

## بررسی پارامترهای پاسخ لرزه ای ساختار مهاربندی معمولی و BRB در ساختمان‌های میان مرتبه فولادی

حدیثه علی کاهی

دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

[alikahi.h@gmail.com](mailto:alikahi.h@gmail.com)

افشین مشکوه الدینی

استادیار، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

[meshkat@khu.ac.ir](mailto:meshkat@khu.ac.ir)

عبدالرضا سروقد مقدم

دانشیار، پژوهشگاه لرزه‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران

[moghadam@iiees.ac.ir](mailto:moghadam@iiees.ac.ir)

**کلید واژه‌ها:** ساختمان میان مرتبه، مهاربند کماتش ناپذیر، زمین لرزه حوزه نزدیک، آرایش مهاربندها، طراحی لرزه ای

### چکیده

در این مطالعه، عملکرد لرزه ای یک ساختمان میان مرتبه فولادی با سیستم مهاربندی قطری در سه نوع معمولی، معمولی سخت شده و BRB ارزیابی شده و نتایج تحلیلی مربوطه با یکدیگر مقایسه شده اند. یک ساختمان ۱۰ طبقه با سیستم مهاربندی قطری و اتصالات ساده تیر به ستون، برای سه مدل مطالعاتی با ساختار سازه‌ای مذکور طراحی شده است. یک سری تحلیل تاریخچه زمانی دینامیکی غیرخطی برای تمامی مدل‌ها، تحت مجموعه‌ای متشکل از ۷ رکورد قدرتمند حوزه نزدیک انجام شده است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که کاربرد سیستم مهاربندی BRB با آرایش منفرد قطری برای ساختمانهای میان مرتبه فولادی مناسب است. این سیستم، عملکرد لرزه ای بهتری در مقایسه با ساختار مقاوم سازه ای با مهاربندی معمولی و معمولی سخت شده دارد.

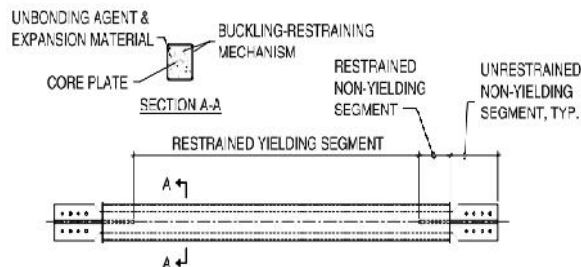
### مقدمه

دو سیستم سازه‌ای فولادی قاب خمشی و قاب مهاربندی شده همگرا دارای بیشترین کاربرد در طراحی و ساخت ساختار مقاوم ساختمان‌های طبقاتی می‌باشند. همچنین باید اذعان نمود که بویژه پس از زلزله‌های بزرگ امپریال ۱۹۷۹، لوماپریتا ۱۹۸۹ و نیز نورت‌ریج ۱۹۹۴، خرابی‌ها و خسارت‌های گسترده‌ای در ساختمان‌های فولادی با دو سیستم سازه‌ای فوق گزارش گردیده است. اثرات ناپایداری دینامیکی در رفتار لرزه‌ای ستون‌های قاب‌های خمشی و نیز رفتار چرخه‌ای دینامیکی غیرخطی مهاربندهای همگرا به دلیل بروز کماتش المان قطری در فشار، بصورت بسیار نامنظم و همراه با روند گسترده و سریع زوال مقاومت پدیدار می‌گردد.

مشخصات رفتار قاب‌های مهاربندی شده با پیکربندی همگرا به دلیل کماتش المان‌های مهاربند تحت نیروهای دینامیکی فشاری بزرگ هنگام جنبش‌های نیرومند زمین در حین وقوع زلزله، دچار نوسانات شدید و ناهماهنگ می‌گردد. همچنین المان‌های مهاربند نیز دارای رفتار هیستریزس نامتقارن و افت زیاد مقاومت تحت بارهای سیکلیک خواهند شد. بدین ترتیب سازه قابلیت اتلاف و جذب انرژی را از دست داده و احتمال وقوع انهدام کلی بالا خواهد رفت. چنانچه کماتش المان‌های مهاربند به واسطه عاملی محدود گردد، امکان ایجاد شرایط تسلیم مهاربند در فشار فراهم می‌گردد و در نتیجه ویژگی‌های رفتار هیستریزس به نسبت متقارن و یکسان در کشش و فشار پدیدار خواهد شد. المان مهاربند کماتش ناپذیر در مقایسه با بادبندهای هم محور معمولی از مقاومت فشاری بالاتری برخوردار است. این نوع مهاربند که به واسطه اعمال شرایطی در مقابل کماتش محافظت شده است.



