

## Cyclic Behavior of Self-Centering, Eccentric Configuration, Buckling-Restrained, Braced Frame

Elnaz Zare<sup>1</sup>, Mohammad Gholami<sup>2</sup>, Shamsedin Hashemi<sup>2\*</sup>

1- Master of Science Student, Civil-Structural Engineering, Yasouj University, Yasouj, Iran

2- Assistant Professor of Civil Engineering, Department of Engineering, Yasouj University, Yasouj, Iran

### ABSTRACT

*Buckling-restrained braced frames can considerably reduce the seismic responses, because of their high energy dissipation capacity. However, they have big residual drifts subjected to great earthquakes. In this paper, buckling - restrained braced frames with eccentric configurations connected to frames with post-tension connections is studied. The results show that this system is able to decrease the residual drift. For evaluation the proposed method, 3 and 6 story frames, for different combinations of self - centering parameters are designed. Self-centering parameters are gradient of disengage connection and ratio of self - centering. Base shear used for the models are calculated using performance-based seismic design. Performance-based seismic design is obtained based on energy-work balance using pre-selected target drift and yield mechanism. Then in Abaqus software, pushover and cyclic analysis method for different combinations of self-centering parameters on the frames is done. Pushover analysis verifies the design method. Cyclic analysis show that the residual drift is decreased by adding frames with post-tension connections to a buckling – restrained braced frame with eccentric configuration. The results show that in order to reach self - centering, the ratio of base shear of the frames with post-tension connections to the total base shear is required to be more than 50%.*

### ARTICLE INFO

**Receive Date:** 19 February 2019

**Revise Date:** 25 December 2019

**Accept Date:** 22 February 2020

### Keywords:

*Buckling-restrained braced frames with eccentric configurations;  
Performance-based seismic design;  
Frame with post-tension Connections;  
Residual drift;  
Cyclic analysis*

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2020.172617.1788

\*Corresponding author: Shamsedin Hashemi

Email address: s.hashemi@yu.ac.ir

## بررسی رفتار چرخه ای قاب دارای مهاربند کمانش ناپذیر با پیکربندی خارج از مرکز در حالت برگشت پذیر

الناز زارع<sup>۱</sup>، محمد غلامی<sup>۲</sup>، شمس الدین هاشمی<sup>۳\*</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران-سازه، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران

۲- استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران

### چکیده

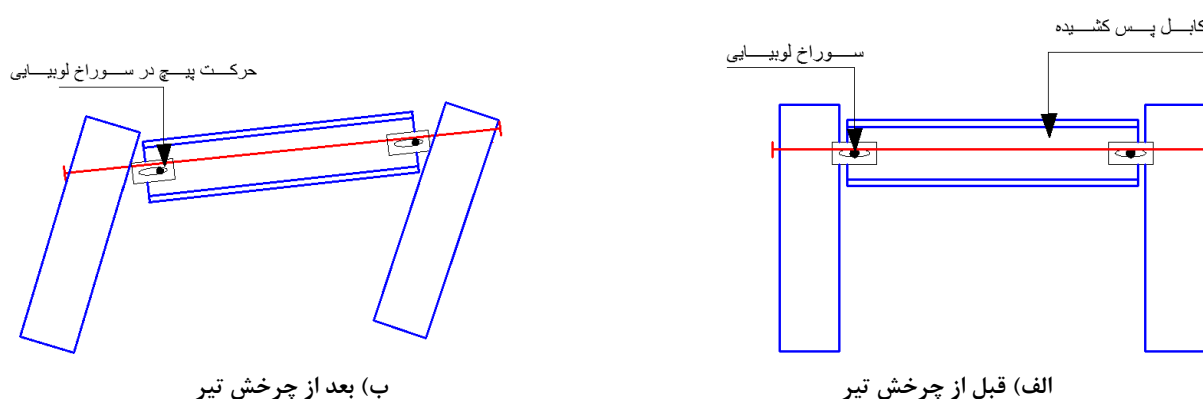
مهاربند کمانش ناپذیر با پیکربندی خارج از مرکز یک سیستم باربر جانبی است که علاوه بر اتلاف انرژی مناسب دارای مزیت معماری برای ایجاد بازشو نیز می باشد. اما مطالعات اخیر نشان داده اند که پس از وقوع زلزله، در ساختمان های دارای سیستم مهاربند کمانش ناپذیر با پیکربندی خارج از مرکز، دررفت پسماند قابل توجه خواهد بود. لذا در این مطالعه، پیشنهاد شده است با اضافه کردن قاب با اتصالات پس کشیده به قاب مهاربندی کمانش ناپذیر و ایجاد سیستم مرکب، دررفت پسماند در قاب کمانش ناپذیر کاهش داده شود. بدین منظور ابتدا با روش طراحی پلاستیک بر اساس عملکرد، برش پایه طراحی نمونه های ۳ و ۶ طبقه با پارامترهای با مقادیر مختلف نسبت برگشت پذیری و مقدار سختی قاب پس از باز شدگی اتصال، محاسبه شده اند و سپس نمونه ها با استفاده از روش ارائه شده در این تحقیق برای طراحی سیستم مرکب قاب مهاربندی کمانش ناپذیر و قاب با اتصال پس کشیده، طراحی شده اند. در ادامه پس از صحت سنجی مدل سازی با نرم افزار اجزاء محدود آباکوس، تحلیل پوش آور و چرخه ای بر روی مدل های عددی انجام شده است. با استفاده از نتایج تحلیل پوش آور، صحت روش ارائه شده برای تعیین ظرفیت سیستم مرکب، مورد تایید قرار گرفت و با استفاده از نتایج تحلیل چرخه ای مشخص گردید که می توان با اضافه کردن قاب با اتصال پس کشیده به قاب مهاربندی کمانش ناپذیر و ایجاد سیستم مرکب، دررفت پسماند در قاب کمانش ناپذیر را کاهش داد. همچنین نتایج تحلیل چرخه ای نشان داد که با افزایش نسبت سختی ثانویه به سختی اولیه سیستم ( $\alpha$ ) و یا کاهش پارامتر نسبت برگشت پذیری ( $\beta$ )، میزان دررفت پسماند، میزان اتلاف انرژی و ضریب ظرفیت اتلاف انرژی کاهش می یابد. البته برای ایجاد برگشت پذیری کامل در سیستم مرکب، باید پارامتر نسبت برگشت پذیری، کمتر از یک در نظر گرفته شود.

