

بهبود رفتار لرزه‌ای قاب‌های فولادی با تغییر تراز نوع سیستم مهاربندی در ارتفاع

سید علیرضا کابلی^۱، محسن گرامی^{۲*}، عادل میرحاج^۳

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: آبان ۱۳۸۷	یکی از سیستم‌های متداول سازه‌ای مقاوم در برابر زلزله برای سازه‌های فولادی نیمه بلند و بلند، سیستم قاب خمشی به‌همراه مهاربندی فلزی است. هر یک از انواع گوناگون سیستم‌های مهاربندی دارای رفتار متفاوت در برابر زمین‌لرزه می‌باشند. رفتار لرزه‌ای سازه‌های فولادی با دو نوع مهاربند هم‌محور و برون‌محور به منظور استفاده بهینه از امتیازات هر یک از این سیستم‌ها، کمتر بررسی شده است. طراحی این‌گونه سازه‌ها و درک درست از چگونگی رفتار مهاربندی‌ها به منظور حصول اطمینان از رفتار و عملکرد مناسب دوگانه، به ویژه در شرایط بحرانی چون زلزله، از اهمیت بالایی برخوردار است. از این‌رو باید در گزینش نوع سیستم مهاربندی و آرایش آن در سازه به‌منظور رعایت ملزومات آیین‌نامه‌ای و خدمت دهی، دقت ویژه‌ای به عمل آید. از طرفی دیگر به دلیل آن که در سازه‌های واقعی تحت اثر زمین‌لرزه‌های واقعی، مصالح الزاماً به حوزه غیرارتجاعی وارد می‌شوند؛ در غیاب تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی؛ روش تحلیل غیرخطی استاتیکی بار افزون می‌تواند رفتار غیرارتجاعی سازه را توصیف کند. در این پژوهش با مدل‌سازی قاب‌های فولادی دوبعدی ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۳۰ طبقه، اثر تراز تغییر نوع سیستم مهاربندی در ارتفاع از هم‌محور به برون‌محور با تکیه بر رفتار غیرارتجاعی سازه (در اثر زلزله‌های واقعی) و بر اساس شاخص سطح زیر منحنی نمودار بار - تغییر مکان به دست آمده از روش بار افزون، بررسی شده است. نتایج به دست آمده از بیش از ۱۰۰ تحلیل انجام شده، نشان می‌دهند که در تراز مشخصی از ارتفاع سازه، تغییر سیستم مهاربندی باعث تغییر در الگوی تشکیل مفاصل پلاستیک و رفتار سازه می‌شود. این تغییر برای سازه‌های تحلیل شده در حدود 0.45 الی 0.6 ارتفاع سازه رخ می‌دهد بنابر این با تغییر در نوع سیستم مهاربندی در ارتفاع سازه رفتار لرزه‌ای سازه بهبود پیدا می‌نماید.
پذیرش مقاله: فروردین ۱۳۸۸	
واژگان کلیدی: قاب‌های فولادی مهاربندی شده تغییر سیستم مهاربندی در ارتفاع تحلیل استاتیکی غیر خطی	

۱- مقدمه و تاریخچه تحقیقات

سازه‌های فولادی کاربرد زیادی در صنعت و نیز ساختمان‌های نیمه بلند و بلند دارند و کاربرد فولاد به

عنوان مصالحی اقتصادی در حال افزایش است. به طور کلی سیستم‌های متداول مقاوم در برابر زلزله برای سازه‌های فولادی عبارت از قاب صلب، قاب مهاربندی شده، قاب صلب مهاربندی شده، قاب لوله‌ای، خر پای لوله‌ای و قاب‌های لوله‌ای می‌باشد. هر کدام از این

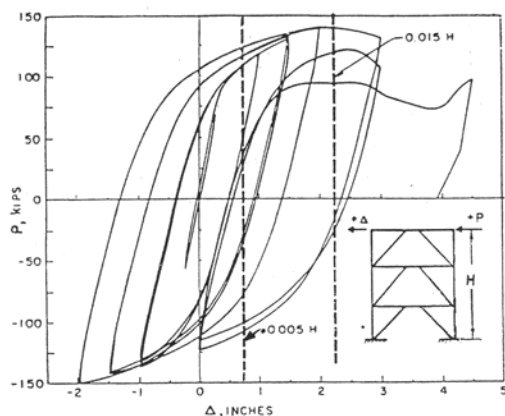
* پست الکترونیک نویسنده مسئول: mgerami@semnan.ac.ir

۱. مربی، گروه معماری، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد فیروزکوه

۲. استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

۳. دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

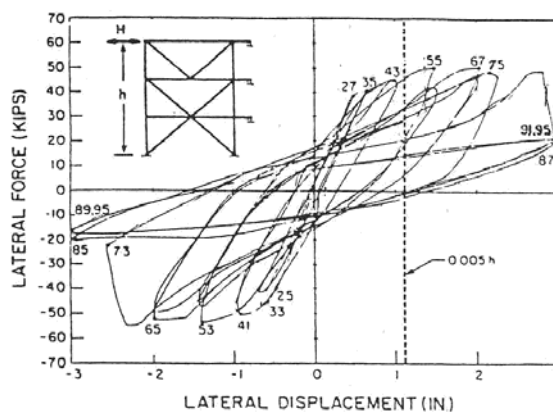
به صورت نیروهای فشاری و کششی به سیستم قائم انتقال می‌یابند. انواع تاشه‌های گوناگون از قبیل مهاربندی قطری Z، مهاربندی X، مهاربندی ۸، مهاربندی ۷ و مهاربندی زانویی و ... در انواع هم‌محور و برون‌محور را می‌توان به عنوان سیستم مهاربندی به کار برد. به طور کلی، سختی مهاربندی‌های هم‌محور بیشتر از مهاربندی‌های برون‌محور است و شکل پذیری کمتری نسبت به آن‌ها دارند. در عوض مهاربندی‌های برون‌محور دارای شکل پذیری و استهلاک انرژی زیاد به همراه سختی مناسب هستند (شکل ۱). مهاربندی‌های برون‌محور نخستین بار توسط پوپوف و رودر در سال ۱۹۷۸ پیشنهاد شده‌اند [۱].



