



## بررسی عملکرد همزمان میراگر پال و بادبند کمانش ناپذیر در قابهای مفصلی تحت اثر زلزله‌های شدید

هاتف حسین پور<sup>1</sup>، مرتضی نقی پور<sup>2</sup>

1- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، سازه، دانشگاه علوم فنون مازندران، بابل، ایران

hatefhosseinpour@yahoo.com

2- دانشیار دانشگاه صنعتی بابل، سازه، دانشگاه صنعتی بابل، بابل، ایران

m-naghi@nit.ac.ir

### چکیده

هرچند که در طول سال‌های متمادی، روش‌های ساخت و طراحی سازه‌ها گسترش یافته است اما همچنان اثر زلزله از مهمترین مشکلات طراحی ساختمان‌ها در مناطق لرزه خیز می‌باشد. یکی از بهترین مسائلی که در مهندسی پیش می‌آید یافتن راه‌هایی برای کاهش نیروی زلزله وارد به ساختمان می‌باشد. استفاده از انواع میراگرهای فعال و غیرفعال، در صنعت ساختمانی یکی از بهترین این راهکارها می‌باشد. در این میان انتخاب میراگرهای غیرفعال به خاطر کم هزینه بودن و تکنولوژی مناسبتر نسبت به میراگرهای فعال و امکان استفاده آنها در داخل کشور، ارجحیت دارد. در این تحقیق میراگر اصطکاکی پال و مهاربند کمانش ناپذیر و ترکیبی از این دو میراگر باهم بکار گرفته شده و پارامترهای عملکرد لرزاهای: تغییر مکان حداکثر، تغییر مکان نسبی و برش پایه حداکثر با تحلیل تاریخیچه زمانی غیرخطی با هفت شتابنگاشت مورد مقایسه قرار گرفت است. براساس این مطالعات، پیکربندی جدیدی برای کنترل جابجای و کنترل تغییر مکان نسبی ارائه شد.

**واژه‌های کلیدی:** مهاربند کمانش ناپذیر، میراگر اصطکاکی پال، تحلیل دینامیکی غیر خطی،

### 1. مقدمه

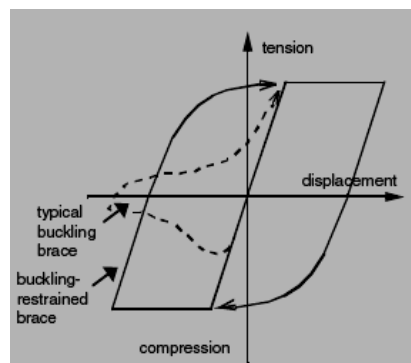
در روش‌های مرسوم، ساختمان با استفاده از ترکیبی از سختی، قابلیت شکل پذیری و همچنین استهلاک انرژی در برابر زلزله از خود مقاومت نشان می‌دهد. مقدار میرایی در این قبیل ساختمان‌ها بسیار کم می‌باشد از این رو انرژی مستهلک شده در محدوده رفتار الاستیک سازه ناچیز می‌باشد. در هنگام زلزله‌های قوی این ساختمان‌ها بعد از محدوده الاستیک تغییر مکان‌های زیادی می‌یابند و فقط به واسطه چگونگی قابلیت تغییر مکان غیرالاستیک خود، پایدار باقی می‌مانند، این تغییر مکان غیرالاستیک موجب به وجود آمدن مفاصل پلاستیک به صورت موضعی در نقاطی از سازه می‌گردند که خود باعث افزایش شکل پذیری و همچنین افزایش استهلاک انرژی می‌گردد. در نتیجه مقدار زیادی از انرژی زلزله به واسطه تخریب‌های موضعی در سیستم مقاوم جانبی سازه مستهلک می‌گردد.

[1].

در حین وقوع زلزله انرژی قابل ملاحظه‌ای به ساختمان وارد می‌شود. اگر بتوان با استفاده از وسایلی که به سازه اضافه می‌شوند، انرژی ورودی به سازه را کنترل نمود، پاسخ سازه و خرابی‌های ایجاد شده تا حدی زیادی تقلیل می‌یابد. بدین منظور می‌توان از تکنولوژی‌های جدید، میراگرهای اصطکاکی و مهارندهای کماتش ناپذیر استفاده نمود.