کلمات کلیدی: مهاربند کمانش ناپذیر با پیکربندی خارج از مرکز، قاب با اتصالات پس کشیده، روش طراحی پلاستیک بر اساس عملکرد، دررفت پسماند، تحلیل چرخه ای

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
10.22065/JSCE.2020.172617.1788	doi:	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2020.172617.1788		۱۴۰۰/۰۶/۳۰	۱۳۹۸/۱۲/۰۳	۱۳۹۸/۱۲/۰۳	۱۳۹۸/۱۰/۰۴	۱۳۹۷/۱۱/۳۰
شمس الدین هاشمی s.hashemi@yu.ac.ir					*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

## ۱- مقدمه

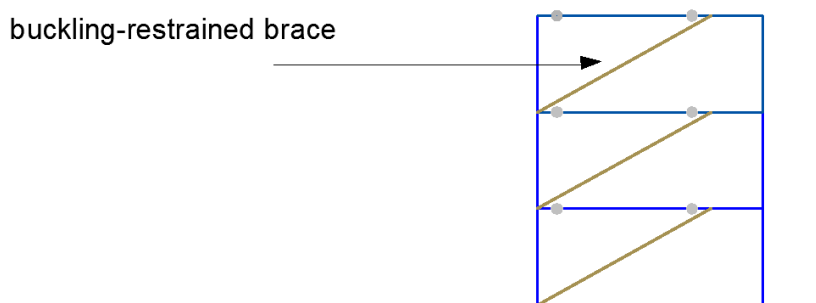
استفاده از مهاربند کمانش‌ناپذیر با توجه به ظرفیت ائتلاف انرژی بالای آن‌ها رو به افزایش می‌باشد. در زمینه‌ی بادبندهای کمانش‌ناپذیر چندین تحقیق انجام شده است [۱-۵]. در زمینه‌ی بادبند کمانش‌ناپذیر خارج از مرکز نیز تحقیقاتی توسط پرینز و همکاران [۶] صورت گرفته است. با توجه به این مطالعات مشخص شده است که هرچند بادبندهای کمانش‌ناپذیر ظرفیت شکل‌پذیری بالایی دارند، اما دریافت پسماند در این سیستم‌ها تحت زلزله‌ی طرح، قابل توجه می‌باشد و دریافت پسماند تحت تعدادی از زلزله‌های طرح حتی از ۰/۵ درصد نیز بیشتر می‌باشد. با توجه به تحقیق انجام شده توسط کرومیک و همکاران [۷]، ایواتا و همکاران [۸] و حال و همکاران [۹] اگر دریافت پسماند در یک ساختمان پس از وقوع زلزله بیشتر از ۰/۵ درصد باشد، به دلیل غیر اقتصادی بودن تعمیر، ترجیح بر آن است که ساختمان جدیدی احداث شود تا این که ساختمان آسیب دیده تعمیر گردد. در نتیجه کنترل دریافت پسماند در BRBF<sup>۱</sup> بسیار با اهمیت می‌باشد. کینگ [۱۰]، پتینگ یا [۱۱] و آریاراتاها [۱۲] بر این باور بودند که دلیل وجود دریافت پسماند قابل توجه در BRBF این است که سختی جانبی قاب پس از تسلیم شدن بادبندها که در دریافت با مقدار کم ایجاد می‌شود، ناچیز می‌باشد. در نتیجه ایشان برای کاهش دریافت پسماند در BRBF ها از سیستم دوگانه‌ی قاب خمشی و BRBF استفاده کردند. دریافت تسلیم BRBF ها در حدود ۰/۶-۰/۳ درصد می‌باشد. اما دریافت تسلیم قاب خمشی به مراتب بالاتر و در حدود ۱،۲٪ می‌باشد. لذا سختی سیستم دوگانه‌ی BRBF و قاب خمشی، پس از تسلیم شدن بادبندها ناچیز نمی‌باشد و سختی این سیستم پس از تسلیم شدن بادبندها، تا ایجاد دریافت در حدود ۱/۲٪، برابر با سختی الاستیک قاب خمشی می‌باشد. هر چند در مطالعات انجام شده توسط بعضی از محققین [۱۰-۱۲] مشخص گردید که اضافه کردن قاب خمشی به BRBF در کاهش دریافت پسماند BRBF موثر می‌باشد. اما نسبت دریافت پسماند سیستم دوگانه‌ی BRBF و قاب خمشی، تحت تعدادی از زلزله‌های طرح، بیشتر از ۰/۵٪ بود [۱۲]. به نظر نویسندگان مقاله حاضر، یکی از دلایل این موضوع این است که تحت این زلزله‌های طرح، دریافت بالای ۱/۲٪ در سیستم دوگانه ایجاد شده است و در دریافت بالای ۱/۲٪ قاب خمشی تسلیم