شکل ۱- نمودارهای هیستریزیس قاب با مهاربندی هم‌محور (راست) و برون‌محور (چپ) [۲]

کافی، از یک عضو سازه‌ای درجه دو (عضو زانویی) به جای تیر پیوند به عنوان "فیوز سازه‌ای" استفاده می‌کند و از طرفی به دلیل به کارگیری از مهاربندی قطری، سختی جانبی مناسبی نیز داراست. با محدود کردن تشکیل مفصل پلاستیک تنها در عضو زانویی، اعضای اصلی سازه دارای ایمنی هستند و بازسازی آسان است [۸]. در شکل ۲ تفاوت عملکرد جانبی قاب‌های مذکور که پارامترهای سازه‌ای یکسانی دارند، نشان داده شده است. در قاب‌های صلب مهاربندی شده، اگر تغییر مکان قاب صلب و سیستم مهاربندی یکسان باشد، نیروی جانبی بین دو سیستم به نسبت سختی تقسیم می‌شود. تغییر شکل یک سیستم قاب صلب، به صورت یک قاب برشی است و

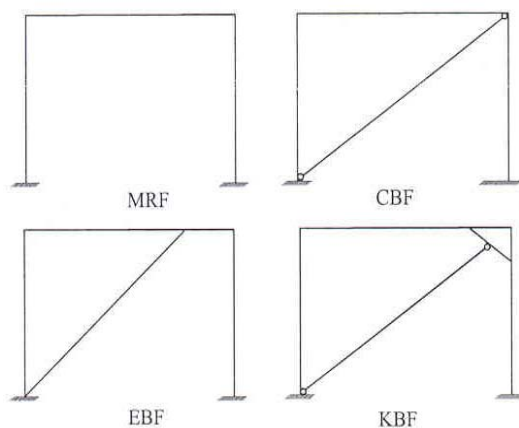
سیستم‌ها با توجه به ارتفاع و کاربری سازه در عملکرد لرزه‌ای دارای مزایا و معایب ویژه خود هستند. در سیستم قاب صلب، اتصالات صلب باید دارای چنان سختی‌ای باشند که زاویه میان اعضاء تحت اثر بار، بدون تغییر باقی بماند. فواصل آزاد بین ستون‌ها و تحمل نیرو بلافاصله پس از اجرا از جمله مزایای قاب‌های صلب به شمار می‌روند. در رفتار لرزه‌ای، این سیستم از شکل پذیری مناسبی برخوردار است ولی سختی محدودی دارد. قاب مهاربندی شده به عنوان سیستمی برای بهبود عملکرد قاب خمشی (به وسیله حذف عملکرد خمشی و اضافه کردن یک سیستم خرپایی طره‌ای) می‌باشد که برش وارده در آغاز توسط اعضای قطری جذب می‌شوند و



سیستم مهاربندی جدیدی به نام مهاربندی زانویی^۱ (KBF) توسط آریستیزایل و آچوا [۳] ارائه شد که دارای شکل پذیری عالی و سختی مناسب است و در طی زلزله‌های شدید، نخست المان زانویی همانند یک فیوز سازه‌ای در قاب تسلیم خواهد شد به طوری که خسارت در اعضای اصلی سازه رخ نمی‌دهد. سام و همکاران در سال ۱۹۹۵ [۴]، مفید و خسروی در سال ۲۰۰۰ [۵]، بالندرا و همکاران در سال ۲۰۰۱ [۶] و ویلیام و همکاران در سال ۲۰۰۲ [۷]، این گونه قاب‌ها را بررسی کرده‌اند. قاب با مهاربندی زانویی برای اطمینان از شکل پذیری

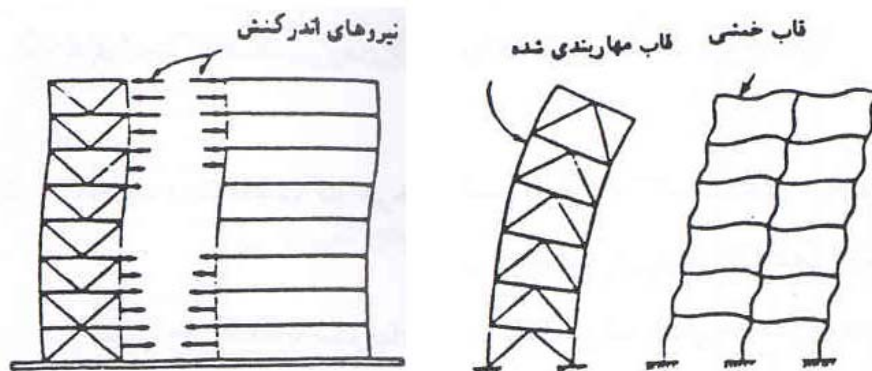
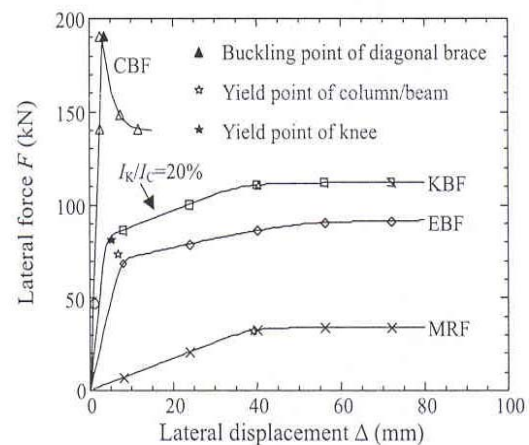
1- Knee Braced Frame

توجه به شکل ۳ مشاهده می‌شود که در طبقات پایین قاب تمایل به فشار دادن سیستم مهاربندی دارد ولی در طبقات بالا سهم بیشتری را به عهده می‌گیرد و در طبقات پایین قاب مهاربندی سهم بیشتری را دارد. این اندرکنش به وجود آمده میان دو سیستم سازه‌ای، گاهی موجب می‌شود که کل برش تحمل شده توسط قاب صلب در طبقات بالا از مجموع نیروهای برشی عامل بر این طبقات به دلیل پدیده برش منفی، بیشتر شود [۱۰].



شکل ۲- سیستم‌های متداول قاب فولادی و عملکرد جانبی متفاوت آن‌ها [۸]

تغییر شکل نسبی طبقات به بزرگی نیروهای جانبی بستگی دارد. اگرچه در پائین قاب، تغییر مکان نسبی طبقات بزرگ‌تر است، ولی الگوی تغییرات تغییر مکان نسبی در ارتفاع قاب را می‌توان از مطالعات آماری پیشگویی کرد [۹]. در قاب‌های مهاربندی شده، تغییر شکل سازه شبیه یک تیر طره است. در پائین مهاربند، سیستم بسیار سخت بوده و تغییر مکان نسبی طبقات در پائین کمتر است و مرتباً در طبقات بالا افزایش می‌یابد. با



الف- تغییر شکل هر کدام از سیستم‌های مجزا ب- تغییر نیروی برشی عامل منتهی از اثر متقابل

شکل ۳- عملکرد متقابل میان قابل مهار شده و قاب صلب [۱۰]

می‌شود. امروزه پژوهش‌های زیادی جهت بررسی افزایش جذب انرژی در مهاربندی‌های همگرا با بادبند شکل پذیر [۱۱] و بررسی افزایش بار کمناشی بادبندهای همگرا با استفاده از غلاف پوششی [۱۲] به منظور افزایش شکل پذیری سازه انجام شده است. از طرف دیگر مهاربندی‌های

به دلیل سختی محدود قاب‌های صلب و لزوم رعایت مقررات آیین‌نامه‌ای درباره کنترل تغییر مکان‌های جانبی، کاربرد سیستم مهاربندی همگرا (که دارای سختی زیادی است) به همراه قاب صلب، دارای امتیازاتی است. اما به دلیل کمناشی بادبند قطری، شکل پذیری سیستم محدود

