

## The Effect of BRB and CBF Braces on Seismic Behavior of Steel Structures under Near Field Earthquakes

M. Emami Kourandeh\*, B. Askari

### Abstract

Buckling Restrained Brace (BRB) has the ability to wear and absorb energy well. The aim of this study was to obtain the results of dynamic behavior of metal structures and seismic system with CBF braces and compare them with the results of steel structures equipped with BRB bracing with two different cross sections due to near field earthquake and better building control. Considering that our country is located in an earthquake-prone region, it is inevitable to take into account the considerations related to near-fault earthquakes in the design of the standard earthquake spectrum. In this paper, two 5 and 10 level steel structures are modeled in Etabs software. This software was selected for the initial design of structural elements and then using Perform-3D software, their seismic behavior in near field earthquakes was evaluated with two braces BRB and CBF. The result of this study shows that structures with non-buckling braces have high energy absorption and absorption and have the same behavior in pressure and tension, which causes maximum and more base shear as well as better performance than Structures with CBF bracing. They also control the movement of the building due to its high stiffness. Finally, if the metal cross-sectional area of the BRB braces is higher, the performance of the structure and displacement will be better controlled. Finally, energy consumption by this brace, as mentioned above, responds to equal traction and pressure, like a damper.

**Key Words:** *BRB, CBF, Seismic Behavior, Steel Structures, Near Field Earthquakes*

This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license.

**Publisher:** Imam Hussein University

© Authors



\* Assistant Professor; Department of Civil Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.  
(Emamiacademic@gmail.com) -Writer-in-Charge

نشریه علمی پدافند غیرعامل

سال چهارم، شماره ۱، بهار ۱۴۰۲، (پیاپی ۵۳): صص ۱۴۸-۱۳۹

علمی - ترویجی

## تأثیر مهاربندهای BRB و CBF در رفتار لرزه‌ای سازه‌های فولادی

### تحت زلزله‌های حوزه نزدیک

محمد امامی کورنده<sup>۱\*</sup>، بهرام عسکری<sup>۲</sup>

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۳/۱۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۷/۲۶

#### چکیده

بادبندهای کمانش ناپذیر قابلیت مستهلک‌شدن و جذب انرژی مناسبی را دارا می‌باشند. هدف از انجام این تحقیق به دست آوردن نتایج حاصل از رفتار دینامیکی سازه‌های فلزی و سیستم لرزه‌ای با مهاربندهای CBF و مقایسه آن‌ها با نتایج سازه‌های فلزی مجهز به مهاربند BRB با دو سطح مقطع مختلف تحت اثر زلزله حوزه نزدیک و کنترل بهتر ساختمان‌ها در برابر زلزله می‌باشد، با توجه به اینکه کشور ما در منطقه زلزله‌خیز قرار گرفته است در نظر گرفتن ملاحظات مربوط به زلزله‌های نزدیک به گسل در طراحی طیف استاندارد زلزله اجتناب‌ناپذیر است. در این مقاله دو سازه فولادی ۵ و ۱۰ طبقه در نرم‌افزار Etabs مورد مدلسازی قرار گرفته است. این نرم‌افزار جهت طراحی اولیه عناصر سازه‌ای انتخاب شده است و سپس با استفاده از نرم‌افزار Perform-3D رفتار لرزه‌ای آنها در زلزله‌های حوزه نزدیک با دو مهاربند BRB و CBF ارزیابی شده است. نتیجه‌ی این تحقیق نشان می‌دهد که سازه‌های با بادبندهای کمانش ناپذیر، دارای مستهلک‌شدن و جذب بالای انرژی بوده و رفتاری یکسان در فشار و کشش داشته که همین امر باعث حداکثر و بیشتر شدن برش پایه و همچنین عملکرد بهتری نسبت به سازه‌های با مهاربند CBF شده است. همچنین جابجایی ساختمان را به علت سختی بالا کنترل می‌نمایند، در نهایت چنانچه سطح مقطع فلزی هسته مهاربند های BRB بیشتر باشد، عملکرد سازه و تغییر مکان‌ها بهتر کنترل می‌گردد. در آخر مستهلک کردن انرژی توسط این بادبند همانطور که در بالا اشاره شد در کشش و فشار مساوی و مانند دمپر جواب می‌دهد.

**کلید واژه‌ها:** ساختمان فولادی، مهاربند همگرا، مهاربند کمانش ناپذیر، حوزه نزدیک، تحلیل لرزه‌ای.



\* این مقاله یک مقاله با دسترسی آزاد است که تحت شرایط و ضوابط مجوز Creative Commons Attribution (CC BY) توزیع شده است.

نویسندگان ©

ناشر: دانشگاه جامع امام حسین (ع)

<sup>۱</sup>استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران - (Emamiacademic@gmail.com) - نویسنده مسئول  
<sup>۲</sup>کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، واحد صفادشت، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

## ۱- مقدمه

یکی از حایز اهمیت‌ترین و تاثیرگذارترین هدفها در طراحی در هر سازه مشخص کردن سیستم باربر آن خواهد بود. مشخص شدن یک حالت برای تحمل بار و نیروهایی که به اتصالات وارد میشود بسیار مهم و حایز اهمیت می‌باشد و می‌تواند ساختمان را در حالت پایدار نگه دارد در ضمن برای شناخت این‌گونه قاب‌ها با این روش طراحی کاملاً باید دقت شود. این ساختمان‌ها که به روش بادبندهای کمانش ناپذیر طراحی و اجرا می‌شود نیروهایش درست مثل اعضا خرپا تقسیم می‌شود و همین‌طور می‌توان گفت در ستون‌ها و تیرها عضوهای جان آن را می‌تواند تشکیل دهد ضمناً در این گونه مهاربندها سیستمی که در طرح لرزه‌ای می‌توان با آن مواجه شد انعطاف‌پذیری، حداکثر مقاومت، سختی و جابجایی را می‌توان نام برد. برای اینکه حتی در نیروهای ضعیف نیز از مقاومت و انعطاف‌پذیری بالا برخوردار باشد مثل زلزله‌های کوچک. بنابراین نتیجه گرفته می‌شود که باید تمام موارد آیین نامه نیز در این گونه ساختمان‌ها و ضعیف شدن نیرو به جابجایی از سختی بالایی برخوردار باشد و در طراحی‌ها رعایت و دقت بیشتری شود. بنابراین با انعطاف‌پذیری بالا ساختمان نیز از پایداری بالایی برخوردار خواهد شد.

در سال ۱۹۹۱ Hassan, Goel توانست نتیجه بگیرد که بادبندهای (CBF) که به صورت درست طبق آیین نامه UBC (۱۹۹۷) بررسی و طراحی شده اند، زمانی که در زلزله این‌گونه بادبندها موجب تخریب و ناپایداری سازه می‌شود و تغییر مکان و جابجایی آن تا هشت درصد بیشتر می‌شود میتوان گفت که باید حداکثر انعطاف‌پذیری در تیر و ستونها افزایش یابد [۱]. Takeushi و همکارانش در سال ۲۰۰۴ نمونه‌هایی در مورد مهاربندهای کمانش ناپذیر و مخصوصاً کمانشهای موضعی در اتصالات را مورد مطالعه و بررسی قرار دادند. سپس در سال ۲۰۱۰ مطالعات آزمایشگاهی بر روی رفتار لرزه‌ای مهاربندهای کمانش گریز تماماً فولادی توسط Eryasar و همکارانش صورت گرفت [۲]. Margaux Burkholder در سال ۲۰۱۲ در پایان‌نامه ای که در دانشکده پلی تکنیک دانشگاه کالیفرنیا ارائه شده است به تجزیه و تحلیل مبتنی بر عملکرد یک ساختمان قاب فولادی با مهاربند کمانش تاب پرداخته است. میتوان گفت که در بررسی که در آن زمان انجام شد مشکلاتی که بادبندهای همگرا و در آخر عدم وجود ظرفیت‌های فشاری و کششی و کاهش مقاومت و سختی این بادبندها در بارگذاری ساختمان‌ها مطرح شد. بنابراین به این نتیجه رسیدند که تحقیق وسیعی در مورد تقویت و بهینه سازی این بادبندها انجام پذیرد تا بتواند مانند الاستو پلاستیک عمل نماید. Justin D. Marshall و Haitham Eletrabi در سال ۲۰۱۵ در تحقیقی با عنوان اقدامات هدفمند در ساختمان‌های