شده و سختی سیستم ناچیز می‌گردد. با توجه به این ضعف، در تحقیق حاضر، محققین برای کنترل دریافت پسماند در سیستم بادبند کمانش‌ناپذیر، روش دیگری را مورد بررسی قرار داده‌اند. در این روش، به جای سیستم قاب خمشی، از سیستم قاب با اتصالات پس کشیده همراه با BRBF برای کنترل دریافت پسماند استفاده شده است. در قاب با اتصالات پس کشیده که در شکل ۱ نشان داده شده است اتصال جان تیر به ستون توسط پیچ‌هایی که در سوراخ‌های لوبیایی شکل قرار می‌گیرند، اجرا شده است و کابل‌ها در راستای تیر اجرا و به دو ستون طرفین تیر مهار می‌شوند. این کابل‌ها قبل از بهره برداری تحت نیروی کششی قرار می‌گیرند و در نتیجه در تیر نیروی فشار ایجاد می‌شود. لازم می‌باشد که سیستم قاب با اتصالات پس کشیده به نحوی طراحی گردد که تا دریافت حدود ۲٪ نیز الاستیک باقی بماند. بدین طریق پس از تسلیم شدن بادبندها، سختی سیستم مرکب جدید BRBF و قاب با اتصالات پس کشیده، حتی تا دریافت حدود ۲٪، ناچیز نخواهد بود.



شکل ۱: قاب با اتصالات با کابل پس کشیده [۱۳].

<sup>۱</sup>Buckling\_restrainer Brace Frame

تا جایی که نویسندگان اطلاع دارند، تاکنون عملکرد بادبند کمانش ناپذیر با خروج از مرکزیت (BRBF-E<sup>2</sup>) که در شکل ۲ نشان مشخص است، فقط توسط پرینز و همکاران [۶] مورد بررسی قرار گرفته است. با وجود اینکه این نوع بادبند از نظر معماری، به دلیل امکان ایجاد بازشوهای بزرگتر نسبت به سیستم بادبند کمانش ناپذیر هم مرکز مناسبتر می باشد، اما بدلیل عدم وجود تحقیقات کافی، کمتر مورد استفاده قرار گرفته است. لذا در تحقیق حاضر، هدف کاهش نسبت دریافت پسماند این نوع بادبند کمانش ناپذیر با متصل کردن آن به قاب با اتصالات پس کشیده می باشد.



شکل ۲: قاب مهارشده با مهاربند کمانش ناپذیر با پیکربندی خارج از مرکز [۶].

## ۲- بررسی رفتار سیستم مرکب BRBF\_E و قاب با اتصالات پس کشیده

برای درک رفتار سیستم مرکب قاب BRBF\_E و قاب با اتصالات پس کشیده، رفتار هرکدام از قابها به صورت مجزا مورد بررسی قرار می گیرد، در شکل ۳ الف- نمودار نیروی جانبی- جابه جایی قاب با اتصالات پس کشیده نشان داده شده است. در صورتیکه نیروی وارد بر قاب کم تر از  $F_d$  باشد، زاویه ی نسبی بین تیر و ستون تغییر نمی کند و سختی جانبی قاب با اتصالات پس کشیده (سختی اولیه) با سختی قاب خمشی (قاب با اتصالات گیردار) برابر است. با اعمال نیروی  $F_d$ ، زاویه ی نسبی بین تیر و ستون تغییر می کند (تیر نسبت به ستون چرخش خواهد داشت) و این سبب افزایش طول کابلها و در نتیجه ایجاد کشش در آنها خواهد شد. سختی جانبی قاب با اتصالات پس- کشیده در این مرحله سختی ثانویه ( $K_{sc-2}$ ) نسبت به سختی اولیه ( $K_{sc-1}$ ) کاهش قابل توجهی خواهد داشت. مقدار نیروی  $F_d$  برای قاب با اتصالات پس کشیده یک طبقه، با رابطه (۱) تعیین میگردد [۱۳]:

$$F_d = \frac{T_{0-top}d_{b-top} + T_{0-bot}d_{b-bot}}{h_s} \quad (1)$$

در رابطه ی بالا،  $F_d$  نیروی جانبی،  $d_{b-top}$  و  $d_{b-bot}$  به ترتیب عمق تیر بالا و پایین،  $T_{0-top}$  و  $T_{0-bot}$  به ترتیب کشش اولیه در تیر بالا و پایین و  $h_s$  ارتفاع طبقه می باشد. میزان سختی ثانویه قاب با اتصالات پس کشیده با رابطه (۲) مشخص می شود [۱۳]:

$$K_{sc-2} = \frac{E}{2} \left[ \frac{A_{c-top}d_{b-top}^2 + A_{c-bot}d_{b-bot}^2}{2L_c h_s^2} \right] \quad (2)$$

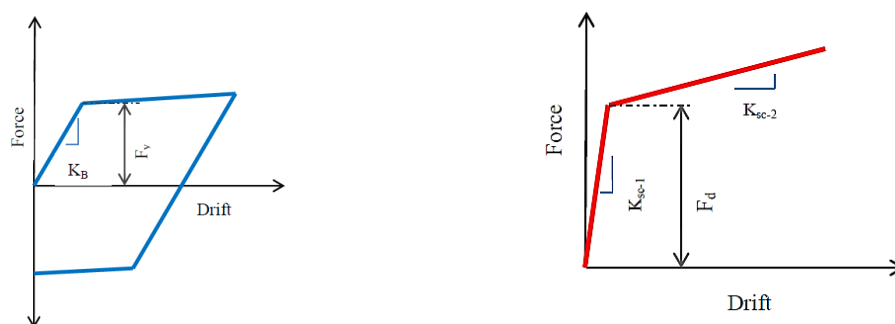
در رابطه ی (۲)،  $A_{c-top}$  و  $A_{c-bot}$  به ترتیب مساحت کابل در تیر بالا و پایین و  $L_c$  طول کابل می باشد. با توجه به اینکه طراحی برای جابه جایی ۲ درصد صورت گرفته، نیروی کابل پس از جابه جایی ۲ درصد به دست آمده است.

با فرض اینکه قاب با اتصالات پس کشیده به نحوی طراحی گردد که در مرحله ی بارگذاری، به صورت الاستیک باقی بماند، در مرحله ی باربرداری نمودار نیرو- جابه جایی قاب، دقیقاً منطبق بر نمودار در مرحله ی بارگذاری خواهد بود. یعنی قاب با اتصالات پس کشیده در برگشت همان مسیر رفت را طی خواهد کرد. بدین ترتیب قاب کاملاً برگشت پذیر خواهد بود و در نمودار هیستریزس قاب، حلقه ای ایجاد نمی شود.

<sup>2</sup>Buckling-Restrained Braced Frames with Eccentric Configurations

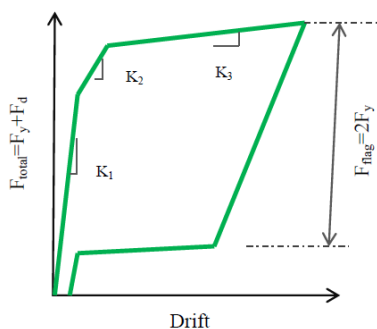
در شکل ۳ ب- نمودار نیرو-جابجایی قاب بادبندی کمانش ناپذیر نشان داده شده است. سختی اولیه قاب بادبندی ( $K_B$ ) و مقاومت تسلیم آن ( $F_y$ ) بر اساس هندسه قاب و مدول الاستیسیته فولاد، قابل محاسبه خواهد بود. سختی پس از تسلیم قاب بادبندی تقریباً برابر با صفر است، با برابری این قاب، حلقه‌های کامل و بدون پینچینگ ایجاد می‌شود.

هنگامی که دو قاب بادبندی و قاب خمشی به صورت موازی باهم ترکیب می‌شوند، نمودار نیرو-جابجایی سیستم مرکب به صورت نشان داده شده در شکل ۳ ج- خواهد شد. پاسخ سیستم با سه پارامتر سختی  $K_1, K_2, K_3$  و مقاومت سیستم مرکب ( $F_{total}$ ) و ارتفاع پرچم ( $F_{flag}$ ) مشخص شده است. سختی اولیه  $K_1$  برابر با مجموع سختی اولیه قاب با اتصالات پس کشیده و سختی اولیه قاب بادبندی است. سختی‌های  $K_2$  و  $K_3$  به ترتیب برابر با مجموع سختی ثانویه قاب با اتصالات پس کشیده و سختی اولیه قاب بادبندی و مجموع سختی ثانویه قاب با اتصالات پس کشیده و سختی پس از تسلیم قاب بادبندی می‌باشند. مقاومت تسلیم سیستم مرکب ( $F_{total}$ ) و ارتفاع پرچم ( $F_{flag}$ )، که در تصویر ۳ ج، نشان داده شده‌اند، به ترتیب با روابط (۳) و (۴) محاسبه می‌شوند.



