

بررسی لرزه‌ای پارامترهای حرکت گهواره‌ای قاب‌های مهاربندی

با ترکیب مهاربندهای مرسوم و کمانش تاب

(تاریخ ارسال مقاله ۱۴۰۳/۰۷/۲۵ تاریخ تصویب ۱۴۰۳/۰۹/۲۳)

مهندس امین محمدی آزاد^۱

دانشجوی کارشناسی ارشد رشته مهندسی عمران _ سازه، موسسه آموزش عالی آیین کمال ارومیه

دکتر مهدی عبدلی بی صفر

استاد موسسه آموزش عالی آیین کمال ارومیه، رشته مهندسی عمران _ سازه

دکتر علیرضا پرویشی

استاد موسسه آموزش عالی آیین کمال ارومیه، رشته مهندسی عمران _ سازه

چکیده

در مقاله حاضر یک سیستم نوین مقاوم لرزه‌ای، تحت عنوان قاب مهاربندی با ترکیب مهاربندهای مرسوم و کمانش تاب مطرح و مورد ارزیابی قرار گرفت. در این تحقیق، پارامترهای حرکت گهواره‌ای مورد بررسی قرار می‌گیرند. در این تحقیق مدل سازی ماکرو با اختصاص مفاصل پلاستیک به المان‌ها توسط نرم افزار ETABS انجام شد. پس از آن سطوح عملکرد و رفتار غیرخطی المان‌ها با اعمال بارهای جانبی مورد مطالعه قرار گرفت. سه نوع قاب مهاربندی فولادی ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه که نماینده سازه‌های کوتاه و متوسط بود انتخاب و مهاربندهای کمانش تاب با توزیع‌های متفاوت همراه با مهاربندهای معمولی مورد مطالعه قرار گرفت. سازه‌های مورد نظر مطابق با آیین نامه‌های طراحی استاندارد ۲۸۰۰ لرزه‌ای ایران ویرایش چهارم و ۳۶۰-۱۰ AISC طراحی گردید. در نهایت با استفاده از تحلیل‌های غیر خطی تاریخچه زمانی و پوش‌اور، ظرفیت نهایی قاب‌ها محاسبه و بررسی شد. نتایج نشان داد که حضور مهاربندهای کمانش تاب نسبت به مهاربندهای معمولی در قاب، باعث ایجاد بیشتر مفاصل پلاستیک در این المان‌ها می‌شود که این خصوصیت به سازه امکان تعمیر پذیری پس از وارد شدن خسارت را می‌دهد. استفاده از مهاربند کمانش تاب به مقدار زیادی باعث کاسته شدن از تغییر مکان جانبی سازه در عملکرد لرزه‌ای آن که بصورت حرکت گهواره‌ای (RBRBF) است، می‌شود. علاوه بر این، عملکرد سازه قاب مهاربندی مجهز به مهاربندهای کمانش تاب به نحوه چیدمان المان‌های مهاربندی بستگی دارد.

واژگان کلیدی: ترکیب مهاربند کمانش تاب با مهاربند های معمولی، حرکت گهواره‌ای، تحلیل تاریخچه زمانی غیر خطی، پوش‌اور

۱-مقدمه

بررسی زلزله‌های اخیر نشان می‌دهد که خسارت‌های مالی زیادی در نتیجه‌ی این زمین لرزه‌ها به سازه‌ها وارد شده است از این رو استفاده از سیستم‌های کار آمد در این زمینه که علاوه بر کاهش خسارت، عملکرد مطلوبی داشته باشد، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. قاب‌های مهاربندی‌شده یکی از سیستم‌های متداول در طراحی سازه‌ها برای افزایش مقاومت در برابر زلزله هستند. با این حال، این سیستم‌ها ممکن است در برابر برخی از حالات بارگذاری، مانند بارهای دینامیکی ناشی از زلزله، عملکرد مناسبی نداشته باشند. به همین دلیل، ترکیب مهاربندهای مرسوم با کمانش‌تاب (Buckling-Restrained Braces) به عنوان یک راهکار نوین در این پژوهش مطرح شده است. این ترکیب می‌تواند به بهبود عملکرد لرزه‌ای سازه‌ها کمک کند و از بروز آسیب‌های جدی جلوگیری نماید. مهاربندی که هم در فشار و هم کشش بدون ایجاد کمانش، تسلیم گردد، مهاربند مقاوم در برابر کمانش یا کمانش‌تاب (BRB)^۱ نامیده می‌شود. این سیستم‌ها به علت ممانعت از کمانش مهاربند، توانایی جذب سهم بزرگی از انرژی زلزله نسبت به سیستم‌های متداول دیگر را داراست [۱]. به طور کلی میزان تغییر شکل‌های ماندگار، عاملی کلیدی در ارزیابی عملکرد سازه‌ها می‌باشد. در یک سیستم مرکزگرا^۲، بسته به نوع سیستم، عناصری همچون مهاربند، میراگر، المان‌هایی که قابلیت تعویض دارند، اتصال تیر-ستون و یا دیوار برشی برای تامین مقدار مورد نیاز استهلاک انرژی به کار برده می‌شوند. در این نوع سیستم‌ها، بطور متعاقب تغییرمکان نسبی ماندگار در سازه حذف می‌گردد. از مهم‌ترین خصوصیات این نوع سیستم‌ها تعویض‌پذیری، تنش‌های پسماند ناچیز با منحنی‌های هیستریزیس پرچم شکل می‌باشد. باید در نظر داشت که تغییر شکل‌های پسماند می‌توانند باعث خلل در بهره‌برداری از سازه گردند یا خسارت‌های مالی سنگینی را به بار بیاورد؛ لذا برای اقلان این خصوصیت می‌بایست در سازه، لنگری وجود داشته باشد که بتواند آن را از نقطه حداکثر جابجایی به حالت اولیه (جابجایی صفر) برساند. این حالت از سازه در اصطلاح حرکت گهواره‌ای (RBRBF) نامیده می‌شود [۲-۶].

در دهه‌های گذشته، چندین روش طراحی برای قاب‌های فولادی مجهز به (BRBs)، ارایه شده است و کاربرد آنها در سیستم‌هایی با ویژگی‌های هندسی مختلف، رفتار رضایت‌بخشی را در کل سیستم ایجاد کرده است [۷]. تحقیقات و بررسی‌های اولیه‌ی انجام شده نشان می‌دهند که در مورد بررسی لرزه‌ای پارامترهای حرکت گهواره‌ای قابهای مهاربندی با ترکیب مهاربندهای مرسوم و کمانش‌تاب، آزمایش‌ها و ارائه مقاله‌های علمی، به حد کافی صورت نگرفته است. بنابراین، ارزیابی این سیستم نوین، نیازمند بررسی دقیق عملکرد آن، در شرایط مختلف بارگذاری و مقایسه با سایر سیستم‌های متداول می‌باشد. این تحقیق می‌تواند به ارائه

^۱ Buckling-Restrained Braces^۲ Self-centering

راهکارهای بهینه طراحی سازه‌ها منجر شود و به افزایش ایمنی ساختمان‌ها در برابر زلزله کمک کند. در این تحقیق، سازه‌ها بر اساس مبحث دهم مقررات ملی ساختمان ویرایش ۱۴۰۱ و ملاحظات بارگذاری لرزه‌ای موجود در ویرایش چهارم آیین نامه ۲۸۰۰ طراحی شده‌اند. پس از انجام تحلیل استاتیکی غیرخطی (پوش اور)، برای استخراج تغییر شکل‌های ماندگار و گذرا، همه قاب‌های دو بعدی سازه‌ای با تیپ‌های فرضی مهاربندهای اشاره شده در بالا، با استفاده از تحلیل غیرخطی تاریخچه زمانی نیز مورد ارزیابی قرار می‌گیرند تا رفتار گهواره‌ای قاب‌ها به صورت مجزا تحت سه رکورد لرزه‌ای مقیاس شده مورد ارزیابی قرار گیرند.