## 2. مهارند کماتش ناپذیر (BRBF)

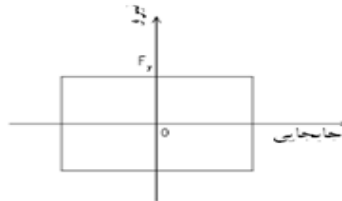
مهارند کماتش ناپذیر در اواسط دهه 80 میلادی اختراع شد و در نیمه‌های دهه 80 مورد تست واقع شد و در دهه 90 بخاطر عملکرد مناسب در ژاپن توسعه داده شد. این تکنولوژی در سال 1998 به آمریکا انتقال یافت و بعد از تست و شبیه‌سازی در سال 1999 و اطمینان از عملکرد مناسب در سال 2000 پروژه‌های مهمی با این سیستم انجام گرفت [2]. مهارند کماتش ناپذیر سیستمی مقاوم در برابر نیروهای جانبی، در ساختمان‌های که در مناطق لرزه‌خیزی بالا قرار گرفته‌اند استفاده می‌شود. ویژگی‌های اصلی مهارند کماتش ناپذیر (BRBF) افزایش پتانسیل اتلاف انرژی، شکل پذیری بسیار خوب، و رفتار هیستریزس متقارن در برابر کشش و فشار است [3]. طول هسته مهارند کماتش ناپذیر تقریباً 60 الی 70 درصد طول کل مهارند است [4,5]. نیروی محوری در سیستم BRBF اصولاً توسط هسته مرکزی تحمل می‌شود، هسته مهارند از پهلوها توسط ملات احاطه شده و از کماتش در برابر نیروهای محوری جلوگیری می‌کند. توانای هسته فولادی در تسلیم شدن در کشش و فشار، موجب افزایش ظرفیت اتلاف انرژی در مقایسه با سیستم CBF می‌باشد [6]. مطالعات اخیر آزمایشگاهی و تحلیلی [7,8] نشان می‌دهد که BRBF می‌تواند به مشکلات مهارندهای CBF از جمله: کاهش ناگهانی مقاومت، سختی، کاهش ظرفیت اتلاف انرژی و حد شکل پذیری غلبه کند. همچنین سیستم BRBF نیاز به سطح مقطع کمتری نسبت به سایر سیستم‌ها دارد [9]. شکل 1 منحنی هیستریزس مهارند کماتش ناپذیر را نشان می‌دهد.



شکل (1): مقایسه رفتار مهارند هم محور و BRBF [9]

### 3. میراگر اصطکاکی پال:

اصطکاک منبع اتلاف انرژی بسیار ارزانی است. می توان گفت تئوری طراحی لرزه‌های سازه‌های قابی مجهز به میراگرهای اصطکاکی توسط پال و همکاران آغاز شد [10]. میراگرهای اصطکاکی را بعد زلزله می‌توان به راحتی تنظیم کرد. همچنین این میراگرها معمولاً نیاز به تعویض نخواهند داشت. به دلیل مزایای فوق استفاده از میراگرهای اصطکاکی در حال گسترش هستند. نحوه عمل کردن این میراگر به این صورت می‌باشد که یک قسمت به صورت ثابت قرار گرفته و قسمت دیگر به صورت دینامیکی بر روی دیگر آن می‌لغزد. لغزش روی داده در سطح مشخصی از نیرو اتفاق افتاده و بر اساس قانون اصطکاک کلمب حرکت می‌کند، تا سطح مشخصی از نیرو هیچ حرکتی روی نمی‌دهد، اما بعد از این سطح لغزش و حرکت آغاز می‌شود که در شکل 2 نمایش داده شده است [11].