قاب فولادی با مهاربندهای کمانش تاب به بررسی تأثیر BRB بر نیازهای عملیاتی در سازه های فولادی پرداختند. تجزیه و تحلیل پوش اور قاب فولادی سه، پنج و هشت طبقه با و بدون BRB انجام شد [۴]. نتایج نشان داد که قاب های با مهاربندی کمانش تاب قابلیت حمل بار بیشتری نسبت به قاب فولاد خالی دارند. طرح‌های مختلف از جایگذاری BRB و ارتفاع ساختمان برای این مطالعه مورد توجه قرار گرفتند. طرح قرار دادن BRB تأثیر بیشتری بر نیازهای عملیاتی قاب فولادی با توجه به ارتفاع ساختمان‌های مختلف داشت. انواع مختلف بارگذاری مورد مطالعه قرار گرفت و نتایج نشان داد که بارگذاری مدل قابل توجهی بر نیروهای توسعه یافته ایجاد شده دارد. در نهایت، نتایج این مطالعه اهمیت ترکیب BRB ها در دستورالعمل های آینده مربوط به مقاومت به فروپاشی پیشرونده سازه های فولادی را برجسته می کند. Ricardo Ferreira و همکاران در مقاله ای در سال ۲۰۱۷ یک مطالعه کاربردی در مورد مهاربندهای کمانش تاب در مقاوم سازی یک مدرسه سازه بتن مسلح طراحی شده با آیین نامه های پیشین را ارائه می دهند [۵].

Papagiannopoulos در سال ۲۰۱۸ به بررسی رفتار لرزه‌ای قاب فولاد مهاربندی شده متحدالمرکز تحت بارهای پیچشی پرداخته است [۶]. تحلیل پاسخ لرزه‌ای قاب‌های فولادی چند طبقه با استفاده از سیستم مهاربندی هیبریدی BRB و SCB تحقیق دیگری است که توسط Chen et. al در سال ۲۰۱۹ به چاپ رسیده است [۷]. هدف این مقاله ترکیب این دو مهاربند مختلف برای تشکیل یک سیستم مهاربندی هیبریدی است. در مجموع چهار ترکیب برای جستجوی یک راه حل بهینه پیشنهاد شده است. قاب‌های فولادی چند طبقه نصب شده با مهاربندهای BRB، SCB و ترکیبی از طریق تحلیل‌های استاتیکی و دینامیکی غیرخطی مورد بررسی عددی قرار می‌گیرند. نتایج تحلیل لرزه ای نشان می‌دهد که قاب‌هایی که از سیستم مهاربندی ترکیبی استفاده می‌کنند، می‌توانند عملکرد بهتری از لحاظ تغییر مکان و نیرو از خود نشان دهند. Yao et. al در سال ۲۰۲۰ عملکرد لرزه‌ای قاب‌های مهاربندی شده متمرکز با در نظر گرفتن شکستگی مهاربند و اثر صفحه چسبنده تقویتی بر روی آنرا بررسی کردند [۸]. اثربخشی راه حل پیشنهادی، که در ابتدا بر اساس راه حل کسایی و همکاران (۱۹۹۸) طراحی شده است و نشان داد که راه حل مقاوم سازی افزایش قابل توجهی در مقاومت، تغییر شکل و ظرفیت اتلاف انرژی ایجاد می‌کند و بنابراین آسیب را در سازه اولیه به حد قابل قبول محدود می‌سازد. بررسی پارامترهای لرزه‌خیزی و تحلیل خطر لرزه ای تحقیق دیگری است که توسط مشمول و همکاران در سال ۱۳۹۹ انجام شده است [۹]. خلقی و بدخشان در سال ۱۴۰۰ به ارزیابی آسیب پذیری لرزه‌ای بیمارستان‌های شهر یاسوج از دیدگاه پدافند

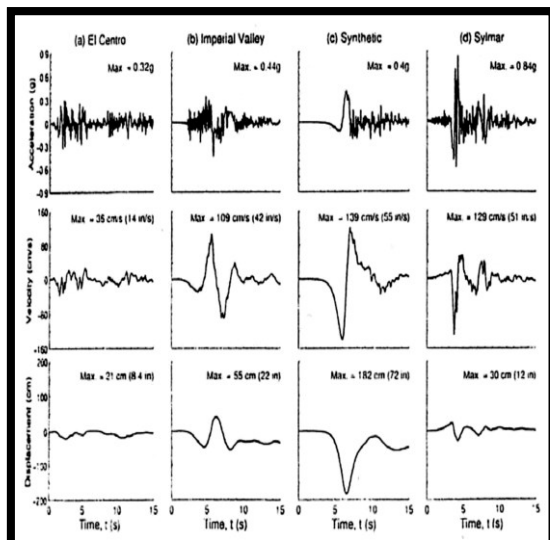
تابع عوامل مختلفی به شرح زیر است:

- بزرگای زلزله
- فاصله منطقه از مرکز رها شدن انرژی
- خصوصیات زمین شناختی

برخی مطالعات نشان می‌دهد که رکوردهای زلزله‌های نزدیک را می‌توان به دو بخش، با ضربه و بدون ضربه تقسیم‌بندی کرد که در بعضی مواقع، پدیده ضربه در تاریخچه شتاب، سرعت و تغییر مکان یکی از ویژگی‌هایی است که زلزله حوزه نزدیک را از زلزله حوزه دور متمایز می‌کند.

ضربه در زمین لرزه به صورت ضربه شتاب، سرعت و جابجایی می‌باشد که می‌توان آن‌ها را به تغییرات بزرگ در تاریخچه‌های شتاب، سرعت و جابجایی تعریف کرد. شکل (۱) تاریخچه‌های شتاب، سرعت و جابجایی را برای چهار حرکت زمین نزدیک گسل مصنوعی، سیلمار، امپریال والی و السنترو نشان می‌دهد، چنانچه در شکل (۱) مشاهده می‌شود، در زلزله‌های نزدیک گسل، حرکت زمین بر اثر گسل مصنوعی، سیلمار و امپریال والی با ضربه و بر اثر گسل السنترو، بدون ضربه می‌باشد [۱۲].

به دلیل نزدیکی محل تا گسل، رکورد حاصل از سرعت و جابجایی زمین به جهت اینکه نسبت به شتاب دارای پیروید بالاتری هستند دارای شکل پالس مانند با پیروید بالا می‌باشند، که یادآور تحریکی به صورت ضربه هستند. در زمین لرزه‌های حوزه نزدیک به جهت فاصله کوتاه بین محل شکست (منبع تولید موج) و محل دریافت آن فرصتی جهت مستهلک شدن فرکانس‌های بالا نبوده؛ از همین رو تاریخچه زمانی شتاب آن‌ها محتوای فرکانسی بالایی دارند.



شکل (۱): تاریخچه‌های شتاب، سرعت و جابجایی را برای چهار حرکت زمین نزدیک گسل مصنوعی (Donovan N, 1978)

غیرعامل و روش (ATC) پرداختند. بخش اول تحقیق به مقدمه و مطالعات صورت گرفته پرداخته می‌شود و در ادامه ادبیات فنی و تئوری نظری تحقیق قرار گرفته است [۱۰]. در بخش دوم با معرفی روش تحقیق به جمع‌آوری داده‌های تحقیق و روش تحقیق ارائه شده در بخش سوم با تجزیه و تحلیل اطلاعات جمع‌آوری شده پرداخته می‌شود و در آخر با جمع‌بندی و نتیجه‌گیری به پایان می‌رسد.

