفاع به‌کار بردند و به‌طور کلی به این نتیجه رسیدند که با شرکت تعداد کافی و مناسب مودها دقت جابه‌جایی نسبی طبقات به‌دست آمده از طریق روش تحلیل بار افزون مودال بر اساس انرژی، نزدیک به دقت جابه‌جایی نسبی طبقات به‌دست آمده از طریق روش تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی می‌باشد. با توجه به بازمینی مطالعات صورت گرفته در بالا روی سازه‌های پس‌رفته جهت تخمین پاسخ لرزه‌ای آنها، می‌توان مشاهده کرد که نتایج متنوعی به دست می‌آید. هومر و رایت [۱۳] پاسخ لرزه‌ای قاب‌های فولادی با پس‌رفتگی را با استفاده از یک زلزله مطالعه کردند. آنها به این نتیجه رسیدند که دریافت طبقه در

نتیجه گرفتند که خسارت در بخش برج سازه پس‌رفته در اثر شکل‌پذیری دورانی بالا متمرکز می‌شود. آنها همچنین بر اساس مطالعات آزمایشی به این نتیجه رسیدند که مود اصلی در جهت موازی با پس‌رفتگی، پاسخ غالبی به دست می‌دهد [۱۹]. تنا و کلونگا [۲۰] اثر قاب‌های تک دهانه به‌جای قاب‌های چند دهانه را در جهت باریک سازه‌های نامنظم دارای پس‌رفتگی روی عملکرد لرزه‌ای سازه‌ها مطالعه کردند. آنها به این منظور دو سازه مقاوم خمشی بتن آرمه (پس‌رفته و باریک) طراحی شده مطابق با آیین‌نامه‌ی لرزه‌ای ۱۹۹۳ مکزیک روی خاک نرم را، در نظر گرفتند و به این نتیجه رسیدند که جهت دهانه کمتر سازه پس‌رفته با قاب یک دهانه، زمانی که با زاویه جابه‌جایی نسبی طبقه نزدیک به $(\Delta = 1.2\%)$ طراحی شود، سازه آسیب‌پذیر می‌شود. ولمودسون و نائو [۲۱] توجهشان را بر روی ارزیابی الزامات دستورالعمل سازه‌ها برای قاب‌های نامنظم در ارتفاع متمرکز کردند. آنها نتیجه گرفتند، زمانی که جرم یک طبقه ۵۰ درصد افزایش می‌یابد، افزایش در نیاز شکل‌پذیری بیش از ۲۰ درصد نیست. با کاهش سختی طبقه اول به اندازه‌ی ۳۰ درصد و ثابت نگه داشتن مقاومت، جابه‌جایی نسبی طبقه اول به اندازه ۲۰ درصد تا ۴۰ درصد، که وابسته به شکل‌پذیری طرح (μ) است، افزایش می‌یابد. وانگ و تسو [۲۲] پاسخ لرزه‌ای سازه پس‌رفته را با استفاده از تحلیل طیف پاسخ الاستیک مطالعه کردند. آنها نتیجه گرفتند که جرم‌های مودال موده‌ای بالاتر برای سازه‌های پس‌رفته که از توزیع بار لرزه‌ای مختلف نتیجه می‌شود، در مقایسه با جرم‌های مودال موده‌ای بالاتر به‌دست آمده از روش استاتیکی آیین‌نامه، بزرگ‌تر به دست می‌آیند. محققین به این نتیجه رسیدند که در سازه‌های مثلثی شکل در پلان، لزوماً قرارگیری مرکز جرم در بین مرکز سختی و مرکز مقاومت سبب کاهش دوران طبقه یا تغییر مکان نسبی بین طبقه‌ای نمی‌گردد بلکه می‌بایست مرکز جرم تا حد امکان در فاصله کمتر نسبت به مرکز مقاومت قرار گیرد و نیز پیوسته کردن دیوارها باعث کاهش تغییر مکان جانبی سازه‌ها تا ۳۸ درصد می‌گردد [۲۳]. منعی و همکاران [۲۴] با بررسی احتمال فرو ریزش ساختمان‌های نامنظم در پلان به این نتیجه رسیدند که با افزایش

قسمت برج سازه پس‌رفته نسبت به جابه‌جایی نسبی طبقه سازه‌های منظم بزرگ‌تر است. کاراواسیلیس و همکاران [۱۴] یک مطالعه‌ی پارامتری گسترده روی پاسخ لرزه‌ای قاب‌های مقاوم خمشی فولادی دارای پس‌رفتگی انجام دادند. آنها به این نتیجه رسیدند که نیازهای تغییر شکل ماکزیمم در قسمت باریک سازه مشابه برج و در مجاورت پس‌رفتگی، برای دیگر سازه‌های نامنظم از نظر هندسی، متمرکز می‌شود. مقدم و تسو [۱۵] روشی را جهت توسعه‌ی تحلیل بار افزون برای سازه‌های نامتقارن و پس‌رفته چند طبقه، پیشنهاد کردند که اثرات موده‌ای بالاتر و سه‌بعدی را که توسط پیچش به سازه القا می‌شود در نظر می‌گیرد و از تحلیل طیف الاستیک سازه جهت به دست آوردن تغییر مکان هدف و توزیع بار در تحلیل بار افزون استفاده می‌کند. آنها به این نتیجه رسیدند که استفاده از تحلیل طیف پاسخ در تحلیل پوش‌اور، نتایج را برای سازه پس‌رفته در مقایسه با سازه‌های نامتقارن، بدتر می‌کند. ناسار و کراوینکلر [۱۶] پارامترهای نیاز لرزه‌ای را برای سیستم‌های یک درجه آزادی دو خطی و کاهنده‌ی سختی و سه نوع سازه چند درجه آزادی با تعداد طبقات ۳ و ۵ و ۱۰ و ۲۰ و ۳۰ و ۴۰ و به‌ترتیب با پریوده‌های اصلی ۰/۲۱۷ و ۰/۴۳۱ و ۰/۷۲۵ و ۱/۲۲ و ۱/۶۵۳ و ۲/۰۵۱ ثانیه، ارزیابی کردند. آنها مشاهده کردند که طبقه اول ضعیف، منجر به افزایش در نیازهای شکل‌پذیری و نیازهای لنگر واژگونی می‌شود. رومائو و همکاران [۱۷] جهت ارزیابی سازه‌های نامنظم پس‌رفته، سه سازه دارای قاب‌های خمشی بتن مسلح با درجات مختلف نامنظمی در نظر گرفتند و آنها را با سازه منظم متناظر مقایسه کردند. آنها به این نتیجه رسیدند که وقتی تغییرات نیروی محوری مطرح می‌شود، قابلیت تغییر شکل جانبی سازه‌ها افزایش می‌یابد. روئیز و دایدریچ [۱۸] عملکرد لرزه‌ای سازه‌ها را با طبقه اول ضعیف در مورد یک زمین‌لرزه واحد مطالعه کردند. آنها اثر ناپیوستگی مقاومتی جانبی را روی نیاز شکل‌پذیری در طبقه اول تحت اثر رکورد شتاب، با بزرگ‌ترین شتاب پیک زمین که روی خاک نرم در مکزیکوسیتی در طول زلزله مکزیک در ۱۹ سپتامبر سال ۱۹۸۵ به دست آمده است، مطالعه کردند. شهروز و موهل [۱۹] بر اساس مطالعات تحلیلی،

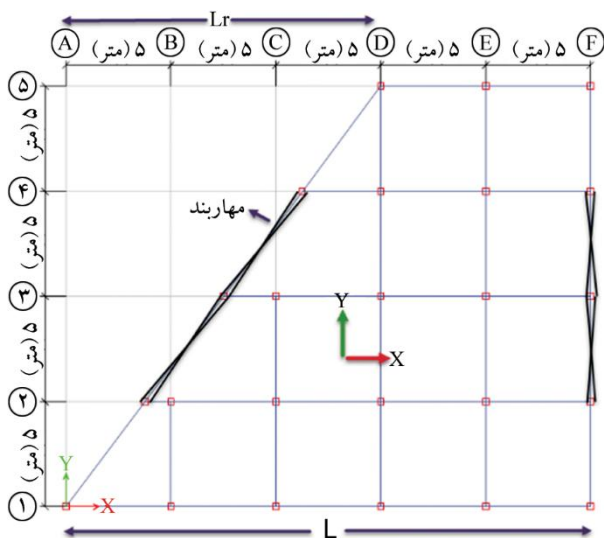
می‌باشد که تنش تسلیم آن ۲۴۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع، تنش نهایی برابر با ۳۷۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع، مدول یانگ برابر با $10^6 \times 2/39$ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع، ضریب پواسون برابر ۰/۳ می‌باشد. همچنین در بخش تحلیل غیرخطی، رفتار فولاد به صورت غیر خطی و بدون در نظر گرفتن سخت‌شوندگی کرنشی فولاد در نظر گرفته شده است. دیگر اینکه در تعریف مفاصل، ستون و مهاربند در حد فاصل ۱۰ و ۹۰ درصد و برای تیر در حد فاصل ۸ و ۹۲ درصد طول مقطع، مفصل تعریف شده است.

۲-۱- نام‌گذاری مدل‌ها

نام‌گذاری سازه‌ها بر اساس آلفا با یک اندیس صورت گرفته است که اندیس آلفا بیانگر میزان ناموازی بودن سیستم باربر در سازه‌ها می‌باشد. اندیس آلفا برابر است با نسبت طول دهانه‌های حذف شده به طول کل سازه که از رابطه (۱) به دست می‌آید.

$$x = L_r / L \quad (1)$$

که در آن x متغیر بیانگر میزان ناموازی بودن سیستم باربر، L_r طول دهانه‌های حذف شده و L طول کل سازه می‌باشد. شکل (۱) مقادیر L_r و L و همچنین جانمایی مهاربندها را در مدل $\alpha 0.6$ نشان می‌دهد.



شکل (۱): مقادیر L_r و L و جانمایی مهاربندها در نمونه مدل $\alpha 0.6$

برون‌محوری پلان، حاشیه امن فروریزش پلان به شدت افت می‌کند. به‌علاوه، مقادیر حاشیه ایمنی ایجاد شده در برابر فروریزش با افزایش تعداد طبقات در ساختمان‌های نامتقارن افت قابل ملاحظه‌ای از خود نشان می‌دهد.