سازه المان مهاربند کماتش‌ناپذیر از یک هسته فلزی و یک مکانیسم خارجی برای محدود کردن کماتش هسته در فشار تشکیل می‌گردد. المان‌های مهاربند کماتش‌ناپذیر به گونه‌ای ساخته می‌شوند که با محدود کردن کماتش هسته در فشار، روند جاری شدن مصالح همانند همین رفتار درکشش باشد و بدین ترتیب توانایی جذب انرژی آنها بطور چشم‌گیری افزایش خواهد یافت. همچنین برای حذف کماتش الاستیک نیز از ایده تکیه‌گاه جانبی سراسری استفاده شده است. بر این اساس به وسیله مکانیسمی طول کماتش المان مهاربند کاهش یافته و بار بحرانی فشاری افزایش می‌یابد. بطور کلی می‌توان پنج قسمت مجزا را برای هر BRB مشخص کرد: (شکل ۱)

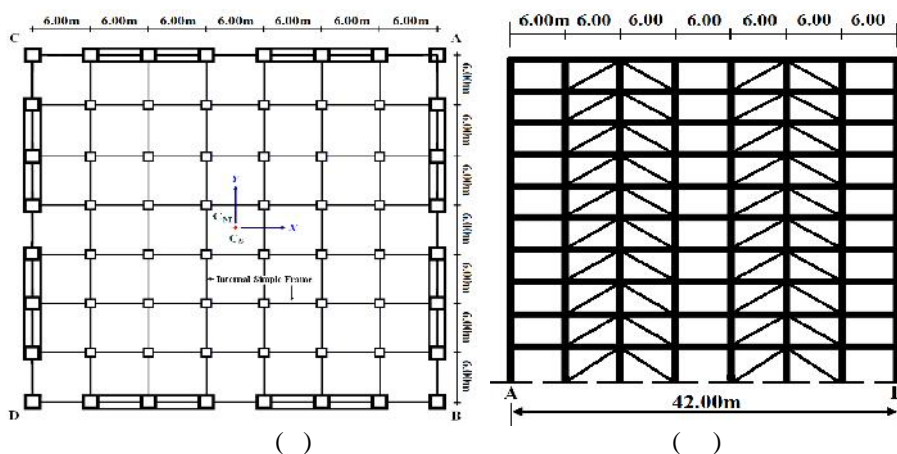


شکل ۱: اجزای مختلف المان BRB (Sabelli 2003)

- ( الف ) قطعه جاری شونده محصور شده : این بخش فقط وظیفه تحمل نیروی محوری را به عهده دارد. استفاده از فولاد نرمه در ساخت آن توصیه شده است. طول این ناحیه 70% طول کل مهاربند می‌باشد.
- ( ب ) بخش الاستیک محصور شده : این ناحیه بوسیله غلاف و ملات احاطه می‌شود.
- ( پ ) بخش الاستیک محصور نشده : این بخش در ادامه قسمت الاستیک محصور شده است و مهاربند را به قسمت اتصال وصل می‌کند.
- ( ت ) مصالح جدا کننده و انبساطی : کارایی این مواد لغزنده در حذف یا به حداقل رساندن انتقال نیروی برشی بین هسته جاری شونده و مکانیزم محدود کردن کماتش (ملات و غلاف) است.
- ( ث ) مکانیزم محصور شدگی : این مکانیزم به طور معمول ترکیبی از ملات و غلاف فولادی است .

## پارامترهای طراحی سازه‌های مطالعاتی

سازه ده طبقه مورد بررسی در این پژوهش دارای هفت دهانه ۶ متری در دو جهت بوده و ارتفاع طبقات نیز ۳.۵ متر در نظر گرفته شده است. مطابق شکل (۲) آرایش مهاربندهای قطری به صورت متقارن در پلان سازه بوده و در قاب‌های پیرامونی واقع شده اند.



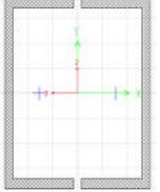
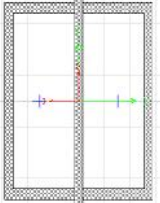
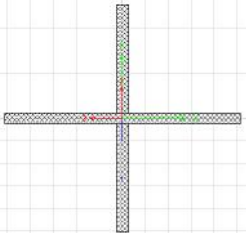
شکل ۲: (الف) آرایش مهاربندی، (ب) پلان سازه مورد مطالعه  $C_M$ : مرکز جرم،  $C_S$ : مرکز برش

در مطالعه حاضر، مدل‌ها به صورت سه بعدی در نرم افزار SAP2000 تحلیل شده‌اند. همچنین از آنجایی که اتصالات تیر به ستون در تمامی مدل‌های مطالعاتی بصورت مفصل می‌باشد، پارامتر سختی متناظر با پانل‌های ترکیبی المان‌های ستون و مهاربندی با توجه به روند طراحی به روش تنش مجاز محاسبه شده است. مقاطع المان‌های تیر و ستون و مهاربند هر سه مدل مطالعاتی با ساختار هندسی شکل (۲)، بر مبنای آیین نامه فولاد ایران (مبحث دهم مقررات ملی ساختمان ایران) و به روش تنش مجاز (ASD) طراحی شده‌اند. صورت نیمرخ‌ها در جداول ۱ و ۲ خلاصه شده است.