نوآوری تحقیق حاضر در کاربرد نرم‌افزار Perform 3D در مدل‌سازی بادبند و بررسی منحنی هیسترسیز این بادبندها است. در این تحقیق رفتار لرزه‌ای بادبندهای CBF و BRB با در نظر گرفتن شرایط تاریخچه‌زمانی زلزله‌های حوزه نزدیک بررسی شده است. همچنین نوآوری دیگر تحقیق حاضر بررسی پارامتر سطح مقطع در رفتار سیستم مهاربند برتر (BRB) در این تحقیق است. همچنین با توجه به نوآوری تحقیق و جدید بودن این روش مدل‌سازی محدودیت‌هایی در زمینه صحت سنجی نتایج تحقیق وجود داشت که می‌توان به عدم وجود نتایج آزمایشگاهی در این ابعاد پرداخت. به همین دلیل جهت صحت‌سنجی مدل‌سازی جداگانه‌ای با استفاده از همین نوع میراگر بر اساس مرجع معتبر انجام شده است. همچنین در طبقات بالاتر از ۱۰ طبقه حجم محاسبات بسیار بالا بوده و محدودیت نرم‌افزاری نیز وجود دارد.

## ۲- زمین لرزه‌های حوزه نزدیک

با توجه به تحقیقات انجام گرفته بر روی رکوردهای ثبت شده، جنبش قوی زمین در نزدیکی گسل و تأثیر این نوع رکوردها بر روی سازه‌های مختلف نیاز توجه به این رکوردها و آثار آن بر روی سازه‌ها، در دو دهه اخیر اهمیت تحقیق بیشتری را به خود جلب نموده است:

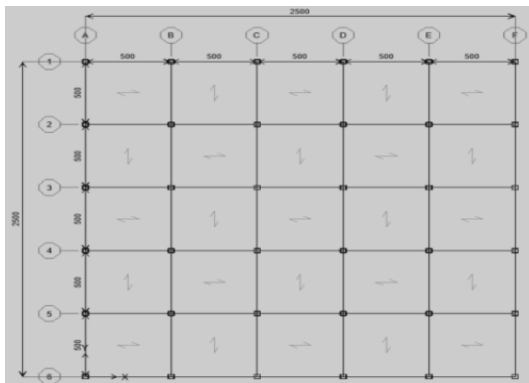
مجموعه تحقیقاتی است که مربوط به بررسی رفتار سازه‌های مختلف تحت اثر رکوردهای نزدیک گسل می‌باشد. مشخصات زلزله‌های نزدیک گسل به دلیل خواص امواج برشی و تجمع آثار این امواج در جلوی مسیر گسیختگی تفاوت‌هایی با مشخصات زلزله‌های دور از گسل دارند. وجود حرکت پالس گونه با پیروید بلند در ابتدای رکوردها، بزرگتر بودن مؤلفه عمود بر جهت گسل نسبت به مؤلفه موازی گسل، تجمع انرژی و انتقال آن در مدت زمان کوتاه، اعمال نیروی ضربه‌گونه بر سازه‌های موجود در مسیر پیشرو گسیختگی، نسبت بیشینه سرعت به بیشینه شتاب بالا و وجود بیشینه شتاب و سرعت و جابجایی بالاتر از تفاوت‌های حائز اهمیت رکوردهای زلزله‌های نزدیک گسل می‌باشد [۱۱].

### ۱-۲- مشخصات زمین لرزه حوزه نزدیک

هنگام وقوع زلزله خصوصیات ارتعاشی هر یک از نقاط زمین

۶- در هر جهت ۵ دهنه موجود می‌باشد و طول هر دهنه ۵ متر می‌باشد.

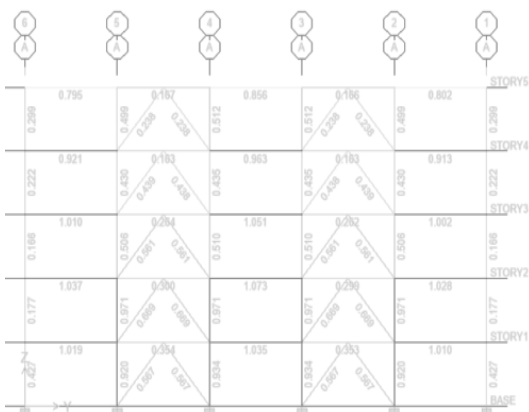
به منظور مدل‌سازی و طراحی اولیه مدل‌های مفروض از نرم‌افزار ETABS استفاده شده است. در شکل (۳) پلان سازه مدل شده به همراه ابعاد دهانه نشان داده شده است. نوع فولاد مصرفی در ساخت مدل‌ها فولاد St37 می‌باشد. در تمامی مدل‌ها بار مرده طبقات ۶۰۰ کیلوگرم بر مترمربع و بار زنده طبقات ۲۰۰ کیلوگرم بر مترمربع در نظر گرفته شده است.



شکل (۳): سازه مدل شده به همراه ابعاد دهانه‌های قاب و

همچنین جهت تیر ریزی

طراحی اولیه مقاطع و سازه‌های مورد بررسی در نرم‌افزار Etabs انجام شده است و پس از آن نتایج تحلیل این نرم‌افزار جهت تحلیل دینامیکی غیرخطی وارد نرم‌افزار Perform-3D شده است. شکل (۴) نمونه‌ای از تصاویر نسبت تنش اعضا پس از مدلسازی اولیه در نرم‌افزار Etabs را نشان می‌دهد.



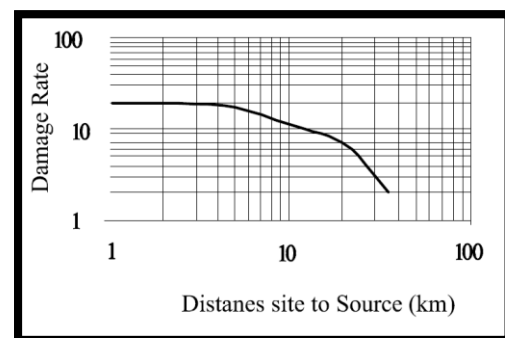
شکل (۴): نسبت تنش اعضا و طراحی اولیه سازه ۵ طبقه در

نرم‌افزار Etabs

برای مدل‌سازی، ارزیابی و بررسی عملکرد مهاربندهای کماتش ناپذیر، ابتدا احتیاج به طراحی ساختمان‌ها می‌باشد تا مقاطع مناسب را بدست آورد و بتوان با استفاده از ابعاد بدست آمده برای مقاطع، آن‌ها را در برنامه غیرخطی Perform-3D مدل کرد [۱۵]. یک مدل تحلیلی Perform-3D شامل گره‌هایی

## ۲-۲- رابطه خسارت با حوزه نزدیکی

خسارت به سازه در زلزله به عوامل و پارامترهای بسیاری بستگی دارد. یکی از عوامل مهم و مؤثر در خسارت به سازه‌ها، فاصله محل سازه تا گسل است. در این بخش رابطه میزان خسارت با فاصله با استفاده از داده‌های زلزله نورتریج ۱۹۹۴ که از آیین‌نامه ATC-38 گردآوری شده، مورد آنالیز قرار گرفته است. در ATC-38 در هر ایستگاه چند ساختمان نمونه انتخاب شده است که نمونه‌های انتخابی بتوانند از نظر آماری تمام خصوصیات ساختمان‌های منطقه مورد نظر را منعکس کنند. رابطه میزان خسارت با فاصله سایت از گسل، در شکل (۲) برای زلزله نورتریج ۱۹۹۴ نشان داده شده است. چنانچه مشاهده می‌شود، با افزایش فاصله، مقدار خسارت کاهش می‌یابد. بنابراین خسارت با فاصله محل از منبع نسبت عکس دارد و هرچه فاصله از منبع کمتر شود میزان خسارت بیشتر می‌شود.