در این مقاله ابتدا با بررسی پژوهش‌ها و مطالعات صورت گرفته از گذشته تا به امروز تلاش می‌شود تا رهیافت مناسبی برای انجام مقاله میسر گردد. در ادامه، ضوابط، مقررات طراحی و آیین‌نامه‌های لرزه‌ای سازه‌ها در ایران مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. با در نظر گرفتن مدل‌های مختلف سه‌بعدی ۲، ۶ و ۱۲ طبقه از سازه‌هایی که بیانگر نامنظمی و ناموازی بودن سیستم باربر هستند و با طراحی و تحلیل آنها طبق ضوابط سازه‌های فولادی و آیین‌نامه‌های مربوطه و اعمال بارهای دینامیکی خطی و بار افزون در هر دو جهت شمالی-جنوبی و شرقی-غربی و به‌صورت جداگانه، پارامترهای مورد نظر به دست می‌آیند. در خاتمه نیز با بررسی و مقایسه پارامترهای حاصل شده تلاش می‌گردد تا نتایج مورد نیاز و از قبل پیش‌بینی شده حاصل شود.

۲-۲- مدل‌سازی

در این مطالعه برای ارزیابی رفتار سازه‌ها و بررسی پیش‌دیفراگم‌ها، سه ساختمان مسکونی ۲، ۶ و ۱۲ طبقه با پلان‌های مختلف که هر پلان بیانگر مقداری از ناموازی بودن سیستم باربر می‌باشد در نظر گرفته شده است. سیستم سازه‌ای مورد استفاده قاب خمشی متوسط در راستای X و مهاربند همگرای ویژه در راستای Y می‌باشد. فاصله تمامی دهانه‌ها ۵ متر و ارتفاع طبقات نیز ۳/۲ متر فرض شده است. بار مرده سقف به همراه پارتیشن ۵۵۰ کیلوگرم بر متر مربع و بار زنده نیز ۲۰۰ کیلوگرم بر متر مربع در نظر گرفته شده است. لرزه‌خیزی محل از نوع زیاد و خاک از نوع تیپ ۲ مطابق استاندارد ۲۸۰۰ و ویرایش چهارم فرض گردیده است. جهت حذف عامل تیر ریزی در نتایج، تیر ریزی به صورت شطرنجی در نظر گرفته شده است. همچنین جهت شمال سازه‌ها نیز در جهت Y (مهاربند همگرا ویژه) فرض شده است. فولاد مورد استفاده از نوع st37 است که فولاد رایج مصرفی در ایران

۲-۲- معرفی مدل‌ها

کاملاً موازی و منظم است و دو محوری که مهاربند در آنها قرار دارد یکدیگر را در بی‌نهایت قطع می‌کنند و در پلان آخر مقدار حداکثر ناموازی بودن یک سیستم لحاظ شده، یعنی مدل مثلثی شکل، که دو محوری که مهاربند در آنها قرار دارد یکدیگر را در نقطه‌ای در داخل سازه قطع می‌کنند. جدول (۱) پلان مدل‌های مورد مطالعه و همچنین جانمایی مهاربندها را نشان می‌دهد.

در این مقاله سه سازه با تعداد طبقات ۲، ۶ و ۱۲ طبقه مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته‌اند که هر کدام از آنها دارای شش نوع پلان مختلف می‌باشند تا اثر ناموازی بودن سیستم باربر در سازه‌ها لحاظ شده باشد. پلان سازه اول مستطیلی شکل و پلان آخرین مدل مورد مطالعه مثلثی شکل می‌باشد، در پلان اول سیستم به صورت

جدول (۱): پلان مدل‌های مورد بررسی.

نام مدل	شکل پلان	نام مدل	شکل پلان
$\alpha 0$		$\alpha 0.6$	
$\alpha 0.2$		$\alpha 0.8$	
$\alpha 0.4$		$\alpha 1$	

۳- روش‌های تحلیل سازه‌ها

بارگذاری در راستای Y (مهاربند) قرار گرفته‌اند. بارگذاری‌های بار افزون با در نظر گرفتن اثر P- Δ اعمال شده‌اند. نقطه هدف جهت تحلیل بار افزون ۰/۰۴ ارتفاع سازه در نظر گرفته شده است. همچنین تحلیل بار افزون از روش بارگذاری در طبقه بام و به صورت کنترل تغییر مکان صورت گرفته است.

تمامی مدل‌های سازه‌ای مورد مطالعه در این مقاله تحت اثر تحلیل بار افزون در دو جهت و همچنین تحلیل تاریخچه زمانی خطی دینامیکی قرار گرفته‌اند. در تحلیل تاریخچه زمانی دینامیکی خطی نیز از دو شتاب‌نگاشت رکوردهای طبس و ال‌سنتر و استفاده شده است. لازم به ذکر است بندهای ۳-۱-۴، ۳-۳-۲ و ۳-۳-۱۰ استاندارد ۲۸۰۰ که به ترتیب در خصوص قاعده ۳۰-۱۰۰، ضریب نامعینی سازه و ضریب اضافه مقاومت است در طراحی و تحلیل سازه‌ها لحاظ گردیده است. جدول (۲) مشخصات شتاب‌نگاشت‌های استفاده شده را نشان می‌دهد. همچنین شکل‌های (۲) و (۳) نیز نمودار تاریخچه زمانی رکوردهای طبس و ال‌سنتر و نمایش می‌دهد.

۳-۲- تحلیل تاریخچه زمانی دینامیکی خطی

همان‌طور که پیش‌تر گفته شد جهت تحلیل تاریخچه زمانی دینامیکی خطی از دو شتاب‌نگاشت زلزله طبس و ال‌سنتر و استفاده شده است. با توجه به انتخاب خاک نوع تیپ ۲ (طبق استاندارد ۲۸۰۰ ویرایش چهارم) هر دو شتاب‌نگاشت با خاک نوع تیپ ۲ تطبیق داده شده‌اند.

جدول (۲): مشخصات رکوردهای زلزله.

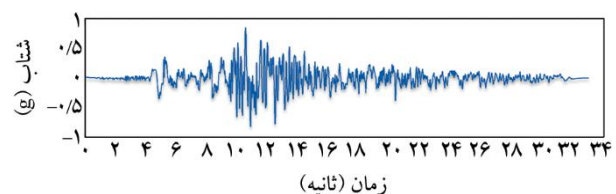
شتاب‌نگاشت	پریود غالب (Sec)	شتاب طراحی مؤثر (g)	مدت زمان (Sec)	گسلش (Faulting)
طبس (ایران)	۰/۲	۰/۸۴۴	۳۲/۹۸	معکوس
ال‌سنتر و (امریکا)	۰/۵۸	۰/۲۰۷	۳۰/۰۹	امتداد لغز

۴- بحث بر روی نتایج

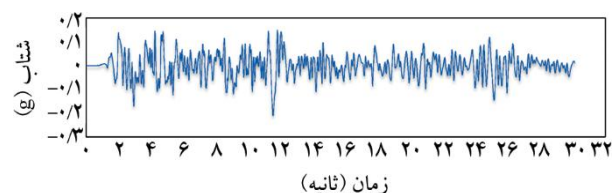
در این بخش از مقاله نتایج تحلیل بار افزون و تاریخچه زمانی دینامیکی خطی به تفکیک برای ساختمان‌های ۲، ۶ و ۱۲ طبقه و نوع بارگذاری ارائه شده است. نتایج درک بهتری از رفتار سازه‌های دارای سیستم باربر ناموازی با پلان نامتقارن فراهم آورده است.

۴-۱- نتایج تحلیل بار افزون

در این قسمت، پیچش طبقات طی بارگذاری بار افزون که شامل بارگذاری‌های بار افزون در راستای X و بار افزون در راستای Y می‌باشد محاسبه و ارائه شده است. انتظار می‌رود به علت جابه‌جایی نسبی حداکثر در طبقات میانی در زمان طراحی سازه‌ها، بیشترین مقدار پیچش در طبقات میانی سازه‌های مورد مطالعه صورت پذیرد. در این بخش به دلیل تعداد بسیار زیاد نمودارها، فقط نمودار مدل ۰.۸ α به دلیل اینکه نشان داده شود پیچش حداکثر هر سازه در چه طبقه‌ای رخ داده است در شکل‌های (۴)، (۵) و (۶) نمایش داده شده است. با ملاحظه شکل‌های مذکور مشاهده می‌شود که بیشترین پیچش سازه‌های ۱۲ طبقه در طبقه ۸، سازه‌های ۶ طبقه در طبقه ۴ و سازه‌های ۲ طبقه در طبقه ۲ رخ می‌دهد. همچنین این موضوع قابل ذکر است که پیچش در سازه ۰ α به دلیل اینکه دارای



شکل (۲): شتاب‌نگاشت زلزله طبس ایران.

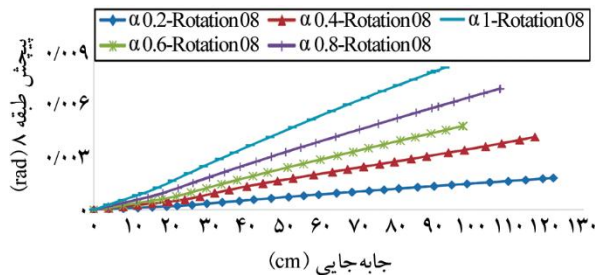


شکل (۳): شتاب‌نگاشت زلزله ال‌سنتر و امریکا.

۳-۱- تحلیل بار افزون

در تحلیل بار افزون ابتدا مدل‌ها یک بار تحت اعمال بارگذاری در راستای X (قاب خمشی) و بار دیگر تحت اعمال

ناموازی (X) اعمال شده است، به دلیل اینکه پیچش طبقه ۸ از سایر طبقات بیشتر بوده است لذا در شکل زیر نمودار پیچش دیافراگم طبقه ۸ تحت اثر تحلیل بار افزون ارائه شده است. شکل (۷) مقدار پیچش طبقه ۸ سازه‌های ۱۲ طبقه را نمایش می‌دهد.

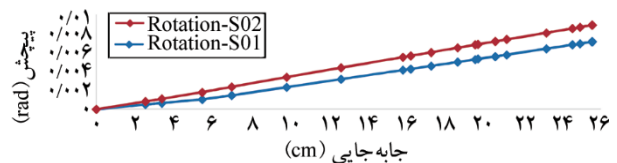


شکل (۷): پیچش دیافراگم طبقه ۸ سازه‌های ۱۲ طبقه تحت اثر بارگذاری بار افزون در راستای X.