جدول ۱: مشخصات مقاطع تیرها و ستون های مدل های سه گانه مطالعاتی

طبقه	ستون های کناری مهاربندها	ستون های داخلی پلان	ستون های وسط دهانه مهاربندی و چهار گوشه پلان	کلیه تیرها
1,2	BOX45x45x2.5 cm	BOX30x30x2.0	BOX30x30x2.0	IPE200
3,4	BOX40x40x2.5	BOX30x30x2.0	BOX30x30x2.0	IPE200
5,6	BOX30x30x2.5	BOX25x25x1.5	BOX22x22x1.0	IPE200
7,8	BOX30x30x2.5	BOX22x22x1.0	BOX22x22x1.0	IPE200
9,10	BOX25x25x1.5	BOX16x16x1.0	BOX16x16x1.0	IPE200

جدول ۲: مشخصات مقاطع مهاربندهای مدل های سه گانه مطالعاتی

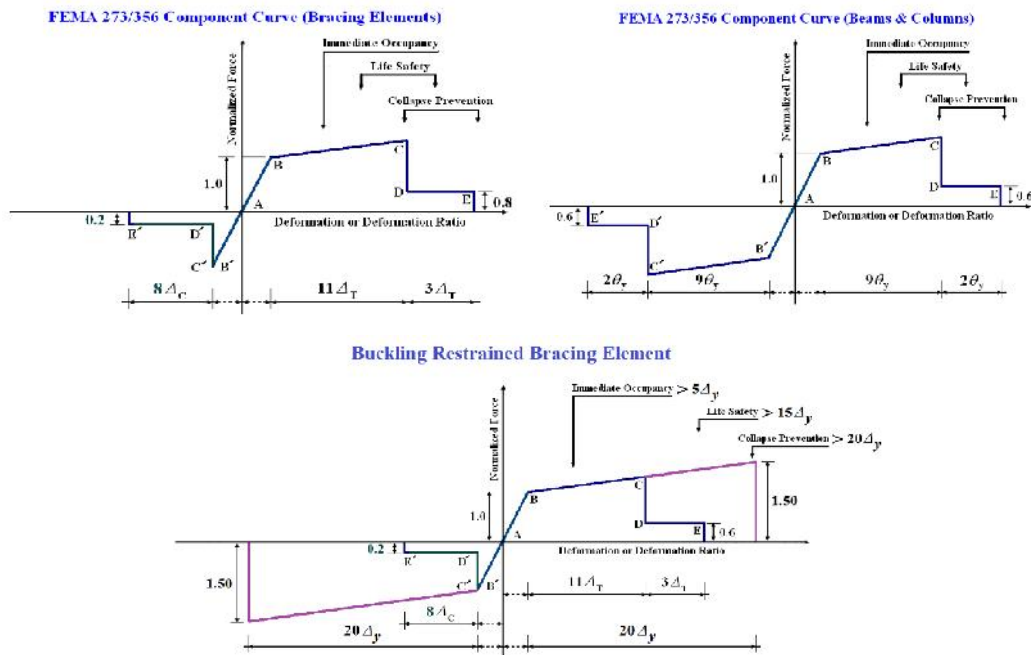
شماره مدل	نوع سیستم مهاربند	طبقه	مقطع مهاربند	شکل مقطع مهاربند
1	Regular Diagonal Bracing System	1-4	2UNP320	
		5-7	2UNP300	
		8-10	2UNP240	
2	Stiffened Diagonal Bracing System	1-4	2UNP320+PL15	
		5-7	2UNP300+PL15	
		8-10	2UNP240+PL10	
3	BRB Diagonal Bracing System	1-3	2PL250x30(+ Shaped)	
		4-8	2PL250x25 (+ Shaped)	
		9,10	2PL200x20 (+ Shaped)	

مقاطع حاصل از طراحی برای مهاربندهای BRB و معمولی، بر اساس محدود کردن نسبت تنش ناشی از نیروی محوری ایجاد شده به مقاومت محوری آنها به عدد ۱ می باشد. ضریب رفتار برای سازه با مهاربندی کمانش ناپذیر برابر با ۷ در نظر گرفته شده است. نتایج مطالعات پیشین نشان می دهد که لحاظ کردن ضریب رفتار بین ۶ تا ۸ برای این سیستم مقاوم نیز صورت گرفته و تغییرات مذکور، تاثیر چندانی بر نتایج طراحی و تحلیل نداشته است (Sabelli 2003). رفتار غیرخطی تمامی اعضا سازه های مطالعاتی با اختصاص دادن مفاصل پلاستیک بر طبق گزارش FEMA356 به صورت متمرکز در قسمتی از المان که بیشترین پتانسیل تشکیل مفصل را دارد، تعریف شده است (شکل ۳).

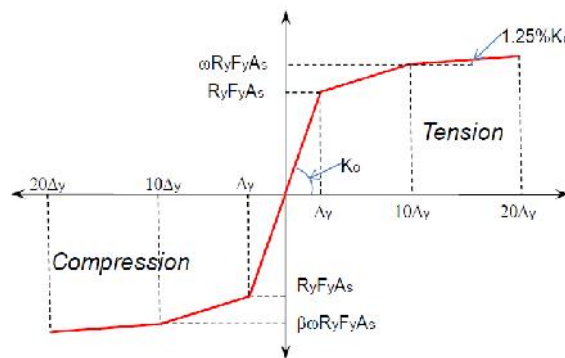
مفاصل پلاستیک تعریف شده برای ستون ها در فاصله  $0.05h$  (ارتفاع ستون) از دو انتهای آن قرار داده شده اند. با توجه به اینکه تیرها دو سر مفصل بوده و ممان ماکزیمم آن در وسط دهانه اتفاق می افتد، مفصل پلاستیک تیرها در همان محل اختصاص داده شده است. مفصل پلاستیک مهاربندهای کمانش ناپذیر، از نوع ترکیبی فشاری-کششی و در وسط طول آن قرار داده شده است. در واقع اندرزش نیروی محوری-تغییرمکان المان های BRB با اختصاص این نوع مفصل پلاستیک تعریف می گردد. طبق مطالعات پیشین آزمایشگاهی در مهاربندهای کمانش ناپذیر هیچگونه زوال سختی و مقاومت رخ نمی دهد (شکل ۴) (Moehle 2011).

