

# ارزیابی پاسخ لرزه‌ای قاب‌های مهار شده با مهاربند کمانش تاب با رویکرد تاب‌آوری

میلاد احتشامی معینی<sup>۱</sup>، سید علی رضوی طباطبائی<sup>۲\*</sup>

۱- کارشناسی ارشد سازه، دپارتمان مهندسی عمران دانشگاه علم و فرهنگ، تهران، ایران

۲- استادیار، دپارتمان مهندسی عمران دانشگاه علم و فرهنگ، تهران، ایران

\* تهران، صندوق پستی ۱۳۱۴۵۸۷۱، [arazavi@usc.ac.ir](mailto:arazavi@usc.ac.ir)

## چکیده

قاب‌های مهاربند کمانش تاب توجه زیادی را به عنوان سیستم مقاوم لرزه‌ای برای مقابله با زمین لرزه‌ها به خود جلب کرده‌اند. اما این سیستم به دلیل برخی نقاط ضعف در رفتار لرزه‌ای یک سیستم ایده آل نیست. در این پژوهش تاب‌آوری لرزه‌ای قاب‌های مهاربندی شده با مهاربند کمانش تاب در دو حالت طول کوتاه و طول بلند مورد بررسی قرار گرفته و همچنین پاسخ لرزه‌ای آنها با سیستم دوگانه مهاربند کمانش تاب - قاب خمشی ویژه (BRBF-SMR) مقایسه گردید. علاوه بر این، اثر گیرداری اتصال تیر دهانه مهاربندی نیز در نظر گرفته شد. بدین منظور دو ساختمان ۴ و ۹ طبقه با سیستم‌های مذکور و در دو حالت قطری و شورون طراحی گردید. سپس قاب‌های نمایانگر رفتار سازه در نرم افزار اجزا محدود مدل شده و تحت ۲۲ رکورد زلزله تحلیل‌های تاریخچه زمانی صورت گرفت. پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها شامل دررفت طبقات و دررفت پسماند با یکدیگر مقایسه و نتایج در قالب نمودار ارائه گردید. نتایج نشان دهنده بهبود رفتار سازه‌ها مهار شده با مهاربند کمانش تاب طول کوتاه خصوصاً در قاب با اتصالات دهانه مهاربندی گیردار است. همچنین، افزایش ظرفیت قاب دوگانه نسبت به سیستم مهاربندی با تیر گیردار در دهانه مهاربندی چندان قابل توجه نیست. طراحی تیر دهانه مهاربندی برای نیروی مورد انتظار خمشی به خوبی می‌تواند جایگزین طراحی قاب خمشی در سیستم دوگانه شود و در کاهش دررفت‌ها و افزایش سختی پلاستیک موفق باشد. مزید بر این، مهاربند‌های طول کوتاه به دلیل ابعاد کوچکتر از نظر هزینه تولید ارزان تر و با سهولت بیشتر اجرا شده و تعویض پذیرترند.

## واژگان کلیدی

تاب‌آوری لرزه‌ای، مهاربند کمانش تاب، تحلیل تاریخچه زمانی، دررفت، دررفت پسماند

## Seismic performance assessment of buckling restrained braced frames based on resiliency aspects

M. Ehteshami Moeini, S. A. Razavi Tabatabaei

### Abstract

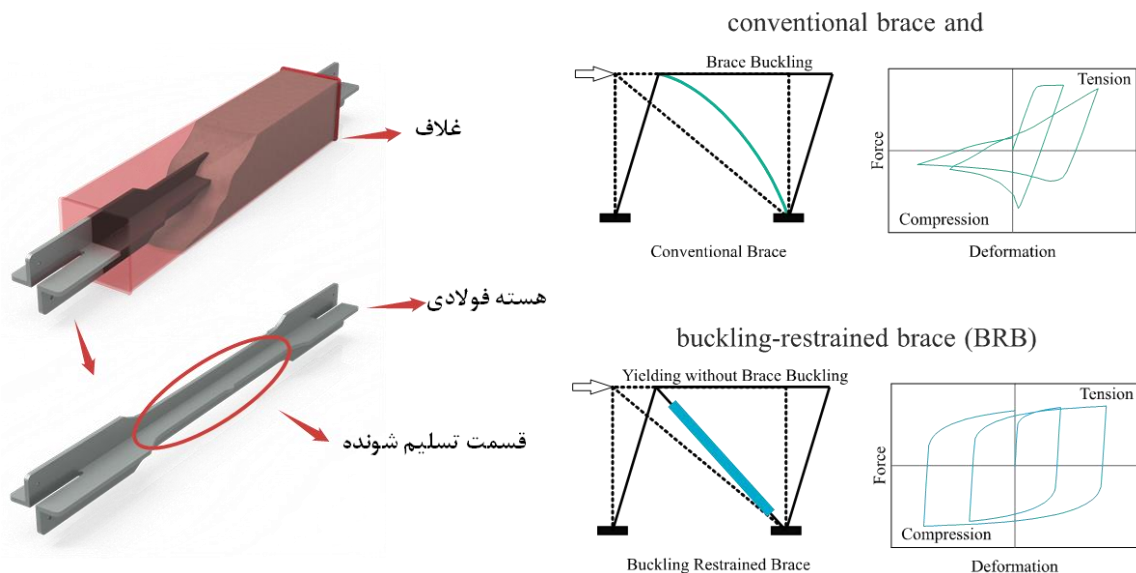
The buckling-restrained braced frame (BRBF) is an appropriate lateral system for resisting seismic excitations. It is not yet an ideal system since there are deficiencies regarding the performance of this system. In this research resiliency of the reduced-length buckling restrained braced frames (RL-BRBFs) were assessed and compared with conventional buckling restrained braced frames (BRBF) as well as dual SMRF-BRBF. To do so two 4 and 9 story structures with conventional and reduced core length BRBs with diagonal and inverted chevron brace configuration were designed, then, the frames representing the lateral behavior of the structures were modelled in finite element software and time history analyses were performed on the structures under a set of 20 ground motion records. Seismic response of the structures including drifts and residual drifts were compared and reported herein. The results indicate that the reduced length BRBs have much better seismic behavior especially in the frame with moment resisting braced bay beam. The dual frame did not exhibit much different behavior compared to the braced frame with moment resisting braced bay beams. The moment resisting beams of the braced bays designed for the expected moment improved the drift response, plastic stiffness, and performed almost similar to the dual frame designed for 25% of the base shear. Furthermore, RL-BRBFs are replaceable, repairable, and more cost-efficient compared to conventional BRBs due to smaller size of the reduced-length buckling restrained braces (RL-BRBF).