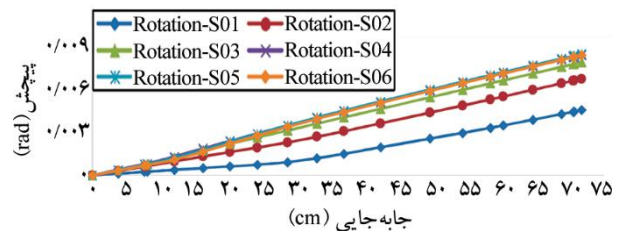
همان‌طور که از شکل (۷) مشاهده می‌شود با افزایش تغییر مکان جانبی سازه (تغییر مکان بام) میزان پیچش افزایش می‌یابد. همان‌طور که انتظار می‌رود با افزایش ناموازی بودن سیستم باربر (نامنظمی) هر چقدر که تغییر مکان جانبی افزایش می‌یابد پیچش دیافراگم نیز افزایش یافته است. در صورتی که سازه $\alpha 0.2$ (سازه با کمترین میزان ناموازی بودن سیستم باربر) را به‌عنوان مبنا در نظر بگیریم میزان افزایش پیچش دیافراگم طبقه مورد نظر (طبقه ۸) در سایر سازه‌ها نسبت به این سازه می‌تواند معیاری برای بیان رفتار سایر سازه‌ها باشد. همان‌گونه که از شکل (۷) مشاهده می‌شود رفتار پیچش سازه‌ها پس از گذشت جابه‌جایی بام از مقدار عددی ۱۸ سانتی‌متر، رفتاری متفاوت است، لذا جهت بررسی و مقایسه پیچش سازه‌ها در هر دو قسمت، قسمت قبل از جابه‌جایی ۱۸ سانتی‌متر قسمت الاستیک و بعد از آن قسمت غیر الاستیک در نظر گرفته شده است و نقطه‌ای مشترک در محور جابه‌جایی بام در نظر گرفته شده است و مقدار پیچش سازه‌ها اندازه‌گیری شده‌اند که نسبت‌گیری آن در شکل‌های (۸) و (۹) ارائه شده است.

مطابق شکل‌های (۸) و (۹) و همچنین مقایسه کمی سایر سازه‌ها نسبت به سازه $\alpha 0.2$ مشاهده می‌شود که تا قبل از مرحله پلاستیک، میزان پیچش در سازه‌های $\alpha 0.8$ ، $\alpha 0.6$ ، $\alpha 0.4$ و $\alpha 1$

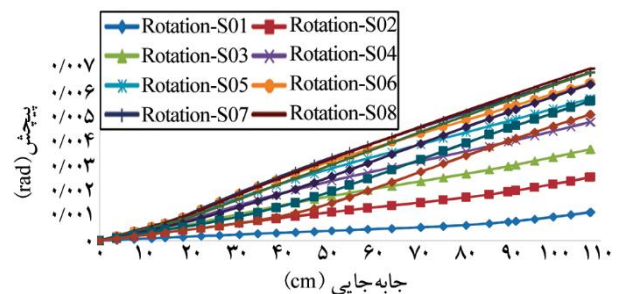
پلاتنی کاملاً منظم می‌باشد لذا مقدار پیچش آن بسیار ناچیز است که می‌توان مقدار آن را برابر با صفر در نظر گرفت.



شکل (۴): پیچش طبقات سازه‌های ۲ طبقه مدل $\alpha 0.8$ تحت بارگذاری بار افزون در راستای X.



شکل (۵): پیچش طبقات سازه‌های ۶ طبقه مدل $\alpha 0.8$ تحت بارگذاری بار افزون در راستای X.



شکل (۶): پیچش طبقات سازه‌های ۱۲ طبقه مدل $\alpha 0.8$ تحت بارگذاری بار افزون در راستای X.

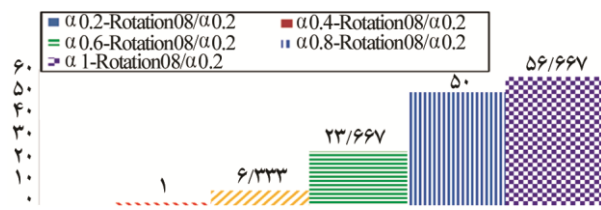
۴-۱-۱- بررسی پیچش طبقه ۸ سازه‌های ۱۲ طبقه

در این بخش برای مقایسه میزان نامنظمی از پیچش دیافراگم طبقه ۸ برای ارائه نتایج استفاده شده است، علت انتخاب این طبقه به‌عنوان معیار، آن است که با توجه به شکل‌های پیش‌تر ارائه شده، این طبقه در بین تمامی طبقات دارای بیشترین پیچش است و همچنین به لحاظ جابه‌جایی نسبی نسبت به سایر طبقات نیز مقدار عددی بیشتری دارد.

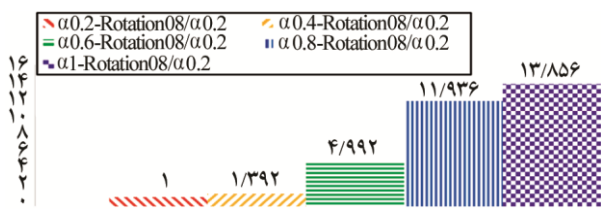
۴-۱-۱-۱- پیچش طبقه ۸ سازه‌های ۱۲ طبقه تحت بارگذاری بار افزون در راستای X

در این قسمت بارگذاری در راستای عمود بر سیستم باربر

همان گونه که از شکل (۱۰) مشاهده می‌شود با افزایش ناموازی بودن سیستم باربر، پیچش طبقه ۸ سازه‌ها رو به افزایش رفته است. این امر بیانگر این موضوع است که افزایش ناموازی بودن سیستم باربر باعث افزایش پیچش و به تبع آن پیچش در سازه‌ها می‌شود. همچنین از ملاحظه شکل (۱۰) مشاهده می‌شود که در این نوع بارگذاری دو سازه آخر یعنی سازه‌های $\alpha 0.8$ و $\alpha 1$ دارای پیچش بیشتری نسبت به سایر سازه‌ها در این نوع بارگذاری می‌باشند، با توجه به این موضوع که در سازه مدل $\alpha 0.8$ زاویه‌ای که محور ناموازی دارای مهاربند با قاعده سازه می‌سازد ۴۵ درجه است، لذا مقدار پیچش پس از گذشت زاویه سیستم باربر از ۴۵ درجه (یعنی کمتر شده زاویه) دارای تغییرات ناگهانی است. در این قسمت نیز از بعد از جابه‌جایی بام به مقدار ۱۵ سانتی‌متر رفتار پلاستیک و قبل از آن رفتار الاستیک در نظر گرفته شده است. شکل‌های (۱۱) و (۱۲) مقادیر نسبت‌گیری شده پیچش سازه‌ها به سازه مرجع را نشان می‌دهند.

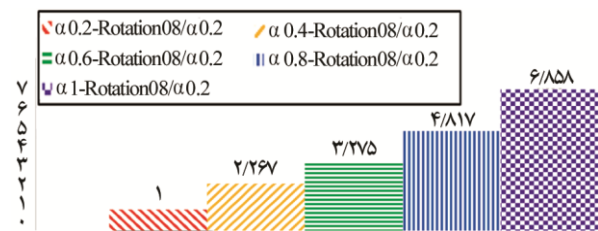


شکل (۱۱): نسبت پیچش طبقه ۸ سازه‌های ۱۲ طبقه به طبقه ۸ سازه $\alpha 0.2$ تحت بارگذاری بار افزون در راستای Y در محدوده الاستیک.

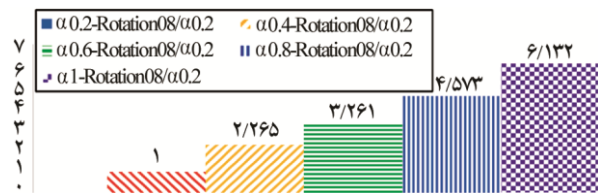


شکل (۱۲): نسبت پیچش طبقه ۸ سازه‌های ۱۲ طبقه به طبقه ۸ سازه $\alpha 0.2$ تحت بارگذاری بار افزون در راستای Y در محدوده پلاستیک.

همان گونه که از شکل‌های (۱۱) و (۱۲) مشاهده می‌شود میزان تغییرات پیچش طبقه ۸ سازه‌های مختلف تحت بارگذاری بار افزون در راستای Y در حالت الاستیک با مقدار شیب بیشتری



شکل (۸): نسبت پیچش طبقه ۸ سازه‌های ۱۲ طبقه به طبقه ۸ سازه $\alpha 0.2$ تحت بارگذاری بار افزون در راستای X در محدوده الاستیک.

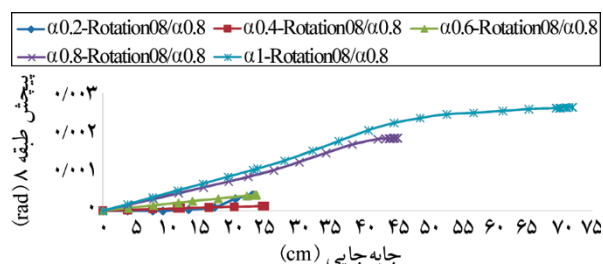


شکل (۹): نسبت پیچش طبقه ۸ سازه‌های ۱۲ طبقه به طبقه ۸ سازه $\alpha 0.2$ تحت بارگذاری بار افزون در راستای X در محدوده پلاستیک.

نسبت به سازه $\alpha 0.2$ به ترتیب برابر $2/27$ ، $3/28$ ، $4/82$ و $6/86$ برابر افزایش می‌یابد. با افزایش بار جانبی و وارد شدن سازه به مرحله پلاستیک مقادیر فوق به ترتیب به مقادیر $2/26$ ، $3/26$ ، $4/57$ و $6/13$ تنزل یافته است. می‌توان این گونه عنوان نمود که در سازه‌های ۱۲ طبقه مقدار پیچش در رفتار الاستیک و پلاستیک به یک نسبت با افزایش ناموازی بودن سیستم باربر افزایش می‌یابد.