ضریب اضافه مقاومت فشاری مهاربندهای BRB یا همان پارامتر  $\beta$  برابر با ۱.۱ فرض می شود و مفهوم آن است که مقاومت این مهاربندها در حالت فشاری، ۱۰ درصد بیشتر از حالت کششی می باشد. طبق آزمایش های انجام شده، المان های BRB قابلیت شکل پذیری بیش از ۲۰ برابر تغییر شکل تسلیم فولاد مورد استفاده را دارند و این معیار نیز در تعریف مفصل پلاستیک این مهاربندها به کار برده شد. طول قسمت هسته جاری شونده مهاربند BRB برابر با ۷۰ درصد طول کل آن فرض گردید. همچنین برای مهاربندهای معمولی علاوه بر اختصاص مفصل پلاستیک فشاری در دو سر المان، یک مفصل فشاری-کششی نیز در وسط طول آن نیز تعریف شده و بدین ترتیب قابلیت وقوع کمانش احتمالی این مهاربندها نیز لحاظ گردیده است (Moehle 2011).





شکل ۳ - ساختار رفتار غیرخطی المان‌ها مطابق FEMA356 (بالا: سمت راست: رفتار غیرخطی المان‌های تیر و ستون، سمت چپ: رفتار غیرخطی المان مهاربند کماتش پذیر، پایین: رفتار غیرخطی المان مهاربند کماتش ناپذیر)



شکل ۴ - منحنی رفتار المان‌های مهاربند کماتش ناپذیر

## رکوردهای انتخابی

شکل (۵) نمایش دهنده تاریخچه زمانی سرعت زمین متناظر با هر دو مولفه شتاب موازی و عمود نسبت به صفحه شکست گسل در رکوردهای اصلی دو زلزله بزرگ بم ۲۰۰۳ و نیز طیس ۱۹۷۸ می‌باشد. پالس‌های پدانه و بلند مدت سرعت در شکل (۵) بوضوح ملاحظه می‌گردند. نتایج مطالعات لرزه‌شناسی صورت گرفته بروی رکوردهای نیرومند حوزه نزدیک، بیان‌گر آشکار شدن ساختارهای پالس‌گونه در رکورد شتاب و نیز تاریخچه زمانی سرعت زمین است. مشخصات فیزیکی ارتعاشات نیرومند زمین در دو راستای افقی و عمودی نسبت به صفحه شکست گسل، یکسان نیست و در بسیاری از رکوردهای حوزه نزدیک، شتاب زمین در راستای عمود بر صفحه شکست گسل (مولفه TR) به نسبت نیرومندتر از مولفه شتاب موازی با صفحه گسیختگی (مولفه LN) است. رکوردهای پر قدرت حوزه نزدیک دارای دانسیته ویژه انرژی زیاد بوده و این انرژی جنبشی نیز به مانند یک حرکت ضربه‌ای بر سیستم سازه‌ای ساختمان وارد می‌شود. شایان ذکر است که سازه‌های مطالعاتی بر اساس استاندارد ۲۸۰۰ و آیین نامه فولاد ایران طراحی شده‌اند و رکوردهای حوزه نزدیک انتخاب شده نیز به طیف استاندارد ۲۸۰۰ همراه با فرض زمین نوع ۲ مقیاس گردیده‌اند (جدول‌های ۴ و ۵).

## نتایج تحلیل مودال

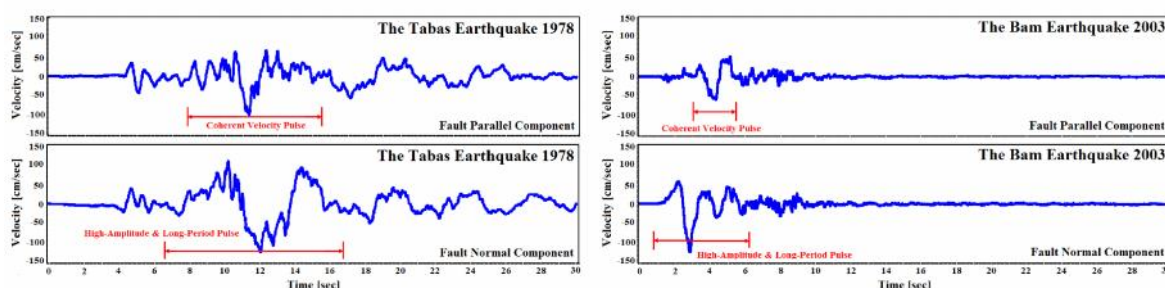
پریود اصلی مدل‌های مورد مطالعه با انجام آنالیز مودال در جدول زیر آورده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، پریود سازه با مهاربندی کماتش ناپذیر بطور نسبی برابر با پریود سازه با مهاربندی معمولی است. باید افزود که اگر مهاربندهای معمولی با بخش‌های سخت‌کننده تقویت شوند، بسته به میزان افزایش سختی المان‌های مهاربند، کاهش پریود سازه بوقوع خواهد پیوست.