### Keywords

Seismic resiliency, Buckling restrained brace (BRB), Time history analysis, Drift, Residual drift

یکی از اولین ایده‌ها که منجر به تولید مهاربند کمانش تاب (BRB) گردید در سال ۱۹۷۶ توسط Takeda و همکارانش ارائه شد [۱]. آنها، به منظور بهبود رفتار پس کمانشی مقاطع H شکل با محصور کردن و مقید کردن این مقاطع به وسیله بتن غیر مسلح باعث بهبود قابل توجه در رفتار چرخه ای مهاربند شدند، گرچه بتن به دلیل غیر مسلح بودن و نبود مکانیزم جداکننده دچار خسارات شدید شد. مهاربند کمانش تاب در واقع نسخه بهبود یافته مهاربند معمولی است که دیگر در اثر نیروی محوری فشاری دچار کمانش نمی‌گردد [۲]. شکل (۱) اجزای مهاربند کمانش تاب و مقایسه رفتار آن با مهاربند معمولی را نشان می‌دهد. در ادامه پژوهش‌ها توسط محققین دستورالعمل‌هایی نیز برای طراحی سازه‌های مجهز به این نوع مهاربندها ارائه شد و در نهایت Wada و همکارانش اولین مهاربند کمانش تاب را تولید و با گذراندن مراحل کنترل کیفی و تست‌های آزمایشگاهی در ساختمان شرکت نیپون استیل مورد استفاده قراردادند [۳]. همچنین با به نتیجه رسیدن تحقیقات و اثبات عملکرد مهاربند کمانش تاب اولین سازه مجهز به مهاربند کمانش تاب در آمریکا در ساختمان دانشکده محیط زیست دانشگاه کالیفرنیا پردیس دیویس استفاده شد (شکل (۲)). سپس با گسترش این فناوری استفاده از این مهاربند نه تنها در سازه‌های مختلف استفاده شده و بلکه به عنوان یک گزینه مناسب برای مقاوم سازی سازه‌های موجود نیز مورد توجه قرار گرفت [۴ و ۵]. با افزایش تحقیقات

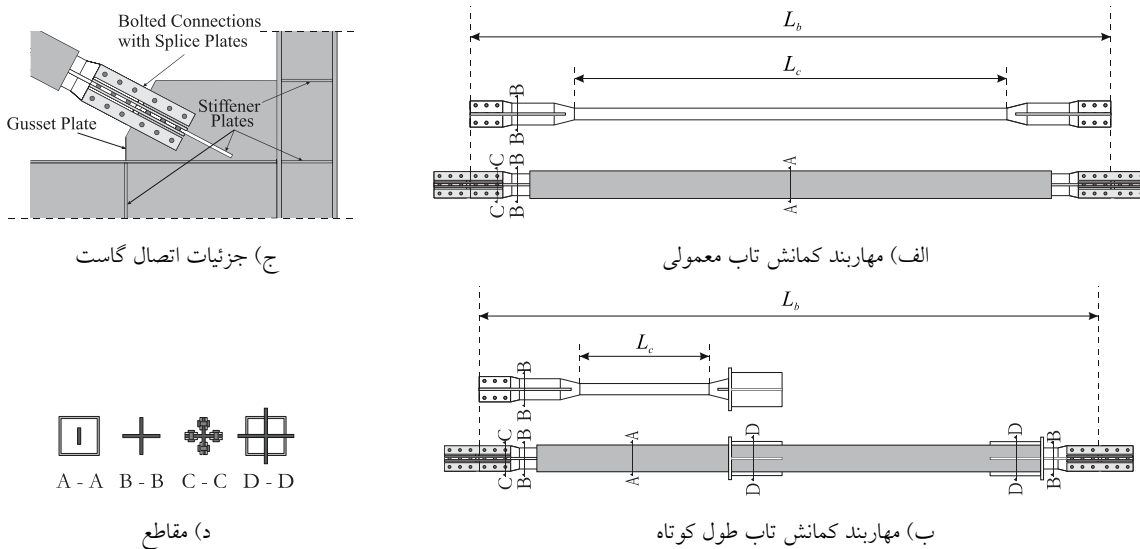
و تکامل این نوع مهاربند، محقق استفاده از مهاربند با طول هسته کوتاه را به عنوان یک روش برای افزایش سختی پیشنهاد کردند [۶]. این امر موجب کاهش دررفت‌های ناشی از زلزله می‌گردد. Fahnestock و همکارانش نیز استفاده از اتصالات گیردار در دهانه مهاربندی در قاب مجهز به کمانش تاب را گزینه‌ای مفید برای بهبود ظرفیت نهایی سیستم معرفی کردند [۷]. گرچه سیستم مهاربندی کمانش تاب نسخه بهبود یافته از مهاربندهای معمولی است اما تحقیقات نشان داده که این سیستم نیز همچنان می‌تواند کمبودهایی داشته باشد و در مواردی پاسخگوی نیاز سازه نیست [۸]. در همین راستا محقق پارامترهای موثر در فروریزش سازه‌های مهار شده با مهاربند کمانش تاب را تحت روکوردهای زلزله با تحلیل تاریخیچه زمانی بررسی کرده و از عوامل موثر در فروریزش استفاد از محور ضعیف ستون دهانه مهاربندی عنوان نموده و استفاده از سیستم دوگانه را به عنوان یک روش سودمند در کنترل پایداری و افزایش ظرفیت نهایی سازه عنوان کردند [۹-۱۱]. اولین بار در سال ۲۰۰۱ ایده استفاده از مهاربند کمانش تاب با طول هسته کوتاه به عنوان یک راهکار که هم سختی پلاستیک سیستم راتقاء می‌بخشد پیشنهاد شد [۱۰]. با معرفی این نوع مهاربند تحقیقات گسترده‌تری روی آن انجام پذیرفت تا رفتار سازه‌های مجهز به این نوع سیستم مهاربندی رو مورد بررسی قرار دهد [۱۲ و ۱۳]. شمای کلی مهاربند کمانش تاب در حالت طول کوتاه و معمولی در شکل (۳) به تصویر کشیده شده است.



شکل ۱- مقایسه رفتار مهاربند معمولی و مهار بند کمانش تاب (سمت راست)، نمای مهاربند کمانش تاب و اجزای آن (سمت چپ)



شکل ۲- اولین سازه‌های مجهز به مهاربند کمانش تاب، ساختمان دانشکده علوم کشاورزی دانشگاه کالیفرنیا دیویس آمریکا (۱۹۹۹) (شکل راست)، دفتر مرکزی شرکت نیپون استیل ژاپن (۱۹۸۷) (شکل چپ)



شکل ۳- اولین سازه‌های مجهز به مهاربند کمانش تاب

### ۱-۱- تاب‌آوری و شاخصه‌های آن

تاب‌آوری لرزه‌ای به معنی قابلیت بهره برداری مجدد سریع پس از یک رخداد لرزه ای شدید یا نسبتاً شدید می‌باشد. بنابراین پارامترهای زیر از شاخصه‌های تاب‌آوری تلقی می‌شوند.

- پایداری جانبی
- دریفت بیشینه و دریفت پسماند
- ظرفیت نهایی جابجایی
- تعویض پذیری
- هزینه تعمیر

### ۱-۱-۱- راهکارهای ارتقای تاب‌آوری

استفاده از هر روشی که می‌تواند موجب کاهش آسیب به سازه شده و یا باعث کاهش هزینه و افزایش سولت تعمیر گردد راهکاری جت افزایش تاب‌آوری است. در همین راستا راهکاری زیر به عنوان یک تکنیک افزایش تاب‌آوری سیستم مهاربندی

کمانش تاب پیشنهاد گردیده است:

- ۱- سیستم دوگانه مهاربند کمانش تاب و قاب خمشی
  - تمرکز تشکیل مفاصل پلاستیک در مهاربندها می‌تواند موجب ایجاد مکانیزم طبقه نرم و فرو ریزش سازه شود.
  - با ترکیب با یک سیستم مقاوم جانبی دیگر مانند قاب خمشی می‌توان از ان پدیده جلوگیری کرد.
  - این کار علاوه بر این می‌تواند موجب بهبود مقاومت در برابر P-Delta و همچنین افزایش سختی خمیری سازه گردد.