۴-۱-۱-۲- پیچش طبقه ۸ سازه‌های ۱۲ طبقه تحت بارگذاری بار افزون در راستای Y

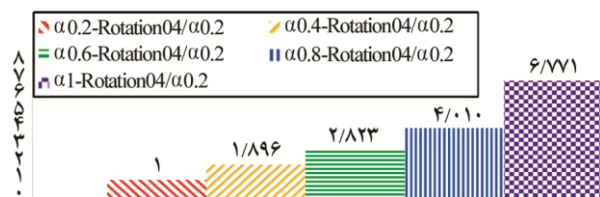
در این قسمت بارگذاری در امتداد سیستم باربر ناموازی (Y) اعمال شده است، به دلیل اینکه پیچش طبقه ۸ از سایر طبقات بیشتر بوده است لذا در شکل ۱۰ نمودار پیچش دیافراگم طبقه ۸ تحت اثر تحلیل بار افزون ارائه شده است.



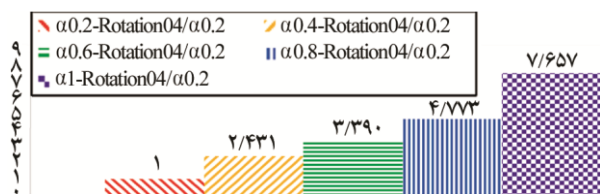
شکل (۱۰): پیچش دیافراگم طبقه ۸ سازه‌های ۱۲ طبقه تحت اثر بارگذاری بار افزون در راستای Y.

در راستای X نیز رو به افزایش رفته است. منحنی سازه مدل $\alpha 0.2$ به طور تقریبی خطی صاف را می‌پیماید، به دلیل اینکه سازه مذکور دارای کمترین مقدار زاویه سیستم باربر در مقایسه با سایر سازه‌ها می‌باشد لذا منحنی پیچش آن نیز دارای کمترین شیب صعودی پیچش است. با مقایسه منحنی مدل $\alpha 1$ یعنی سازه مثلثی شکل با مدل $\alpha 0.2$ مشاهده می‌شود که تغییرات زاویه سیستم باربر بر شیب منحنی پیچش تأثیرات زیادی دارد. روند صعودی و شیب زیاد منحنی سازه $\alpha 1$ در شکل (۱۳) کاملاً نمایان است.

در این نمودار نیز پیچش‌ها تا قبل از جابه‌جایی ۱۰ سانتی‌متر سازه‌ها الاستیک و پس از آن غیر الاستیک در نظر گرفته شده است. شکل‌های (۱۴) و (۱۵) مقادیر نسبت‌گیری شده پیچش در محدوده الاستیک و غیر الاستیک را نمایش می‌دهند.



شکل (۱۴): نسبت پیچش طبقه ۴ سازه‌های ۶ طبقه به طبقه ۴ سازه $\alpha 0.2$ تحت بارگذاری بار افزون در راستای X در محدوده الاستیک.



شکل (۱۵): نسبت پیچش طبقه ۴ سازه‌های ۶ طبقه به طبقه ۴ سازه $\alpha 0.2$ تحت بارگذاری بار افزون در راستای X در محدوده پلاستیک.

ملاحظه شکل‌های (۱۴) و (۱۵) نشان می‌دهد که مقدار تغییرات پیچش طبقه ۴ سازه‌های ۶ طبقه به طبقه ۴ سازه $\alpha 0.2$ تحت بارگذاری بار افزون در راستای X در دو حالت الاستیک و پلاستیک تقریباً به هم نزدیک می‌باشند اما تغییرات پیچش در حالت پلاستیک دارای روند و شیب نسبتاً تندتری نسبت به حالت الاستیک می‌باشد. مشاهده می‌شود که نسبت تغییر پیچش طبقه ۴ سازه‌ها به طبقه ۴ سازه $\alpha 0.2$ در حالت الاستیک به ترتیب ۱/۸۹،

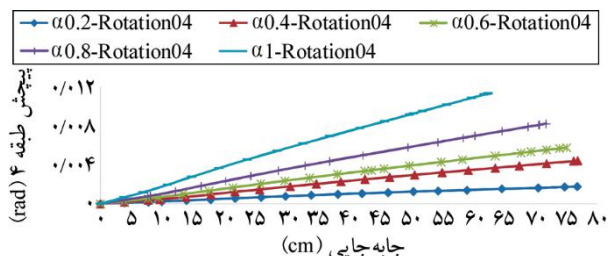
نسبت به حالت پلاستیک در حال تغییر است. همچنین مشاهده می‌شود که مقدار تغییرات پیچش طبقه ۸ سازه‌ها نسبت به طبقه ۸ سازه $\alpha 0.2$ به ترتیب برای حالت الاستیک ۶/۳۳، ۲۳/۶۶، ۵۰ و ۵۶/۶۶ و در حالت پلاستیک به ترتیب ۱/۳۹، ۴/۹۹، ۱۱/۹۳ و ۱۳/۸۵ برابر می‌باشد. مشاهده می‌شود که در این نوع بارگذاری رفتار الاستیک سازه‌ها تفاوت بیشتری نسبت به رفتار پلاستیک آنها نسبت به یکدیگر دارند.

۴-۱-۲- بررسی پیچش طبقه ۴ سازه‌های ۶ طبقه

در این بخش برای مقایسه میزان نامنظمی از پیچش دیافراگم طبقه ۴ برای ارائه نتایج استفاده شده است. علت انتخاب این طبقه به عنوان معیار، آن است که با توجه به شکل‌های پیش‌تر ارائه شده، این طبقه در بین تمامی طبقات دارای بیشترین پیچش است و همچنین به لحاظ جابه‌جایی نسبی نسبت به سایر طبقات نیز مقدار عددی بیشتری دارد.

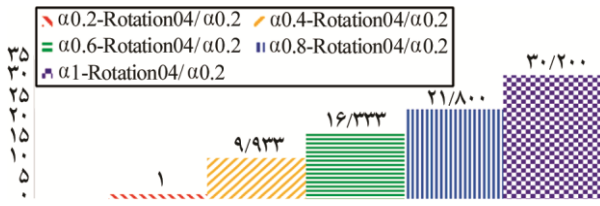
۴-۱-۲-۱-۱- پیچش طبقه ۴ سازه‌های ۶ طبقه تحت بارگذاری بار افزون در راستای X

در این قسمت بارگذاری در راستای عمود بر سیستم باربر ناموازی (X) اعمال شده است، به دلیل اینکه پیچش طبقه ۴ از سایر طبقات بیشتر بوده است لذا در شکل (۱۳) نمودار پیچش دیافراگم طبقه ۴ تحت اثر تحلیل بار افزون ارائه شده است.

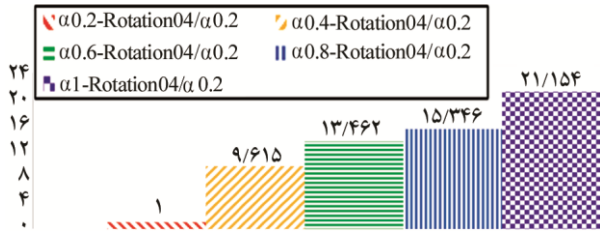


شکل (۱۳): پیچش دیافراگم طبقه ۴ سازه‌های ۶ طبقه تحت اثر بارگذاری بار افزون در راستای X

شکل (۱۳) نشان می‌دهد که با افزایش ناموازی بودن سیستم باربر پیچش طبقه ۴ سازه‌های ۶ طبقه تحت بارگذاری بار افزون



شکل (۱۷): نسبت پیچش طبقه ۴ سازه‌های ۶ طبقه به طبقه ۴ سازه $\alpha 0.2$ تحت بارگذاری بار افزون در راستای Y در محدوده الاستیک.



شکل (۱۸): نسبت پیچش طبقه ۴ سازه‌های ۶ طبقه به طبقه ۴ سازه $\alpha 0.2$ تحت بارگذاری بار افزون در راستای Y در محدوده پلاستیک.

ملاحظه شکل‌های (۱۷) و (۱۸) نشان می‌دهد که تغییرات پیچش طبقه ۴ سازه‌های ۶ طبقه تحت بارگذاری بار افزون در راستای Y در حالت الاستیک بیشتر از حالت پلاستیک است. نسبت تغییرات پیچش طبقه ۴ سازه‌های ۶ طبقه به پیچش طبقه ۴ سازه $\alpha 0.2$ در حالت الاستیک به ترتیب ۹/۹۳، ۱۶/۳۳، ۲۱/۸ و ۳۰/۲ و در حالت پلاستیک به ترتیب ذکر شده ۹/۶۱، ۱۳/۴۶، ۱۵/۳۴ و ۲۱/۱۵۴ برابر شده است. مشاهده می‌شود که از همان ابتدا و تنها با اعمال کمی ناموازی بودن سیستم باربر، پیچش بیشتر از ۹ برابر شده است که این میزان تأثیر زاویه سیستم‌های باربر بر پیچش و پیچش طبقات را نشان می‌دهد.

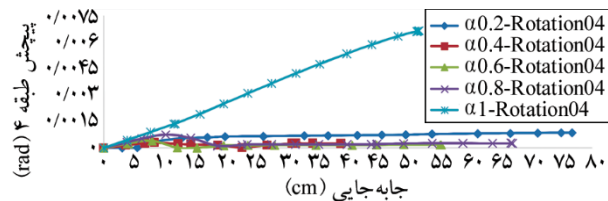
۴-۱-۳- بررسی پیچش طبقه ۲ سازه‌های ۲ طبقه

در این بخش برای مقایسه میزان نامنظمی از پیچش دیافراگم طبقه ۴ برای ارائه نتایج استفاده شده است، علت انتخاب این طبقه به‌عنوان معیار، آن است که با توجه به شکل‌های پیش‌تر ارائه شده، این طبقه در بین تمامی طبقات دارای بیشترین پیچش است و همچنین به لحاظ جابه‌جایی نسبی نسبت به سایر طبقات نیز مقدار عددی بیشتری را از خود نشان داده است.

۲/۸۲، ۴/۰۱ و ۶/۷۷ برابر و در حالت پلاستیک به ترتیب ۲/۴۳، ۳/۳۸، ۴/۷۷ و ۷/۶۵ برابر است. در مقایسه این حالت با مقایسه پیش‌تر انجام شده سازه‌های ۱۲ طبقه، در حالت اعمال بارگذاری بار افزون در راستای X سازه‌های ۱۲ طبقه، مشاهده می‌شود روند تغییرات پیچش در حالت الاستیک و غیر الاستیک در این نوع بارگذاری، فرق چندان زیادی با یکدیگر ندارند.