جدول ۳: پیروود اصلی مدل های سه گانه مطالعاتی

مدل مطالعاتی	T1 (sec)
سازه با مهاربندی معمولی	1.26
سازه با مهاربندی معمولی سخت شده	1.16
سازه با مهاربندی کماتش ناپذیر	1.26

### تحلیل تاریخیچه زمانی غیرخطی

تحلیل دینامیکی غیرخطی تحت اثر ۷ رکورد قدرتمند حوزه نزدیک مقیاس شده به طیف استاندارد ۲۸۰۰ برای سه مدل تحلیلی مورد مطالعه انجام گرفته است. مهم ترین مشخصات فیزیکی و لرزه شناسی رکوردهای انتخابی همراه با ضرایب مقیاس در جدول های ۴ و ۵ آورده شده اند. شایان ذکر است که تاریخیچه زمانی شتاب و سرعت رکوردهای حوزه نزدیک انتخابی دارای پالس های پیوسته و بلند مدت سرعت همراه با اسپایک های پر دامنه شتاب و نیز جهت پذیری پیش رونده می باشند.



شکل ۵ - تاریخیچه زمانی سرعت هر دو مولفه افقی رکوردهای بم و طبس حاوی پالس های پر دامنه سرعت

جدول ۴: مشخصات رکوردهای انتخابی

Ground Motion	Component	Duration (sec)	PGA (g)	PGV (cm/s)	PGD (cm)	Magnitude $M_w$	PGV/PGA (sec)	PGD/PGV (sec)
Bam 2003 (Bam - 1.0km)	LN	30	0.635	59.6	20.7	6.6	0.09	0.34
	TR		0.793	123.7	37.4		0.16	0.3
	UP		0.999	37.66	10.11		0.03	0.26
Tabas 1978 (Tabas - 3.00km)	LN	30	0.836	97.7	39.9	7.4	0.12	0.4
	TR		0.851	121.3	94.5		0.14	0.78
	UP		0.688	45.5	17		0.06	0.37
Northridge 1994 (SCS - 6.20km)	LN	30	0.897	102.23	45.28	6.7	0.12	0.44
	TR		0.612	117.47	54.16		0.19	0.46
	UP		0.586	34.59	25.63		0.06	0.74
Northridge 1994 (JFP - 6.10km)	LN	30	0.593	99.1	23.96	6.7	0.17	0.24
	TR		0.424	105.95	50.69		0.25	0.48
	UP		0.399	33.91	8.89		0.08	0.26
Northridge 1994 (RRS - 7.10km)	LN	30	0.472	72.72	19.82	6.7	0.16	0.27
	TR		0.838	166.87	29.79		0.20	0.17
	UP		0.852	51.01	11.71		0.06	0.22
Northridge 1994 (WPI - 7.10km)	LN	30	0.325	67.4	16.1	6.7	0.21	0.24
	TR		0.455	92.8	56.7		0.21	0.61
	UP		0.29	37.2	13.3		0.13	0.36
Northridge 1994 (SPV - 8.90km)	LN	30	0.939	75.95	15.12	6.7	0.08	0.20
	TR		0.752	84.47	18.70		0.112	0.22
	UP		0.467	33.04	9.36		0.07	0.28