۲- استفاده از المان‌های تعویض پذیر

- یکی از مهم‌ترین شاخصه‌های تاب‌آوری، تعمیرپذیری و تعویض پذیری المان‌های اتلاف کننده انرژی است. بدین منظور همانند می‌توان از دیتیل‌های متشکل از پیچ و مهره به نحوی استفاده نمود تا تنها

المان فیوز تعویض شود.

### ۳- کاهش طول مهاربند کمانش تاب

- کاهش هزینه ساخت ناشی از کوچک شدن قطعه
- افزایش سهولت تعویض ناشی از کوچک شدن قطعه
- افزایش سختی پس از تسلیم به دلیل کاهش طول موثر هسته که نقش فیوز را ایفا می‌کند

### ۲-۱- مهاربند کمانش تاب طول کوتاه

Razavi و همکارانش در سال ۲۰۱۴ با کاهش طول قسمت تسلیم شونده مهاربند کمانش تاب، نوع جدیدی از این مهاربندها معرفی کردند [۱۲]. این مهاربندها بدون تغییر در سطح مقطع و ظرفیت نیروی باعث افزایش سختی و سختی پس از تسلیم سازه شد. در واقع مهاربند معرفی شده ترکیبی از یک مهاربند معمولی که در زلزله الاستیک باقی می‌ماند و یک مهاربند کمانش تاب کوچک تشکیل شده است.

### ۳-۱- ارزیابی رفتار مهاربند کمانش تاب طول کوتاه

در این پژوهش بهبود رفتار مهاربند کمانش تاب طول کوتاه به عنوان یک روش برای ارتقاء تاب‌آوری قاب‌های مجهز به مهاربند کمانش تاب مورد بررسی قرار گرفته است. این نوع مهاربندها با توجه به ابعاد هزینه تولید کمتر و اجرای راحت‌تری دارند و با توجه به سختی بالا می‌تواند موجب کاهش دررفت و به تبع آن دررفت‌های پس‌ماند شود. بدین منظور سازه‌های ۴ و ۹ طبقه تحت یک ست ۲۲ تایی از رکوردهای زلزله با هر دو نوع مهاربند کمانش تاب طول بلند و کوتاه مورد ارزیابی قرار گرفتند.

### ۲- مدل‌سازی

#### ۱-۲- سازه‌های تحت بررسی

در راستای بررسی رفتار مهاربند کمانش تاب طول کوتاه دو ساختمان ۴ و ۹ طبقه در نظر گرفته شد. پلان و شمای کلی ساختمان‌ها در شکل (۴) نمایش داده شده است. سازه‌ها طبق دستورالعمل جامعه مهندسی عمران ایالات متحده آمریکا (ASCE 7-16) طراحی شدند [۱۴]. مهاربندها در دو الگوی قطری و شورون در راستاهای متعامد در نظر گرفته شدند. طول هسته‌ها (RL-BRB) معادل ۲۰٪ طول هسته مهاربند کمانش تاب طول بلند ( $L_c=0.2L$ ) در نظر گرفته شد. اتصالات دهانه مهاربندی در دو حالت گیردار و مفصلی فرش شد. یک قاب قطری در ساختمان ۴ طبقه به صورت سیستم دوگانه از مهاربند کمانش تاب - قاب خمشی ویژه طراحی شد

به نحوی که قاب خمشی توانایی تحمل ۲۵٪ برش پایه را داشته باشد. در مجموع ۱۷ سازه مهاربندی کمانش تاب طراحی و تحلیل شد. شتاب مبنای طرح  $0.1g$  (با توجه به قرارگیری سازه در شهر سان فرانسیسکو) و خاک محل احداث سازه‌ها معادل تیپ III در نظر گرفته شد. فولاد هسته مهاربند و سایر اعضا به ترتیب مقاومت تسلیم ۲۶۰ و ۳۴۵ مگاپاسکال فرض شد. بار مرده گسترده طبقات مرده و زنده به ترتیب ۳۵۰ و ۲۵۰ کیلوگرم بر متر مربع و بار زنده گسترده طبقات مرده و زنده به ترتیب ۳۰۰ و ۱۰۰ کیلوگرم بر متر مربع اتخاذ و به سازه اعمال گردید. روند طراحی اعضاء به سه گام کلی زیر تقسیم می‌شود:

۱- اعضای تغییر مکان کنترل برای زلزله کاهش یافته طراحی می‌شوند ← تعیین سطح مقطع هسته مهاربندها

۲- اعضای نیروکنترل بر اساس نیروی مورد انتظار ناشی از تسلیم مهاربند‌ها محاسبه می‌شوند.

۳- طراحی قسمت الاستیک مهاربند بر اساس روند طراحی خاص این نوع المان انجام شده است.

ضریب اضافه نیرو برای فشار و کشش مهاربند کمانش تاب طبق نمودار استخراج شده از نمونه آزمایشگاهی (Razavi و همکارانش [۱۲]) که در شکل (۵) نمایش داده شده محاسبه گردیده است.

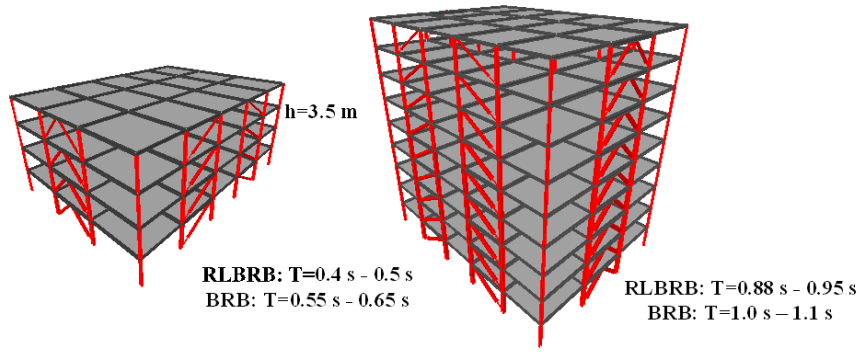
همچنین نیروهای مورد انتظار برای المان‌های نیرو کنترل همانند تیرها و ستون‌ها براساس شکل (۶) محاسبه شد. دستورالعمل طراحی AISC 360-16 و AISC 41-16 برای محاسبات و بدست آوردن مقاطع سازه استفاده شد [۱۵ و ۱۶].

لیست سازه‌های مورد بررسی در جداول (۱) تا (۵) ارائه شده است

#### ۲-۲- مدل اجزای محدود

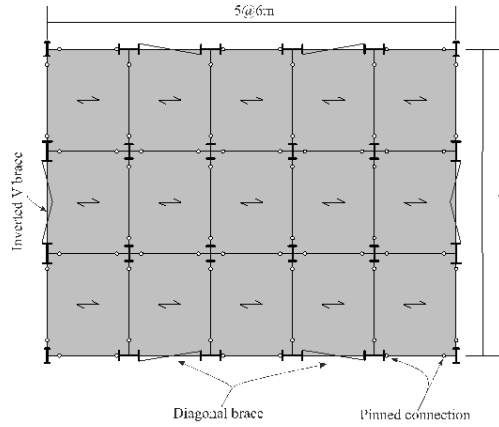
تحلیل‌ها با استفاده از نرم افزار SeismoStruct 2018 و به صورت ۲ بعدی انجام شده است [۱۷]. اثر ورق اتصال مهاربند یکی از پارامترهایی است که می‌تواند در رفتار سازه تأثیر قابل توجهی داشته باشد. بررسی‌های انجام گرفته نشان می‌دهد حضور گاست باعث افزایش سختی تیر و ستون دهانه مهاربندی می‌شود. برای در نظر گرفتن اثر سختی گاست، مقاطع یک بار با یک گاست و یک بار با دو گاست مدل شده و اثر سختی در انحنای بدست آمده است. ضریب ۱/۸۵ برای تیرها با دو گاست و ۱/۳ برای ستونها با یک گاست منظور گردید. مدل به صورت مجموعه‌ای از المان‌های تیر-ستون و فنر تشکیل شده است. فنرها برای مدلسازی رفتار مفاصل پلاستیک استفاده شده‌اند.