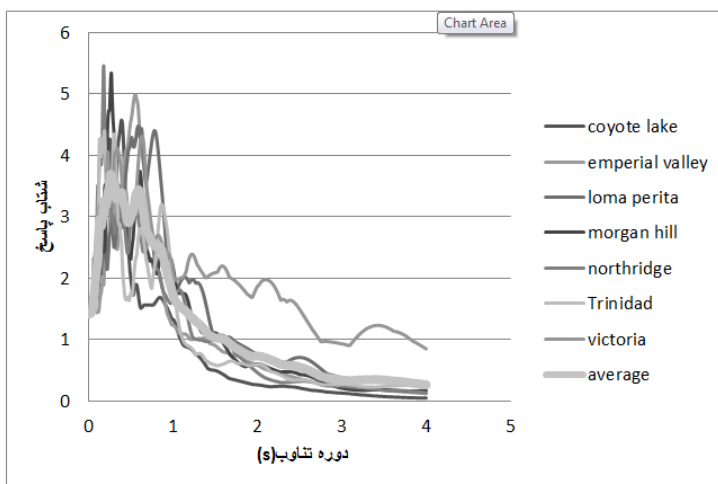
شکل (2): حلقه هیستریزس میراگر اصطکاکی پال [11]

### 4. انتخاب شتاب نگاشت‌ها

در این تحقیق از هفت شتاب نگاشت افقی زلزله به منظور تحلیل دینامیکی استفاده شده است. مشخصات رکودهای انتخابی در جدول 1 آمده است که برمبنای زلزله دور ازگسل می‌باشد. در قاب‌های دوبعدی رکورد انتخاب به نحوی مقیاس می‌شوند که در فاصله  $0.2T$  تا  $1.5T$  (T زمان تناوب اصلی سازه) کمتر از 1.4 برابر طیف طرح استاندارد منطقه مورد بررسی نباشد [12]. در شکل 3 طیف ترکیبی هفت شتاب زوج شتاب نگاشت به همراه طیف میانگین آن برای نسبت میرای 5٪ آمده است.

جدول (1): مشخصات زلزله های انتخابی

شماره	سال وقوع	نام شتابنگاشت	شدت	ایستگاه	پیشینه شتاب حرکت زمین (PGA)
1	1979	کویوت لیک	5.74	هالز ولی	0.039
2	1979	امپریال والی	6.53	کوآ چلا کانال	0.115
3	1989	لوما پریتا	7	هالز ولی	0.134
4	1984	مورگان هیل	6.19	ایپا ایی ها یوارد	0.0406
5	1980	ترینیداد	7.2	ریودل اور پس	0.061
6	1994	نورثریج	6.69	لا فرینک رد	0.231
7	1980	ویکتوریا	6.33	چیپو آهوآ	0.15



شکل (3): طیف ترکیب هفت زوج شتاب نگاشت به همراه طیف میانگین آن

## 5. شرح مدل سازی

در این تحقیق چهار نوع قاب مورد بررسی قرار گرفته که قاب اول با مهاربندهای معمولی، قاب دوم با مهاربند کمانش ناپذیر که براساس ظرفیت، طراحی شده و قاب سوم و چهارم ترکیبی از مهاربند کمانش ناپذیر و میراگر پال استفاده شده و با تعداد طبقات 8 و 10 مورد مطالعه قرار گرفته است. که فاصله دهانه 5 متر و ارتفاع طبقات 3 متر می باشد. بارگذاری بر اساس آیین نامه 2800 وارد شده است. بار مرده طبقات  $600 \text{ kg/m}^2$  و بار زنده طبقات  $200 \text{ kg/m}^2$  می باشد. طراحی بر اساس آیین نامه فولاد ایران انجام گرفته است و فولاد استفاده شده از نوع st37 می باشد. قاب به صورت ساده طراحی شده است و پای ستون ها بصورت مفصلی می باشد. برای مقایسه بهتر، ابعاد تیر و ستون ها یکسان در نظر گرفته شده است. برای ستون ها از مقطع IPB، برای تیرها IPE و برای مهاربندها از IPE استفاده شده است. مقاطع مهاربند BRBF طراحی براساس ظرفیت انجام شده و از نوع BOX می باشد. نیروی لغزش میراگر پال برحسب درصدی از وزن ساختمان تعیین شده است. در جدول 2 مقدار نیروی لغزش آمده است. در جدول 3 و شکل 4 نحوه توزیع میراگر پال و مهاربند کمانش ناپذیر آورده شده است.