ب: منحنی نیرو-جابجایی قاب مهاربندی شده [۶].

الف: منحنی نیرو-جابجایی قاب پس کشیده [۱۳].



ج: منحنی نیرو-جابجایی سیستم مرکب.

شکل ۳: منحنی نیرو-جابجایی در اعضای سیستم.

$$F_{total} = F_y + F_d \quad (3)$$

$$F_{flag} = 2F_y \quad (4)$$

در این روابط  $\alpha$  ضریب شیب قسمت بازشدگی اتصال برگشت پذیر است و با استفاده از رابطه‌ی (۵) به دست آمده،  $\beta$  ضریب

برگشت پذیری سیستم می‌باشد و طبق مطالعه‌ی [۱۴] با توجه به رابطه‌ی (۶) به دست آمده است.

$$\alpha = \frac{K_{SC-2}}{K_1} = \frac{K_{SC-2}}{K_B + K_{SC-1}} \quad (5)$$

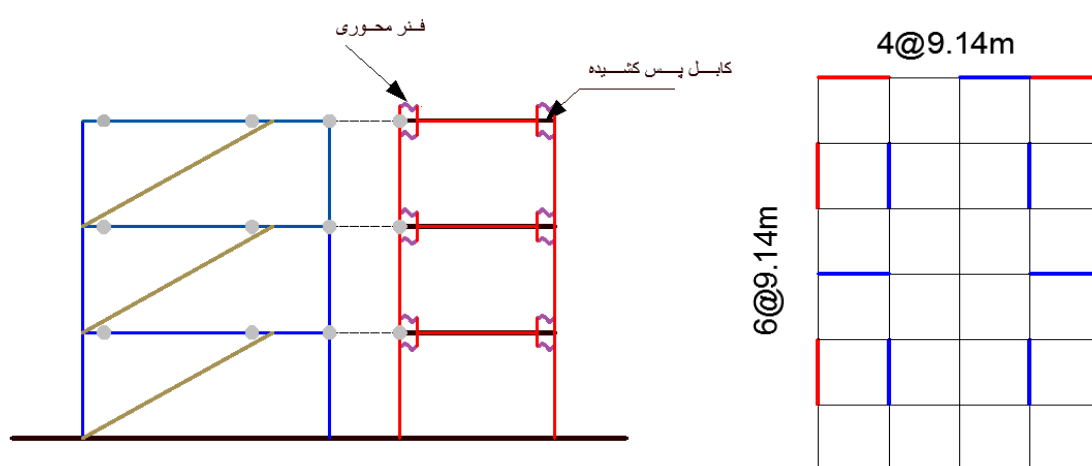
$$\beta = \frac{ZF_y}{F_d + F_y} \quad (6)$$

### ۳- طراحی نمونه‌ها

در این مطالعه، برای محاسبه‌ی برش پایه طراحی قاب مهاربند کم‌انرژی‌ناپذیر با پیکربندی خارج از مرکز متصل شده به قاب با اتصالات پس‌کشیده<sup>۳</sup> از روش طراحی پلاستیک بر اساس عملکرد (PBPD<sup>۴</sup>) که در دو دهه‌ی اخیر برای طراحی انواع سیستم‌های سازه‌ای بکار برده شده است [۱۵-۲۱]، استفاده شده است. سپس برش پایه محاسبه شده بر اساس الگوی ارائه شده توسط چو و همکاران [۲۲] بین طبقات ساختمان توزیع تعیین می‌گردد. در ادامه طبق دستورالعمل ارائه شده در بخش ۳-۲ مطالعه‌ی حاضر، اعضای ساختمان تحلیل و طراحی می‌شوند.