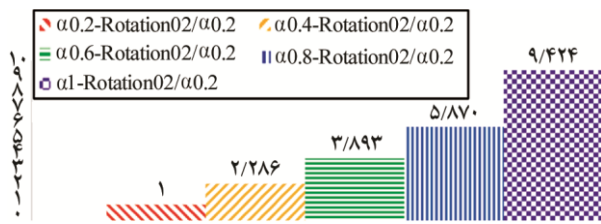
۴-۱-۲-۲- پیچش طبقه ۴ سازه‌های ۶ طبقه تحت بارگذاری بار افزون در راستای Y

در این بخش بارگذاری در امتداد سیستم باربر ناموازی اعمال شده است، به دلیل اینکه پیچش طبقه ۴ از سایر طبقات بیشتر بوده است لذا در شکل (۱۶) نمودار پیچش دیافراگم طبقه ۴ تحت اثر تحلیل بار افزون ارائه شده است.



شکل (۱۶): پیچش دیافراگم طبقه ۴ سازه‌های ۶ طبقه تحت اثر بارگذاری بار افزون در راستای Y.

شکل (۱۶) نشان می‌دهد که پیچش سازه‌ها با افزایش ناموازی بودن سیستم باربر افزایش پیدا می‌کند. نکته قابل تأمل پیچش طبقه ۴ سازه $\alpha 1$ (سازه مثلث شکل) است که پیچش بسیار بیشتری نسبت به سایر سازه‌ها دارد. همان‌طور که پیش‌تر بیان شد، در سازه مدل $\alpha 1$ ، زاویه سیستم‌های باربر آن کمتر از ۴۵ درجه است و پیچش بیشتری نسبت به سایر سازه‌ها دارد. در بخش بارگذاری بار افزون در راستای Y سازه‌های ۱۲ طبقه نیز شاهد تغییر روند تغییرات پیچش سازه‌های دارای زاویه سیستم باربر ۴۵ درجه و کمتر از آن بودیم. در این بخش نیز پیچش سازه‌ها تا قبل از جابه‌جایی ۱۰ سانتی‌متر الاستیک و پس از آن غیر الاستیک در نظر گرفته شده‌اند. شکل‌های (۱۷) و (۱۸) مقادیر نسبت‌گیری شده در حالات الاستیک و پلاستیک را نمایش می‌دهند.

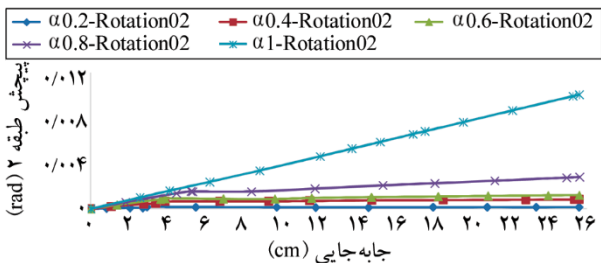


شکل (۲۱): نسبت پیچش طبقه ۲ سازه‌های ۲ طبقه به طبقه ۲ سازه $\alpha 0.2$ تحت بارگذاری بار افزون در راستای X در محدوده پلاستیک.

ملاحظه شکل‌های (۲۰) و (۲۱) نشان می‌دهد که در سازه‌های با ارتفاع کم و در این مقاله ۲ طبقه، نسبت تغییرات پیچش طبقات در حالت پلاستیک و الاستیک تحت بارگذاری بار افزون در راستای X اختلاف چندانی با یکدیگر ندارند. نسبت پیچش طبقه ۲ سازه‌های ۲ طبقه در حالت الاستیک به ترتیب $2/12$ ، $3/58$ ، $5/31$ و $8/41$ برابر و در حالت پلاستیک به همان ترتیب $2/28$ ، $3/89$ ، $5/86$ و $9/42$ برابر شده‌اند. در این نوع بارگذاری، در سازه‌های ۶ و ۱۲ طبقه نیز شاهد تغییرات نه‌چندان زیاد پیچش در حالت‌های الاستیک و پلاستیک بودیم.

۴-۳-۱-۲- پیچش طبقه ۲ سازه‌های ۲ طبقه تحت بارگذاری بار افزون در راستای Y

در این قسمت بارگذاری در راستای سیستم باربر ناموازی اعمال شده است، به دلیل اینکه پیچش طبقه ۲ از سایر طبقات بیشتر بوده است لذا در شکل (۲۲) نمودار پیچش دیافراگم طبقه ۲ تحت اثر تحلیل بار افزون ارائه شده است.

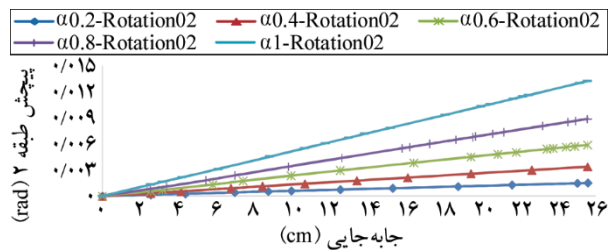


شکل (۲۲): پیچش دیافراگم طبقه ۲ سازه‌های ۲ طبقه تحت اثر بارگذاری بار افزون در راستای Y.

در این بخش با ملاحظه نمودار شکل (۲۲) مشاهده می‌شود که پیچش طبقه ۲ سازه $\alpha 1$ طبقه ۲ نسبت به سایر سازه‌ها مقدار بسیار

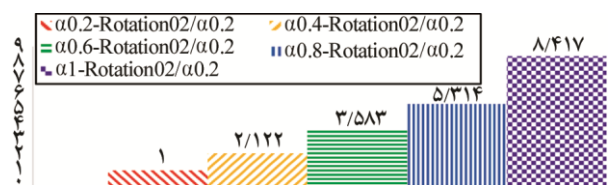
۴-۳-۱-۲- پیچش طبقه ۲ سازه‌های ۲ طبقه تحت بارگذاری بار افزون در راستای X

در این قسمت بارگذاری در راستای عمود بر سیستم باربر ناموازی (X) اعمال شده است، به دلیل اینکه پیچش طبقه ۲ از سایر طبقات بیشتر بوده است لذا در شکل (۱۹) نمودار پیچش دیافراگم طبقه ۲ تحت اثر تحلیل بار افزون ارائه شده است.



شکل (۱۹): پیچش دیافراگم طبقه ۲ سازه‌های ۲ طبقه تحت اثر بارگذاری بار افزون در راستای X.

شکل (۱۹) نشان می‌دهد که در سازه‌های ۲ طبقه نیز با افزایش ناموازی بودن سیستم باربر مقدار پیچش طبقات نیز افزایش پیدا کرده است. مطابق بررسی صورت گرفته بر روی پیچش سازه‌های ۱۲ و ۶ طبقه ملاحظه شد که سازه‌های ۲ طبقه نیز تحت بارگذاری بار افزون در راستای X بیشتر رفتار الاستیک از خود نشان داده‌اند؛ مسئله‌ای که در سازه‌های ۱۲ و ۶ طبقه نیز شاهد آن بودیم. برای تعیین موقعیت الاستیک و غیر الاستیک، منحنی پیچش بیشتر از جابه‌جایی بام ۸ سانتی‌متر غیر الاستیک و قبل از آن الاستیک در نظر گرفته شده است. شکل‌های (۲۰) و (۲۱) مقادیر الاستیک و پلاستیک پیچش طبقه ۲ سازه‌ها را نمایش می‌دهند.



شکل (۲۰): نسبت پیچش طبقه ۲ سازه‌های ۲ طبقه به طبقه ۲ سازه $\alpha 0.2$ تحت بارگذاری بار افزون در راستای X در محدوده الاستیک.

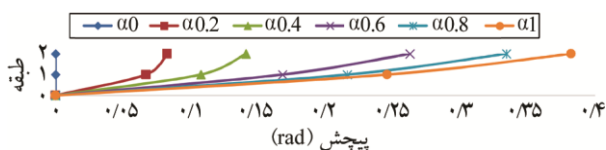
طبقه، مشاهده می‌شود که در سازه‌های ۲ طبقه نیز مقدار پیچش مدل $\alpha 1$ به صورت ناگهانی افزایش پیدا کرده است.

۴-۲- نتایج تحلیل تاریخچه زمانی دینامیکی خطی

در این بخش پیچش طبقات با تحلیل دینامیکی خطی محاسبه و مورد بررسی قرار گرفته است. پیچش‌های محاسبه شده نسبت به پیچش هر طبقه نسبت به پیچش طبقه زیرین خود می‌باشد که تحت چهار بارگذاری دینامیکی خطی در دو جهت جنوبی-شمالی و شرقی-غربی اعمال شده است. نتایج به دست آمده به تفکیک هر بارگذاری به طور جداگانه در ادامه آمده است.

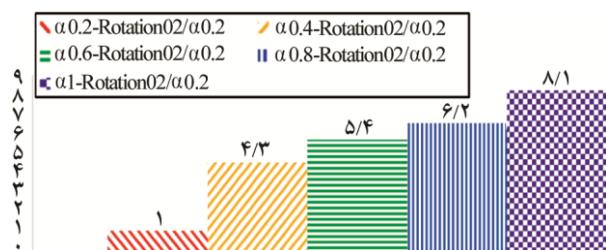
۴-۲-۱- پیچش سازه‌ها تحت بارگذاری طیس در راستای X

از ملاحظه شکل‌های (۲۵)، (۲۶) و (۲۷) مشاهده می‌شود در تمامی سازه‌ها با طبقات مختلف با افزایش ناموازی شدن سیستم باربر، پیچش طبقات افزایش یافته است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود پیچش طبقات در این حالت از بارگذاری دارای رابطه مستقیمی با مقدار ناموازی بودن سیستم باربر است یعنی افزایش ناموازی بودن سیستم باربر باعث افزایش پیچش طبقات شده است، این بدان معنی است که سازه‌های دارای سیستم باربر ناموازی‌تر تحت پیچش بیشتری نسبت به سازه‌های منظم و دارای سیستم باربر موازی قرار می‌گیرند؛ اما نکته دیگر که از مشاهده نمودارها مشاهده می‌شود، کاهش مقدار پیچش با افزایش ارتفاع سازه‌ها می‌باشد. در حالت دینامیکی پیچش مدل‌های $\alpha 0.8$ و $\alpha 1$ دارای یک جهش نسبت به پیچش سایر سازه‌ها هستند. در بخش تحلیل بار افزون نیز مشاهده شده بود که سازه‌های دارای زاویه سیستم باربر ۴۵ درجه و کمتر از آن دارای پیچش زیاد نسبت به سایر سازه‌ها بودند.