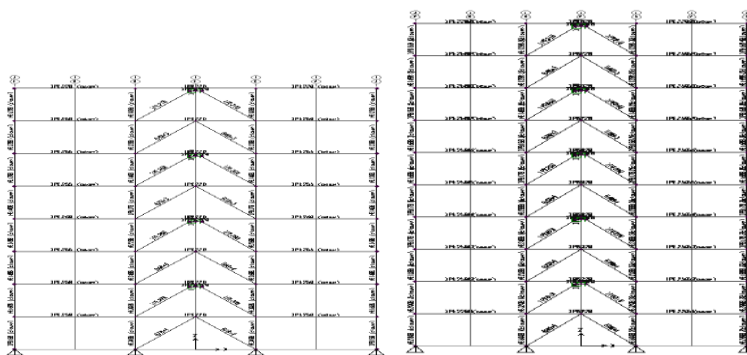
جدول (2): الف) مقدار نیروی لغزش قاب 10 طبقه ب) مقدار نیروی لغزش قاب 8 طبقه

٪ درصد وزن	(Kg) نیروی لغزش میراگر
15	3719
20	4958
30	7437
40	9916

(ب)

٪ درصد وزن	(Kg) نیروی لغزش میراگر
15	3755
20	5007
30	7511
40	10015

(الف)







(ب) قاب 8 طبقه

(الف) قاب 10 طبقه

شکل 4: نحوه توزیع میراگر پال و مهاربند کمانش ناپذیر

جدول (3): نحوه توزیع نیروی لغزش میراگر پال و مهاربند کمانش ناپذیر

	نام قاب	طبقه اول	طبقه دوم	طبقه سوم	طبقه چهارم	طبقه پنجم	طبقه ششم	طبقه هفتم	طبقه هشتم	طبقه نهم	طبقه دهم
قاب 8 طبقه	B-P-3	BRBF	پال 40%	BRBF	پال 40%	BRBF	پال 20%	BRBF	پال 20%		
	B-P-4	BRBF	پال 30%	BRBF	پال 30%	BRBF	پال 15%	BRBF	پال 15%		
قاب 10 طبقه	B-P-5	BRBF	پال 40%	BRBF	پال 40%	BRBF	پال 20%	BRBF	پال 20%	BRBF	پال 20%
	B-P-6	BRBF	پال 30%	BRBF	پال 30%	BRBF	پال 15%	BRBF	پال 15%	BRBF	پال 15%

## 6. تحلیل و ارزیابی نتایج

حال به مقایسه قاب‌های با مهاربند معمولی، با مهاربند کمانش ناپذیر و ترکیبی از میراگر پال و مهاربند کمانش ناپذیر می‌پردازیم. در جدول 4 و 5 تعداد مفاصل تشکیل شده تحت رکورد زلزله؛ کویت‌لیک، نورث‌ریچ و ویکتوریا و همچنین در شکل‌های 5 و 6 به ترتیب پاسخ‌های میانگین هفت شتابنگاشت؛ ماکزیمم جابجایی، ماکزیمم جابجایی نسبی و حداکثر برش پایه حاصل از تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی برای قاب 8 و 10 طبقه ارائه شده است.

جدول (4): تعداد مفاصل تشکیل شده تحت شتابنگاشت‌های مختلف در قاب 8 طبقه

کویت لیک							
نوع قاب	B	IO	LS	CP	C	D	E
OCBF8	0	0	0	0	0	0	0
BRBF8	0	16	0	0	0	0	0
B-P-3	0	3	0	0	0	0	0
B-P-4	1	2	0	0	0	0	0

نورثریج							
نوع قاب	B	IO	LS	CP	C	D	E
OCBF8	6	7	0	0	0	0	4
BRBF8	0	16	0	0	0	0	0
B-P-3	2	6	0	0	0	0	0
B-P-4	4	3	0	0	0	0	0

ویکتوریا							
نوع قاب	B	IO	LS	CP	C	D	E
OCBF8	7	5	0	0	0	1	7
BRBF8	3	16	0	0	0	0	0
B-P-3	0	8	0	0	0	0	0
B-P-4	3	8	0	0	0	0	0