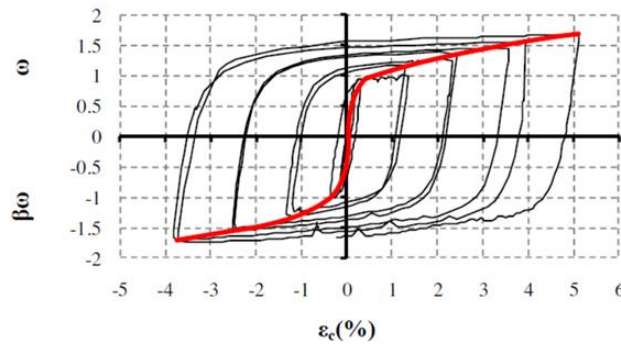
مدل ۳ بعدی ساختمان ۴ طبقه

مدل ۳ بعدی ساختمان ۹ طبقه

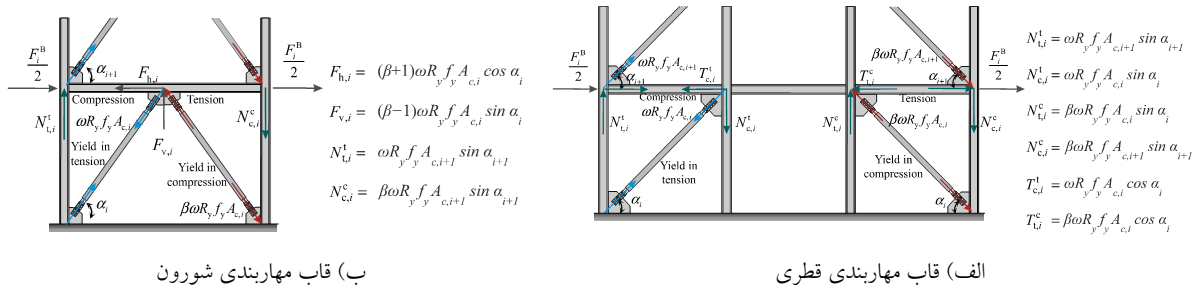


پلان ساختمان مورد بررسی

شکل ۴- پلان و نمای سه بعدی سازه های بررسی شده



شکل ۵- نمودار بک بن استخراج شده از نمونه آزمایشگاهی [۱۰]



شکل ۶- روند محاسبه نیروهای مورد انتظار

جدول ۱- قاب مهاربند شورون (V) ۴ طبقه

Inverted V braced frame				
Elastic pipe (RLBRB ONLY)	BRB core area (cm <sup>2</sup> )	Braced span beam	Braced span column	طبقه
P10X0.625	۹/۷۰	W12X35	W14X53	۴
P14X0.625	۲۲/۶	W12X35	W14X53	۳
P16X0.625	۲۵/۸	W16X36	W14X53	۲
P16X0.625	۲۵/۸	W16X36	W14X68	۱

جدول ۲- قاب مهاربند قطری ۴ طبقه

Diagonal braced frame				
Elastic pipe (RLBRB ONLY)	BRB core area (cm <sup>2</sup> )	Braced span beam	Braced span column	طبقه
P10X0.375	۶/۵۰	W12X35	W14X53	۴
P14X0.500	۱۶/۱	W12X35	W14X53	۳
P16X0.625	۲۲/۶	W16X36	W14X53	۲
P16X0.625	۲۲/۶	W16X36	W14X68	۱

جدول ۳- قاب سیستم دوگانه ۴ طبقه

Diagonal BRB frame + smrf					
SMRF beam	SMRF column	BRB core area (cm <sup>2</sup> )	Braced span beam	Braced span column	طبقه
W12X35	W14X53	۶/۵۰	W12X35	W14X53	۴
W16X57	W14X53	۱۶/۱	W12X35	W14X53	۳
W16X67	W16X89	۲۲/۶	W16X36	W14X53	۲
W16X67	W16X89	۲۲/۶	W16X36	W14X68	۱

جدول ۴- قاب مهاربند شورون (V) ۹ طبقه

Inverted V braced frame				
Elastic pipe (RLBRB ONLY)	BRB core area (cm <sup>2</sup> )	Braced span beam	Braced span column	طبقه
P14X0.375	۱۲/۹	W16X57	W14X38	۹
P16X0.500	۲۲/۶	W16X57	W14X38	۸
P20X0.500	۳۲/۳	W16X77	W14X145	۷
P20X0.625	۴۱/۹	W16X77	W14X145	۶
P20X0.625	۴۵/۲	W16X89	W14X211	۵
P22X0.625	۵۱/۶	W16X89	W14X211	۴
P22X0.625	۵۱/۶	W16X89	W14X283	۳
P22X0.625	۵۴/۸	W16X100	W14X283	۲
P22X0.625	۵۴/۸	W16X100	W14X283	۱

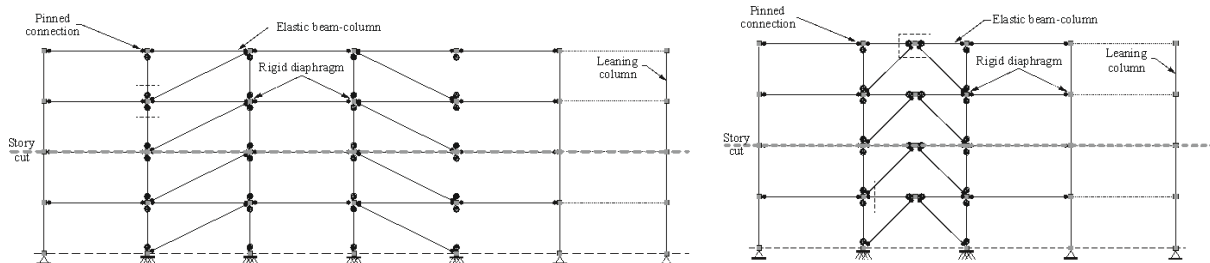


جدول ۵- قاب مهاربند قطری ۹ طبقه

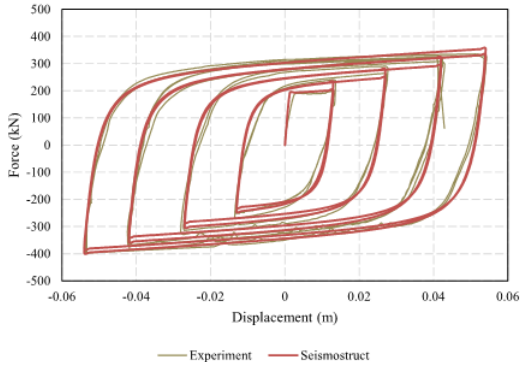
Diagonal braced frame				
Elastic pipe (RLBRB ONLY)	BRB core area (cm <sup>2</sup> )	Braced span beam	Braced span column	طبقه
P10X0.500	۹/۷۰	W12X35	W14X38	۹
P14X0.500	۱۹/۴	W12X35	W14X38	۸
P16X0.625	۲۵/۸	W12X35	W14X74	۷
P20X0.500	۳۲/۳	W16X36	W14X74	۶
P20X0.500	۳۵/۵	W16X36	W14X145	۵
P20X0.625	۳۸/۷	W16X36	W14X145	۴
P20X0.625	۴۱/۹	W16X45	W14X211	۳
P20X0.625	۴۵/۲	W16X45	W14X211	۲
P20X0.625	۴۵/۲	W16X45	W14X211	۱