به صورت ایده‌آل، بایستی بر اساس تحلیل‌های تاریخچه زمانی غیرخطی سیستم سازه‌ای، با منظور نمودن اثرات واقعی پی و با به کارگیری از مجموعه رکورد زمین لرزه‌های محتمل انجام گیرد. در سازه‌هایی که پاسخ آن‌ها عموماً ناشی از مود اول است، انجام تحلیل استاتیکی افزایشی غیرخطی بار افزون^{*} می‌تواند به عنوان گزینه‌ای مناسب در مقابل تحلیل‌های پیچیده تاریخچه زمانی به کار رود [۱۴، ۱۵، ۱۶]. این روش مستلزم اعمال یک الگوی بار جانبی افزایشی به سازه تا سطح «تغییر شکل مورد انتظار» تحت زلزله طراحی است. مناسب بودن سیستم سازه‌ای، نیروهای اعضاء، تغییر شکل‌های موضعی و سراسری، ترتیب و توالی و الگوی تشکیل مفاصل پلاستیک و ظرفیت شکل پذیری در این روش می‌تواند ارزیابی شود. لازم است حداکثر تغییر مکان مورد انتظار تحت زمین لرزه طراحی به عنوان نقطه هدف تحلیل بار افزون تخمین زده شود (شکل ۴). معادله حاکم در این تحلیل به صورت زیر است:

$$[K_T]\{\Delta u\} = \{\Delta F\} \quad (1)$$

که در آن:

$[K_T]$ ، ماتریس سختی مماسی

$\{\Delta u\}$ ، بردار میزان افزایش تغییر مکان‌های جانبی

$\{\Delta F\}$ ، بردار میزان افزایش نیروهای جانبی

تحلیل بار افزون می‌تواند به صورت کنترل نیرو یا کنترل جابجایی انجام شود جزئیات بررسی رفتار لرزه‌ای توسط این تحلیل در مراجعی همانند FEMA-273 برای سازه‌های فولادی و ATC-40 برای سازه‌های بتنی و نیز گزارش‌های FEMA-274 و ATC-33 ذکر شده است [۹ و ۱۷]. از این رو رفتار نمودار بار-تغییر مکان به دست آمده از این روش و سطح زیر منحنی آن و نیز زاویه تغییر مکان نسبی سراسری بام و زاویه تغییر مکان نسبی طبقه تغییر، به عنوان یکی از شاخص‌های بررسی رفتار لرزه‌ای غیرارتجاعی قاب‌های صلب مهاربندی شده فولادی انتخاب و نتایج بعدی بر این اساس ارزیابی شده‌اند.

واگرا دارای شکل پذیری زیادی (به ویژه در بارهای رفت و برگشتی) هستند و در صورت انتخاب مناسب هندسه سازه، می‌توانند سختی همانند قاب با مهاربندی همگرا را نیز دارا باشند. در این نوع مهاربندی، بادبند به جای برخورد به محل اتصال تیر و ستون، به تیر بالای آن با یک فاصله معین (تیر پیوند) متصل می‌شود. در حوزه غیرارتجاعی تیر پیوند مانند فیوزی عمل می‌کند که از وارد شدن نیروی بیش از حد به بادبندها و کمانش آن‌ها جلوگیری می‌کند [۱۳]. تیرهای پیوند کوتاه در فاز برشی و تیرهای پیوند بلند در فاز خمشی تسلیم می‌شوند. در حالتی که تسلیم برشی غالب باشد در طی یک بارگذاری شدید، تیرهای پیوند تسلیم شده و با شکل پذیری خود مانع از کمانش ستون و بادبند می‌شود که برای طراحی این اعضاء، نیروها به نیروهای نهایی ایجاد شده توسط تیرهای پیوند محدود می‌شوند. پژوهش‌های انجام گرفته نشان می‌دهد که استهلاک انرژی در فاز تسلیم برشی بسیار بیشتر از فاز تسلیم خمشی است [۸].

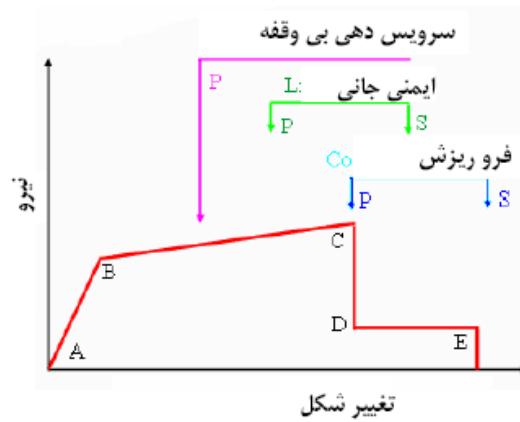
با توجه به مزایا و رفتار متفاوت هر یک از این سیستم‌ها، استفاده بهینه از امتیازات هر یک از انواع سیستم‌های مهاربندی، از راه تغییر سیستم مهاربندی در ارتفاع سازه و تعیین مناسب‌ترین آرایش آن، به منظور بهبود رفتار لرزه‌ای سازه و هدایت مناسب تشکیل مفاصل پلاستیک، نیازمند انجام پژوهش‌های بیشتری است.

۲- اهداف پژوهش

در این پژوهش، به منظور بهبود رفتار لرزه‌ای و ایجاد مقاومت و سختی لازم همچنین تأمین شکل پذیری بیشتر از طریق جذب انرژی در قاب‌های فلزی، به کارگیری همزمان از مهاربندی‌های همگرا و واگرا و تغییر آرایش سیستم مهاربندی در ارتفاع بررسی شده است. سازه‌های واقعی تحت اثر زمین لرزه‌های واقعی به حوزه غیرارتجاعی وارد می‌شوند و ارزیابی عملکرد لرزه‌ای سازه

مهاربندی به منظور بهبود رفتار لرزه‌ای سازه، مشخص می‌شود.

طی این بررسی و با توجه به روند تشکیل مفاصل پلاستیک، مناسب‌ترین تراز تغییر آرایش سیستم



شکل ۴- قسمت‌های گوناگون منحنی نیرو - تغییر شکل [۱۷].

گسترده بر روی تیرها $1500 \frac{kg}{m}$ و بار زنده خطی گسترده $500 \frac{kg}{m}$ در نظر گرفته شد.