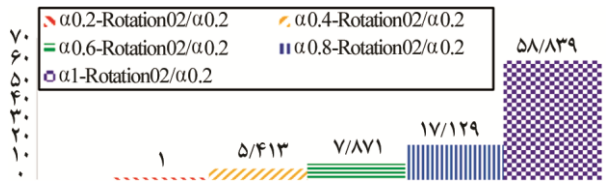


شکل (۲۵): پیچش طبقات سازه‌های ۲ طبقه تحت بارگذاری طیس در راستای X.

بیشتری است. همان‌گونه که در سازه‌های قبل نیز مشاهده شد در بارگذاری بار افزون در راستای Y یعنی بارگذاری در راستای سیستم باربر ناموازی پیچش سازه $\alpha 1$ (سازه مثلی شکل) به مقدار قابل توجهی بیشتر از سایر سازه‌ها می‌باشد. این اتفاق در تمامی سازه‌ها با تعداد طبقات ۲، ۶ و ۱۲ طبقه رخ داده است. در این قسمت منحنی پیچش پس از جابه‌جایی ۵ سانتی‌متر غیر الاستیک و قبل از آن الاستیک در نظر گرفته شده است. شکل‌های (۲۳) و (۲۴) مقادیر نسبت پیچش در حالات الاستیک و پلاستیک را نمایش می‌دهند.

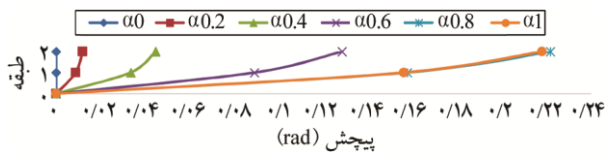


شکل (۲۳): نسبت پیچش طبقه ۲ سازه‌های ۲ طبقه به طبقه ۲ سازه $\alpha 0.2$ تحت بارگذاری بار افزون در راستای Y در محدوده الاستیک.

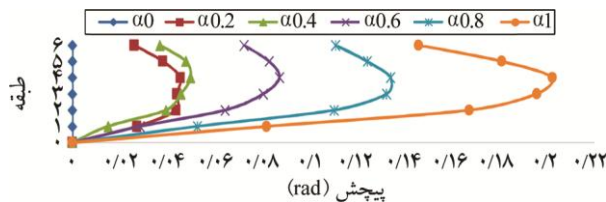


شکل (۲۴): نسبت پیچش طبقه ۲ سازه‌های ۲ طبقه به طبقه ۲ سازه $\alpha 0.2$ تحت بارگذاری بار افزون در راستای Y در محدوده پلاستیک.

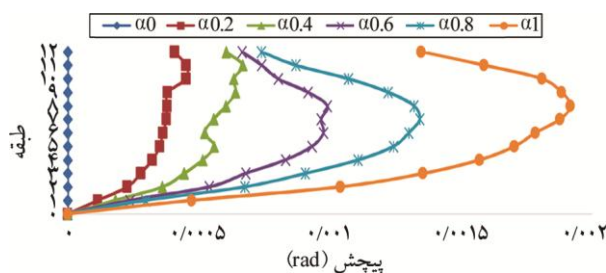
در این بخش با ملاحظه نمودار شکل‌های (۲۳) و (۲۴) مشاهده می‌شود که تغییرات پیچش طبقه ۲ سازه‌های ۲ طبقه تحت بارگذاری بار افزون در راستای Y در حالت پلاستیک و به خصوص در سازه $\alpha 1$ بسیار بیشتر از پیچش در حالت الاستیک است. نسبت پیچش طبقه ۲ سازه‌های ۲ طبقه در حالت الاستیک به ترتیب افزایش ناموازی بودن سیستم باربر به ترتیب $4/3$ ، $5/4$ ، $6/2$ و $8/1$ برابر و در حالت پلاستیک و به همان ترتیب ذکر شده $7/871$ ، $5/413$ ، $17/129$ و $58/839$ برابر است. مشاهده می‌شود که در حالت پلاستیک سازه $\alpha 1$ تغییرات بسیار زیادی را به نسبت سایر سازه‌ها از خود نشان داده است. در مقایسه با نمودارهای حالت پلاستیک سازه‌های ۶ و ۱۲



شکل (۲۸): پیچش طبقات سازه‌های ۲ طبقه تحت بارگذاری طبس در راستای Y.

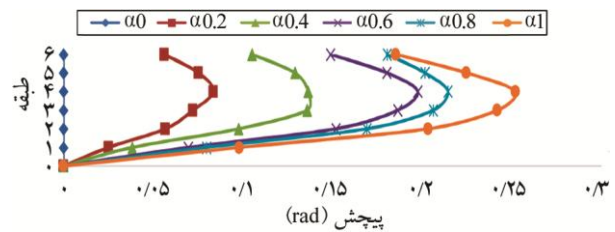


شکل (۲۹): پیچش طبقات سازه‌های ۶ طبقه تحت بارگذاری طبس در راستای Y.

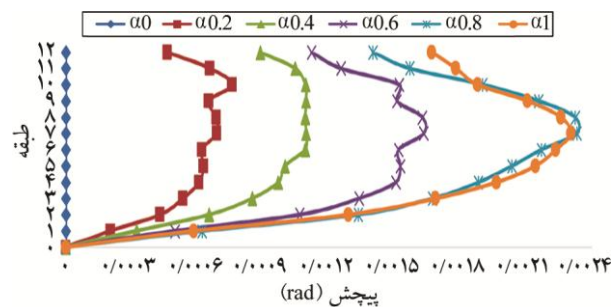


شکل (۳۰): پیچش طبقات سازه‌های ۱۲ طبقه تحت بارگذاری طبس در راستای Y.

۴-۲-۳- پیچش سازه‌ها تحت بارگذاری ال‌سنتر و در راستای X در این بخش که بارگذاری دینامیکی خطی در راستای عمود بر سیستم باربر ناموازی (X) اعمال شده است ملاحظه می‌شود افزایش ناموازی بودن سیستم باربر افزایش پیچش را در پی دارد. شکل‌های (۳۱)، (۳۲) و (۳۳) نشان می‌دهند که با افزایش ناموازی شدن سیستم باربر پیچش طبقات نیز افزایش یافته است. در سازه‌های ۲، ۶ و ۱۲ طبقه با اعمال اولین ناموازی بودن سیستم باربر، پیچش زیاد شده و این افزایش تا سازه $\alpha 0.6$ تقریباً با یک نسبت ثابتی حرکت می‌کند؛ اما پس از سازه $\alpha 0.6$ مقدار این روند افزایشی کمتر شده است. این پدیده در هر سه سازه با طبقات مختلف دیده می‌شود.



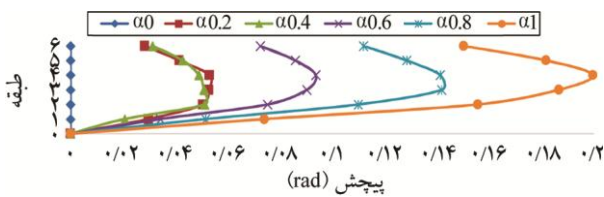
شکل (۲۶): پیچش طبقات سازه‌های ۶ طبقه تحت بارگذاری طبس در راستای X.



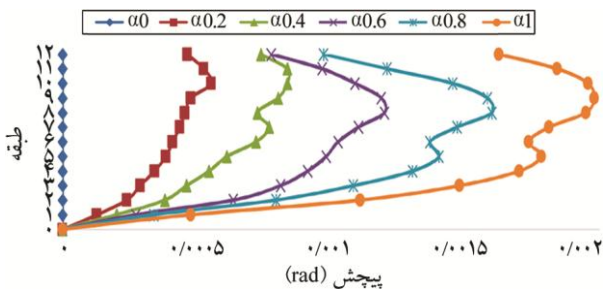
شکل (۲۷): پیچش طبقات سازه‌های ۱۲ طبقه تحت بارگذاری طبس در راستای X.

۴-۲-۲- پیچش سازه‌ها تحت بارگذاری طبس در راستای Y

از شکل‌های (۲۸)، (۲۹) و (۳۰) مشاهده می‌شود که در تمامی سازه‌ها و با ارتفاع‌های مختلف با افزایش ناموازی بودن سیستم باربر ناموازی پیچش طبقات نیز افزایش یافته است. لازم به ذکر است که پیچش سازه منظم یعنی $\alpha 0$ مقدار صفر نیست، اما به قدری ناچیز و کوچک است که می‌توان آن را صفر در نظر گرفت. همان‌گونه که مشاهده می‌شود در بارگذاری در راستای سیستم باربر ناموازی هم با افزایش ارتفاع سازه‌های پیچش طبقات کاهش یافته است. بدین صورت که سازه‌های ۲ طبقه دارای بیشترین پیچش و سازه‌های ۱۲ طبقه دارای کمترین پیچش هستند. در اعمال بارگذاری در این جهت چنانچه پیچش دیافراگم حداکثر هر سازه را بررسی نماییم، مشاهده می‌شود که مدل‌های $\alpha 0.8$ و $\alpha 1$ پیچش بسیار بیشتری نسبت به سازه‌های دیگر دارند، به طوری که پیچش این دو مدل به شکل تصاعدی در نمودارها رشد داشته است. همچنان تأثیرات مقدار زاویه میان سیستم‌های باربر در نتایج دیده می‌شود.



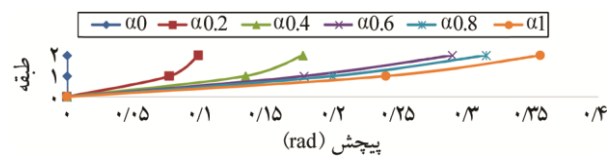
شکل (۳۵): پیشش طبقات سازه‌های ۶ طبقه تحت بارگذاری ال‌سنتر و در راستای Y.



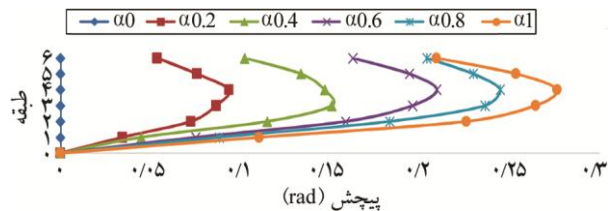
شکل (۳۶): پیشش طبقات سازه‌های ۱۲ طبقه تحت بارگذاری ال‌سنتر و در راستای Y.