شکل (۲): رابطه میزان خسارت با فاصله سایت از گسل [۱۳]

## ۳- مدلسازی

### ۳-۱- سازه‌های مورد بررسی

ساختمان‌های مورد بررسی، دو ساختمان ۵ و ۱۰ طبقه با سازه فولادی و کاربری مسکونی می‌باشند. این تعداد طبقات بر اساس مطالعات منتشر شده داخلی و بین‌المللی انتخاب شده است. بر این اساس سازه ۵ طبقه با بیشترین فراوانی در پروژه‌های مسکونی تهران انتخاب شده است. همچنین سازه ۱۰ طبقه نیز برای سازه‌های با ارتفاع متوسط مورد بررسی قرار گرفته است. سیستم باربر جانبی ساختمان‌ها در هر دو جهت قاب خمشی معمولی می‌باشد. سایر مشخصات پروژه عبارت است از:

- ۱- ارتفاع تمامی طبقات برابر ۳ متر است.
- ۲- کاربری ساختمان‌ها مسکونی می‌باشد.
- ۳- محل پروژه از نظر لرزه‌خیزی در شهر تهران (منطقه با خطر نسبی خیلی زیاد) واقع گردیده است.
- ۴- خاک محل پروژه از نوع تیپ ۲ می‌باشد.
- ۵- سقف‌ها از نوع تیرچه بلوک می‌باشند.

است. بارگذاری ثقلی با تعریف مقادیر بارهای مربوطه انجام شده است. تحلیل پوش‌آور با محاسبه تغییرمکان هدف برای هر سازه و تعریف مفاصل پلاستیک جهت اجازه رفتار غیرخطی به اعضای سازه‌ای انجام شده و در نهایت تحلیل دینامیکی غیرخطی به کمک شتاب‌نگاشت انجام شده است.

در این تحقیق از ۳ رکورد زلزله‌ی نزدیک گسل برای انجام تحلیل تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی استفاده شده است. در انتخاب رکوردها سعی شده است هم‌گونی مناسبی بین آن‌ها وجود داشته باشد. به این معنا که نوع خاک رکوردها با توجه به سرعت موج‌برشی آن‌ها در محدوده  $250 \leq V \leq 750$  (m/s) باشد. این نوع خاک در آیین‌نامه‌ی زلزله ۲۸۰۰ ایران خاک نوع II می‌باشد. شتاب‌نگاشت‌ها از سایت PEER استخراج شده‌اند. شتاب‌نگاشت‌های انتخاب‌شده حوزه نزدیک گسل در این پروژه با استفاده از زلزله‌های زیر به‌دست‌آمده‌اند: زلزله Kobe - ۱۹۹۵، زلزله Northridge - ۱۹۹۴، زلزله شهر ChiChi - ۱۹۹۹ در کشور Taiwan. مرحله اول مقیاس کردن شتاب‌نگاشت‌های بدست آمده از نرم‌افزار به حداکثر مقدار خود که برابر با شتاب g می‌باشد، است. برای این کار عددی را باید پیدا کرد که اگر PGA بدست آمده در مرحله اول ضربدر آن عدد شود، مقدار حاصل شتاب g شود. این توضیحات در نماد ریاضی به‌صورت رابطه زیر می‌باشد:

$$a = g / (PGA) \quad (1)$$

که در این رابطه a برابر ضریب مقیاسی می‌باشد که شتاب‌نگاشت حوزه نزدیک گسل را به مقدار حداکثر خود مقیاس می‌کند. در جدول (۱)، PGA و ضریب a برای هر شتاب‌نگاشت نشان داده شده است.

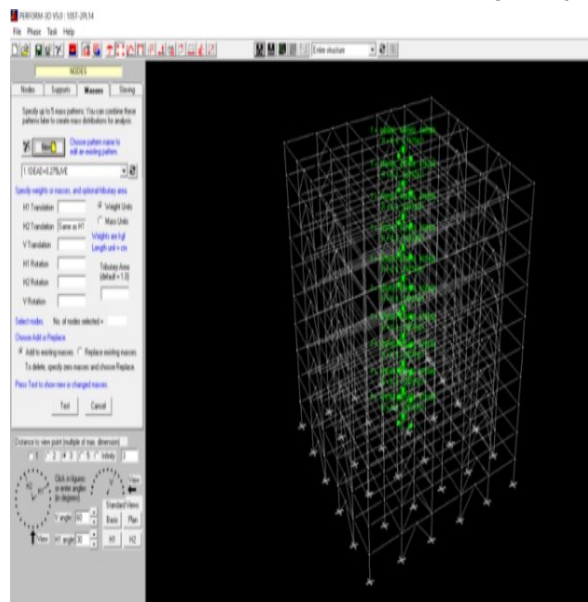
جدول (۱): ضریب a و PGA برای شتاب‌نگاشت‌ها حوزه نزدیک

گسل

شتاب‌نگاشت	حداکثر شتاب (PGA)	ضریب a
KOBE - 1	۰/۴۸۳	۲/۰۷۰
KOBE - 2	۰/۴۶۴	۲/۱۵۵
NORTHRIDG	۰/۷۵۳	۱/۳۲۸
NORTHRIDG	۰/۹۳۲	۱/۰۷۳
CHI CHI - 1	۰/۶۳۶	۱/۵۷۲
CHI CHI - 2	۰/۷۶۰	۱/۳۱۵

همان‌طور که در نمودارهای (۶) تا (۸) مشاهده می‌شود برای زوج شتاب‌نگاشت‌ها، مقدار شتاب به مقدار حداکثر خود که برابر مقدار g می‌باشد، رسیده است یعنی به مقدار g مقیاس شده است.

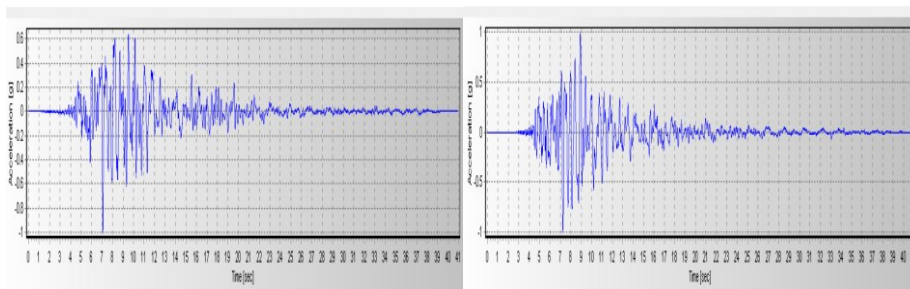
می‌باشد که به یکدیگر وصل می‌شوند. در برنامه Perform-3D مدل تحلیلی یک سازه، مدل گره - المان است. شکل (۵) یک تصویر از سازه معمول هم‌گره‌ها و هم‌المان‌ها را نمایش می‌دهد. اجزای مرکب: یک مؤلفه مرکب از یک تعداد مقطع عرضی و یا مؤلفه‌های مقطع مرکب ساخته می‌شود. برای مثال، یک جز مرکب برای یک تیر می‌تواند شامل یک مؤلفه ناحیه انتهایی ارتجاعی، یک مؤلفه مفصل پلاستیک، یک قطعه ارتجاعی با یک مقطع عرضی یکنواخت، یک مفصل پلاستیک ثانویه و یک ناحیه انتهایی در پایان باشد. برای مشخص نمودن یا تغییر خصوصیات اجزاء، از نوآر ابزار و در مرحله Modeling گزینه‌ی Components باید استفاده گردد. مؤلفه‌های قابل انتخاب عبارت‌اند از: Inelastic (مؤلفه‌های اصلی غیر ارتجاعی)، Elastic (مؤلفه‌های اصلی ارتجاعی)، Cross Section (مقاطع عرضی)، Strenght Sects (مقاطع مقاومت)، Compound (مؤلفه‌های مرکب) گام‌های کلی برای مؤلفه‌های BRB (مهاربند کمانش ناپذیر) همانند مؤلفه‌های مرکب دیگر می‌باشد و فرم و پنجره‌ی مخصوص به خود را دارا می‌باشد. در یک مؤلفه مرکب BRB از مؤلفه‌های اصلی و میله‌ی الاستیک استفاده می‌شود. برای مدل کردن این نوع مهاربند می‌بایست در قسمت Components گزینه‌ی BRB را انتخاب نمود (شکل ۵).