۲- ادبیات و پیشینه پژوهش

سلطانی و همکاران در سال ۲۰۲۳ در بررسی یکی از سیستم‌های جدید مقاوم در برابر نیروی جانبی که برای بهبود عملکرد لرزه‌ای سازه‌ها از سیستم ترکیبی کمانش‌تاب و گهواره‌ای (RBRBF) استفاده شد به این نتیجه رسیده‌اند که با انتخاب RBRBF به عنوان یک سیستم مقاوم در برابر نیروی جانبی به جای BRBF می‌توان تغییر شکل ماندگار را به میزان قابل توجهی کاهش داد [۸]. بوسکو و همکارانش در سال ۲۰۱۸ در ارزیابی یک روش طراحی برای حرکت گهواره‌ای با استفاده از مفصل قاب‌های مهاربندی شده، به این نتیجه رسیدند که در مورد تغییر رفتار RBRBF از الاستیک تا محدوده غیر خطی، سختی جانبی طبقه بطور قابل ملاحظه‌ای بدون تغییر شکل باقی می‌ماند. این در حالی است که سختی جانبی کل سیستم، به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. به همین دلیل، RBRBF به تدریج از رفتار شکل پذیری به رفتار با سختی بالا تمایل دارد. این سیستم نسبت به سایر انواع قاب‌های مهاربندی شده، از نظر اقتصادی مقرون به صرفه می‌باشد [۹]. هو و وانگ در سال ۲۰۲۱ به ارزیابی پاسخ لرزه‌ای سیستم های دوگانه مرکزگرا با حرکت گهواره‌ای پرداختند. آنها در یک بررسی عددی در خصوص قاب‌های SEDRC^۱ به این نتیجه رسیدند که دریف‌های نسبی در تراز بام این نوع سیستم ها، در مقایسه با سیستم مهاربند کمانش‌تاب BRBF، بسیار کاهش می‌یابد [۱۰]. ژانگ و همکاران در سال ۲۰۲۳ یک سیستم سازه‌ای نوینی به نام "قاب مهاربند کمانش‌تاب گهواره‌ای" ارائه نمودند. ساختار قاب RBRBFS برای رفع نواقص سیستم‌های BRBFS و کاربردهای عملی عنوان گردید. این سیستم نوآورانه صرفاً نیروهای فشاری عمودی، برشی افقی و لنگر خمشی را با قطع اتصالات قائم بین پی و ستون‌های قاب منتقل می‌نمود [۱۱]. در پژوهشی رفتار مهاربندهای کمانش‌تاب توسط ژو و همکاران مورد مطالعه قرار گرفت. آنها آزمایش‌های چرخه‌ای را بر روی دو نمونه به اصطلاح مهاربند با دیوار برشی انجام دادند که شامل یک مهاربند در بردارنده صفحه فلزی صاف داخل پائل بتن مسلح با و بدون مواد غیر چسبنده بود. نتایج حاصل از صحت سنجی یک نمونه آزمایشگاهی مهاربند کمانش‌تاب در نرم افزار ABAQUSE نشان داد که شکل هندسی صفحه اتصال و جنس آن تاثیر زیادی در عملکرد چرخه‌ای

^۱ Self-centering Energy-absorbing Dual Rocking Core (SEDRC)

این نوع مهاربند دارد [۱۲]. نتایج شکیب و همکاران در سال ۲۰۱۵ نشان داد که سیستم مهاربندی کمانش‌تاب برون محور در نزدیکی گسل‌های لرزه‌زا نسبت به سیستم مهاربندی برون محور متداول عملکرد بهتری دارد [۱۳]. از نخستین سیستم‌هایی که قابلیت بازگشت‌پذیری به آن‌ها الحاق گردید قاب‌های خمشی فولادی بودند [۱۴-۲۰].