#### ۳-۱- مشخصات ساختمان مورد بررسی

برای اینکه بتوان نتایج استخراج شده از این مطالعه را با نتایج مطالعه‌ی پرینز و همکاران مقایسه کرد [۶]، تصمیم گرفته شد از مشخصات همان ساختمان مورد بررسی در مطالعه‌ی مذکور استفاده شود. پلان این ساختمان در شکل ۴ نشان داده شده است. در این پلان دهه‌ی قاب مهاربند، ۹،۱۴ متر، ارتفاع طبقات ۳،۹۶ متر و طول قسمت خارج از مرکز ۱،۲۲ متر است. جرم لرزه‌ای بام و طبقات به ترتیب ۱۵۲۳۵ کیلونیوتن ۱۴۰۷۸ کیلونیوتن می‌باشد. در شکل ۵ نمای قاب ۳ و ۶ طبقه نشان داده شده است. همانطور که در پلان مشخص می‌باشد، در هر راستای ساختمان، ۴ سیستم بادبندی کم‌انرژی‌ناپذیر و ۸ قاب با اتصالات پس‌کشیده وجود دارد. پس در پلان به ازای هر بادبند کم‌انرژی‌ناپذیر، یک قاب با اتصالات پس‌کشیده قرار داده شده است. توجه شود که هر چند بادبند کم‌انرژی‌ناپذیر مستقیماً به قاب با اتصالات پس‌کشیده متصل نشده است و لیکن توسط دیافراگم صلب سقف به هم متصل می‌باشند. با این شرایط ساختمان در هر راستا دارای ۴ سیستم باربری جانبی مرکب قاب بادبندی متصل به قاب با اتصالات پس‌کشیده (نشان داده شده در تصویر ۵) می‌باشد. با توجه به وجود تقارن در پلان ساختمان و در نتیجه عدم وجود پیچش، مشخصات و مقاصع هر ۴ سیستم باربری جانبی با هم مشابه می‌باشند. لذا می‌توان به جای تحلیل سه بعدی ساختمان در برابر زلزله، یکی از سیستم‌های باربری جانبی مرکب را برای یک چهارم جرم لرزه‌ای بام و طبقات طراحی کرد.



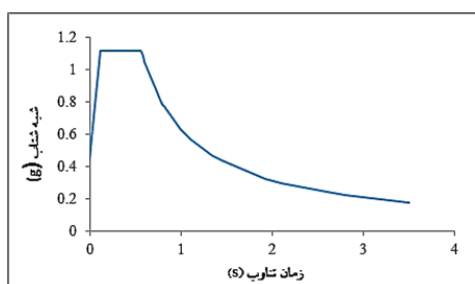
شکل ۴: پلان طبقات.

شکل ۵: نمای کلی سیستم مرکب ساختمان ۳ طبقه

<sup>۱</sup> buckling-restrained braced frames with eccentric configurations Connected to Frame With post-tension Connections

<sup>۴</sup> Performance-based plastic design

در ضمن فرض بر این است که این ساختمان در ایالت لوس آنجلس احداث شده است و مطابق با ASCE 7 طیف شتاب طرح این ایالت مطابق شکل ۶ می‌باشد. [۲۳]



شکل ۶: طیف طراحی شبه شتاب.

### ۳-۲- محاسبه‌ی برش پایه طراحی با استفاده از روش PBPD و توزیع آن بین طبقات

در روش طراحی پلاستیک بر اساس عملکرد (PBPD)، برش پایه طراحی با استفاده از روش انرژی و تغییر مکان هدف محاسبه می‌گردد. توجه شود که با استفاده از طراحی پلاستیک بر اساس عملکرد می‌توان اثر رفتار غیر خطی و مودهای بالاتر سازه را در طراحی لحاظ کرد [۲۴]. این روش بر مبنای این که منحنی چرخه‌ای برش پایه-تغییر مکان سازه بدون پینچینگ باشد، استخراج شده است. اما همان‌طور که در تصویر ۳:ج نشان داده شده است، منحنی چرخه‌ای برش پایه-تغییر مکان سازه دارای سیستم باربری جانبی مرکب پیشنهادی در تحقیق حاضر، دارای پینچینگ می‌باشد. لذا مستقیماً نمی‌توان از آن جهت تعیین برش پایه‌ی طراحی سیستم مرکب پیشنهادی استفاده کرد. اخیراً در یک تحقیق، اصلاحاتی در روش طراحی پلاستیک بر اساس عملکرد جهت استفاده برای تعیین برش پایه‌ی طراحی سازه‌هایی که منحنی چرخه‌ای آن‌ها دارای پینچینگ باشد، انجام شده است. در مطالعه‌ی حاضر، از روش اصلاح شده برای تعیین برش پایه‌ی طراحی استفاده شده است. جزئیات روش اصلاح شده توسط کیو و ژو در سال ۲۰۱۷ ارائه شده است [۱۴]. در ادامه روش به-صورت خلاصه و در قالب چند گام ارائه می‌گردد.

گام ۱: مقادیر پارامتر نسبت سختی سیستم مرکب پس از تسلیم شدن بادی کم‌انرژی ناپذیر به سختی اولیه‌ی سیستم ( $\alpha$ ) و پارامتر ارتفاع پرچم ( $\beta$ )، فرض می‌شوند. توجه شود که در بخش طراحی نمونه‌ها (بخش ۳-۲)، مشخصات هندسی و ابعاد اعضای قاب پس-کشیده شامل تیر، ستون و کابل متناسب با مقادیر فرض شده در این بند برای  $\alpha$  و  $\beta$ ، طراحی می‌گردند.