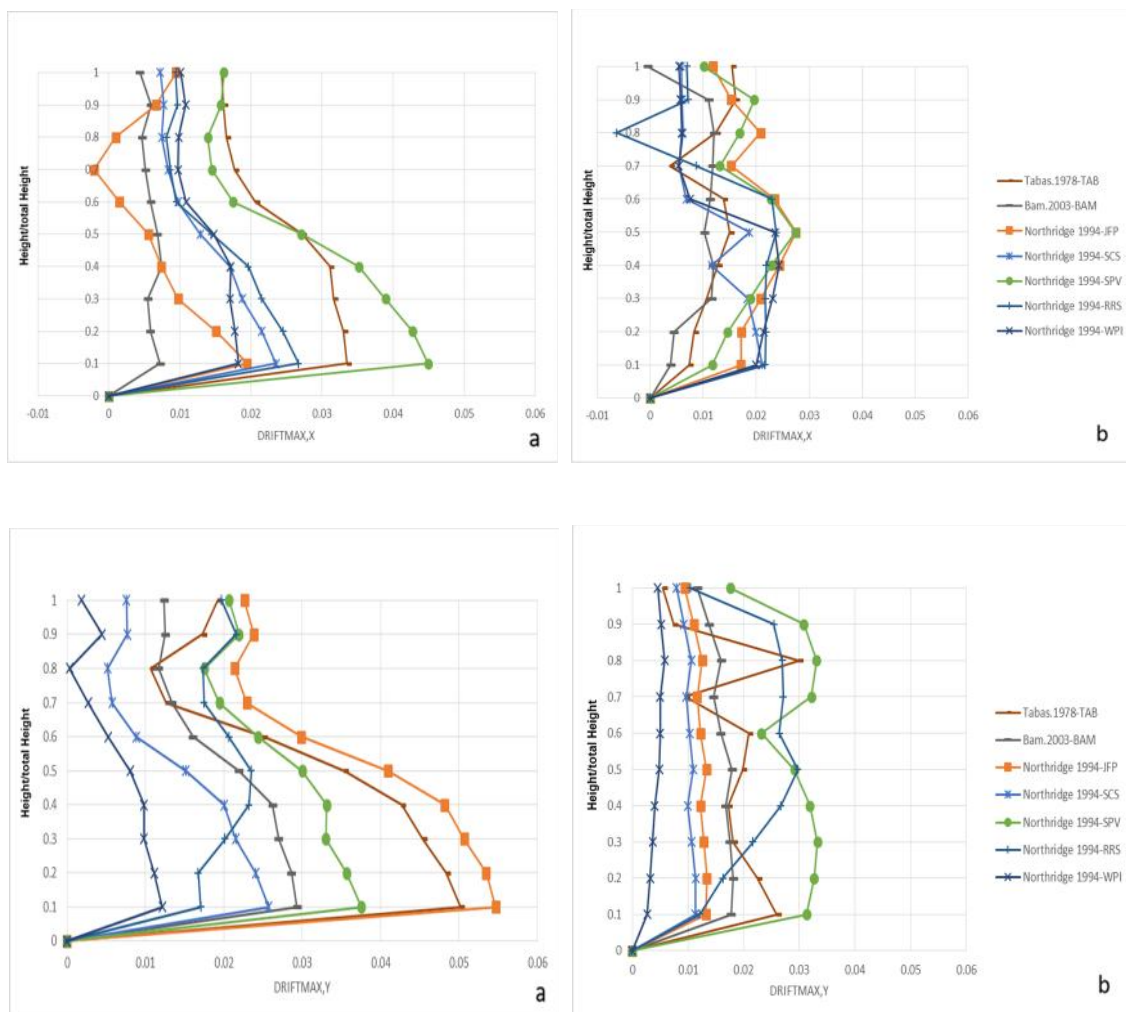


جدول ۵: ضرایب مقیاس رکوردهای انتخابی

رکورد	Tabas	Bam	JFP	WPI	SPV	SCS	RRS
ضریب مقیاس	2.15	2.42	2.03	1.87	3.53	2.26	1.56

### پاسخ جابجایی نسبی طبقه

شکل (۶) نمایش دهنده چگونگی تغییرات پارامتر دریافت ماکزیمم متناظر با ارتعاشات غیرخطی راستای X و Y پلان سازه مطالعاتی بر پایه کاربرد جداگانه ساختار مقاوم مهاربندی قطری سخت شده و نیز المانهای BRB است. بررسی مکانیزمهای مفاصل پلاستیک تشکیل شده در هر دو سیستم مقاوم یاد شده، بیانگر آرایش به نسبت متمرکز حوزههای غیرخطی در بخشهای میانی سازه است. این روند در سیستم مقاوم مهاربندهای BRB برای ترازهای پایینتر نسبت به سازه مقاوم متشکل از مهاربندهای قطری سخت شده، شکل گرفته است. همچنین با ارزیابی نمودارهای دریافت دو نوع مهاربند مذکور ملاحظه می‌گردد که شکستگیهای بیشتر و تیزتری در نمودار دریافت مهاربند معمولی همراه با سخت کننده نسبت به نوع BRB وجود دارد. این وضعیت بیانگر وجود اندرکنش شدید میان برآیندهای برش و نیروی محوری در رفتار لرزه‌ای المانهای مهاربند سخت شده است که تحت تاثیرات انتشار امواج به نسبت پراکنش زلزله متناظر با فرکانسهای بالا و نمود بیشتر اثر مودهای بالاتر در تغییرشکل سازه خواهد بود. پیک دریافت سازه در مدل با مهاربند BRB تحت رکوردهای مقیاس شده SPV، JFP، ، BAM و TABAS نسبت به مدل دارای مهاربند معمولی بطور قابل ملاحظه‌ای افزایش داشته و تحت رکوردهای مقیاس شده WPI و RRS نیز به طور متوسط 25% کاهش داشته است. نمود کلی این فرآیند تاثیر گرفته از وجود پالس‌های بلند مدت و پدمانه غیر همزمان سرعت در تاریخچه زمانی هر دو مولفه LN و TR رکوردهای انتخابی می‌باشد (شکل ۶).