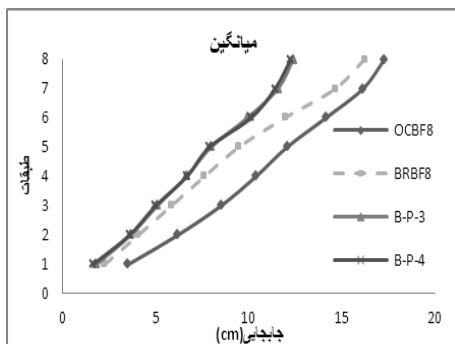
جدول (5): تعداد مفاصل تشکیل شده تحت شتابنگاشت‌های مختلف در قاب 10 طبقه

کویت لیک							
نوع قاب	B	IO	LS	CP	C	D	E
OCBF10	4	9	3	11	1	0	12
BRBF10	7	6	0	0	0	0	0
B-P-5	0	2	0	0	0	0	0
B-P-6	1	1	0	0	0	0	0

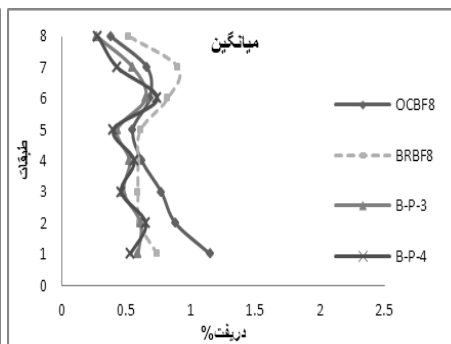
نورثریج							
نوع قاب	B	IO	LS	CP	C	D	E
OCBF10	2	0	0	0	0	0	0
BRBF10	2	18	0	0	0	0	0
B-P-5	2	0	0	0	0	0	0
B-P-6	1	0	0	0	0	0	0

ویکتوریا							
نوع قاب	B	IO	LS	CP	C	D	E
OCBF10	11	6	0	0	0	1	5
BRBF10	1	20	0	0	0	0	0
B-P-5	0	6	0	0	0	0	0
B-P-6	1	8	0	0	0	0	0

جدول 4 و 5 تعداد و نوع مفاصل تشکیل شده در سیستم‌های مختلف بارگذاری را نشان می‌دهد. LS، IO، CP و به ترتیب معرف سطوح قابلیت استفاده بی‌وقفه، ایمنی جانی و آستانه فروریزش می‌باشد. B مرحله قبل استفاده بی‌وقفه و C، D و E مراحل تا خرابی کامل را نشان می‌دهد. که در سیستم OCBF8 و OCBF10 مفاصل بیشتری از سطح عملکرد LS عبور کرده که این نشان دهنده رفتار نامناسب این سیستم در مقابل شتاب نگاشتهای مختلف می‌باشد. در سیستم‌های با مهاربند کمانش‌ناپذیر و سیستم‌های ترکیبی با میراگر پال هیچ مفصلی از سطح عملکرد LS عبور نکرده که این، بیانگر رفتار مناسب این سیستم‌ها می‌باشد. همچنین از انتقال مفاصل به تیر و ستون که باعث خرابی کلی می‌شود، جلوگیری می‌کند.

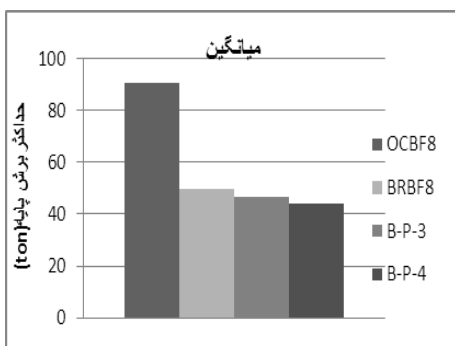


(الف)