گام ۲: با توجه به مشخص بودن ارتفاع ساختمان، بر اساس فرمول تجربی ارائه شده در ASCE 7-2010، زمان تناوب ساختمان محاسبه و سپس بر اساس زمان تناوب محاسبه شده و طبق طیف طرح، شتاب طیفی ( $S_a$ )، تعیین شده است.

گام ۳: دریافت تسلیم طبقه‌ی بام، طبق روش ارائه شده در مطالعه‌ی [۲۵] با استفاده از روابط (۷-۱۰)، محاسبه شده است.

$$\theta_{yi} = \frac{2\varepsilon_y L_{br}}{\sin(2\alpha)} \quad (7)$$

$$\theta_{yb} = \frac{2 \cdot 0.25 [h_t - h_i]}{L_b} \quad (8)$$

$$\theta_s = \frac{1.2F_y}{E} + \frac{0.56F_y}{G} \quad (9)$$

$$\theta_y = \theta_{yi} + \theta_{yb} + \theta_s \quad (10)$$

در این روابط،  $\theta_{yi}$  دریافت تسلیم مهاربند،  $\theta_{yb}$  چرخش صلب طبقه،  $\theta_s$  دریافت برشی،  $\varepsilon_y$  کرنش تسلیم مهاربند،  $L_{br}$  طول مهاربند،  $\alpha$  زاویه‌ی مهاربند با افق،  $h_t$  کل ارتفاع سازه،  $h_i$  ارتفاع یک طبقه،  $L_b$  طول دهنه‌ی قاب،  $F_y$  تنش تسلیم،  $E$  مدول الاستیسیته و  $G$  مدول برشی می‌باشد.

سپس بر اساس ASCE7، با لحاظ حداکثر دررفت مجاز برابر با ۲ درصد، حداکثر دررفت مجاز پلاستیک با استفاده از رابطه‌ی (۱۱) محاسبه می‌گردد.

$$\theta_p = 0.02 - \theta_y \quad (11)$$

در رابطه‌ی (۱۱)،  $\theta_y$  دررفت تسلیم می‌باشد.

در ادامه  $\mu$ ، ضریب شکل‌پذیری مطابق با رابطه‌ی (۱۲) تعیین خواهد شد.

$$\mu = \frac{\theta_p}{\theta_y} \quad (12)$$

گام ۳: با استفاده از رابطه‌ی R- $\mu$ -T و مقادیر مشخص شده برای  $\mu$  و T در گام‌های قبل، مقدار ضریب کاهش مقاومت محاسبه شده است.

$$R = \mu^{\exp\left(\frac{a}{T^b}\right)} \quad (13)$$

در این رابطه، a و b ضرایبی هستند که با توجه به روابط (۱۴) و (۱۵) به دست آمده‌اند.

$$a = -0.38 + 0.51\alpha + 0.16\beta \quad (14)$$

$$b = 0.31 - 0.05\alpha + 0.18\beta \quad (15)$$

گام ۴: در این گام طبق روابط (۱۶) و (۱۷) به ترتیب ضریب  $\lambda$  و ضریب اصلاح انرژی  $\gamma$ ، محاسبه شده است.

$$\lambda = \left( \sum_{i=1}^n c_i h_i \right) \left( \frac{8\theta_p \pi^2}{gT^2} \right) \left[ 1 + \frac{\alpha(\mu-1)}{2} \right] \quad (16)$$

$$\gamma = \frac{\alpha(\mu-1)^2 + 2(\mu-1) + 1}{R_{\mu}^2} \quad (17)$$

در رابطه‌ی (۱۶)،  $C_i$  ضریب توزیع نیروی برشی طبقه‌ی i ام است که مطابق با رابطه‌ی (۱۸) به دست آمده است. ضریب  $P_i$  نیز با توجه به رابطه‌ی (۱۹) به دست آمده است، هم‌چنین  $C_{i+1}$  ضریب توزیع نیروی برشی در طبقه‌ی i+1 می‌باشد. هم‌چنین  $W_i$  وزن لرزه‌ای در سطح طبقه‌ی i ام،  $h_i$  ارتفاع طبقه‌ی i ام از پایه،  $h_j$  ارتفاع طبقه‌ی j ام از سطح پایه،  $h_n$  ارتفاع بام از کف و  $W_n$  وزن لرزه‌ای بام می‌باشد.

$$C_i = (P_i - P_{i+1}) \left( \frac{W_n h_n}{\sum_{j=1}^n W_j h_j} \right)^{0.75T-0.2} \quad (18)$$

$$P_i = \left( \frac{\sum_{j=1}^n W_j h_j}{W_n h_n} \right)^{0.75T-0.2} \quad (19)$$

گام ۵: در گام آخر، با استفاده از رابطه‌ی (۲۰)، برش پایه‌ی طراحی تعیین خواهد شد.