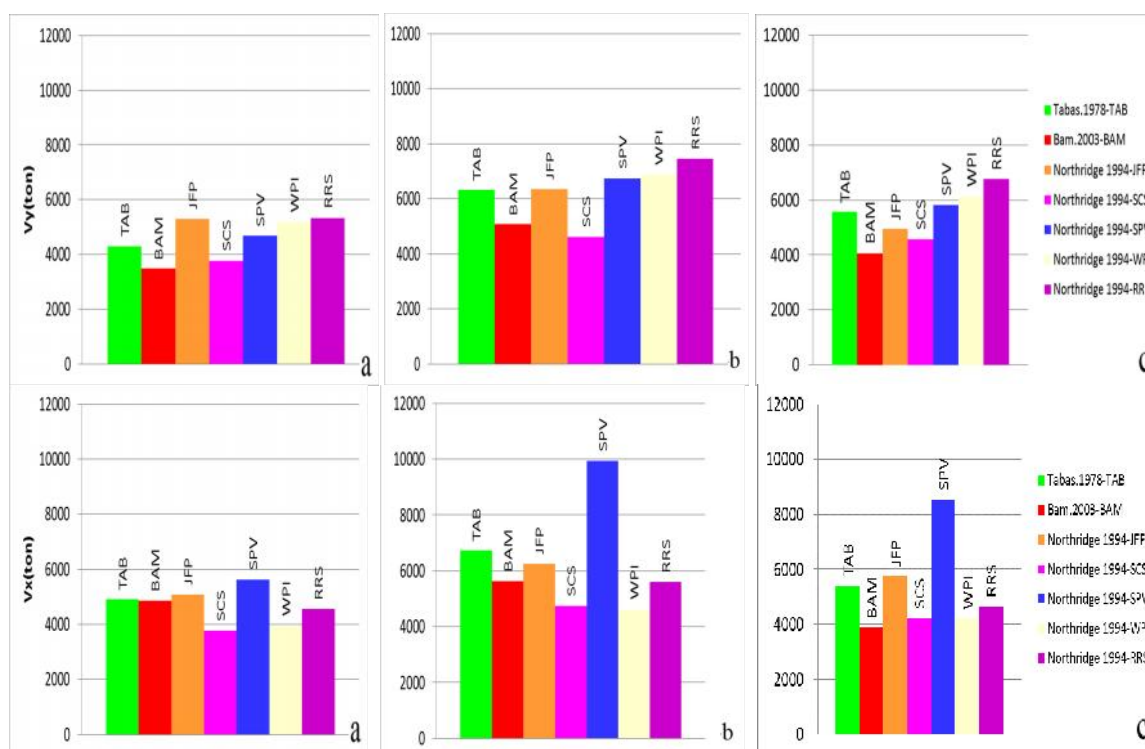
شکل ۶ - پوش بیشینه دریافت طبقه، (a) سیستم با مهاربندی BRB، (b) سیستم با مهاربندی معمولی سخت شده



همچنین با بررسی و ارزیابی تحلیلی نتایج مربوط به پارامتر دریافت مدل‌های مطالعاتی با مقدار مجاز آیین‌نامه‌ای (حد ۰.۰۲) مشاهده می‌شود که ماکزیمم دریافت مدل با ساختار مهاربندهای معمولی تحت تمامی رکوردها از حد یاد شده فراتر رفته است. این روند برای ماکزیمم دریافت مدل سازه با سیستم مهاربند معمولی دارای سخت‌کننده نیز تحت تمامی رکوردها به جز رکورد BAM از مقدار ۰.۰۲ بیشتر شده است. نتایج بیان‌گر آن است که پوش دریافت‌های ماکزیمم مدل با مهاربندی کمانش‌ناپذیر تحت تمامی رکوردها به جز رکورد WPI از مقدار مجاز آیین‌نامه فراتر رفته است.

## برش پایه سازه‌های مطالعاتی

شایان ذکر است که با هدف ایجاد قابلیت باربری جانبی بیشتر برای سیستم مهاربندی سازه‌های میان‌مرتبه و کاربرد المان‌های سخت‌کننده‌ها، ملاحظه شد که متناظر با این افزایش سختی برای المان‌های مهاربند، به طور متوسط یک افزایش ۱۰ تا ۴۰ درصد برای برش پایه نتیجه می‌گردد. این در حالی است که طبق نتایج حاصله این پژوهش در صورت استفاده از مهاربندهای کمانش‌ناپذیر، روند کاهش برش پایه به حدود ۵ تا ۳۰ درصد می‌رسد. دلیل این روند کاهش برش پایه، رفتار نرم‌تر مهاربندهای BRB نسبت به مهاربندهای معمولی است (شکل ۷).

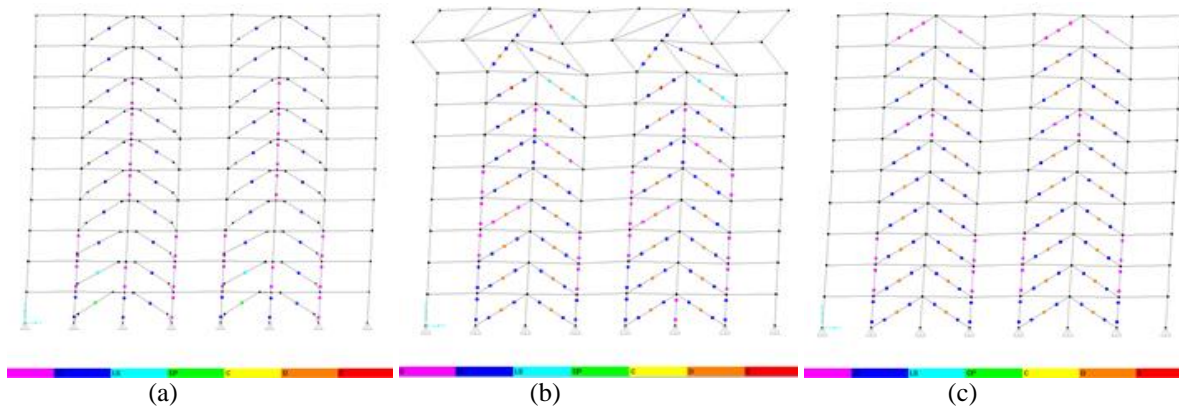


شکل ۷ - برش پایه سازه با (a) سیستم مهاربندی BRB، (b) سیستم مهاربندی معمولی سخت‌شده، (c) سیستم مهاربندی معمولی