برای پیش بینی رفتار غیر خطی چرخه ای قاب‌های خمشی ارائه کرده است. علت استفاده از این مدل در نظر گرفتن همزمان زوال سختی در اثر دررفت‌های بزرگ و زوال ناشی از تکرار چرخه با بازه جابجایی یکسان است. مدل ارائه شده و تعاریف نظیر آن در شکل (۱۰) نمایش داده شده است. علت استفاده از این مدل در نظر گرفتن همزمان زوال سختی در اثر دررفت‌های بزرگ و زوال ناشی از تکرار چرخه با بازه جابجایی یکسان است. مدل ارائه شده و تعاریف نظیر آن در شکل (۱۰) به تصویر کشیده شده است. پارامتر اثر غیر هندسی در نرم افزار لحاظ شده است. این پارامتر اثرات کماتش در ستون‌ها را مد نظر قرار می‌دهد. همچنین، در تیرهای گیردار، روابط مدل رفتاری ایبارا-مدینا-کراوینکلر اصلاح شده با در نظر گرفتن کماتش‌های موضعی جان و بال تیرها استخراج گردیده‌اند و استفاده از این رفتار در فنرها اثرات غیر خطی هندسی را در تیرها نیز لحاظ می‌نماید [۲۱ و ۲۲]. سایر فرضیات مدل‌سازی نظیر شرایط مرزی تیرهای دهانه مهاربندی و مدل‌سازی اجرای مرزی از تحقیقات دهقانی و ترمبلی استفاده گردید [۲۳].

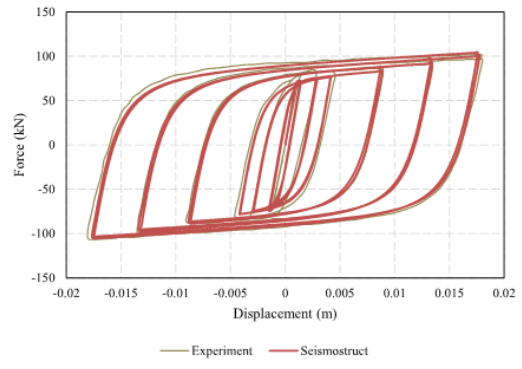
نمای شماتیک مدل‌های ایجاد شده در شکل (۷) به تصویر کشیده شده است. برای مدل‌سازی هسته مهاربند‌های کماتش تاب طول کوتاه از نتایج آزمایشگاهی **Razavi** و همکارانش (۲۰۱۴) [۱۲] و برای طول بلند از نتایج آزمایشگاهی **Eryasar** و **Topkaya** (۲۰۱۱) [۱۸]، استفاده شده است. شکل (۸) نمایانگر دقت بالای مدل‌سازی در هسته مهاربند‌ها را می‌باشد. برای مدل سازی رفتاری هسته مهاربند از روابط مدل **GMP** استفاده شده است. مدل **GMP** و تعاریف نظیر آن در شکل ۹ دیده می‌شود. اتصالات خمشی تیرهای دهانه مهاربندی و همچنین ظرفیت خمشی ستون‌ها توسط فنرها مدل گردید. مدل رفتاری ایبارا-مدینا-کراوینکلر<sup>۲</sup> اصلاح شده (**MIMK**) برای این منظور اتخاذ شد [۱۹] و برای محاسبه پارامترهای این مدل از روابط ارائه شده توسط **Lignos** و همکارانش استفاده شده است [۲۰]. این مدل با بررسی آزمایشگاهی بر روی تعداد بسیار زیادی از تیرهای با ابعاد مختلف با اتصال گیردار انجام شده که نسبت‌های پهنا به ضخامت در بال و جان و طول تیرهای مورد بررسی را در رفتار خمشی سازه مورد سنجش قرار داده و رابطه ای دقیق



شکل ۷- مدل اجزای محدود برای قابهای مهاربندی شده متشکل از المان‌های تیر-ستون و فنر، قاب شورون (بالا)، قاب قطری (پائین)

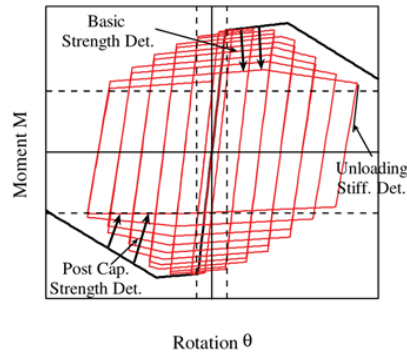
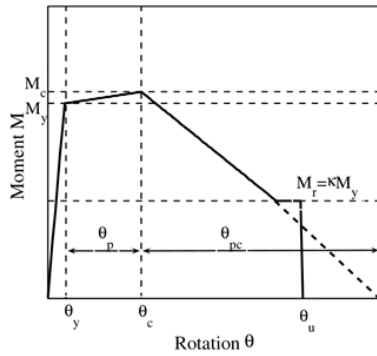


مقایسه منحنی آزمایشگاهی و عددی برای RL-BRB [۱۸]

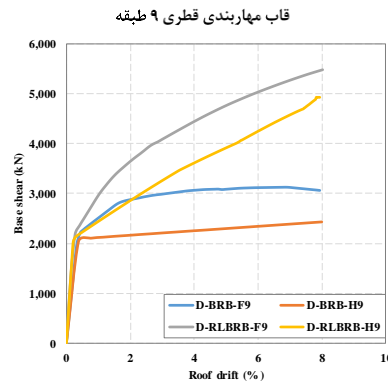
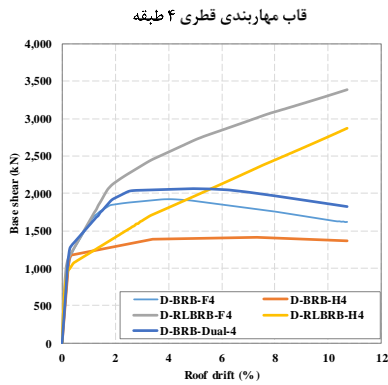
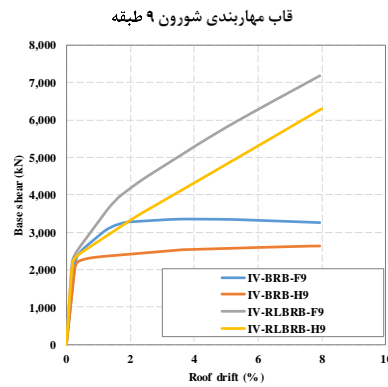
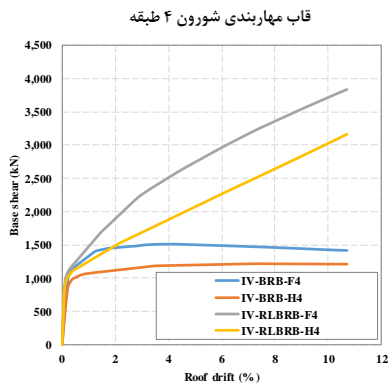