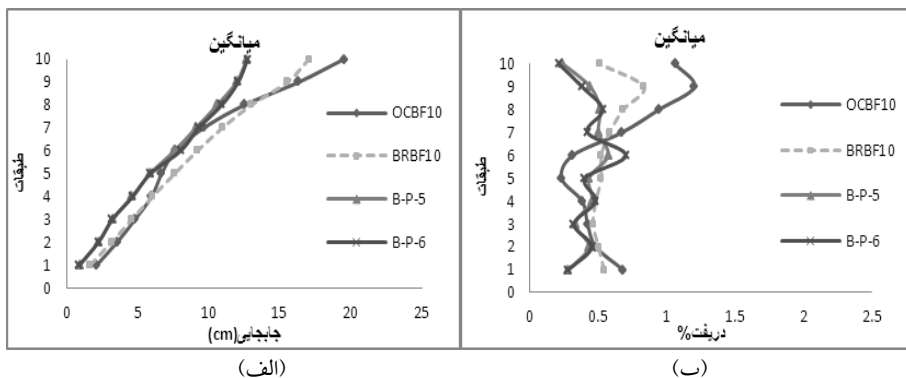
(ب)





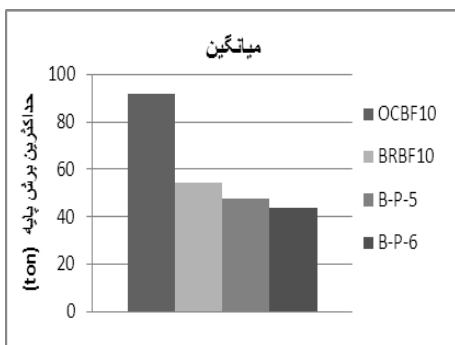
(ج)

شکل 5: الف) ماکزیمم تغییر مکان، ب) ماکزیمم تغییر مکان نسبی و ج) حداکثر برش پایه برای قابهای مختلف به همراه پاسخ میانگین هفت شتابنگاشت برای قاب 8 طبقه



(الف)

(ب)



(ج)

شکل 6: الف) ماکزیمم تغییر مکان، ب) ماکزیمم تغییر مکان نسبی و ج) حداکثر برش پایه برای قابهای مختلف به همراه پاسخ میانگین هفت شتابنگاشت برای قاب 10 طبقه

شکل 5 و 6 میانگین پاسخ میانگین هفت شتابنگاشت زلزله را نشان می‌دهد. مشخص است که قاب OCBF با عبور کردن مفصل زیادی از حد LS باعث نرمی سازه و افزایش تغییر مکان در طبقات شده است. در سیستم‌های BRBF از کماتش نامطلوب در مقایسه با مهارندهای هم مرکز اجتناب می‌شود و هسته در کشش و فشار به تسلیم می‌رسد که سبب اتلاف انرژی پایدار و بالایی در لرزه‌های سطح بالا می‌شود. یکی از معایب مهاربند کماتش ناپذیر این است که در زلزله‌های قوی ممکن است تغییر شکل‌های بزرگی اتفاق بیافتد زیرا این سیستم قابلیت بازگردانی به مرکز را ندارد و همچنین سختی پایین پس از تسلیم این مهاربندها سبب تمرکز خرابی در یک طبقه خاص می‌شود [6]. در سیستم‌های ترکیبی سعی شده است که این قسمت‌ها را بهبود بخشید، با استفاده از میراگر پال همراه با مهاربند کماتش ناپذیر و با توجه به جدول و شکل بالا، مشخص است که در هنگام وقوع زلزله میراگر پال در سطح مشخصی از نیرو لغزش می‌کند و مقداری از نیرو را جذب می‌کند و مهاربند کماتش ناپذیر هم، چون در برابر کماتش مقاوم است، کماتش نکرده و باعث افزایش سختی، همچنین کاهش تغییر مکان و برش پایه شده است.

## 7. خلاصه و نتیجه گیری

از هفت شتابنگاشت اعمال شده به سازه‌ها مشخص است که در قاب OCBF، با عبور مفاصل پلاستیک بیشتری از حد LS باعث شکل پذیری بیشتر و نرمی سازه شده و از سختی سازه کاسته شده که باعث افزایش تغییر مکان در طبقات شده است. ولی قبل از تشکیل مفاصل پلاستیک بخاطر بالا بودن سطح مقطع مهاربند و بالا بودن سختی باعث افزایش برش پایه شده است. در سیستم‌های BRBF بخاطر عملکرد مناسب در کشش و فشار و چرخه هیستریزس متقارن، انرژی ورودی به سازه را جذب کرده و از ایجاد تغییر مکان زیاد و ایجاد طبقات نرم در بعضی از طبقات جلوگیری کرده و تغییر مکان نسبی در تمام طبقات بصورت یکنواخت پخش شده است.