## مکانیزم مفصل پلاستیک

با بررسی نتایج تحلیل‌های غیرخطی مدل‌های مطالعاتی می‌توان ملاحظه نمود که در سازه با مهاربند معمولی، مفصل پلاستیک P-M در سطح عملکرد بسیار بالاتری نسبت به مفصل P در مهاربندها تشکیل شده و در این مهاربندها خیلی پیشتر از اینکه تسلیم صورت پذیرد، کمانش خمشی اتفاق می‌افتد. در حالی که در سازه با مهاربند BRB، مشخصات عملکردی مفصل P تشکیل یافته نشان می‌دهد که مهاربند تسلیم شده و تا گسیختگی کامل پیش رفته و در عین حال مفصل پلاستیک تشکیل شده در المان‌های ستون در سطح عملکرد IO باقی می‌ماند. بدین لحاظ می‌توان استنباط نمود که المان BRB همانند یک فیوز سازه‌ای عمل کرده و با تسلیم و وارد شدن در محدوده غیرخطی، انرژی ناشی از نیروی زلزله را جذب می‌کند. بر این اساس هدف طراحی سازه بر مبنای فلسفه ستون قوی-مهاربند ضعیف نیز ارضاء شده است. توصیف روند مطرح شده فوق را می‌توان در شکل ۸ برای ساختار مفصل پلاستیک تشکیل شده در پانل‌های پیرامونی مدل‌های مطالعاتی تحت رکورد BAM ملاحظه نمود.





شکل ۸ - مفاصل پلاستیک المانهای سازه ای با،  
(a) سیستم مهاربندی BRB، (b) سیستم مهاربندی معمولی سخت شده، (c) سیستم مهاربندی معمولی

## نتیجه گیری

نتایج این پژوهش نشان می دهد که کاربرد سیستم مهاربندی BRB با آرایش منفرد قطری برای ساختمانهای میان مرتبه فولادی مناسب است. این سیستم دارای عملکرد لرزه ای بهتری در مقایسه با ساختار مقاوم سازه ای با مهاربندی معمولی و معمولی سخت شده می باشد. همچنین در صورت استفاده از مهاربندهای کمانش ناپذیر به عنوان سیستم مقاوم یک سازه میان مرتبه، روند کاهش برش پایه همراه با افزایش قابلیت مقاومتی سازه مشاهده خواهد شد. نتایج این پژوهش نشان می دهد که تحت اثر رکوردهای قدرتمند حوزه نزدیک، نزدیک به تمامی المانهای مهاربند معمولی دچار کمانش و ناپایداری دینامیکی می گردند. بررسی مشخصات پاسخ لرزه ای مهاربندهای کمانش ناپذیر تحت رکوردهای دارای اثرات گسلش پیشرو، نشان دهنده وقوع مود تسلیم در بخش هسته مهاربند در حالت کشش یا فشار بوده و فرایند جذب انرژی جنبشی زلزله نیز بخوبی صورت گرفته است.

## مراجع

مقررات ملی ساختمان، مبحث دهم (۱۳۸۷) طرح و اجرای ساختمان های فولادی، دفتر تدوین و ترویج مقررات ملی ساختمان

AISC (American Institute of Steel Construction), Seismic Provisions for Structural Steel Building, Chicago, AISC, 2005

Black C, Makris N, Aiken I (2002) Component Testing, Stability Analysis and Characterization of Buckling-Restrained Unbounded Brace, PEER Report 2002/08, Pacific Earthquake Engineering Center

Mingming J and Dagang Lu (2014) Experimental research and cyclic behavior of buckling-restrained braced composite frame, *Journal of Constructional Steel Research*, No. 95, pp: 90-105

Moehle J and Bozorgnia Y (2011) Case Studies of the Seismic Performance of Tall Buildings Designed by Alternative Means, PEER Report 2011/05, Pacific Earthquake Engineering Center

Sabelli R, Mahin S, Chang C (2003) Seismic demands on steel braced frame buildings with Buckling restrained Braces, *Journal of Engineering Structures (ASCE)*, No. 25, pp: 655-666

Takeuchi T and Hajjar JF (2012) Effect of local buckling core plate restraint in buckling restrained braces, *Journal of Engineering Structures (ASCE)*, No. 44, pp: 304-311

Tremblay R, Filiatrault A, Timler P and Bruneau M (1995) Performance of steel structures during the 1994 Northridge earthquake, *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 22, pp: 338-360

Tremblay R, Bolduc P, Neville R and DeVall R (2006) Seismic testing and performance of buckling restrained systems, *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 33, pp: 183-198.

Tsai KC (2011) Analytical Simulations for Shaking Table Tests of a Full Scale Buckling Restrained Braced Frame, *Journal of Procedia Engineering*, No. 14, pp: 2941-2948