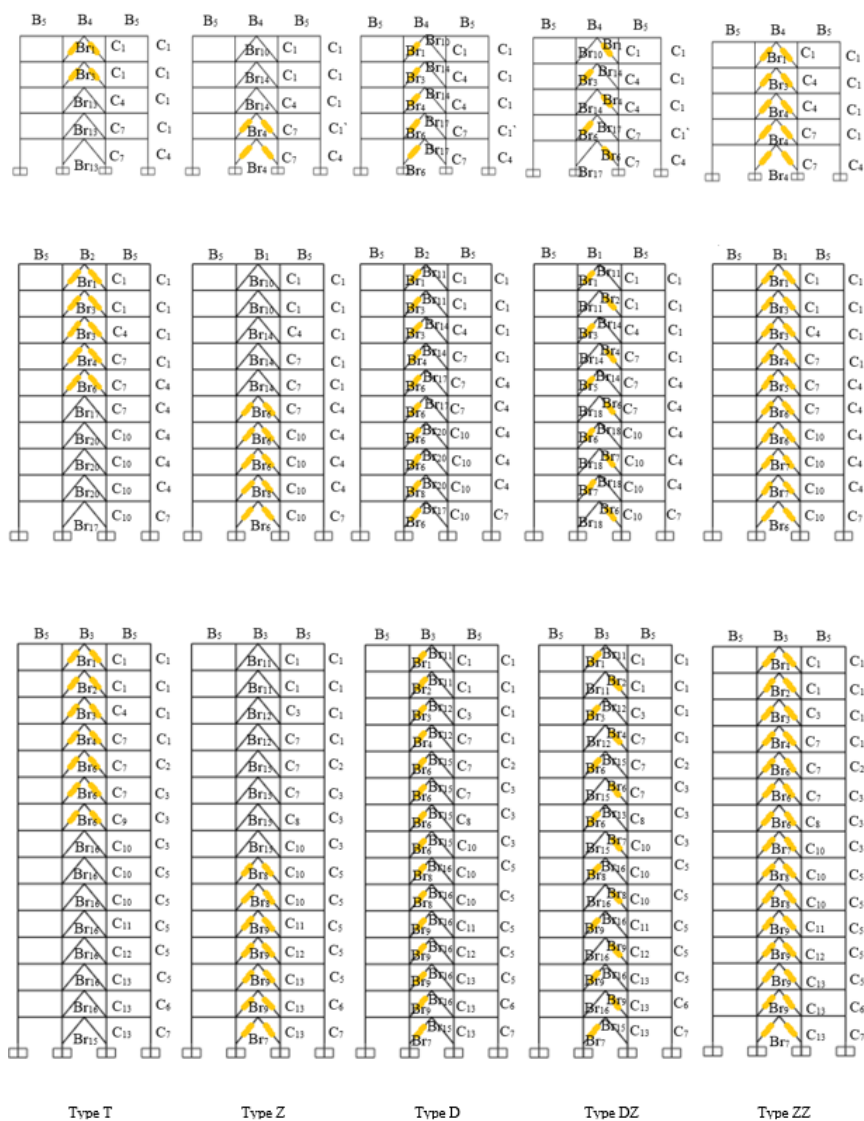
جدول (۱): مشخصه‌های مقاطع

۳- مدلسازی و تحلیل

۳-۱- فرضیات تحلیل

BEAM	B_۱ (TG ۱۴*۱۴*۱.۱) B_۲ (TG ۱۴*۱۴*۱.۳) B_۳ (TG ۱۴*۱۴*۱.۵) B_۴ (TG ۱۵*۱۵*۱.۰) B_۵ (TG ۲۵*۲۵*۱.۲)
Column	C_۱ (Box ۱۰*۱۰) C_۲ (Box ۱۲*۱۰) C_۳ (Box ۱۵*۱۰) C_۴ (Box ۱۵*۱۰) C_۵ (Box ۱۶*۱۰) C_۶ (Box ۱۶*۱۰) C_۷ (Box ۲۵*۱۰) C_۸ (Box ۲۵*۱۰) C_۹ (Box ۲۵*۲۰) C_{۱۰} (Box ۲۵*۲۰) C_{۱۱} (Box ۲۴*۲۰) C_{۱۲} (Box ۲۴*۳۰) C_{۱۳} (Box ۲۵*۴۰)
Brace	Br_۱ (BRB ۱.۵ Bolted) Br_۲ (BRB ۱.۷۵ Bolted) Br_۳ (BRB ۲.۰ Bolted) Br_۴ (BRB ۲.۵ Bolted) Br_۵ (BRB ۲.۷۵ Bolted) Br_۶ (BRB ۳.۰ Bolted) Br_۷ (BRB ۳.۲۵ Bolted) Br_۸ (BRB ۳.۵ Bolted) Br_۹ (BRB ۳.۷۵ Bolted) Br_{۱۰} (Box ۱۰) Br_{۱۱} (Box ۱۰*۰.۵) Br_{۱۲} (Box ۱۰*۰.۷) Br_{۱۳} (Box ۱۰*۰.۸) Br_{۱۴} (Box ۱۲) Br_{۱۵} (Box ۱۲*۰.۷) Br_{۱۶} (Box ۱۲*۰.۸) Br_{۱۷} (Box ۱۳*۰.۵) Br_{۱۸} (Box ۱۳*۰.۶) Br_{۱۹} (Box ۱۳*۰.۸) Br_{۲۰} (Box ۱۳*۱.۰)
	Br_{۲۱} (Box ۱۰) Br_{۲۲} (Box ۱۰*۰.۵) Br_{۲۳} (Box ۱۰*۰.۷) Br_{۲۴} (Box ۱۰*۰.۸) Br_{۲۵} (Box ۱۲) Br_{۲۶} (Box ۱۲*۰.۷) Br_{۲۷} (Box ۱۲*۰.۸) Br_{۲۸} (Box ۱۳*۰.۵) Br_{۲۹} (Box ۱۳*۰.۶) Br_{۳۰} (Box ۱۳*۰.۸) Br_{۳۱} (Box ۱۳*۱.۰)

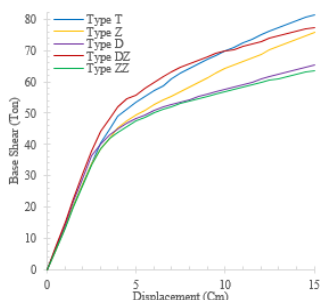
در این پژوهش برای مدل‌سازی بخش‌های سازه‌ای مشتمل بر قاب‌ها و مهاربندها که رفتار کلی آن‌ها اعم از مقاومت، سختی و تغییر مکان مورد نظر می‌باشند، مدل‌سازی با اختصاص مفاصل پلاستیک به المان‌ها صورت پذیرفته است. در پژوهش حاضر فرض شد که قابهای مهاربندی‌شده فولادی ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه از قاب‌های سه بعدی متقارن استخراج شده‌اند. قاب مهاربندی با مهاربندهای همگرا که در آن مهاربندهای کمانش‌تاب با توزیع‌های متفاوت در ارتفاع سازه توزیع شده‌اند، مورد طراحی قرار گرفت. برای هسته از مشخصات فولاد ST-۳۷۵ در مهاربندهای کمانش‌تاب استفاده شد. در انجام پژوهش حاضر از نرم افزای ETABS بهره گرفته شده است. درجه اهمیت سازه متوسط و ضریب شتاب مبنای طرح A برابر با ۰/۳۵ فرض گردید. سازه مطابق با آیین‌نامه‌های طراحی، شامل استاندارد ۲۸۰۰ [۲۱] لرزه‌ای ایران ویرایش چهارم طراحی شده است. مهاربندهای کمانش‌تاب در اشکال مختلف در ارتفاع سازه‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه توزیع گردیدند که شامل تیپ‌های T, Z, D, DZ, ZZ می‌باشند. راهنمای توزیع مهاربندها در قاب‌ها در شکل (۱) نمایش داده شده است مدل‌سازی قاب‌ها با شکل‌پذیری متوسط در نظر گرفته شده‌اند. قاب‌ها با استفاده از روش تحلیل استاتیکی معادل، طراحی و مقاطع طراحی با استفاده از شکل (۱) و جدول (۱) نمایش داده شده‌اند.



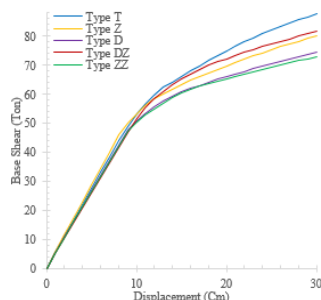
شکل (۱): توزیع المان های مهاربند کمانش تاب و سایر المان ها در سازه های ۵ ، ۶ و ۱۵ طبقه

۳-۲- تحلیل‌های غیر خطی

جهت اعمال رفتار غیر خطی به اعضای قابهای مهاربندی فولادی نظیر تیرها و مهاربندها، مفاصل پلاستیک نرم‌افزار ETABS که مطابق با ضوابط ASCE بود در نظر گرفته شد. مفاصل برای اجزای تیرها و مهاربندها تعریف گردید. در شکل (۲ تا ۴) منحنی ظرفیت تپه‌های مختلف ارائه شده است. سازه‌ها بر اساس تحلیل‌های غیر خطی پوش‌آور و تاریخچه زمانی در ادامه مورد ارزیابی قرار گرفتند و پارامترهای لرزه‌ای آنها بر اساس منحنی ظرفیت و تاریخچه پاسخ طبقه بام استخراج شد. بر اساس منحنی ظرفیت، مقادیر ضریب رفتار سیستم‌ها محاسبه گردید. محاسبات مربوط به تعیین ضریب رفتار از تحلیل پوش‌آور (پوش به مقدار ۱/۵ برابر جابجائی هدف) برای تیپ‌های مختلف در قابهای ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه در جدول (۲) ارائه شده است.