۳- روند انجام پژوهش

قاب‌های دو بعدی ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۳۰ طبقه با ۵ دهانه (به طول مساوی ۵ متر) و با ارتفاع طبقات معادل ۳ متر با نرم‌افزار ETABS2000 مدل‌سازی شدند. بار مرده خطی

جدول ۱ - معرفی تیپ تیرها، ستون‌ها و مهاربندها

Element No.	Column (C)	Beam (B)	Brace (Br)
1	2IPE160	IPE180+PL5*120	2L80*80*8
2	2IPE180	IPE200	2L100*100*10
3	BOX15 PL1.0	IPE200+PL8*120	
4	BOX15 PL1.5	IPE220	
5	BOX20 PL0.8	IPE220+PL5*120	
6	BOX20 PL1.0	IPE220+PL8*120	
7	BOX20 PL1.5	IPE240	
8	BOX20 PL2.0	IPE240+PL6*150	
9	BOX25 PL1.0	IPE240+PL8*150	
10	BOX25 PL1.2	IPE240+PL10*150	
11	BOX25 PL1.5	IPE270	
12	BOX25 PL2.0		
13	BOX30 PL1.5		
14	BOX30 PL2.0		
15	BOX30 PL2.5		
16	BOX30 PL3.0		

بالا $A = 0.3g$ ؛ در بارگذاری جانبی مدل‌ها به کار گرفته شد. دیافراگم سقف در تمام طبقات صلب

آئین نامه ۲۸۰۰ ایران (ویرایش دوم) با فرض خاک تیپ II با $T_0 = 0.5sec$ و منطقه با خطر نسبی

تشکیل مفاصل پلاستیک در اعضا، استفاده شد و کنترل‌های مربوط به انجام این تحلیل بر اساس ضوابط FEMA-273 [۱۶] انجام گرفت. دو شاخص سطح زیر منحنی (برش پایه - تغییر مکان) و زاویه تغییر مکان نسبی سراسری بام (حاصل تقسیم تغییر مکان طبقه بام به ارتفاع سازه) محاسبه شد. علاوه بر این دو شاخص مذکور، زاویه تغییر مکان نسبی طبقه تغییر سیستم نیز برای مدل‌هایی با دو سیستم مهاربندی اندازه‌گیری شد این روند برای تمام مدل‌ها تا تبدیل تمام مهاربندی‌ها به مهاربندی برون‌محور (ضمن بارگذاری، تحلیل و طراحی دوباره قاب‌ها) ادامه می‌یابد. مهاربندهای برون‌محور در فاز تسلیم برشی ($e \leq 0.15L$) در نظر گرفته و طراحی شده‌اند. در هر مرحله از تحلیل بارافزون از تشکیل مفصل پلاستیک در تیر پیوند، پیش از مهار بندهای برون‌محور اطمینان به دست آمد.

نتایج تحلیل بار افزون به صورت نمودارهای برش پایه-تغییر مکان بام (همسان سازی شده) در شکل ۷ نشان داده شده است. در این نمودارها CBF همان مدل a و EBF همان مدل b می‌باشد. برای معرفی مدل c با توجه به تعداد طبقات مهاربندی شده CBF، مدل مورد نظر به صورت nCBF معرفی شده است.

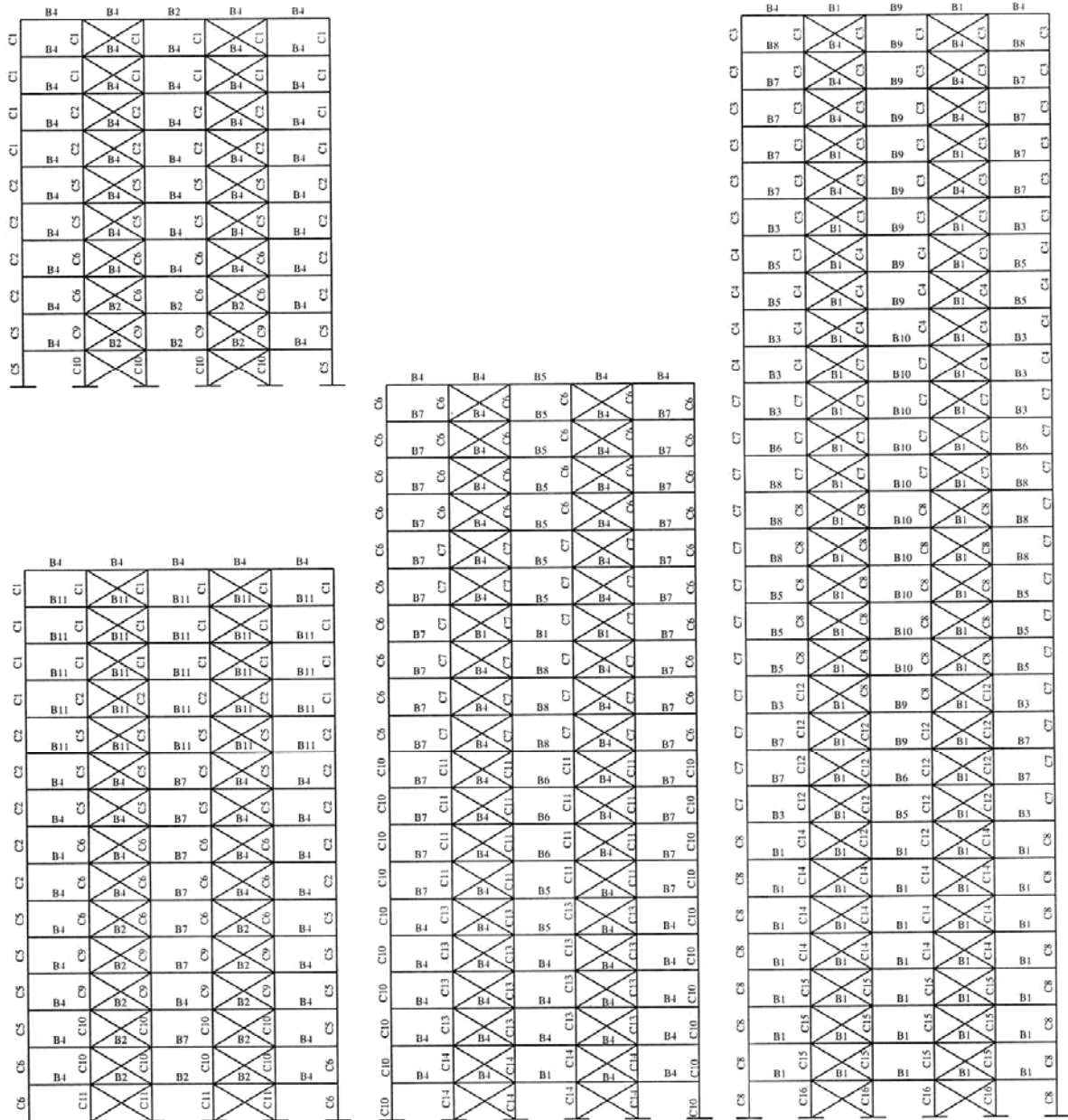
به طور کلی آشکارا دیده می‌شود که با تبدیل مهاربندی هم‌محور به برون‌محور، شکل پذیری سازه افزایش می‌یابد، ولی با افزایش ارتفاع سازه، میزان افت مقاومت نهایی سازه کاملاً EBF نسبت به حالت کاملاً CBF کاهش می‌یابد و حتی در سازه ۳۰ طبقه، تغییر سیستم از حالت مهاربندی هم‌محور به برون‌محور سبب افزایش مقاومت نهایی سازه شده است به بیانی دیگر می‌توان گفت که شاید در سازه‌های بلند به دلیل آن که دوره تناوب آن‌ها زیاد است، کاربرد سیستم‌های مهاربندی با سختی کمتر همانند مهاربندی برون‌محور، نه تنها باعث افزایش شکل پذیری و توانایی استهلاک انرژی می‌شود بلکه مقاومت نهایی سازه نیز نسبت به حالت مهاربندی کاملاً هم‌محور، افت چندانی ندارد.