۴-۲-۵- مقایسه پیشش طبقات با سازه مرجع

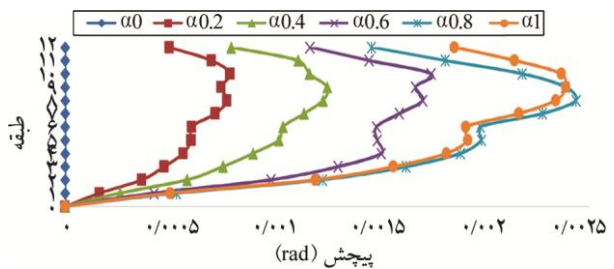
در شکل‌های (۳۷)، (۳۸) و (۳۹) پیشش سازه‌های ۲، ۶ و ۱۲ طبقه به پیشش سازه‌های ۲، ۶ و ۱۲ طبقه $\alpha 0.2$ نسبت‌گیری شده‌اند و با بارگذاری‌های مختلف مقایسه شده‌اند. به دلیل اینکه پیشش حداکثر در سازه‌های ۲ طبقه در طبقه ۲، در سازه‌های ۶ طبقه در طبقه ۴ و در سازه‌های ۱۲ طبقه در طبقه ۸ رخ داده است، لذا پیشش طبقات مذکور نسبت‌گیری شده‌اند. شکل‌های (۳۷)، (۳۸) و (۳۹) نشان می‌دهند که در تمامی سازه‌ها با طبقات مختلف و تمامی بارگذاری‌ها، با افزایش ناموازی شدن سیستم باربر پیشش طبقات نیز افزایش یافته است، لذا امری بدیهی است که در هر سازه‌ای، افزایش ناموازی بودن مساوی با افزایش پیشش در آن سازه است. پیشش سازه‌ها تحت بارگذاری در امتداد سیستم باربر ناموازی (Y)، تغییرات جابه‌جایی نسبی بسیار بیشتر و شدیدتری نسبت به اعمال بارگذاری در راستای عمود بر سیستم باربر ناموازی دارد. این تأثیر در سازه‌های کوتاه بسیار محسوس‌تر از سازه‌های بلند است زیرا مشاهده می‌شود که با افزایش ارتفاع سازه‌ها اختلاف نسبت پیشش سازه میان



شکل (۳۱): پیشش طبقات سازه‌های ۲ طبقه تحت بارگذاری ال‌سنتر و در راستای X.

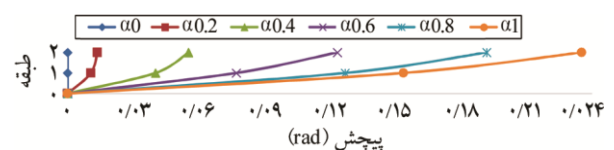


شکل (۳۲): پیشش طبقات سازه‌های ۶ طبقه تحت بارگذاری ال‌سنتر و در راستای X.

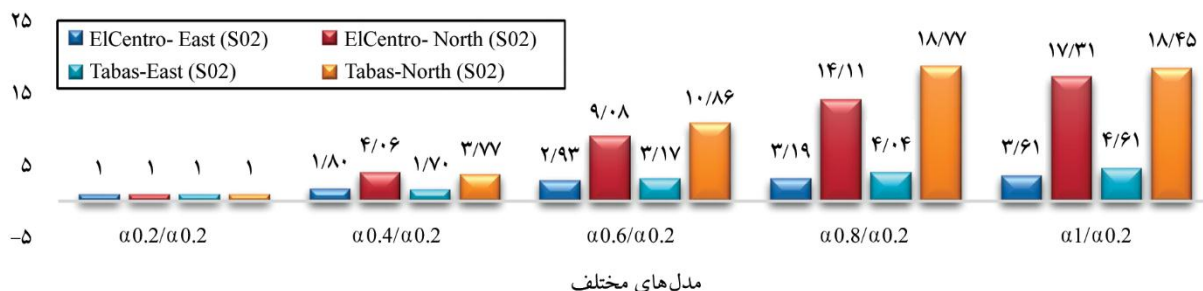


شکل (۳۳): پیشش طبقات سازه‌های ۱۲ طبقه تحت بارگذاری ال‌سنتر و در راستای X.

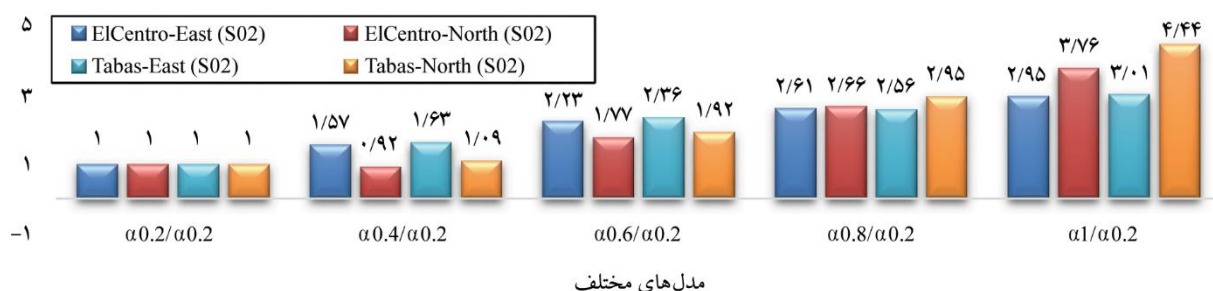
۴-۲-۴- پیشش سازه‌ها تحت بارگذاری ال‌سنتر و در راستای Y
در این بخش بارگذاری در امتداد سیستم باربر ناموازی (Y) اعمال شده و نتایج زیر حاصل شده است. از شکل‌های (۳۴)، (۳۵) و (۳۶) مشاهده می‌شود که با افزایش ناموازی بودن سیستم باربر پیشش طبقات نیز افزایش یافته است. در سازه‌های ۲ طبقه تغییرات پیشش سازه $\alpha 1$ نسبت به سایر سازه‌ها بیشتر است. با صرف نظر کردن از مدل مستطیلی شکل یعنی سازه $\alpha 0$ پیشش طبقات تا سازه $\alpha 0.8$ با نسبت تقریباً معینی زیاد شده‌اند اما در سازه $\alpha 1$ این نسبت کاهش یافته است.



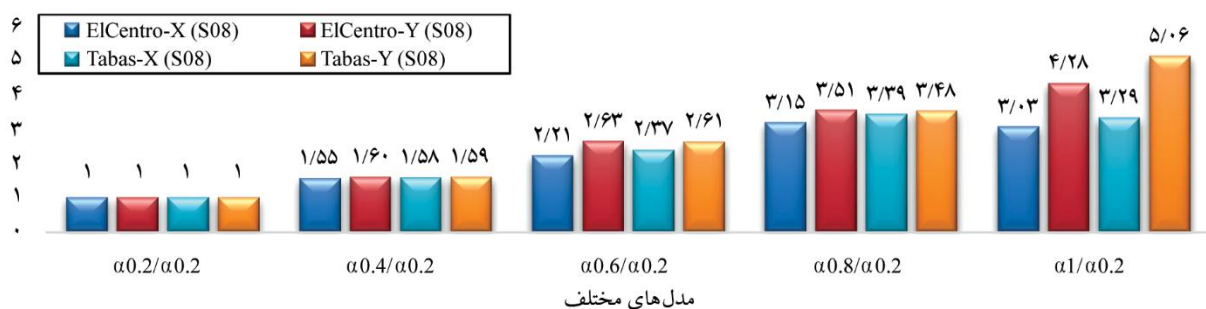
شکل (۳۴): پیشش طبقات سازه‌های ۲ طبقه تحت بارگذاری ال‌سنتر و در راستای Y.



شکل (۳۷): پیش‌سازه‌های ۲ طبقه به پیش‌سازه ۲ طبقه تحت بارگذاری‌های دینامیکی خطی.



شکل (۳۸): پیش‌سازه‌های ۴ طبقه به پیش‌سازه ۴ طبقه تحت بارگذاری‌های دینامیکی خطی.



شکل (۳۹): پیش‌سازه‌های ۱۲ طبقه به پیش‌سازه ۸ طبقه تحت بارگذاری‌های دینامیکی خطی.

۵- نتیجه‌گیری

با مدل‌سازی سه‌بعدی سازه‌های معرفی شده و اعمال سیستم باربر ناموازی با تغییر پلان سازه‌ها و با اعمال بارگذاری‌های تاریخیچه زمانی دینامیکی خطی و بارافزون در دو جهت به صورت جداگانه نتایج بدین صورت حاصل شده است. ابتدا به نتایج حاصل شده از تحلیل استاتیکی غیرخطی می‌پردازیم. در سازه‌هایی که دارای سیستم باربر ناموازی هستند بیشترین پیش‌دیافراگم مربوط به طبقه‌ای است که مابین ۶۰ الی ۷۰ درصد ارتفاع سازه از تراز پایه قرار دارد. با بررسی دیافراگم دارای بیشترین پیش‌دیافراگم، مشخص شد که با افزایش

بارگذاری‌های در راستای سیستم باربر ناموازی و عمود بر سیستم باربر ناموازی کمتر شده است. به عنوان مثال تغییرات پیش‌سازه‌های ۲ طبقه با افزایش ناموازی بودن سیستم باربر و تحت بارگذاری طیس در راستای Y به ترتیب ۳/۷۷، ۱۰/۸۵، ۱۸/۷۷ و ۱۸/۴۴ برابر می‌باشد، در صورتی که این نسبت برای سازه‌های ۱۲ طبقه به ترتیب ۱/۵۹، ۲/۶۱، ۳/۴۸ و ۵/۰۶ برابر می‌باشد. لذا می‌توان نتیجه گرفت برای پیش‌بارگذاری در راستای سیستم باربر ناموازی برای سازه‌های کوتاه بحرانی ولی برای سازه‌های بلندتر چندان فرق محسوسی در نتایجی که نسبت به سازه مرجع اندازه‌گیری می‌شوند، ندارد.