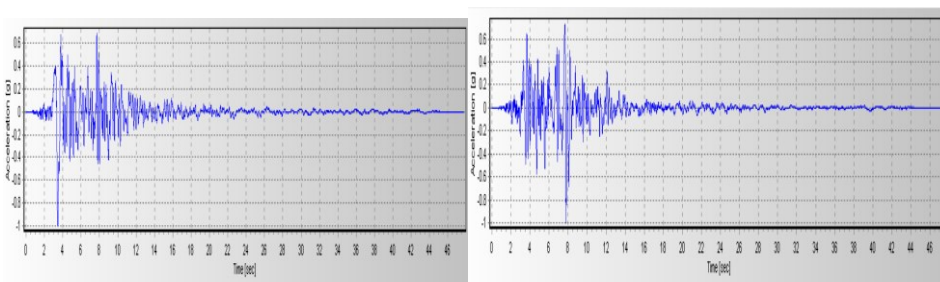
شکل (۵): مدلسازی سازه ۱۰ طبقه در نرم‌افزار Perform-3D و تعریف مراکز جرم آن

### ۳-۲- الگوی بارگذاری

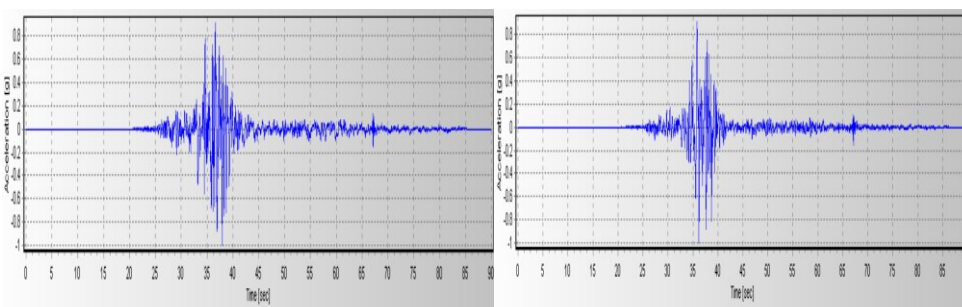
در این تحقیق سه نوع بارگذاری ثقلی (استاتیکی خطی)، پوش‌آور (استاتیکی غیرخطی) و تاریخچه زمانی (دینامیکی غیرخطی) جهت بررسی مدلسازی و تحلیل نتایج آن اعمال شده



شکل ۶- شتاب‌نگاشت مؤلفه افقی زلزله KOBE، مقیاس شده با شتاب حداکثر خود حوزه نزدیک گسل



شکل ۷- شتاب‌نگاشت مؤلفه افقی زلزله NORTHDRIDGE، مقیاس شده با شتاب حداکثر خود حوزه نزدیک گسل



شکل ۸- شتاب‌نگاشت مؤلفه افقی زلزله CHI-CHI، مقیاس شده با شتاب حداکثر خود حوزه نزدیک گسل

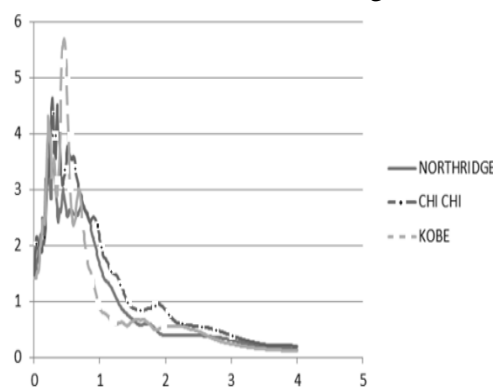
#### ۴- بررسی نتایج

پس از مدلسازی سازه‌های ۵ و ۱۰ طبقه، اقدام به بررسی و تحلیل نتایج حاصله شده است. پارامترهایی از قبیل تغییرمکان حداکثر، برش پایه، درصد انرژی جذب شده، منحنی ظرفیت سازه، عملکرد لرزه‌ای سازه و منحنی هیسترسسز مهاربند مورد ارزیابی قرار گرفته است.

#### ۴-۱- بررسی برش پایه و تغییرمکان بام

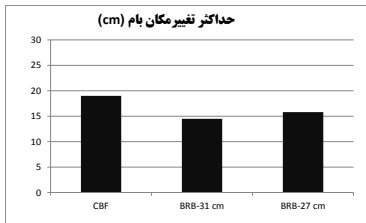
از پارامترهای مهمی که در طراحی لرزه‌ای موردتوجه قرار می‌گیرد، تغییر مکان مطلق و نسبی سازه می‌باشد. زیرا عامل اصلی خسارت نیز، اختلاف تغییر مکان بین دو طبقه می‌باشد. تغییر مکان جانبی نسبی هر طبقه اختلاف تغییر مکان‌های مراکز جرم کف در بالا و پایین آن طبقه و تغییر مکان مطلق، میزان تغییر مکان بام نسبت به محل ابتدایی آن قبل از تغییر مکان سازه می‌باشد. در نمودارهای زیر تغییر مکان مطلق مرکز جرم بام سازه‌های ۵ و ۱۰ طبقه با دبل ناودانی و مهاربند BRB با سطح مقطع  $31\text{Cm}^2$  و  $27\text{Cm}^2$  با اعمال شتاب‌نگاشت‌ها نشان

جهت ساخت یک طیف پاسخ میانگین واحد برای هر زلزله باید طیف‌های پاسخ شتاب‌نگاشت‌ها که در هر راستا بدست آمده، با استفاده از روش جذر مجموع مربعات (SRSS) ترکیب شوند تا یک طیف واحد برای دو زوج شتاب‌نگاشت هر کدام از زلزله‌ها بدست آید. در نمودار (۹) طیف پاسخ ترکیب شده هر جفت شتاب‌نگاشت نشان داده شده است.

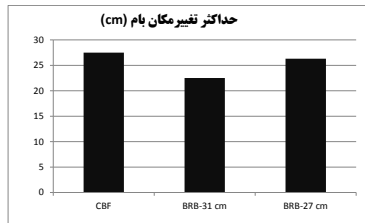


شکل (۹): طیف پاسخ ترکیب شده شتاب‌نگاشت‌ها

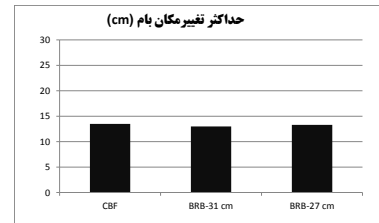
داده شده است. در نمودارهای زیر محور عمودی تغییر مکان مرکز جرم بام برحسب سانتی متر می باشد.



ج: تحت اثر زلزله Chi Chi



ب: تحت اثر زلزله Northridge



الف: تحت اثر زلزله Kobe

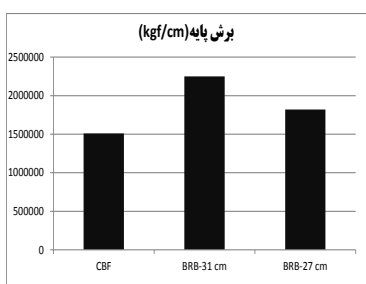
شکل (۱۰): تغییر مکان بام سازه‌های ۵ طبقه

با استفاده از نمودارهای بالا در جدول (۲) مقدار تغییر مکان حداکثر بام توسط هر کدام از شتاب‌نگاشت‌ها مشاهده می‌شود.