مقایسه منحنی آزمایشگاهی و عددی برای BRB [۱۹]

شکل ۸- صحت سنجی مدل‌سازی هسته‌مهاربندهای کماتاش تاپ



شکل ۹- زوال مقاومت اتصال خمشی طبق روابط ایبارا-مدینا-کراوینکلر، زوال چرخه‌ای (سمت راست)، زوال یکطرفه (سمت چپ) [۲۰]



شکل ۱۰- نمودار پوش سازه‌ها

### ۳- تحلیل‌های غیر خطی و بررسی نتایج

برای ارزیابی پاسخ سازه‌ها دو پارامتر حائز اهمیت است. پارامتر اول سختی پلاستیک سازه و پارامتر دوم که ناشی از همان سختی است، در واقع، دریف‌ها و دریف‌های پسماند در زلزله احتمالی. بدین جهت دو نوع تحلیل شامل تحلیل پوش آور و تحلیل تایرخچه زمانی صورت پذیرفت. تحلیل پوش در واقع اعمال نیرو به تمام طبقات و در هر تراز متناسب با شکل مودی و یا متناسب با توزیع جرم در ترازهای ارتفاعی (هرکدام که بحرانی‌تر است) تا رسیدن به جابجایی دریف‌ت هدف می‌باشد (در این پژوهش میزان دریف‌تی که می‌تواند موجب منفی شدن سختی سازه گردد). نمودار پوش سازه‌ها در شکل (۱۰) دیده می‌شود. با توجه به نمودار شکل (۱۰) نتایج زیر برداشت می‌شود:

- سختی پس از تسلیم مهاربندهای کمانش تاب طول کوتاه بسیار بالاتر از مهاربند طول بلند است.
- ظرفیت قاب مهاربند کمانش تاب طول کوتاه از مهاربند طول بلند به طور مشهودی بیشتر است.
- سختی پس از تسلیم مهاربند طول بلند با تیر دهانه مهاربندی مفصلی اندک است.
- با وجود ظرفیت بیشتر قابهای با تیرهای گیردار، افت مقاومت در این قاب‌ها زودتر شروع می‌شود. این امر به دلیل ورود تقریباً همزمان اثر قاب و مهاربندی و وارد شدن ستون‌ها به محدوده پلاستیک می‌باشد.
- افت مقاومت به دلیل اثر دو عامل P-Delta و مدل رفتاری تنزل مقاومت برای تیر و ستون است.
- افزایش ظرفیت قاب دوگانه نسبت به سیستم مهاربندی با تیر گیردار چندان قابل توجه نیست.

برای تحلیل تاریخچه زمانی از ۲۲ رکورد توصیه شده توسط FEMA P695 استفاده شد. لیست رکوردها مشخصات آنها در جدول (۶) ارائه شده است. نمودار طیف رکوردهای زلزله در شکل (۱۱) به نمایش در آمده است. میانگین ماکزیمم دریف‌ت و دریف‌ت پس‌ماند طبقات به ازای ۲۲ شتاب نگاشت برای هر قاب ترسیم شده است. نمودارهای دریف‌ت و دریف‌ت پس‌ماند در شکل (۱۲) و (۱۳) نمایش داده شده است. با توجه خروجی تحلیل‌ها نتایج زیر از استنتاج می‌شود:

- ۱- سیستم مهاربند کمانش تاب طول کوتاه با تیر دهانه مهاربندی گیردار کمترین دریف‌ت را از خود نشان داده است.
- ۲- سیستم مهاربند کمانش تاب طول کوتاه با تیر دهانه مهاربندی مفصلی تفاوت چندان با مهاربند طول بلند با تیر

دهانه مهاربندی گیردار ندارد.

۳- تمامی سیستم‌ها دارای پایداری مناسبی بوده و ستون هیچ یک از سازه‌ها به حد تسلیم نرسید.

۴- سیستم مهاربند کمانش تاب طول کوتاه با تیر دهانه مهاربندی گیردار کمترین دریف‌ت پسماند را از خود نشان داده است.

۵- سیستم مهاربند کمانش تاب طول کوتاه با تیر دهانه مهاربندی مفصلی به همراه مهاربند طول بلند با تیر دهانه مهاربندی گیردار تقریباً دارای دریف‌ت پسماند مساوی هستند. همچنین با توجه به برداشت محققین این پژوهش برای سیستم‌های مورد بررسی این یک رتبه بندی ا منظر شاخصه‌های تاب‌آوری انجام پذیرفته که در جدول (۷) دیده می‌شود.

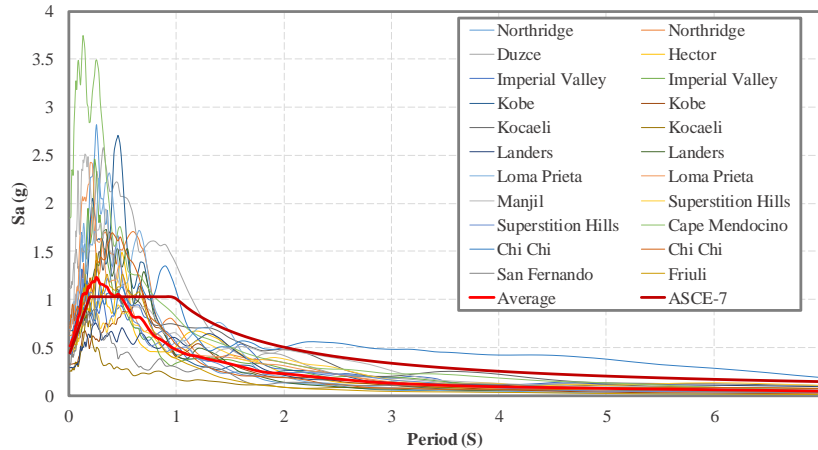
جدول ۶- مشخصات رکوردهای زلزله اعمالی به سازه‌ها

Recording station	زلزله	سال	M	Rec. ID
Beverly Hills-Mulhol	Northridge	۱۹۹۴	۶/۷	۱
Canyon-WLC	Northridge	۱۹۹۴	۶/۷	۲
Bolu	Duzce	۱۹۹۹	۷/۱	۳
Hector	Hector	۱۹۹۹	۷/۱	۴
Delta	Imperial	۱۹۷۹	۶/۵	۵
El Centro Array	Imperial	۱۹۷۹	۶/۵	۶
Nishi-Akash	Kobe	۱۹۹۵	۶/۹	۷
Shin-Osaka	Kobe	۱۹۹۵	۶/۹	۸
Duzce	Kocaeli	۱۹۹۹	۷/۵	۹
Arcelik	Kocaeli	۱۹۹۹	۷/۵	۱۰
Yermo Fire Sta	Landers	۱۹۹۲	۷/۳	۱۱
Coolwater	Landers	۱۹۹۲	۷/۳	۱۲
Capitola	Loma	۱۹۸۹	۶/۹	۱۳
Gilroy Array	Loma	۱۹۸۹	۶/۹	۱۴
Abbar	Manji;	۱۹۹۰	۷/۴	۱۵
El Centro Imp.	Superstition	۱۹۸۷	۶/۵	۱۶
Poe Road (temp)	Superstition	۱۹۸۷	۶/۵	۱۷
Rio Dell Overpass	Cape Mendocino	۱۹۹۲	۷	۱۸
CHY101	Chi-Chi	۱۹۹۹	۷/۶	۱۹
TCU045	Chi-Chi	۱۹۹۹	۷/۶	۲۰
LA-Hollywood Stor	San Fernando	۱۹۷۱	۶/۶	۲۱
Tolmezzo	Friuli	۱۹۷۶	۶/۵	۲۲