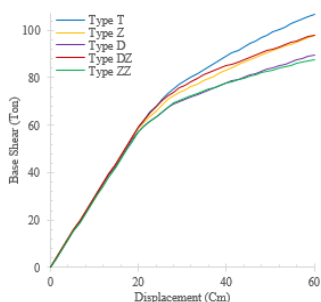


شکل (۲): نمودار مقایسه‌ای منحنی ظرفیت قابهای ۵ طبقه



شکل (۳): نمودار مقایسه‌ای منحنی ظرفیت قابهای ۱۰ طبقه

Chart Area



شکل (۴): نمودار مقایسه‌ای منحنی ظرفیت قابهای ۱۵ طبقه

جدول (۲). محاسبات ضریب رفتار در تیپ های مختلف قاب های مهاربندی شده ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه از تحلیل پوشاور

Structure Type	۵ Story					۱۰ Story					۱۵ Story				
	T	Z	D	DZ	ZZ	T	Z	D	DZ	ZZ	D	Z	D	DZ	ZZ
η	۱.۱	۱.۱	۱.۱	۱.۱	۱.۱	۱.۱	۱.۱	۱.۱	۱.۱	۱.۱	۱.۱	۱.۱	۱.۱	۱.۱	۱.۱
R_p	۴.۲۰	۴.۹۰	۴.۸۰	۴.۵۳	۴.۹۰	۳.۳۲	۳.۴۵	۳.۴۵	۳.۱۵	۳.۴۴	۲.۸۰	۲.۹۲	۳.۰۰	۲.۸۰	۲.۹۴
R_s	۰.۹۳	۰.۷۶	۰.۸۰	۰.۹۰	۰.۸۰	۰.۸۶	۰.۹۰	۰.۷۸	۰.۹۸	۰.۸۰	۰.۹۰	۰.۸۵	۰.۸۰	۰.۹۶	۰.۸۰
R	۳.۹۰	۳.۷۰	۳.۸۴	۴.۱۰	۳.۹۲	۲.۸۶	۳.۱۰	۲.۷۰	۳.۱۰	۲.۷۵	۲.۵۰	۲.۵۰	۲.۴۰	۲.۷۰	۲.۳۵

۳-۳- رکوردهای مورد استفاده در تحلیل تاریخچه زمانی

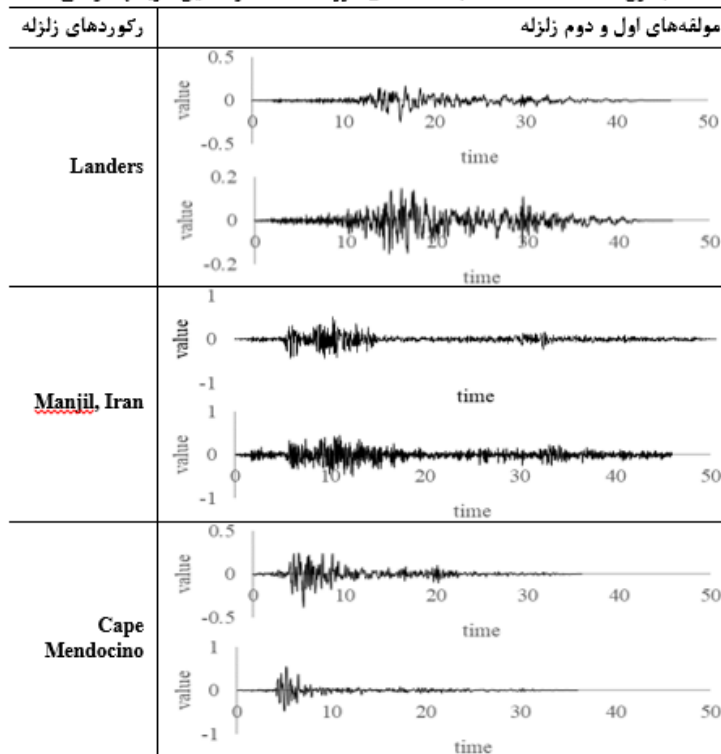
برای تحلیل تاریخچه زمانی غیر خطی، از سه رکورد زمین لرزه: Cape و Manjil, Iran Landers و Mendocino استفاده می شود که مشخصات زلزله در جدول (۳) و جدول (۴) آورده شده اند. مطابق با دستورالعمل بهسازی لرزه ای ساختمان های موجود (نشریه ۳۶۰ سازمان برنامه) برای سطح خطر زلزله یک در تعیین طیف طرح شتاب، معادل سطحی از حرکت های قوی زمین می باشد که احتمال فراگذشت از آن ۱۰٪ در ۵۰ سال است. این سطح خطر معادل دوره بازگشت ۴۷۵ سال است. سطح خطر یک در استاندارد ۲۸۰۰ «زلزله طرح» نامیده می شود. میزان شتاب مبنای طرح، مربوط به زلزله سطح خطر یک، با استفاده از نقشه پهنه بندی خطر زلزله استاندارد ۲۸۰۰ و نیز طیف طرح استاندارد ۲۸۰۰ برای میرایی ۵٪ تعیین می گردد.

جدول (۳): مشخصه های رکوردهای زلزله

EQ ID	Earthquake			Recording Station		Peer-Nga Record Information		PGA (g)	(cm/s)
						File Names - Horizontal Records			
	M	Year	Name	Name	Owner	Component ۱	Component ۲		
Eq _۱	۷.۳	۱۹۹۲	Landers	Yermo Fire Station	Cdmg	Landers/Yer۲۷۰	Landers/Yer۳۶۰	۰.۲۴	۵۱
Eq _۲	۷.۴	۱۹۹۰	Manjil, Iran	Abbar	Bhrc	Manjil/Abbar-L	Manjil/Abbar-T	۰.۴۰	۴۳
Eq _۳	۷.۰	۱۹۹۲	Cape Mendocino	Rio Dell Overpass	Cdmg	Capemend/Rio۲۷۰	Capemend/Rio۳۶۰	۰.۴۵	۳۶

$$SF_1 = ۴.۰۸۵, SF_2 = ۰.۳۸ \rightarrow SF = ۱.۵۵۱g$$

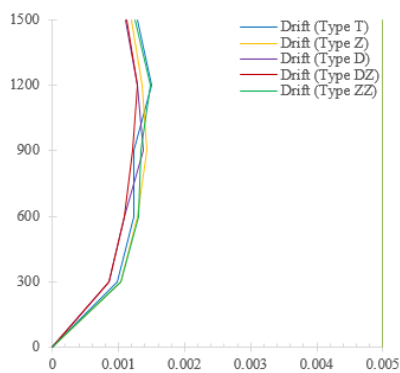
جدول (۴): مشخصات شتاب‌نگاشت‌های مورد استفاده در تحلیل تاریخچه زمانی