فرض شد. پس از مدل‌سازی و تحلیل، قاب‌ها بر اساس آئین نامه‌های معتبر طراحی سازه‌های فولادی AISC-ASD89 و UBC-LRFD-EBF-99 (ویژه طراحی مهاربندی برون‌محور) طراحی شده‌اند. برای حصول اطمینان از رعایت ضابطه تیر ضعیف - ستون قوی انتخاب مقاطع ستون به نحوی بوده است که مفصل پلاستیک تحت تحلیل‌های انجام شده در ستون‌ها (قبل از تیرها) ایجاد نگردد. تیپ تیرها، ستون‌ها و مهاربندهای به کار رفته، در جدول ۱ ذکر شده است و نتیجه طراحی برای یکی از مدل‌های مورد استفاده در شکل ۵ نشان داده شده است.

برای مهاربندی قاب‌های ۲۰ و ۳۰ طبقه تا طبقات ۱۵ و ۲۳ از زوج ناودانی شماره ۱۰ و برای سایر طبقات و همچنین برای قاب‌های ۱۰ و ۱۵ طبقه از زوج ناودانی شماره ۸ استفاده شده است.

در راستای اهداف پژوهش به منظور تعیین مناسب‌ترین آرایش سیستم مهاربند از دو نوع مهاربند رایج شامل مهاربند هم‌محور ضربدری و مهاربند برون‌محور هشت در سه مدل a، b و c، مطابق با شکل ۶ استفاده شد. دو دهانه از ۵ دهانه قاب در تمام ارتفاع دارای مهاربند می‌باشد. در مدل a از مهاربند CBF و در مدل b از مهاربند EBF جهت مهاربندی، در کل ارتفاع استفاده شده است.

در مدل c با تغییر نوع سیستم مهاربندی از CBF به EBF در تراز هر یک از طبقات، سیستم ترکیبی در ارتفاع مورد استفاده قرار گرفته است. روش کار به این صورت بوده که در مدل a به ترتیب از طبقه بالا به پایین باندن‌های CBF به EBF تبدیل شده و مدل‌ها به صورت nCBF نامگذاری شده‌اند که n بیانگر تعداد طبقات دارای مهاربند CBF می‌باشد. بدین ترتیب برای قاب n طبقه، یک مدل a، یک مدل b و n-1 مدل c ایجاد شده است (برای n=10,15,20,30) و مجموعاً بیش از ۷۵ سازه مورد بررسی قرار گرفته است. در تحلیل بار افزون، از الگوی بار استاندارد ۲۸۰۰ ایران و با تعریف نقاط احتمالی



شکل ۵- تیپ مقاطع به کار رفته در مدل‌های سازه‌های ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۳۰ طبقه.

۴- تحلیل نتایج

پس از آنالیز مدل‌ها و به دست آوردن سطح زیرمنحنی برش پایه - تغییر مکان بام از تحلیل بار افزون و ترسیم آن، سطح زیر این منحنی به عنوان شاخصی در میزان جذب انرژی مورد نظر قرار می‌گیرد. به منظور سهولت انجام مقایسه، پارامتر CBF Ratio به صورت نسبت

تعداد طبقات دارای مهاربند CBF به تعداد کل طبقات سازه تعریف می‌شود.

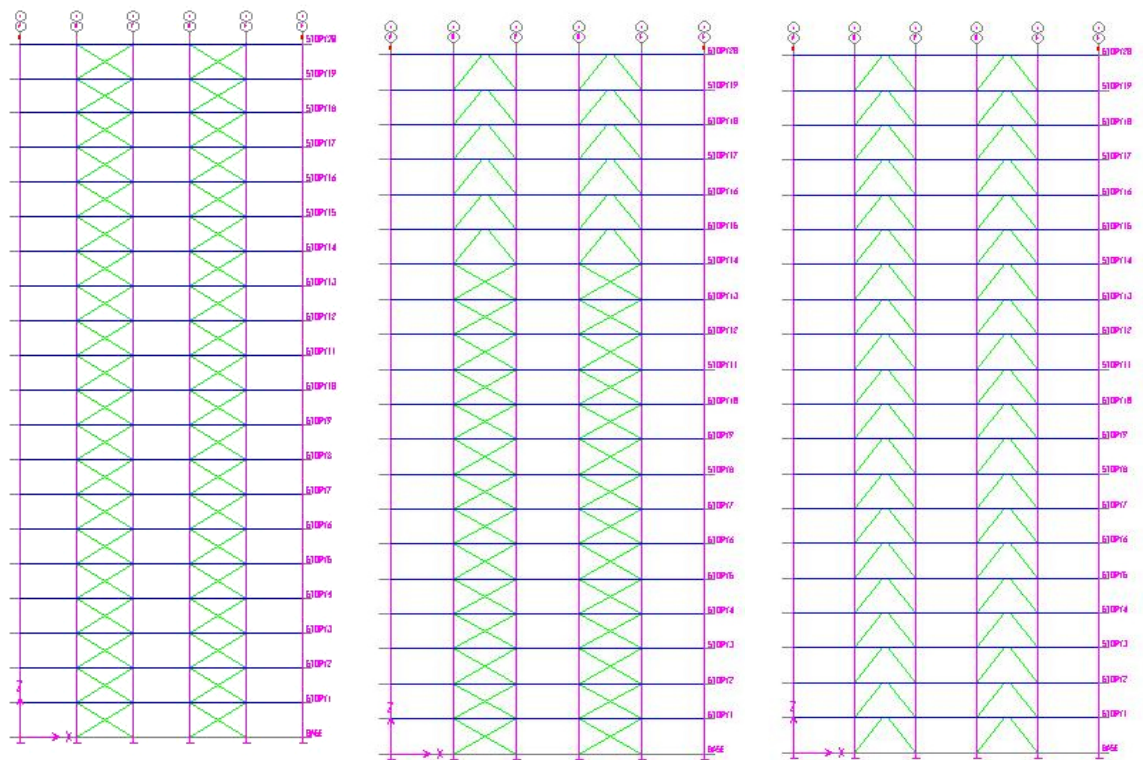
به‌عنوان مثال $CBF\ Ratio = 0.5$ به معنای کاربرد مهاربند CBF تا نصف ارتفاع کل سازه است. مقدار مساحت اضافه شده منحنی برش پایه تغییر مکان برای هر یک از مدل‌های نوع C، $(A_{nCBF} - A_a)$ ، نسبت به مساحت زیر منحنی برش پایه - تغییر مکان مدل

مهاربندی کاملاً هم‌محور و محور افقی نسبت ارتفاع مهاربندی هم‌محور به ارتفاع کل سازه (CBF ratio) را نشان می‌دهند. عدد یک بر روی محور افقی نمایانگر سازه‌ای با مهاربندی کاملاً هم‌محور و عدد صفر نمایانگر سازه‌ای با مهاربندی کاملاً برون‌محور است.

a. (A_a) ، با نسبت $(\frac{A_{nCBF} - A_a}{A_a})$ ؛ بر حسب CBF

Ratio رسم شده است.