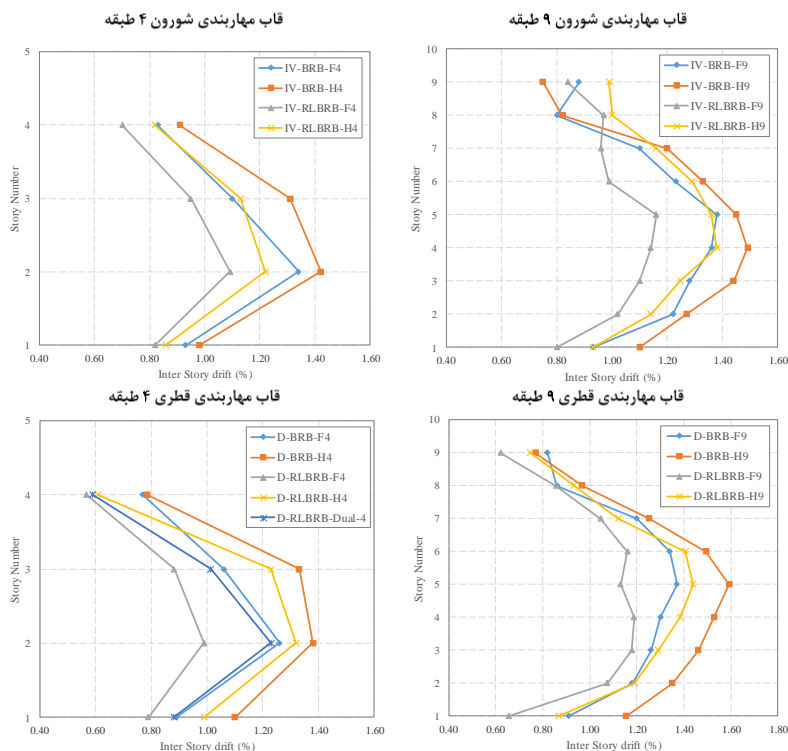


تحلیل‌ها بدست آمده است. بدیهی است مهاربند طول کوتاه به دلیل کوچک بودن قطعه مهاربند که هزینه بالایی نسبت سایر المان‌های سازه‌ای دارد از نظر هزینه رتبه برتر را دارد و به دلیل کوچک بودن سهولت اجرای بهتری نیز دارد، لذا در برترین رتبه کلی گرفته است.

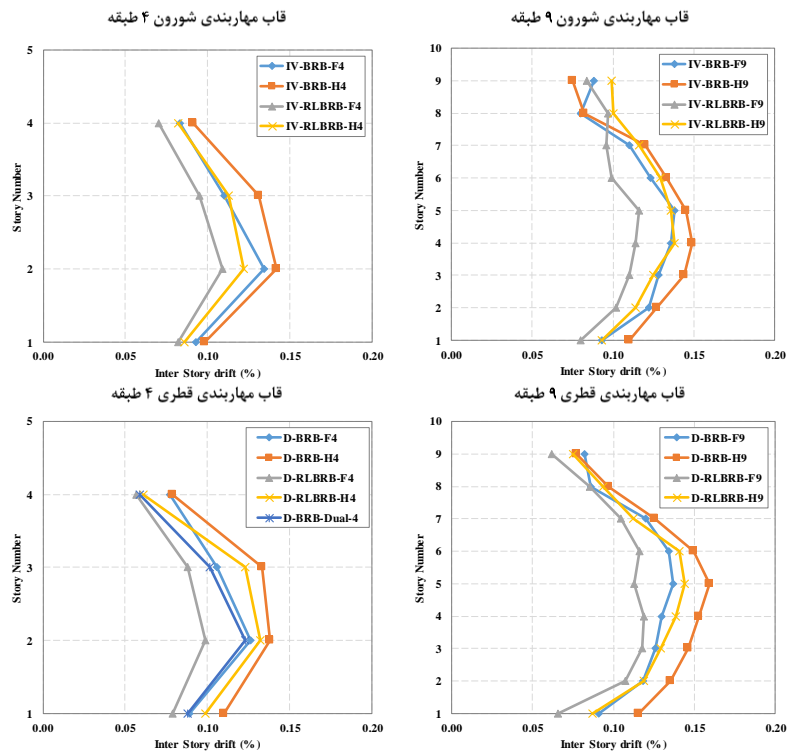
در جدول (۷) بر اساس عملکرد سازه‌های مورد بررسی به هر یک رتبه‌ای تخصیص داده شده است. به این شکل که سیستمی که بیشترین ظرفیت نیرویی را داشته است، رتبه یک را به خود اختصاص داده است. به همین ترتیب برای کمترین دررفت و بیشترین سهولت تعویض پذیری و هزینه کمتر نیز رتبه ای تخصیص داده شده است. نتایج نیرویی و دررفت از



شکل ۱۱- طیف رکوردهای زلزله اعمالی به سازه‌ها



شکل ۱۲- میانگین ماکزیمم دررفت سازه‌ها



شکل ۱۳- میانگین ماکزیمم دریفت پس ماند سازه‌ها

جدول ۷- رتبه بندی از منظر شاخصه‌های تاب‌آوری

مهاربند	ظرفیت نهایی نیروی برشی	دریفته‌های بیشینه و پسماند	تعویض پذیری	هزینه	عملکرد نهایی
مهاربند طول بلند با تیر دهانه مهاربندی مفصلی	۳	۳	۲	۲	۴
مهاربند طول بلند با تیر دهانه مهاربندی گیردار	۲	۲	۴	۴	۳
مهاربند طول کوتاه با تیر دهانه مهاربندی مفصلی	۲	۲	۱	۱	۱
مهاربند طول کوتاه با تیر دهانه مهاربندی گیردار	۱	۱	۳	۳	۲

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش ارتقاء تاب‌آوری سازه‌های دارای مهاربند کم‌مانش تاب با استفاده از کوتاه کردن قطعه مهاربند مورد بررسی قرار گرفت. ۱۷ قاب با مهاربند کم‌مانش تاب معمولی و مهاربند طول کوتاه و با در نظر گرفتن گیرداری اتصال دهانه مهاربندی تحت تحلیل پوش و تاریخچه زمانی مورد بررسی شدند. نتایج زیر از رفتار سازه بدست آمده است:

- ۱- اثرات کاهش مقاومت ناشی از P-Delta و تنزل مقاومت خمشی تیر یا ستون در سازه‌های با BRB بلند مشهود است.
- ۲- کاهش طول مهاربندی کم‌مانش تاب به خوبی سختی و مقاومت پس از تسلیم فراهم می‌کند، بدون آنکه هزینه اضافی و تعمیر پذیری سخت تری را تحمیل نماید. این

سیستم گزینه بسیار مناسبی برای ارتقای تاب‌آوری قاب‌های مهاربندی کم‌مانش تاب می‌باشد.