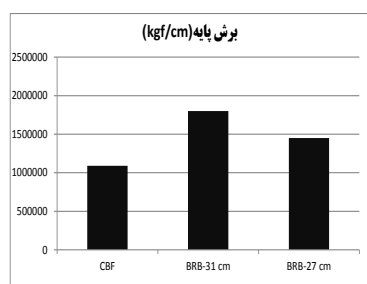
جدول (۲): تغییر مکان بام توسط اعمال شتاب‌نگاشت‌ها

شتاب‌نگاشت مدل‌ها		Chi Chi	Northridge	Kobe
		جدول ۱: ۵ طبقه هم مرکز	۱۸/۵۳	28/09
تغییر مکان بام (cm)	جدول ۲: ۵ طبقه - BRB 31CM <sup>2</sup>	۱۳/۸۵	22/01	۱۱/۹
	جدول ۳: ۵ طبقه - BRB 27CM <sup>2</sup>	۱۶/۵۶	26/54	۱۲/۰۶
	جدول ۴: ۱۰ طبقه هم مرکز	۳۱/۹۵	۳۵/۳۷	۲۷/۰۳
	جدول ۵: ۱۰ طبقه - BRB 31CM <sup>2</sup>	۲۲/۸	۳۱/۲۲	۱۷/۵۱
	جدول ۶: ۱۰ طبقه - BRB 27CM <sup>2</sup>	۲۹/۲۹	۳۳/۵۴	۲۱/۲۵

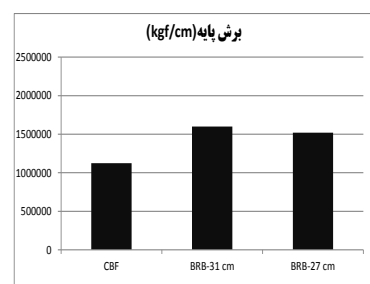
همان‌طور که در جدول (۲) مشاهده می‌شود تغییر مکان بام با اعمال شتاب‌نگاشت Northridge ساختمان‌ها بیشتر از دو شتاب‌نگاشت دیگر می‌باشد و به عبارتی شتاب‌نگاشت Northridge نیروی بیشتری را به سازه اعمال می‌کند و باعث تغییر مکان بیشتری در سازه می‌شود، همچنین از مقایسه دو سازه مجهز به مهاربند کماتش ناپذیر مشاهده می‌گردد که هرچه سطح مقطع هسته فلزی مهاربند کماتش ناپذیر بیشتر باشد تغییر مکان بام سازه کمتر می‌شود. میزان برش پایه طبقات در اثر اعمال شتاب‌نگاشت‌ها به صورت نمودار میله‌ای نشان داده می‌شود. در نمودارهای شکل (۱۱) نمودار برش پایه ساختمان‌ها قابل مشاهده می‌باشد. در نمودارهای زیر محور عمودی مقدار برش پایه برحسب کیلوگرم بر سانتی‌متر می‌باشد.



ج: تحت اثر زلزله Chi Chi



ب: تحت اثر زلزله Northridge



الف: تحت اثر زلزله Kobe

شکل (۱۱): برش پایه حاصله از سازه‌های ۱۰ طبقه

بادبندهای معمولی به علت ضعف در تحمل فشار این حالت اتفاق نمی‌افتد سختی کاهش می‌یابد و این کاهش سختی باعث کاهش برش پایه می‌گردد. به بیان دیگر افزایش برش پایه به علت جذب انرژی بیشتر این مهاربندها می‌باشد که در قسمت بعدی به میزان جذب انرژی پرداخته می‌شود.

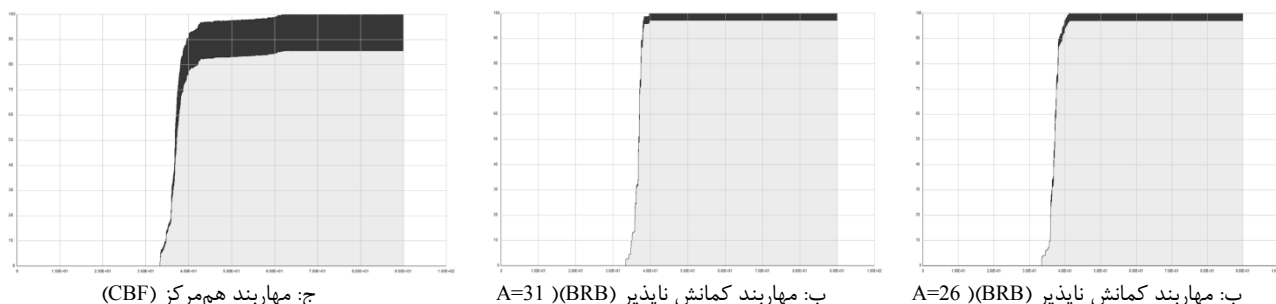
مشاهده می‌شود که برش پایه به وجود آمده در ساختمان‌های مجهز به مهاربند کماتش ناپذیر نسبت به سازه‌های با مهاربند هم‌مرکز بیشتر می‌باشد که این موضوع به علت رفتار یکسان بادبندهای BRB در فشار و کشش می‌باشد و بادبند BRB تا حد نهایی ظرفیت کششی پیش می‌رود به همین دلیل برش پایه بیشتری را جذب می‌کند، درحالی‌که در



## ۲-۴- بررسی درصد انرژی جذب شده توسط مهاربندها

انرژی جذب شده به کل انرژی ورودی زلزله به صورت درصد نشان می‌دهد. در اشکال (۱۲) درصد انرژی‌ای که توسط بادبند هم‌مرکز و بادبند کمانش ناپذیر در هنگام اعمال شتاب‌نگاشت ChiChi به سازه‌ها جذب شده است نشان داده می‌شود. در این اشکال رنگ قرمز برابر کل انرژی ورودی و رنگ زرد انرژی جذب شده توسط مهاربندها می‌باشد. همچنین محور افقی زمان و محور عمودی بیانگر درصد جذب انرژی می‌باشد.

برنامه Perform-3D پس از اعمال نیروهای زلزله (شتاب‌نگاشت ChiChi) به صورت رفت و برگشتی به سازه، درصد انرژی جذب شده توسط عضو موردنظر را با تقسیم مقدار



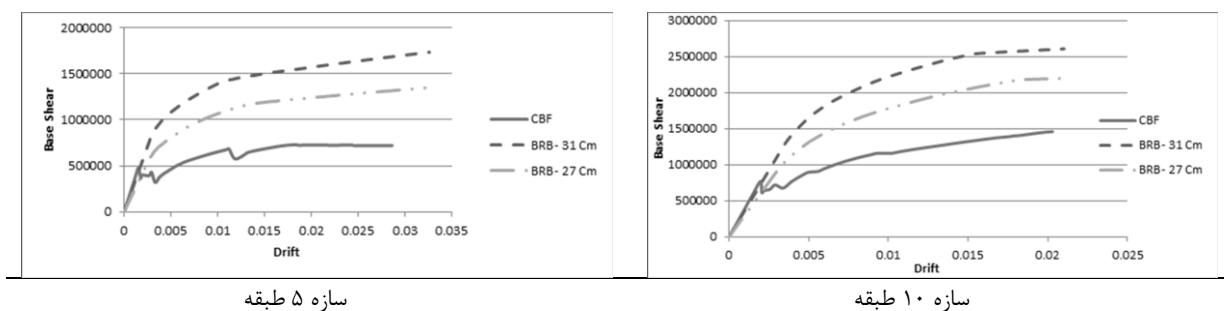
شکل (۱۲): درصد انرژی جذب شده توسط مهاربند ۵ طبقه برای دو مهاربند BRB با سطح مقطع متفاوت

زرد رنگ میزان انرژی جذب شده توسط مهاربندها می‌باشند که به ناحیه غیرخطی وارد شده‌اند و جذب انرژی داشته‌اند.