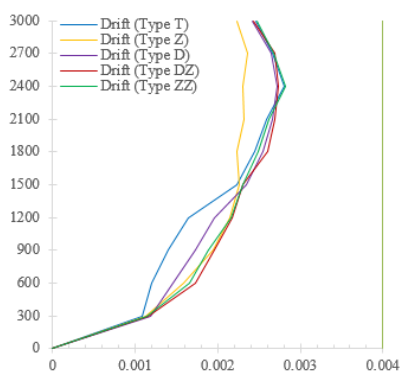
۴- بررسی نتایج

۴-۱ کنترل جابجایی نسبی طبقات (دیررفت) در تحلیل خطی

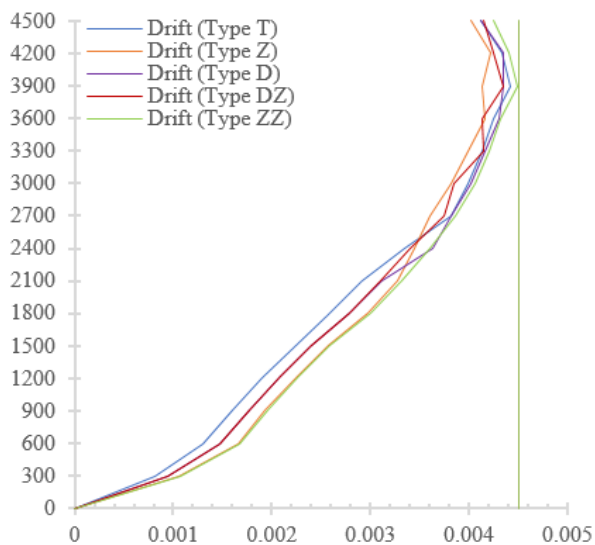
طبق بند ۳-۵-۱ آیین‌نامه ۲۸۰۰، تغییر مکان جانبی نسبی واقعی هر طبقه، که اختلاف بین تغییر مکان‌های جانبی واقعی مرکز جرم کف‌های بالا و پایین آن طبقه است، نباید از مقدار مشخص تعیین شده در این بند تجاوز نماید. طبق بند ۳-۵-۲ آیین‌نامه فوق، مقدار Δ_M نباید از مقادیر مجاز Δ_a تجاوز کند. در این روابط h ارتفاع تراز بام قاب می‌باشد. مطابق با شکل‌های (۵) الی (۷)، نمودارهای جابجایی نسبی طبقات در تمامی قاب‌های مورد مطالعه ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه برای تیپ‌های مختلف آرایش مهاربندهای کمانش تاب ترسیم گردیده‌اند. با توجه به موارد فوق، قاب‌های سازه‌های ۵ - ۱۰ و ۱۵ طبقه، دارای دیررفت کمتر از مقدار مجاز آیین‌نامه فوق هستند.



شکل (۵): نمودار مقایسه‌ای دریفت طبقه‌های قاب‌های ۵ طبقه



شکل (۶): نمودار مقایسه‌ای دریفت طبقه‌های قاب‌های ۱۰ طبقه



شکل (۷): نمودار مقایسه‌ای دریفت طبقه‌های قاب‌های ۱۵ طبقه

۴-۲ تحلیل غیر خطی تاریخچه زمانی

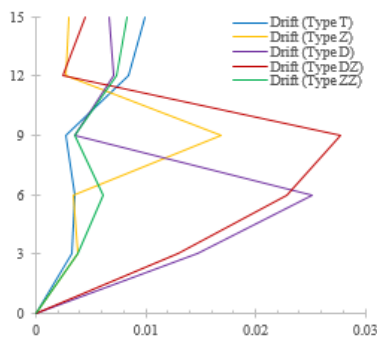
از جمله مهمترین پارامترهای مورد مطالعه در این تحلیل‌ها: جابجایی نسبی طبقه‌ها، سطح عملکرد، و تغییر مکان ماندگار می‌باشد. لازم به توضیح است که، مفاصل پلاستیک و کنترل آیین‌نامه‌ای تغییر مکان‌ها در تحلیل غیر خطی، برای رکورد زلزله Manjil بررسی شده‌اند.

۴-۲-۱- کنترل جابجایی نسبی طبقات (دیریت) در تحلیل غیر خطی

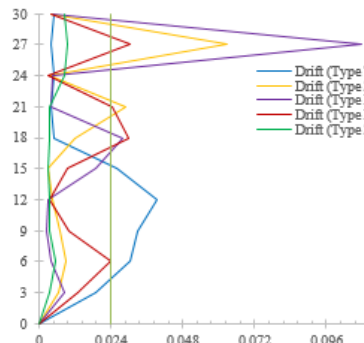
مطابق بند ۴-۴-۳ آیین‌نامه ۲۸۰۰ زلزله ایران (ویرایش چهارم) در تحلیل غیر خطی، تغییر مکان جانبی نسبی طبقات، نباید از ۱۲۰ درصد مقدار مجاز این استاندارد تجاوز نماید. در رکورد زلزله Manjil تمامی تیپ‌های سازه‌ای ۵ طبقه و در سازه‌های ۱۰ و ۱۵ طبقه، تیپ ZZ در محدوده مجاز آیین‌نامه قرار داشته و از این نظر بهترین عملکرد را دارند. شکل‌های (۸) الی (۱۰) جابجایی نسبی طبقات در قاب‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه را برای انواع تیپ‌های سازه‌ای مورد بررسی، نشان می‌دهند.

• بررسی سطوح عملکرد قاب‌ها

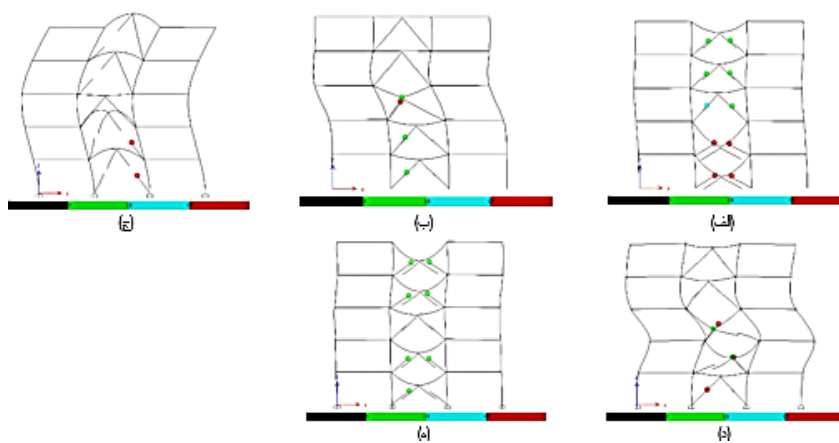
با توجه به شکل‌های (۱۱) الی (۱۳)، تعداد مفاصل پلاستیک و نحوه توزیع آنها در تمامی قاب‌های مهاربندی شده مجهز به مهاربند کماتش‌تاب در انواع تیپ‌های سازه‌ای نشان داده شده‌اند. بر این اساس، نحوه شکل‌گیری این مفاصل پلاستیک بطور عمده در مهاربندها می‌باشند. همچنین ملاحظه می‌گردد در تمامی سازه‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه، تیپ سازه‌ای ZZ با مهاربندهای کماتش‌تاب (BRB)، تحت رکورد زلزله Manjil در سطح عملکردی قابلیت استفاده بی‌وقفه (IO) قرار داشته و از این جهت عملکرد مطلوبی دارد.



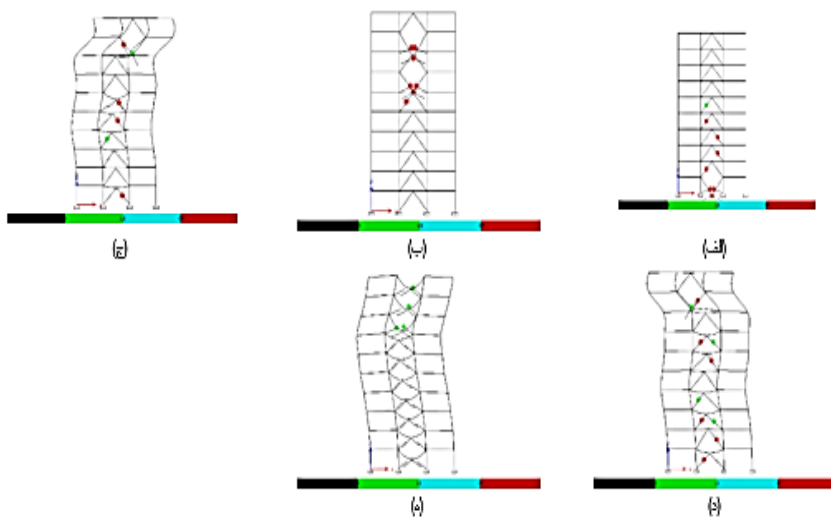
شکل (۸) نمودار مقایسه‌ای دررفت طبقه‌های قاب‌های ۵ طبقه