۳- افزودن قاب خمشی به بهبود رفتار قاب مهاربندی کم‌مانش تاب می‌انجامد، اما مستلزم هزینه بیشتر است و علاوه بر این تعمیر آن پس از زلزله چندان آسان نیست.

۴- طراحی تیر دهانه مهاربندی به صورت خمشی و برای نیروی مورد انتظار به خوبی طراحی قاب با سیستم دوگانه برای تحمل ۲۵٪ برش پایه عمل نموده و در کاهش دریفت-ها و افزایش سختی پلاستیک موفق بوده است.

۵- سیستم مهاربندی کم‌مانش تاب در زلزله‌های DBE مشکل پایداری ندارند.

در این پژوهش ارتقاء تاب‌آوری سازه‌های دارای مهاربند



- the 8<sup>th</sup> U.S. National Conference on Earthquake Engineering April 18-22, San Francisco, California, USA, paper NO. 1909.
- [9] Mehdipanah, A., Mirghaderi, S.R. and Razavi S.A. (2014), "Seismic performance of stiffness-based designed buckling-restrained braced frame and special moment-resisting frame dual systems", *Structure and Infrastructure Engineering*, Vol. 12, pp. 918-935.
- [10] Razavi, S.A., Shemshadian, M.E., Mirghaderi, S.R. and Ahleghagh S. (2011), "Seismic design of buckling restrained braced frames with reduced core length", *Proceedings of Structural Engineering World Congress, Italy*.
- [11] Zaruma, S. and Fahnestock, L.A. (2018), "Assessment of design parameters influencing seismic collapse performance of buckling-restrained braced frames", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 113, pp. 35-46.
- [12] Razavi, S.A., Mirghaderi, S.R. and Hosseini A. (2014), "Experimental and numerical developing of reduced length buck-ling-restrained braces", *Engineering Structures*, Vol. 77, pp. 144-160.
- [13] Fanaie, N. and Afsar Dizaj, E. (2014), "Response modification factor of the frames braced with reduced yielding segment BRB", *Structural Engineering and Mechanics*, Vol. 50, pp. 1-17.
- [14] ASCE/SEI 7-16. (2016), "Minimum design loads for buildings and other structures", American Society of Civil Engineers, Reston, VA, USA.
- [15] ANSI/AISC, 360-16. (2016), "Specification for structural steel buildings", American Institute of Steel Construction, American Institute of Steel Construction, Chicago, Illinois.
- [16] ANSI/AISC 341-16. (2016), "Seismic Provisions for Structural Steel Buildings", American Institute of Steel Construction, Chicago, Illinois.
- [17] Seismosoft SeismoStruct. (2018), "Earthquake Engineering Solutions user manual".
- [18] Eryasar, M.E. and Topkaya, C. (2009), "Experimental and numerical investigation of buckling restrained braces", Master of Science in Civil Engineering Dissertation, Ankara: Middle East Technical University, Turkey.
- [19] Ibarra, L.F., Medina, R.A. and Krawinkler, H. (2005), "Hysteretic models that incorporate strength and stiffness deterioration", *Earthquake engineering & structural dynamics*, Vol. 34, pp. 1489-1511.
- [20] Lignos, D.G. and Krawinkler, H. (2011), "Deterioration Modeling of Steel Components in Support of Col-lapse Prediction of Steel Moment Frames under Earthquake Loading", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 137, pp. 1291-1302.
- [21] Inamasu, H., Kanvinde, M.A. and Lignos, D.G. (2019), "Seismic Stability of Wide-Flange Steel Columns Interacting with Embedded Column Base Connections," *Journal of Structural Engineering*, Vol. 145, pp. 04019151.
- [22] Kolwankar, S., Kanvinde, A., Kenawy, M., Lignos, D. and Kunnath, S. (2018), "Simulating local buckling-induced softening in steel members using an equivalent nonlocal material model in displacement-based fiber elements," *Journal of Structural Engineering*, Vol. 144, pp. 04018192-1.
- [23] Dehghani, M. and Tremblay R. (2017), "Design and full-scale experimental evaluation of a seismically endurant steel buckling-restrained brace system," *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol. 47, pp.105-129.
- کمانش مورد بررسی قرار گرفت، رفتار سازه در راستای بهبود تاب‌آوری سازه و کاهش هزینه و افزایش سهولت اجرا مناسب ارزیابی گردید، اما همچنان مواردی جهت بررسی بیشتر توصیه می‌گردد. پیشنهاد جهت تحقیقات آتی:
- لحاظ نمودن مدل ۳ بعدی برای لحاظ نمودن اثرات ستونهای ثقلی و همچنین پیچش میان طبقات در تحلیل‌های غیر خطی
  - مدل رفتاری تنزل مقاومت خمشی جدید برای لحاظ نمودن اندرکنش نیروی محوری و لنگر و لحاظ نمودن آن در تحلیل‌ها
  - لازمه مداخله عملکرد قاب در دهانه مهاربندی، برآورد دقیق تر تقاضای نیروی محوری و لنگر در ستون مهاربندی و همچنین وجود ورق اتصال مهاربندی قوی می‌باشد که طراحی ظرفیتی و همچنین قابل تعویض بودن آن نیازمند تحقیقات بیشتر است.

#### ۵- مراجع

- [1] Watanabe, A., Hitomi, Y., Saeki, E., Wada, A. and Fujimoto, M. (1998), "Properties of brace encased in buckling-restraining concrete and steel tube", *Proceedings of the 9<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering*. Tokyo-Kyoto, Japan.
- [2] Uang, C.M., Nakashima, M., Bozorgnia, Y. and Vitelmo, V.B. (2004), "Earthquake Engineering: From Engineering Seismology to Performance-Based Engineering", First edition, Chapter 16.
- [3] Wada, A., Connor, J., Kawai, H., Iwata, M. and Watanabe, A. (1992), "Damage tolerant structures", *Proceedings of the 5th U.S.-Japan Workshop on the Improvement of Structural Design and Construction Practices*. San Diego, CA, Applied Technology Council, ATC-15-4, pp. 27-39.
- [4] Brown, A.P., Aiken, I.D. and Jafarazadeh, F.J. (2001), "Buckling restrained braces provide the key to the seismic retrofit of the Wallace F. Bennett Federal Building", *Modern Steel Construction*, Vol. 8, pp.123-124.
- [5] Tremblay, R., Degrange, G. and Blouin, J. (1999), "Seismic rehabilitation of a four-story building with a stiffened bracing system", *Proceedings of the 8<sup>th</sup> Canadian Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, Canada, pp. 549-554.
- [6] Tremblay, R., Poncet, L., Bolduc, P., Neville, R. and DeVall, R. (2004), "Testing and design of buckling restrained braces for Canadian application", *Proceedings of the 13<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, B.C., Canada, Paper no. 2893.
- [7] Fahnestock, L.A., Sause, R. and Ricles, J.M. (2007), "Seismic response and performance of buckling-restrained braced frames", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 133, pp. 1195-1204.
- [8] Mezrouq, S. and Tremblay, R. (2006), "Seismic design of dual concentrically braced steel frames for stable seismic performance for multi-story buildings", *Proceedings of*

#### پی نوشت

- <sup>1</sup> Gusset plate
- <sup>2</sup> Giuffre-Menegotto-Pinto
- <sup>3</sup> Modified-Ibarra-Medina-Krawinkler (MIMK)