## ۳-۴- منحنی ظرفیت سازه‌ها (منحنی PushOver)

منحنی ظرفیت سازه‌ها قبل و بعد از مقاوم‌سازی آن‌ها با مهاربند BRB در حالت‌های مختلف توسط تحلیل استاتیکی غیرخطی در نمودارهای شکل (۱۳) نشان داده شده است. در نمودارهای زیر محور افقی در یافت بر حسب سانتی‌متر و محور عمودی برش پایه بر حسب (kgf) می‌باشد.

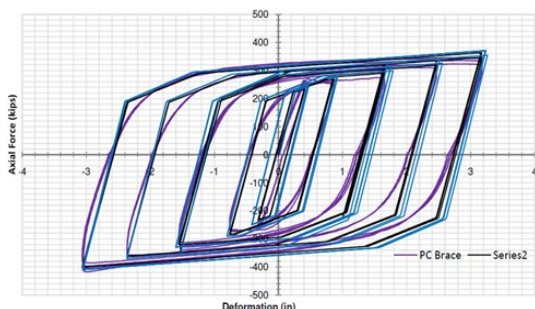
مشاهده می‌شود در ساختمان‌های مجهز به BRB جذب انرژی بیشتر از ساختمان با مهاربند هم‌مرکز می‌باشد و سطح مقطع فلزی موجود در BRB تأثیرگذار در میزان جذب انرژی می‌باشد به طوری که هرچه سطح مقطع فلزی BRB بیشتر باشد میزان جذب انرژی توسط این مهاربندها بیشتر می‌گردد. البته همان‌طور که مشاهده می‌شود در همه‌ی ساختمان‌ها انرژی بسیار زیادی توسط BRB جذب شده است که باعث می‌شود انرژی کمتری توسط تیرها و ستون‌ها جذب شود، ناحیه



شکل (۱۳): منحنی ظرفیت سازه‌های مدلسازی شده

افزایش می‌یابد سختی مهاربند بیشتر می‌شود و ظرفیت جذب انرژی نیز بیشتر می‌شود. یعنی هرچه سطح مقطع فلزی بیشتر باشد ظرفیت سازه بیشتر افزایش می‌یابد. در سازه‌های ۵ و ۱۰ طبقه با مهاربند هم‌مرکز (CBF) طراحی شده تغییر مکان هدف بعد از معیار پذیرش LS-Brace قرار می‌گیرد، اما در سازه‌های ۵ و ۱۰ طبقه بهسازی شده با مهاربند BRB، معیارهای پذیرش LS و CP بعد از تغییر مکان هدف قرار می‌گیرد، با توجه به اینکه ساختمان‌های طراحی شده از لحاظ گروه‌بندی ساختمان‌ها طبق

همان‌طور که در نمودارهای فوق مشاهده می‌شود برش پایه سازه بعد از مقاوم‌سازی افزایش داشته که این افزایش برش پایه همان‌طور که در بخش ۴-۵-۲ توضیح داده شد به علت رفتار یکسان مهاربندهای BRB در کشش و فشار و افزایش سختی می‌باشد. همچنین همان‌طور که در نمودارها قابل مشاهده است ظرفیت سازه‌ها بعد از مقاوم‌سازی با مهاربند BRB بین ۲ تا ۳ برابر افزایش داشته است، که این افزایش به علت افزایش سختی BRB ها می‌باشد، و هرچه سطح مقطع فلزی مهاربند BRB در



شکل (۱۵): مقایسه نمودارهای هیستریزیس مهاربند BRB در دو حالت PC Brace مربوط به مرجع [۲۱] و series 2 مربوط به تحقیق حاضر

## ۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق با توجه به ضوابط موجود در استاندارد ۲۸۰۰ (آیین نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله، ۱۳۹۲)، ۶ مدل ساختمان با طبقات ۵ و ۱۰ با استفاده از برنامه Etabs طراحی شد و سپس با استفاده از آیین نامه بهسازی لرزه ای که در خصوص طراحی بر اساس عملکرد می باشد اقدام به تحلیل استاتیکی غیرخطی و دینامیکی غیرخطی با استفاده از برنامه Perform-3D (Della Corte, 2011) این مدل‌ها شد که در تحلیل دینامیکی غیر خطی ۳ شتابنگاشت حوزه نزدیک زلزله ChiChi، Northridge و Kobe مورد استفاده قرار گرفتند.

بر اساس تحلیل‌های انجام شده نتایجی که از این تحقیق می‌توان بدست آورد عبارتند از:

۱- مهاربند BRB قابلیت جذب انرژی بالا و مستعد استهلاک انرژی زیادی در زمین لرزه‌ها را در مقایسه با مهاربند های هم مرکز (CBF) دارد.

۲- به کار بردن مهاربند های BRB در سازه‌های باعث افزایش برش پایه در این سازه‌ها نسبت به سازه‌های با مهاربند هم مرکز (CBF) می‌گردد که این افزایش برش پایه به علت رفتار یکسان مهاربند های BRB در کشش و فشار و افزایش سختی می‌باشد.

۳- مهارندهای BRB به علت مدفون شدن در بتن و جلوگیری از کمانش آن در هنگام اعمال بارهای زلزله، با توجه به این که بیشتر انرژی زلزله را جذب کرده اند ولی به علت کمانش ناپذیر بودن دچار فرو ریزش نشده اند و همچنین دیگر اعضای سازه نیز مانند تیرها و ستون‌ها حد مجاز آیین نامه (معیار پذیرش) را رعایت کرده اند و آن‌ها نیز دچار فرو ریزش نشده اند، سازه تاب باربری خود را حفظ کرده و سازه‌های مجهز به BRB در مقایسه با سازه‌های با مهاربند هم مرکز (CBF) در سطح عملکرد IO باقی مانده است و از لحاظ سطح عملکرد، عملکرد بهتری دارند.

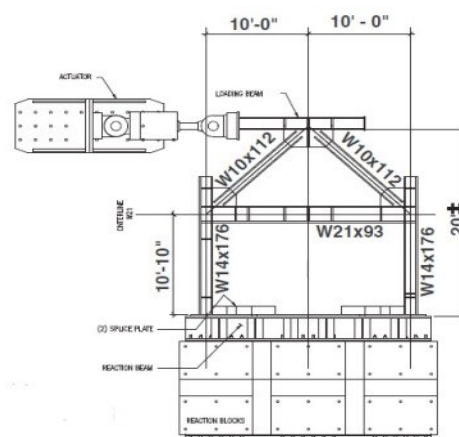
۴- با کاهش ۱۵ درصدی سطح مقطع هسته فلزی مهاربند BRB، تغییرمکان نسبی (دریفت) سازه ۱۵ درصد افزایش یافته

استاندارد ۲۸۰۰، در گروه ساختمان‌های با اهمیت متوسط قرار دارند، بنابراین نتایج بدست آمده قابل قبول می‌باشند.

## ۴-۴- صحت‌سنجی نتایج

به منظور اطمینان از درستی نحوه مدل‌سازی در نرم افزار و کنترل نزدیک بودن نتایج به واقعیت، یک نمونه قاب مهاربندی شده با نرم افزار PERFORM 3D مدل‌سازی شده و نتایج نرم افزار با نتایج آزمایشگاهی ارائه شده مقایسه می‌گردد.