شکل (۹) نمودار مقایسه‌ای دررفت طبقه‌های قاب‌های ۱۰ طبقه

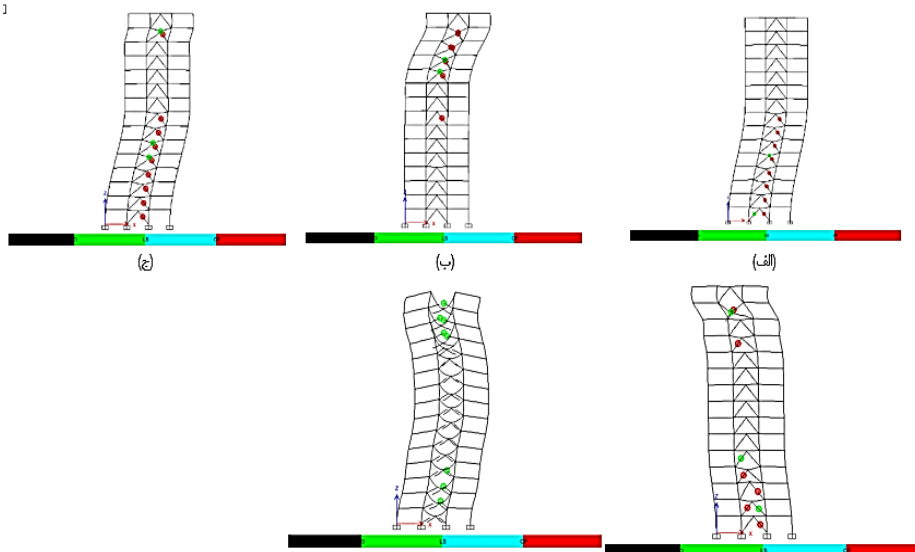


شکل (۱۰): سطح عملکرد و تعداد مفاصل پلاستیک تشکیل شده از بار لرزه‌ای در قابهای ۵ طبقه تیپ (الف): T؛ (ب): Z؛ (ج): D؛ (د): DZ؛ (ه): ZZ



شکل (۱۱): سطح عملکرد و تعداد مفاصل پلاستیک تشکیل شده از بار لرزه‌ای در قابهای ۱۰ طبقه تیپ (الف): T؛ (ب): Z؛ (ج): D؛ (د): DZ؛ (ه): ZZ

1



شکل (۱۲): سطح عملکرد و تعداد مفاصل پلاستیک تشکیل شده از بار لرزه‌ای در قابهای ۱۵ طبقه تیپ (الف): T؛

(ب): Z؛ (ج): D؛ (د): DZ؛ و (ه): ZZ

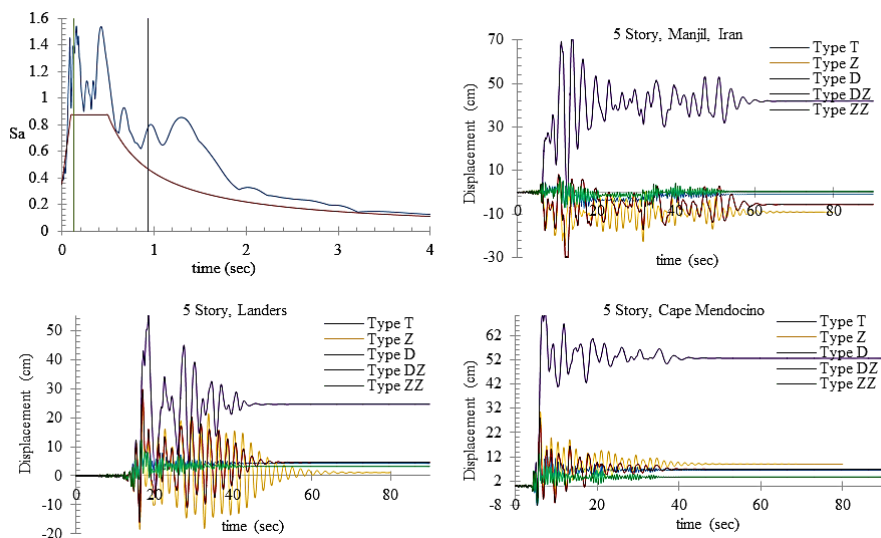
شکل‌های (۱۳) الی (۱۵) تاریخچه پاسخ جابجایی بام در قاب‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه را برای انواع تیپ‌های مورد بررسی و جداول (۵) الی (۷) به ترتیب مقادیر تغییر شکل‌های ثابت و ماندگار در قاب‌های ساده ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه مجهز به مهارندهای کمانش‌تاب را در انواع تیپ‌های سازه‌ای نشان می‌دهند. همانطور که ملاحظه می‌شود، در سازه‌های ۵ و ۱۵ طبقه، سازه Type ZZ و در سازه ۱۰ طبقه، Type T و Type ZZ دارای کمترین مقدار تغییر شکل ماندگار طبقه بام بوده که نشان‌دهنده رفتار بهتری در مقایسه مدل‌ها با هم در تاریخچه پاسخ مرکز جرم طبقه بام است. بطور کلی، در تمامی سازه‌ها، Type T و Type ZZ حرف اول را در تاریخچه پاسخ مرکز جرم و همچنین در تغییر شکل ماندگار طبقه بام دارند.

جدول (۵): مقادیر تغییر شکل‌های حداکثر و ماندگار قاب‌های ۵ طبقه		
TYPE	Max Displacement (cm)	تغییر شکل ماندگار (cm)
T	۱۲.۶۰	۶.۶۰
Z	۳۰.۵۰	۹
D	۷۲.۱۶	۵۲.۶۰
DZ	۳۱.۷۰	۵.۶۰
ZZ	۱۳.۳۴	۳.۶۵
MAX	Eq _r ۷۲.۱۶	Eq _r ۵۲.۶۰
MIN	Eq _i ۱۲.۶۰	Eq _i ۳.۶۵

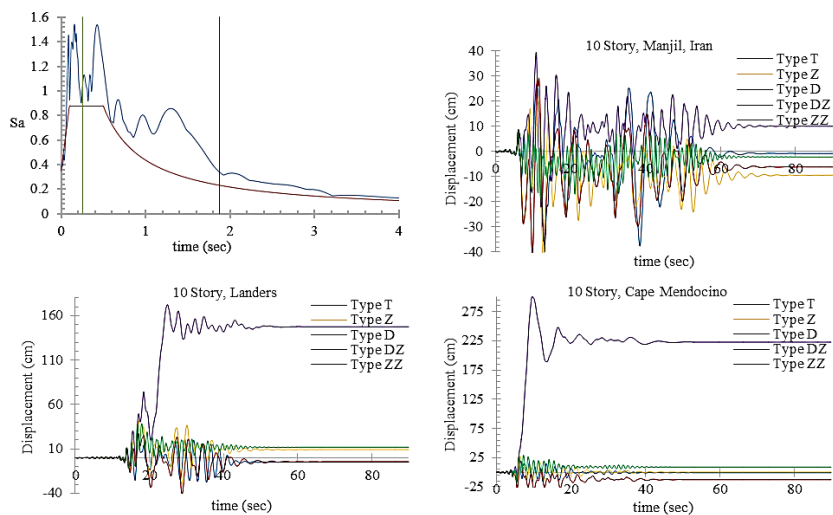
جدول (۶): مقادیر تغییر شکل‌های حداکثر و ماندگار قاب‌های ۱۰ طبقه		
TYPE	Max Displacement (cm)	تغییر شکل ماندگار (cm)
T	۴۰	۴.۸۳
Z	۴۵	۹.۵۰
D	۳۰۰.۶۲	۲۲۲.۸۰
DZ	۴۰.۹۲	۱۲.۶۰
ZZ	۳۸.۶۵	۱۱.۸۵
MAX	Eq _r ۳۰۰.۶۲	Eq _r ۲۲۲.۸۰
MIN	Eq _i ۳۸.۶۵	Eq _i ۴.۸۳