- 3rd Edition). BHRC Press, Tehran, Iran (in Persian).
- ASCE (2010) *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*. ASCE Standard ASCE/SEI 7-10. American Society of Civil Engineering: Reston, Virginia.
 - Al-Ali, A.A.K. and Krawinkler, H. (1998) *Effects of Vertical Irregularities on Seismic Behavior of Building Structures*. Report No. 130, The John A. Blume Earthquake Engineering Center, Department of Civil and Environmental Engineering, Stanford University, Stanford, U.S.A.
 - Khoshnam, M. and Kheyroddin, Ali (1395) Investigation of non-parallel lateral resisting system effect on steel structures roof displacement under linear dynamic loading. *3rd International Conference on Structural Engineering*, Tehran, Iran (in Persian).
 - Khoshnam, M. and Kheyroddin, Ali (1395) Investigation of steel structures drift with non-parallel lateral resisting system under linear dynamic loading. *3rd International Conference on Sustainable Architecture and Urbanism*, Dubai, UAE (in Persian).
 - Khoshnam, M. and Kheyroddin, Ali (1395) Investigation of non-parallel lateral resisting system effect on steel structures period. *2nd International Conference on Human, Architecture, Civil Engineering and City*, Tabriz, Iran (in Persian).
 - Aranda, G.R. (1984) Ductility demands for R/C frames irregular in elevation. *Proceedings of the Eighth World Conference on Earthquake Engineering, San Francisco, U.S.A.*, **4**, 559-566.
 - Athanassiadou, C.J. (2008) Seismic performance of R/C plane frames irregular in elevation. Department of Civil Engineering, Aristotle University of Thessaloniki, Greece. *Engineering Structures*, **30**, 1250-1261.
 - Chintanapakdee, C. and Chopra, A.K. (2004) Seismic response of vertically irregular frames: response history and modal pushover analyses. *Journal of Structural Engineering, ASCE*, **130**(8), 1177-1185.

ناموازی بودن سیستم باربر، پیچش طبقه مذکور نیز افزایش پیدا می‌کند. همچنین مشاهده شد که در اعمال بارگذاری‌هایی که در راستای سیستم باربر ناموازی (Y) صورت می‌گیرد، پیچش برای سازه‌های بلند تا ۵۶ برابر و برای سازه‌های کوتاه تا ۸ برابر بیشتر از سازه‌های موازی تر (سازه مدل $\alpha 0.2$) است، این موضوع در حالی رخ می‌دهد که این نسبت برای اعمال بارگذاری در راستای عمود بر سیستم باربر ناموازی (X) به ترتیب ۶ و ۸ برابر است، لذا در این نوع سازه‌ها بارگذاری در امتداد سیستم باربر ناموازی (Y) دارای نتایج بحرانی‌تری نسبت به اعمال بارگذاری در راستای دیگر است. نتایج پیچش در حالت پلاستیک، در اعمال بارگذاری بار افزون در راستای Y متفاوت از بارگذاری دیگر است، در بارگذاری بار افزون در راستای X رفتار الاستیک و غیر الاستیک سازه‌ها چندان فرقی با یکدیگر ندارد و اختلاف آنها قابل چشم‌پوشی و صرف نظر کردن است.

اما در تحلیل تاریخچه زمانی دینامیکی خطی نتایج بدین صورت حاصل شده است. دو مدل $\alpha 0.8$ و $\alpha 1$ در هر دو جهت اعمال بارگذاری دارای چرخش ناگهانی دیافراگم نسبت به سایر سازه‌ها هستند. برای سازه با تعداد طبقات مختلف و پلان مشابه، با افزایش ارتفاع، مقدار پیچش دیافراگم دارای حداکثر پیچش، کم می‌شود. در سازه‌های کوتاه مرتبه، پیچش سازه‌های ناموازی تا ۱۸ برابر بیشتر از پیچش سازه مدل $\alpha 0.2$ است، این مقدار برای سازه‌های بلند مرتبه تا ۵ برابر بیشتر از سازه مدل $\alpha 0.2$ است. افزایش ارتفاع باعث کاهش مقدار پیچش می‌شود، همچنین افزایش ارتفاع باعث کاهش نسبت پیچش سازه‌های ناموازی به سازه‌های کمتر ناموازی تر نیز می‌شود. نکته‌ای که به صورت نهایی حاصل شده است، این موضوع است که بارگذاری در حالتی که در امتداد سیستم باربر ناموازی (Y) باشد، نتایج غیر قابل پیش‌بینی تر و بحرانی‌تری را به وجود می‌آورد.

مراجع

- BHRC (2014) *Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings (Standard No. 2800*

19. Shahrooz, B.M. and Moehle, J.P. (1990) Seismic response and design of setback buildings. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, **116**(5), 1423-1439.
20. Tena-Colunga, A. (2004) Evaluation of the seismic response of slender, setback RC moment-resisting frame buildings designed according to the seismic guidelines of a modern building code. *Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering*, CD ROM, Vancouver, August 2004.
21. Valmundsson, E.V. and Nau, J.M. (1997) Seismic response of building frames with vertical structural irregularities. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, **123**(1), 30-41.
22. Wong, C.M. and Tso, W.K. (1994) Seismic loading for buildings with setbacks. *Canadian Journal of Civil Engineering*, **21**(5), 863-871.
23. Kheyroddin, A. (2017) Positioning shear wall in reinforced concrete buildings. *The Tenth National Congress of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering*, Sharif University of Technology (in Persian).
24. Maniei, S., Sarvghad Moghadam, A., Ghafouri Ashtiani, M. (1395) Probabilistic assessment of short buildings collapse with asymmetric plan. *Journal of Science and Earthquake Engineering*, **3**(2) (in Persian).
10. Das, S. and Nau, J.M. (2003) Seismic design aspects of vertically irregular reinforced concrete buildings. *Earthquake Spectra*, **19**(3), 455-477.
11. Fragiadakis, M., Vamvatsikos, D. and Papadrakakis, M. (2006) Evaluation of the influence of vertical irregularities on the seismic performance of a nine-storey steel frame. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **35**(12), 1489-1509.
12. Hashemi, M.J. and Mofid, M. (2010) Evaluation of energy-based modal pushover analysis in reinforced concrete frames with elevation irregularity. *Transaction A: Civil Engineering*, **17**(2), 96-106, Sharif University of Technology.
13. Humar, J.L. and Wright, E.W. (1977) Earthquake response of steel-framed multistorey buildings with set-backs. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **5**(1), 15-39.
14. Karavasilis, T.L., Bazeos, N., Beskos, D.E. (2008) Seismic response of plane steel MRF with setbacks: Estimation of inelastic deformation demands. *J. Const. Steel Res.*, **64**(6), 644-654.
15. Moghadam, A.S., Tso, W.K. (2000) Pushover analysis for asymmetric and set-back multi-story buildings. *Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering*, CDROM. Auckland, NewZealand, February 2000.
16. Nassar, A.A. and Krawinkler, H. (1991) *Seismic Demands for SDOF and MDOF Systems*. Report No. 95, The John A. Blume Earthquake Engineering Center, Department of Civil and Environmental Engineering, Stanford University, Stanford, U.S.A.
17. Romão, X., Costa, A., Delgado, R. (2004) Seismic behaviour of reinforced concrete frames with setbacks. *Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering*, CD ROM. Vancouver, August 2004.
18. Ruiz, S.E. and Diederich, R. (1989) The Mexico earthquake of September 19, 1985 – the seismic performance of buildings with weak first storey. *Earthquake Spectra*, **5**(1), 89-102.

Assessment of the Effects of Torsion in Steel Structures with Non-Parallel Lateral Resisting System with an Asymmetric Plan

Mohammad Khoshnam¹, Ali Kheyroddin² and Mohammad Iman Khodakarami^{3*}

1. M.Sc. Graduate, Earthquake Engineering, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran
 2. Professor of Structural Engineering, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran
 3. Assistant Professor of Earthquake Engineering, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran,
- * Corresponding Author, email: khodakarami@semnan.ac.ir

Since Iran is located in a seismic region and due to the existence of trapezoidal or triangular terrains, because cities were not constructed based on a grid format in the past, in addition to the interest of contemporary architecture in designing irregular structures and structures with non-parallel lateral resisting system as defined in the 4th edition of the Standard 2800, thus this paper studies the seismic behavior of such structures.

In this paper, three-dimensional modelling of steel structures with five different plans, each representing a percentage of irregularities of the lateral resisting system and three-dimensional modelling of a completely regular plan is presented for comparison. Besides, the torsional behavior of structures with lateral resisting systems is studied and compared with regular structures. The letter alpha is used with indexes indicating the level of anomaly of the carrier systems. The value of the alpha index is obtained by dividing the length of the removed openings by the length of the entire structure. In order to investigate the effect of height, the structures were modelled and studied using two, four and twelve floor models. The modelled structures are made of steel and possess a specific steel converging bracing system in line with Y and a modular steel folding frame along X. Moreover, the soil on the land is of type 2 in accordance with the 4th edition of the Standard 2800, and the structures are in accordance with articles six and ten of National Building Regulations. To analyze the structures, pushover analysis and dynamic linear analysis were implemented. In the pushover analysis, a load was analyzed in line with X and another load was analyzed in line with Y. Furthermore, for dynamic linear analysis, the peak acceleration recorded for Tabas, Iran and El Centro, USA earthquakes were used.

The results obtained from this investigation and comparisons with regular structures suggests that in structures with non-parallel lateral resisting system, the highest torsion is related to the floor that has a distance of 60% to 70% from the base level. Besides, it was evident that during loading for the non-parallel lateral resisting system in line with Y, the torsion for longer order structures is up to 56 times, and for shorter order structures up to 8 times more than that of more parallel structures (structure model $\alpha 0.2$). Moreover, this ratio for loading on the lateral resisting system (X) was 6 and 8 times, respectively. Thus, it is noteworthy that for these types of structures, loading in (Y) direction has more disastrous results compared to other types of loading. The results obtained from torsion in elastic mode for pushover analysis in Y direction were different compared to other types. For pushover analysis in X direction, the elastic and non-elastic behavior of structures was not significantly different and could be neglected. The results obtained from dynamic linear chronological analysis were such that for models $\alpha 0.8$ and $\alpha 1$, loading for both directions experienced sudden aperture rotation compared to other structures. For structures of different floors and identical plan, the aperture of maximum twists can be reduced by increasing structure height. In short order structures, the torsion of irregular structures is up to 18 times more than the torsion of structure model $\alpha 0.2$. This torsion for high order structures is up to five times more than that of structure model $\alpha 0.2$. Increasing the height reduces the torsion. Besides, increasing height reduces the torsion ratio of irregular structures to more regular structures.

The final point is that loading in a state of non-parallel lateral resisting system (Y) will entail more unpredictable and disastrous results.

Keywords: Non-Parallel Resisting System, Steel Moment Resisting Frame, Concentrically Braced Frame, Diaphragm Torsion, Nonlinear Dynamic Analysis, Pushover.