این منحنی در شکل ۸ نشان داده شده است که محور عمودی میزان مساحت اضافه شده نسبت به حالت

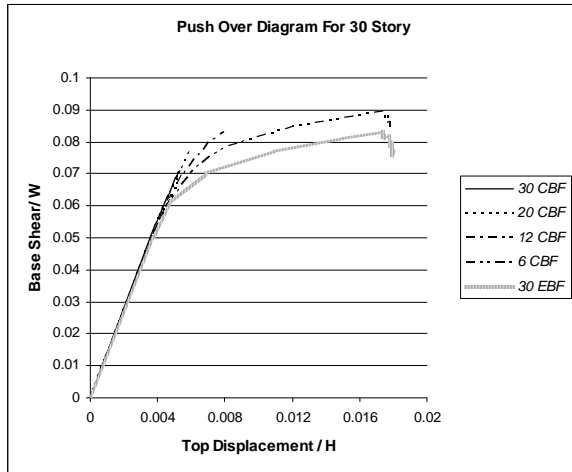
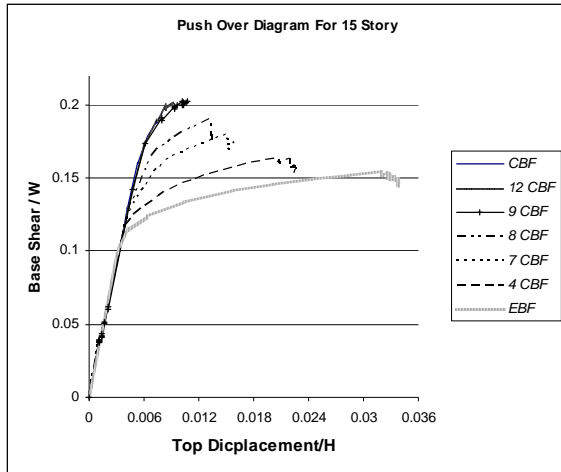


الف) مدل با مهاربندی برون‌محور کامل (b) مدل با مهاربندی ترکیبی (c) مدل با مهاربندی هم‌محور کامل (a)

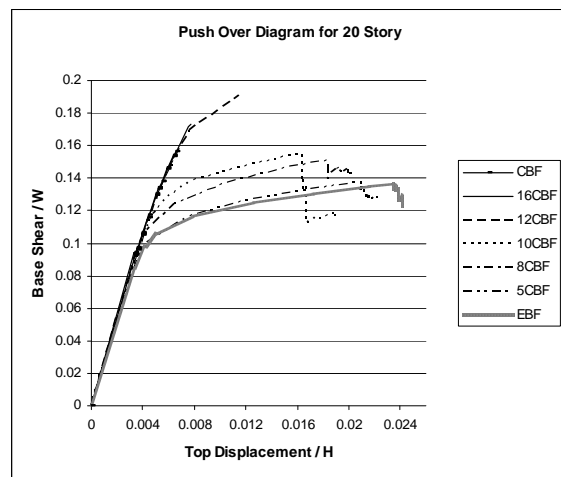
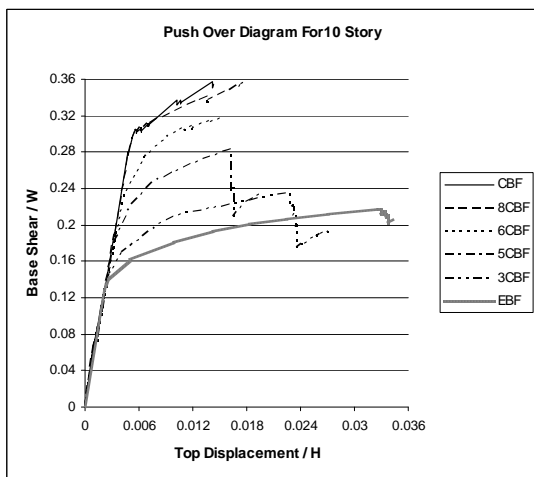
شکل ۶- مدل سازه‌های به کار رفته در پژوهش با آرایش متفاوت در سیستم مهاربندی

همچنین دیده می‌شود که تغییر سیستم مهاربندی از حالت کاملاً هم‌محور به کاملاً برون‌محور، برای سازه ۱۰ طبقه در حدود ۸۰٪ و برای سازه‌های نیمه بلند تا ۲۰ طبقه در حدود ۳۷۰٪ در مساحت زیر منحنی برش پایه - تغییر مکان افزایش ایجاد می‌کند که نشان از توانایی استهلاک انرژی در سازه است.

همان طور که در این نمودار دیده می‌شود؛ با تغییر طبقه به طبقه مهاربندی هم‌محور، به برون‌محور، از بالای سازه، سطح زیرمنحنی برش پایه - تغییر مکان افزایش می‌یابد که برای سازه ۳۰ طبقه افزایش ناگهانی در حدود $0.45H$ و برای سازه‌های ۱۵ و ۲۰ طبقه در حدود $0.65H$ رخ می‌دهد.



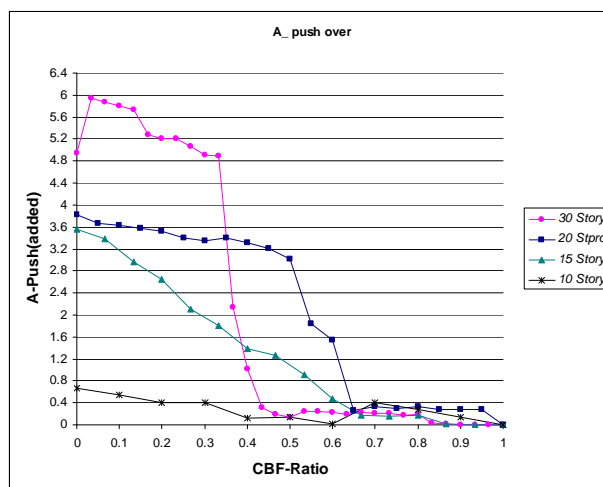
الف) منحنی پوش مدل ۳۰ طبقه برای حالات مختلف ج) منحنی پوش مدل ۱۵ طبقه برای حالات مختلف