جدول (۷): مقادیر تغییر شکل‌های حداکثر و ملدگار قاب‌های ۱۵ طبقه

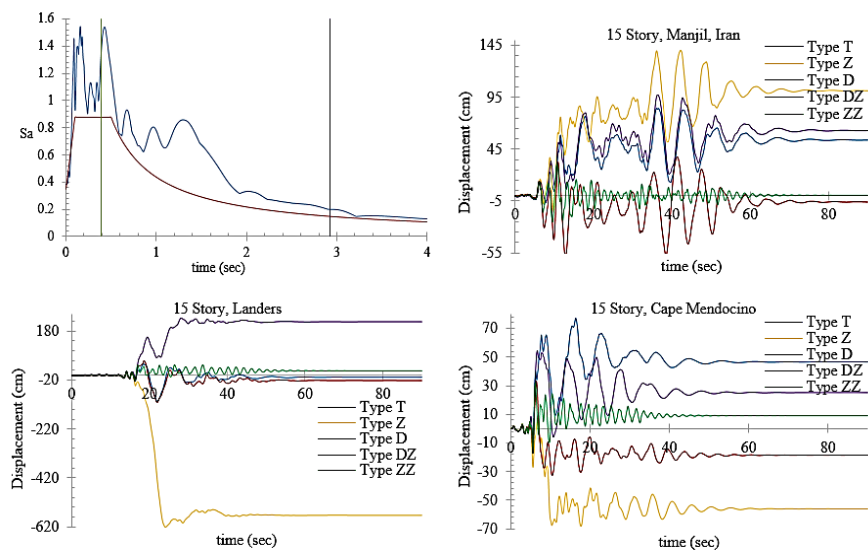
TYPE	Max Displacement (cm)	تغییر شکل ماندگار (cm)
T	105.84	53.90
Z	623	574.30
D	232.63	218.10
DZ	109.62	21.85
ZZ	42.50	18.40
MAX	Eq1 623	Eq1 574.30
MIN	Eq1 42.50	Eq1 18.40



شکل (۱۳): طیف‌شتاب مولفه‌های افقی رکوردهای مورد استفاده در تحلیل تاریخچه‌زمانی - مقایسه تاریخچه پاسخ بام در تیپ‌های مختلف قاب ۵ طبقه تحت رکوردهای: Manjil-Iran و Landers و Cape Mendocino



شکل (۱۴): طیف‌شتاب مولفه‌های افقی رکوردهای مورد استفاده در تحلیل تاریخچه‌زمانی - مقایسه تاریخچه پاسخ بام در تیپ‌های مختلف قاب ۱۰ طبقه تحت رکوردهای: Manjil-Iran، Landers و Cape Mendocino



شکل (۱۵): طیف‌شتاب مولفه‌های افقی رکوردهای مورد استفاده در تحلیل تاریخچه‌زمانی - مقایسه تاریخچه پاسخ بام در تیپ‌های مختلف قاب ۱۵ طبقه تحت رکوردهای: Manjil-Iran، Landers و Cape Mendocino

۵- نتیجه گیری

سیستم نوین مقاوم لرزه‌ای تحت عنوان قاب مهاربندی با ترکیب مهاربندهای مرسوم و کمانش تاب مطرح و مورد ارزیابی قرار گرفت. در این خصوص، پارامترهای حرکت گهواره‌ای این نوع از سیستم سازه‌ای بررسی گردید. سپس عملکرد سازه تحت رکوردهای انتخابی و چیدمان مهاربندهای کمانش تاب در ارتفاع قاب‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه مورد مطالعه قرار گرفت. همچنین در این سیستم‌ها ویژگی‌هایی نظیر طیف پاسخ جابجایی تراز بام، تغییر شکل‌های ماندگار قاب، جابجایی‌های نسبی طبقات و ماکزیمم تغییر مکان‌های قاب مورد ارزیابی قرار گرفت.

خلاصه‌ای از نتایج بدست آمده در این پژوهش به شرح زیر می‌باشند:

- مهاربند کمانش تاب تا حد زیادی باعث بهبود عملکرد سازه‌ای شده، بطوریکه در میان ۵ تیپ سازه مقایسه شده، قاب تیپ ZZ سطح عملکردی بهتری نسبت به سایر قاب‌ها در تمامی ارتفاع‌ها داشته است.
- حضور مهاربندهای کمانش تاب در سازه قاب، باعث ایجاد بیشتر مفاصل پلاستیک در این المان‌ها می‌شود که این خصوصیت به سازه امکان تعمیر پذیری پس از وارد شدن خسارت را می‌دهد.
- استفاده از مهاربند کمانش تاب به مقدار زیادی باعث کاسته شدن تغییر مکان افقی سازه‌ی گهواره‌ای می‌شود.
- عملکرد سازه قاب مهاربندی شده مجهز به مهاربندهای کمانش تاب، تا حد زیادی به نحوه چیدمان المان‌های مهاربند بستگی دارد.
- Type D در همه سازه‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه، به علت توزیع مهاربندهای کمانش تاب در یک سمت خرابی عمودی مهاربند، باعث تحت فشار قرار گرفتن و ایجاد پدیده کمانش در مهاربندهای مرسوم آن، در همه طبقه‌ها شده؛ موجب ایجاد بیشترین تغییر شکل‌های گذرا و ماندگار می‌شود، به همین علت، ضعیف‌ترین تیپ در بین آنها است.
- با توجه به اینکه در سازه‌های مهاربندی شده، مقاومت عامل کنترل کننده است تا تغییر مکان، با در نظر گرفتن فرض ۱/۱ برای پارامتر α (h) برای مدلسازی سازه دو بعدی بجای سه بعدی، در همه سازه‌ها تیپ DZ (آرایش زیگزاگی مهاربندها)، با حداکثر مقدار R (ضریب شکل)، شکل پذیری بالا را از تحلیل‌های پوش‌آور دارد. در عین حال، چنانچه تغییر شکل ماندگار طبقه بام، برای انتخاب بهترین تیپ در بین مدل‌ها ملاک عمل قرار گیرد در سازه‌های ۵ و ۱۵ طبقه، Type ZZ و در ۱۰ طبقه، Type T و Type ZZ با کمترین تغییر شکل ماندگار طبقه بام، عملکرد بهتری را نسبت به بقیه مدل‌ها دارند.