در سیستم‌های ترکیبی با توجه به نتایج مشخص است که با استفاده از میراگر و مهاربند کماتش ناپذیر سختی قابل توجهی به سازه اضافه شده و تغییر مکان را بصورت چشمگیری کاهش داده است. میزان کاهش تغییر مکان بام قاب B-P-3 و B-P-4 نسبت به قاب با مهاربند معمولی، تقریباً 29 درصد می‌باشد. و همچنین میزان برش پایه حداکثر به میزان 50 درصد تقریباً کاهش یافته است.

در قاب 10 طبقه هم سیستم‌های ترکیبی عملکرد مناسبی داشته و میزان تغییر مکان بام در قاب B-P-5 و B-P-6 نسبت به قاب با مهاربند معمولی تقریباً 35 درصد و میزان برش پایه حداکثر تقریباً 49 درصد کاهش داشته است.

تشکیل مفاصل در سیستم‌های ترکیبی به مراتب کمتر از قاب با مهاربندهای معمولی می‌باشد و همچنین هیچ مفصلی از سطح ایمنی جانی عبور نکرده و این نشان می‌دهد که قاب با سیستم ترکیبی در محدوده رفتار الاستیک مانده و می‌تواند در زلزله‌های شدیدتر رفتاری مطلوبتر از خود نشان دهد.

با توجه به تحلیل‌های انجام شده و نتایج حاصل برای محدوده مدل‌های مورد مطالعه، می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از میراگرهای اصطکاکی پال در سازه باعث بهبود عملکرد لرزه‌ای سازه خواهد شد.

## 8. مراجع

- [1] هاشم شریعتمدار، فرشاد صادقی. ارزیابی طیف بار لغزش و نگرشی بر طراحی سیستم میراگر اصطکاکی پال در تحلیل خطی و مقایسه آن با تحلیل دینامیکی غیر خطی، چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه تهران، اردیبهشت 1387
- [2] Eric, K., and Arup, The unbonded brace-from research to California practice, San Francisco
- [3] Lopez WA, Sabelli R. Seismic design of buckling-restrained braced frames. Steel tips. Moraga (CA): Structural Steel Educational Council; 2004.
- [4] Huang YC, Tsai KC. Experimental responses of large scale buckling restrained brace frames. Report no. CEER/R91-03. National Taiwan University; 2002 [in Chinese].
- [5] Richard RM. Braced frame steel structures 402: when and why frame action matters struct Eng 2009.
- [6] Uang CM, Nakashima M. Steel buckling-restrained braced frames. In: Earthquake engineering: recent advances and applications. Boca Raton (FL): CRC Press; 2000.
- [7] Sabelli R. Research on improving the design and analysis of earthquake resistant steel braced frames. Final report\_NEHRP Fellowship in Earthquake Hazard Reduction; 2000.
- [8] Fahnestock LA, Ricles JM, Sause R. Experimental evaluation of a large-scale buckling-restrained braced frame. J Struct Eng 2007;133(9):1205\_14.
- [9] Clark, P., Aiken, I., Kasai, K. Ko, E. and Kimura, I., (1999), "Design procedures for buldings incorporating hysteretic damping devices ", Proc. 69th Annual Convention of SEAOC, Sacramento, CA.
- [10] Pall, Avtar. Marsh, Cedric, "seismic Response of Friction Damped Braced Frames" Structural Division, Vol. 108, No. 6, June 1982 pp. 1313- 1323. (1982).
- [11] سیدقاسم جلالی، " ارزیابی پارامتریک میراگرهای اصطکاکی دورانی در قابهای فولادی غیر هم محور "، پایان نامه کارشناسی ارشد سازه به راهنمایی دکتر جواد واتقی امیری، دانشگاه مازندران، 1386.
- [12] آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله (استاندارد 2800)، ویرایش سوم، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، وزارت مسکن و شهرسازی، 1384.