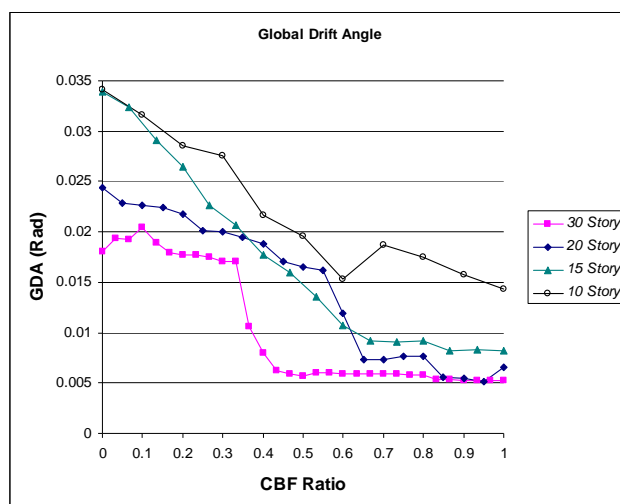
د) منحنی پوش مدل ۱۰ طبقه برای حالات مختلف

ب) منحنی پوش مدل ۲۰ طبقه برای حالات مختلف

شکل ۷- نتایج تحلیل بار افزون در سازه‌های با ارتفاع مختلف با مدل‌های a,b,c



شکل ۸- نمودار تغییرات سطح زیرمنحنی برش پایه - تغییر مکان نسبت به سطح زیر منحنی برش پایه - تغییر مکان سازه کاملاً CBF



شکل ۹- نمودار تغییرات زاویه تغییر مکان کلی سراسری بام

می‌یابد. تغییرات این پارامتر در شکل ۱۰ برای هر سازه نشان داده شده است.

از افزایش زاویه تغییر مکان نسبی سراسری بام و کاهش زاویه تغییر مکان نسبی طبقه تغییر سیستم مهاربندی با کاهش نسبت ارتفاع مهاربندی هم‌محور می‌توان نتیجه گرفت که با کاهش نسبت ارتفاع مهاربندی هم‌محور، از مشارکت دو سیستم در ارتفاع کاسته شده و طبقاتی که دارای مهاربندی برون‌محور هستند؛

در تسلیم کلی و نهایی سازه نقش اصلی را ایفا می‌کنند. این اثر در تمام سازه‌ها با نسبت ارتفاع مهاربندی هم‌محور برابر $0.5H$ به خوبی دیده می‌شود (شکل ۱۱). این نتیجه با نتیجه‌ای که از تحلیل استاتیکی افزایشی غیر خطی بار افزون نمونه‌های مورد بررسی در خصوص الگوهای تشکیل مفاصل پلاستیک انجام شده است، از انطباق مناسبی برخوردار است.

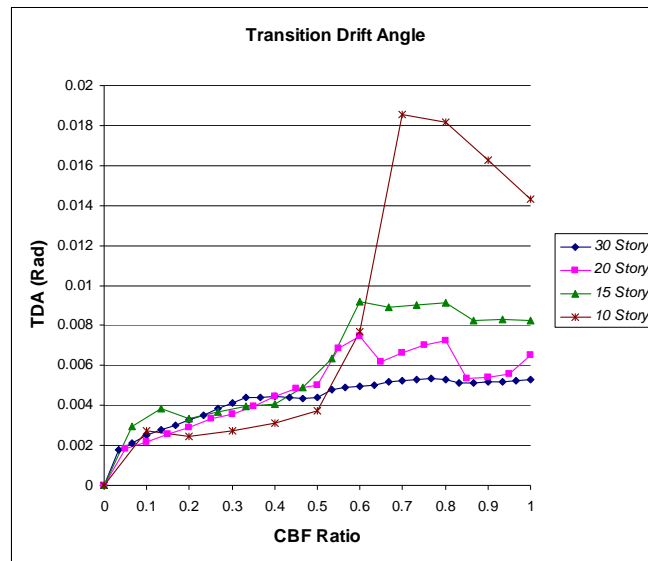
جهت مقایسه تاثیر تراز تغییر سیستم مهاربندی در روند تغییر زاویه تغییر مکان نسبی بام با محاسبه این زاویه در حالت انهدام^۱ (GDA) برای هر سازه، تغییرات آن بر حسب نسبت ارتفاع مهاربندی هم‌محور در شکل ۹ نشان داده شده است (زاویه تغییر مکان کلی بام عبارت است از تغییر مکان سراسری بام به ارتفاع کل سازه).

به عنوان مثال در نقطه A که مربوط به نتایج سازه ۱۰ طبقه می‌باشد، مشخص شده زمانی که ۳ طبقه زیرین سازه با مهاربند CBF و ۷ طبقه روی آن با مهاربند EBF باشد مقدار زاویه تغییر مکان نسبی سراسری بام در حالت انهدام برابر $0.18/H$ رادیان می‌باشد.

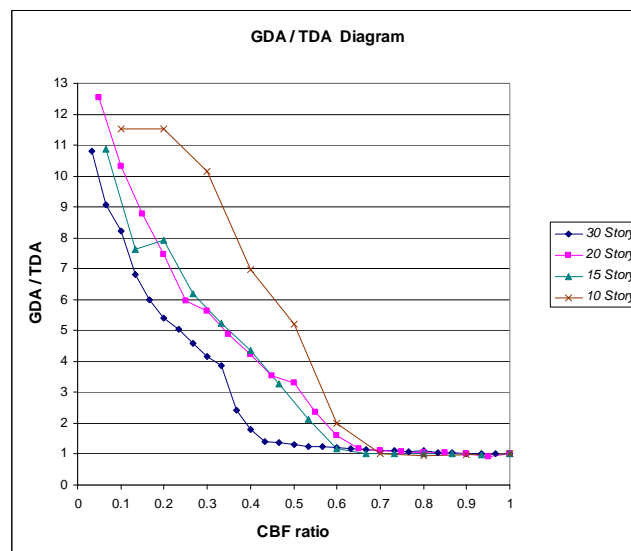
همان طور که در این نمودار دیده می‌شود؛ در تمامی حالات با افزایش ارتفاع سازه، زاویه تغییر مکان نسبی سراسری بام کاهش می‌یابد. همچنین برای سازه ۳۰ طبقه، این پارامتر در حدود $CBF = 0.4H$ افزایش ناگهانی دارد که با کاهش ارتفاع سازه به ۱۰ طبقه این پرش در حدود $CBF = 0.6H$ رخ می‌دهد.

بر خلاف زاویه تغییر مکان نسبی سراسری بام، زاویه تغییر مکان نسبی برای طبقه تغییر سیستم مهاربندی^۲ (TDA) روندی متفاوت داشته و با کاهش نسبت ارتفاع مهاربندی هم‌محور کاهش

- 1- Global Drift Angle
- 2- Transition Drift Angle



شکل ۱۰- نمودار تغییرات زاویه تغییر مکان نسبی طبقه تغییر سیستم مهاربندی



شکل ۱۱- نمودار تغییرات نسبت زاویه تغییر مکان نسبی بام به طبقه تغییر سیستم مهاربندی

۵- نتیجه گیری

و صحیح عناصر مستهلک کننده انرژی می‌توان از این توانایی بهره برد.