شایان ذکر است در پاسخ چرخه‌ای غیرخطی به بارگذاری جانبی در سیستم‌های متداول (Strain)

Hardening [۲۲] و روابط ریاضی مهاربندهای کمانشی، با حداکثر نیروی فشاری: $C_{max} = \beta C_0 R_y F_y A_{sc}$ و

حداکثر نیروی کششی: $T_{max} = C \cdot R_y F_{ysc} A_{sc}$ ؛ به علت وجود ضریب β (نسبت حداکثر نیروی فشاری به حداکثر نیروی کششی از آزمایش هسته فولادی) در رابطه C_{max} در آرایش مهاربندی شورون ۸ شکل، مقدار نیروی مقاومتی فشاری بیشتر از کششی است که موجب رو به بالا شدن جهت مولفه عمودی برآیند نیروهای مهاربندها (در مقابل نیروهای ثقیلی) می شود، که فقط در Type ZZ در هر دو جهت رفت و برگشتی نیروی جانبی زلزله، قابل صورت پذیرفتن است نه در Type DZ. لذا، این جهت مولفه موجب کاهش صلبیت خمشی مورد نیاز و سطح مقطع (کاهش جرم) تیرهای دهانه های مهاربندی شده و نیز باعث حذف کلی ستون های زیپ کننده (Zipper Braced Frames)، [که بلحاظ معماری نیز، سطح بیشتری را برای بازشوها ایجاد می نماید] می شود. بدیهی است که سازه ی در حال ارتعاش اجباری، با کاهش ضریب اینرسی (جرم)، بیشتر به سمت تحت کنترل سختی شدن نیل می کند تا کنترل جرمی. بنابر این در همه سازه ها، Type ZZ کنترل کننده بوده و منتخب است.

۶- منابع و مراجع

- [۱] Zhang, G., Chang, Y. and Song, J., ۲۰۲۳, December. Seismic fragility analysis of rocking buckling-resistant braced structures subjected to far-field and near-field ground motions. In Structures (Vol. ۵۸, p. ۱۰۵۴۷۱). Elsevier.
- [۲] Di Egidio, A., Pagliaro, S., Fabrizio, C. and de Leo, A.M., ۲۰۲۰. Seismic performance of frame structures coupled with an external rocking wall. *Engineering Structures*, ۲۲۴, p. ۱۱۱۲۰۷.
- [۳] Di Egidio, A., Pagliaro, S. and Fabrizio, C., ۲۰۲۱. Combined use of rocking walls and inerters to improve the seismic response of frame structures. *Journal of Engineering Mechanics*, ۱۴۷(۵), p. ۰۴۰۲۱۰۱۶.
- [۴] Piri, M. and Massumi, A., ۲۰۲۲. Seismic performance of steel moment and hinged frames with rocking shear walls. *Journal of Building Engineering*, ۵۰, p. ۱۰۴۱۲۱.
- [۵] Majumerd, M.J.E., Dehcheshmeh, E.M., Broujerdian, V. and Moradi, S., ۲۰۲۲. Self-centering rocking dual-core braced frames with buckling-restrained fuses. *Journal of Constructional Steel Research*, ۱۹۴, p. ۱۰۷۳۲۲.
- [۶] Guo, G., Qin, L., Yang, D. and Liu, Y., ۲۰۲۰. Dimensional response analysis of rocking wall-frame building structures with control devices subjected to near-fault pulse-like ground motions. *Engineering Structures*, ۲۲۰, p. ۱۱۰۸۴۲.
- [۷] Bosco, M., E. Marino, and P. Rossi, Design of steel frames equipped with BRBs in the framework of Eurocode ۸. *Journal of Constructional Steel Research*, ۲۰۱۵. ۱۱۳: p. ۴۳-۵۷.
- [۸] Soltani, M.H., et al., Probabilistic seismic performance assessment of rocking buckling restrained braced frames. ۲۰۲۳.
- [۹] Bosco, M., E.M. Marino, and P.P. Rossi, A design procedure for pin-supported rocking buckling-restrained braced frames. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, ۲۰۱۸. ۴۷(۱۴): p. ۲۸۴۰-۲۸۶۳.
- [۱۰] Hu, S. and Wang, W., ۲۰۲۱. Comparative seismic fragility assessment of mid-rise steel buildings with non-buckling (BRB and SMA) braced frames and self-centering energy-absorbing dual rocking core system. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, ۱۴۲, p. ۱۰۶۵۴۶.
- [۱۱] Zhang, G., Chang, Y. and Song, J., ۲۰۲۳, December. Seismic fragility analysis of rocking buckling-resistant braced structures subjected to far-field and near-field ground motions. In Structures (Vol. ۵۸, p. ۱۰۵۴۷۱). Elsevier.
- [۱۲] Zhou, Y., Shao, H., Cao, Y. and Lui, E.M., ۲۰۲۱. Application of buckling-restrained braces to earthquake-resistant design of buildings: A review. *Engineering Structures*, ۲۴۶, p. ۱۱۲۹۹۱.

- [۱۳] شکیب، حمزه و صافی، تحلیل دینامیکی غیرخطی افزایشی قاب های فولادی با مهاربندهای کمانش تاب برون محور تحت رکوردهای نزدیک گسل. مهندسی عمران، ۲۰۱۵. ۳۱ (۱.۲): ۱۲۳-۱۳۱.
- [۱۴] Hu S, Wang W. Comparative seismic fragility assessment of mid-rise steel buildings with non-buckling (BRB and SMA) braced frames and self-centering energy-absorbing dual rocking core system. *Soil Dyn Earthq Eng* ۲۰۲۱; ۱۴۲: ۱۰۶۵-۷۶.
- [۱۵] Chen X, Takeuchi T, Matsui R. Simplified design procedure for controlled spine frames with energy-dissipating members. *J Constr Steel Res* ۲۰۱۷; ۱۳۵: ۲۴۲-۵۲.
- [۱۶] Li Y-W, Wang Y-Z, Wang Y-B. Experimental and numerical study of beam-through energy-dissipative rocking columns for mitigating seismic responses. *J Constr Steel Res* ۲۰۲۲; ۱۸۹: ۱۰۷۰-۹۷.
- [۱۷] Maroofi E, Mansoori MR, Moghadam S, Aziminejad A. Introducing a new seismic resisting system with dual linked column frame and rocking motion. *Structures* ۲۰۲۳; ۴۷: ۲۱۴۸-۶۱.
- [۱۸] Shirai K, Horii J, Fujimori T. Optimal sliding force characteristics of friction dampers for seismic response control of building structures considering sway-rocking motion. *Soil Dyn Earthq Eng* ۲۰۲۱; ۱۴۹: ۱۰۶۸-۹۲.
- [۱۹] Kounadis A. The effect of sliding on the rocking instability of multi-rigid block assemblies under ground motion. *Soil Dyn Earthq Eng* ۲۰۱۸; ۲۰۱۷(۱۰۴): ۱-۱۴.
- [۲۰] Guan M, EERI, X., Burton M. EERI, H. and Shokrabadi, M., ۲۰۲۱. A database of seismic designs, nonlinear models, and seismic responses for steel moment-resisting frame buildings. *Earthquake Spectra*, ۳۷(۲), pp. ۱۱۹۹-۱۲۲۲.
- [۲۱] آیین نامه طراحی ساختمان ها در برابر زلزله، استاندارد ۲۸۰۰، دفتر تدوین ضوابط و استاندارد وزارت راه و شهرسازی، ویرایش چهارم، ۱۳۹۳
- [۲۲] Beaumont, E. and Annan, C.D., ۲۰۱۶, June. Cyclic response of structural stainless steel plate under large inelastic strains. In Annual Conference of the Canadian Society for Civil Engineering, London, Ontario