مدل‌سازی قاب نمونه در نرم افزار PERFORM 3D بر اساس قاب ارائه شده توسط یوریز و همکاران در سال ۲۰۰۸ برای آزمایش مهاربند کمانش ناپذیر، انجام می‌شود [۲۱]. نمونه مورد بررسی یک قاب ۲ طبقه تک دهانه مطابق با شکل (۱۴) می‌باشد. طبقه دوم قاب به قدری محکم انتخاب شده است تا تغییر شکل‌های غیرالاستیک در طبقه پایینی که مهاربند کمانش ناپذیر قرار دارد، رخ دهد. ستون‌ها از مقطع W14x176 و تیر از مقطع W21x93 انتخاب شده است. آکس تا آکس ستون‌ها ۲۰ فوت و از روی پایه تا آکس تیر ۱۰ فوت و ۱۰ اینچ می‌باشد.



شکل (۱۴): مدل نمونه قاب و مشخصات مقاطع اعضا [۲۱]

بارگذاری چرخه‌ای در نمونه آزمایشگاهی توسط دستگاه محرک که به تیر طبقه دوم متصل است مطابق با تحقیق [۲۱] به قاب اعمال می‌شود. در مدل نرم افزاری نیز مشابه با مدل آزمایشگاهی، بار محرک ۱۰۰۰ kips به قاب اعمال می‌شود، سپس قاب تحت اثر پروتکل بارگذاری چرخه‌ای، تحلیل می‌شود. برای انجام تحلیل در نرم افزار PERFORM 3D، از تحلیل نیروی دینامیکی استفاده می‌گردد. به منظور اطمینان از درستی نحوه مدل‌سازی در نرم افزار PERFORM 3D و کنترل نزدیک بودن نتایج به واقعیت، نمودار نتایج مدل‌سازی صورت گرفته در این بخش با نمودار نتایج ارائه شده در تحقیق آزمایشگاهی [۲۱] در شکل (۱۵) مقایسه شده‌اند. نتایج نشان از صحت محاسبات و مدل‌سازی‌ها در این مقاله دارد.

- [10] M. Kholghifard and E. Badakhshan Nejad, "Seismic Vulnerability Assessment of Yasooj Hospitals from the Perspective of Passive Defense and ATC Methods," *Passive Defense Quarterly*, 12(1), 1-12, 2021. (In Persian)
- [11] Y. Moarrab, B. Sepehrzad, and M. Naderi, "Evaluation of City's Structural Vulnerability to Earthquake with Non-Active Defense Approach (Case Study: District 2 of Tehran)," *Passive Defense Quarterly*, 11(2): 31-43, 2020. (In Persian)
- [12] M. Emami Korandeh and B. Asgari, "Investigation of Parameters Affects on the Phenomenon of Progressive Collapse in Steel Structures Using Artificial Neural Network (ANN)," *New Approaches in Civil Engineering*, 6(2), 27-44, 2022. doi: 10.30469/jnace.2022.157825
- [13] PEER Strong Motion Database, 2016. Available: <http://ngawest2.berkeley.edu/>,
- [14] M. Emami Korandeh and N. Nourbakhsh, "Optimizing the Weight of Steel Structures using Artificial Neural Network Method", *New Approaches in Civil Engineering*, 4(4), 63-77, 2021. doi: 10.30469/jnace.2021.131610
- [15] Perform-3D V5.0.0, "Nonlinear Analysis and Performance Assessment for 3D Structures, Computers and Structures (SCI) Berkeley", California, 2011.
- [16] M. Mahmoudi and M. Zaree, "Evaluating response modification factors of concentrically braced steel frames," *Journal of constructional steel research*, 2018, vol. 66, pp. 1196-1204, 2017.
- [17] M. EmamiKorandeh and S. A. Hosseini, "Determination of the Critical Column in the Phenomenon of Progressive Collapse of the Steel Bending Frame Considering the Effect of Soil-Structure Interactions with both the Direct and Indirect Methods", *Passive Defense Quarterly*, 13(2),1-13, 2022.
- [18] G. Della Corte, M. D'aniello, R. Landolfo, F. M. Mazzolani, "Review of steel buckling-restrained braces", *Steel construction*, 4(2), 85-93, 2011.
- [19] M. EmamiKorandeh and S. A. Hosseini, "Evaluation of the Coefficient of behavior of Steel Structures with EBF Bracing by Changing the Range of Link Beam Considering the Effect of Soil-Structure Interaction" *New Approaches in Civil Engineering*, 5(4), 81-99, 2022. doi: 10.30469/jnace.2022.150302
- [20] M. Emami and S. S. Yasrobi, "Modeling and Interpretation of Pressuremeter Test Results with Artificial Neural Networks", *Geotech Geol Eng* 32, 375-389, 2014. <https://doi.org/10.1007/s10706-013-9720-9>
- [21] G. Della Corte, M. D'Aniello, R. Landolfo, F. M. Mazzolani, "Review of steel buckling restrained braces," *Steel Construction*, 4(2), 85-93, Jun 2011.

است و همچنین با جایگزین کردن مهاربند BRB با سطح مقطع  $31\text{Cm}^2$  به جای مهاربند CBF در سازه های ۵ و ۱۰ طبقه به ترتیب ۲۵٪ و ۱۵٪ کنترل دررفت مشاهده شده است.

۵- با کاهش ۱۵ درصدی سطح مقطع هسته فلزی مهاربند BRB، تعداد مفاصل پلاستیک تشکیل شده ۱۵ درصد افزایش یافته است و همچنین با جایگزین کردن مهاربند BRB با سطح مقطع  $31\text{Cm}^2$  به جای مهاربند CBF در سازه های ۵ و ۱۰ طبقه تعداد مفاصل پلاستیک تشکیل شده به ترتیب ۳۰٪ و ۲۰٪ کاهش یافته است.

## ۶- مراجع

- [1] O. Hassan and S. C. Goel, "Modeling of bracing members and seismic behavior of concentrically braced steel structures," Report no. umce 91-1, Department of civil engineering, the university of Michigan, ann arbor, MI., 1991.
- [2] T. Takeuchi, J. F. Hajjar, R. Matsui, K. Nishimoto, I. D. Aiken, "Local buckling restraint condition for core plates in buckling restrained braces," *Journal of constructional steel research*, 1, 66(2), 139-49, Feb. 2010.
- [3] M. C. Burkholder, "Performance based analysis of a steel braced frame building with buckling restrained braces," Master of Science thesis, 2012.
- [4] H. Eletrabi, J. D. Marshall, "Catenary action in steel framed buildings with buckling restrained braces," *Journal of Constructional Steel Research*, 1, 113, 221-33, Oct. 2015.
- [5] A. Almeida, R. Ferreira, J. M. Proença, A. S. Gago, "Seismic retrofit of RC building structures with Buckling Restrained Braces," *Engineering Structures*, 1, 130, 14-22, Jan 2017.
- [6] G. A. Papagiannopoulos, "On the seismic behaviour of tension-only concentrically braced steel structures," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 1, 115, 27-35, Dec. 2018.
- [7] Chen, Rong, Canxing Qiu, and Dongxue Hao, "Seismic Response Analysis of Multi-Story Steel Frames Using BRB and SCB Hybrid Bracing System" *Applied Sciences* 10, no. 1, 284, 2020. <https://doi.org/10.3390/app10010284>
- [8] Cui Yao, Xu Xiao-zhuo, Lin Chi, "Seismic Performance of Concentrically Braced Frames Considering the Brace Fracture and Gusset Plate Effect," *Engineering Mechanics*, 37(10), 85-92, 2020. doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2019.11.0648
- [9] S. Mashmoul kovich, M. Hassanpour Sedghi, and A. Sharifi, "Study of Seismic Parameters and Seismic Risk Analysis (Case Study: Maraghe-Hashtrood Highway project area (second part))" *Passive Defense Quarterly*, 11(1), 29-35, 2020. (In Persian)