۲- با افزایش ارتفاع سازه زاویه تغییر مکان نسبی سراسری بام در حالت انهدام، کاهش می‌یابد. اما این پارامتر در هر سازه با کاهش نسبت ارتفاع مهاربندی هم‌محور، روندی افزایشی دارد که برای سازه ۳۰ طبقه در $CBF Ratio = 0.45$ و برای بقیه مدل‌ها در حدود $CBF Ratio = 0.6$ جهش ناگهانی نشان می‌دهد.

۱- تغییر سیستم مهاربندی از حالت کاملاً هم‌محور به کاملاً برون‌محور سبب افزایش شکل پذیری و در پی آن افزایش سطح زیر منحنی برش پایه - تغییر مکان، که از روش تحلیل بار افزون به دست می‌آید می‌شود. این افزایش برای سازه‌های کوتاه (تا ۱۰ طبقه) در حدود ۸۰٪ و برای سازه‌های نیمه بلند (۱۵ تا ۲۰ طبقه) در حدود ۳۷۰٪ اندازه گیری شده است که در صورت طراحی دقیق

توجه به شکل ۷، افت مقاومت در سازه‌های ۱۵، ۲۰ و ۳۰ طبقه به ترتیب کاهش می‌یابد به طوری که در سازه ۱۰ طبقه میزان افت مقاومت سازه کاملاً برون محور نسبت به سازه کاملاً CBF ۸۰٪ و در سازه ۲۰ طبقه این مقدار ۴۵٪ می‌باشد.

۶- در به کارگیری همزمان از دو سیستم مهاربندی هم‌محور و برون‌محور، عواملی مانند ارتفاع سازه، ارتفاع سیستم مهاربندی هم‌محور، آرایش چگونگی مهاربندی‌های و ضریب رفتار انتخاب شده از اهمیت زیادی برخوردار هستند.

۷- تغییر سیستم مهاربندی تأثیری در جلوگیری از کماتش زود هنگام مهاربندی‌های هم‌محور ندارد.

۳- با افزایش نسبت ارتفاع مهاربندی هم‌محور زاویه تغییر مکان نسبی طبقه تغییر سیستم مهاربندی کاهش می‌یابد. به عنوان مثال، بیشترین کاهش در سازه ۱۰ طبقه و در $CBF\ Ratio = 0.5$ به میزان ۰.۰۱۵ رادیان کاهش یافته است.

۴- با کاهش نسبت ارتفاع مهاربندی هم‌محور، تسلیم و تشکیل مفاصل پلاستیک بیشتر در طبقاتی که دارای مهاربندی برون‌محور هستند، دیده می‌شود. در تمامی قاب‌های بررسی‌شده در $CBF\ ratio = 0.5$ و کمتر از آن، این پدیده آغاز می‌شود و به عبارت دیگر رفتار سازه بالایی در رفتار کلی سازه تعیین کننده است که باید در انتخاب ضریب رفتار سازه مورد توجه قرار گیرد.

۵- با تبدیل مهاربندی هم‌محور به برون‌محور، شکل پذیری و توانایی استهلاک انرژی در سازه افزایش می‌یابد که با افت مقاومت نیز همراه است. اما افت در مقاومت نهایی سازه با افزایش ارتفاع سازه کاهش می‌یابد. مثلاً با

مراجع

1. Roeder, C.W. and Popov, E.P., "Eccentrically Braced Steel Frames for Earthquakes", *Journal of Structural Div ASCE*, 104(3):pp.391-412, (1978).
۲. ناطق الهی، فریبرز. "نالیز و طراحی لرزه‌ای بادی‌های واگرا"، مؤسسه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، (۱۳۷۸).
3. Aristizabal-Ochoa, J.D., "Disposible Knee Bracing: Improvement in Seismic Design of Steel Frames", *Journal of Structural Engineering*, 112 (7), pp. 1544-1552, (1986).
4. Sam, M.T., Balendra, T. and Liaw, C.Y., "Earthquake-Resistant Steel Frames with Energy Dissipating Knee Elements", *Engineering Structure*, 17(50), pp. 334-343, (1995).
5. Mofid, M. and Khosravi, P., "Nonlinear Analysis of Disposable Knee Bracing", *Computer & Structures*, 75, pp. 65-72, (2000).
6. Balendra, T., Yu, C.Y. and Xiao, Y., "An Economical Structural System for Wind and Earthquake Loads", *Engineering Structures*, 23, pp. 491-501, (2001).
7. William, M.S., Blakeborough, A., Clement, D. and Bourahla, N., "Seismic Behavior of Knee Braced Frames", *Proceedings of the institution of Civil Engineers: Structures and Buildings*, 152(2), pp. 147-155, (2002).
8. Zhen, H., Song, L. and Long-Zhu, C., "Elastoplastic Analysis of Knee Bracing Frame", *Journal of Zhejiang University Science*, 6, pp. 748-789, (2005).
9. Gerami, M. and Daneshjoo, F., "Higher Mode Effects on Seismic Behavior of MDOF Steel Moment Resisting Frames", *JSEE Journal*, Vol. 5, pp. 20-32, (2003).

۱۰. ناطق الهی، ف. و کاکوند اسدی، ر.، "رفتار طراحی سازه‌های ساختمان‌های بلند"، موسسه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، چاپ اول، (۱۳۷۵).
۱۱. وتر، م.ق، عباس نیا، ر. و کافی، م.ع.، "افزایش جذب انرژی در قاب‌های مهاربندی هم‌مرکز با باد بند شکل پذیر"، اولین همایش بین المللی مقاوم سازی، دانشگاه امیرکبیر، (۱۳۸۵).
۱۲. عباس نیا، ر. و وتر، م.ق.، "بررسی عملکرد المان شکل پذیر در بادبندهای هم‌مرکز شکل پذیر"، هفتمین کنگره بین المللی مهندسی عمران، دانشگاه تربیت مدرس، (۱۳۸۵).
۱۳. تهران زاده، رازدار، م. و کافی، م.ع.، "شکل پذیری و نحوه تشکیل مفصل‌های پلاستیک در قاب‌های مهاربندی شده KBF- EBF"، مجموعه مقالات پنجمین کنفرانس بین المللی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد، (۱۳۷۹).
14. Aguirre, C., "Nonlinear Behavior of Steel Frames and Spectrum Reduction Factor", 12th WCEE, (2000).
15. Lawson, R.S., Vonce, V. and Krawinkler, H., "Nonlinear Static Pushover Analysis-Why, When and How?", Proceeding of the 5th U.S. Conference in Earthquake Engineering, Chicago, Vol. 1, pp. 283-292, (1994).
16. FEMA-273. "NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings", Federal Emergency Management Agency, (1997).
۱۷. تابش پور، م.ر.، "کاربرد تحلیل بار افزون و طیف ظرفیت در مقاوم سازی لرزه‌ای سازه‌های موجود"، اولین همایش بین المللی مقاوم سازی لرزه‌ای، دانشگاه امیرکبیر، (۱۳۸۵).