$$\frac{V}{W} = \frac{-\lambda + \sqrt{\lambda^2 + 4\gamma S_{\mu}^2}}{2} \quad (20)$$

در جداول ۱ و ۲، به ترتیب برش پایه‌ی به دست آمده برای قاب‌های ۳ و ۶ طبقه آورده شده است. لازم به ذکر است که نامگذاری نمونه‌ها بصورت As-B $\alpha$ -C $\beta$  انجام شده، که A نشان دهنده‌ی تعداد طبقات، B نشان دهنده‌ی میزان  $\alpha$  و C نشان دهنده‌ی میزان



$\beta$  می‌باشد، به عنوان مثال  $3s-0.1\alpha-1.5\beta$ ، نمونه‌ی ۳ طبقه با  $\alpha=0.1$  و  $\beta=1/5$  می‌باشد. هم‌چنین BRBF-E<sup>5</sup> نمونه‌ی بادبند کمانش ناپذیر بدون قاب با اتصالات پس کشیده می‌باشد.

جدول ۱: برش پایه طراحی ساختمان ۳ طبقه

3s-0.2α-1 β	3s-0.2α-1.5β	3s-0.05α-1.71β	3s-0.05α-1.5β	3s-0.1α-1.71β	3s-0.1α-1.5β	BRBF_E	مراحل
۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	دریافت هدف، $\Theta_u$
۱۱/۸۸	۱۱/۸۸	۱۱/۸۸	۱۱/۸۸	۱۱/۸۸	۱۱/۸۸	۱۱/۸۸	ارتفاع کل طبقه (m)
۰/۳۳	۰/۳۳	۰/۳۳	۰/۳۳	۰/۳۳	۰/۳۳	۰/۳۳	دریافت تسلیم، $(\Theta_p)$
۰/۴۶۷	۰/۴۶۷	۰/۴۶۷	۰/۴۶۷	۰/۴۶۷	۰/۴۶۷	۰/۴۶۷	زمان تناوب تجربی (S)
۱/۶۷	۱/۶۷	۱/۶۷	۱/۶۷	۱/۶۷	۱/۶۷	۱/۶۷	دریافت پلاستیک، $(\Theta_p)$
۶/۰۴	۶/۰۴	۶/۰۴	۶/۰۴	۶/۰۴	۶/۰۴	۶/۰۶	شکل پذیری $(\mu_s)$
۴/۵۶	۵/۴۵	۴/۸۶	۴/۵۱	۵/۱۹	۴/۷۹	۴/۷۵	ضریب رفتار ساختمان $(R_{\mu})$
۰/۷۷	۰/۵۴	۰/۵۲۲	۰/۶۰۷	۰/۵۰۵	۰/۵۹	۰/۵۶	ضریب اصلاح انرژی، $(\gamma)$
۱/۱۲	۱/۱۲	۱/۱۲	۱/۱۲	۱/۱۲	۱/۱۲	۱/۱۲	شبه شتاب، $(S_d)$
۰/۱	۰/۰۷۰۷	۰/۰۹۸	۰/۱۱	۰/۰۸۶	۰/۱	۰/۱۱۶	ضریب برش پایه (v/w)
۱۱۹	۸۳	۱۰۶	۱۲۴	۹۳	۱۰۸	۱۲۶	نیرو برشی کل (ton)

جدول ۲: برش پایه ساختمان ۶ طبقه

6s-0.2α-1 β	6s-0.2α-1.5β	6s-0.05α-1.71β	6s-0.05α-1.5β	6s-0.1α-1.71β	6s-0.1α-1.5β	BRBF-E	مراحل
۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	دریافت هدف، $\Theta_u$
۲۳/۷۶	۲۳/۷۶	۲۳/۷۶	۲۳/۷۶	۲۳/۷۶	۲۳/۷۶	۲۳/۷۶	ارتفاع کل طبقه (m)
۰/۴۴۹	۰/۴۴۹	۰/۴۴۹	۰/۴۴۹	۰/۴۴۹	۰/۴۴۹	۰/۴۴۹	دریافت تسلیم، $(\Theta_p)$
۰/۷۲	۰/۷۲	۰/۷۲	۰/۷۲	۰/۷۲	۰/۷۲	۰/۷۲	زمان تناوب تجربی (S)
۱/۵۵	۱/۵۵	۱/۵۵	۱/۵۵	۱/۵۵	۱/۵۵	۱/۵۵	دریافت پلاستیک، $(\Theta_p)$
۴/۴۴	۴/۴۴	۴/۴۴	۴/۴۴	۴/۴۴	۴/۴۴	۴/۴۵	شکل پذیری $(\mu_s)$
۳/۶۶	۴/۱۵	۳/۸۵	۳/۶۶	۴/۰۲	۳/۸۱	۴/۴۵	ضریب رفتار ساختمان $(R_{\mu})$
۰/۷۶	۰/۵۹۴	۰/۵۷	۰/۶۳	۰/۵۶	۰/۶۲	۰/۳۹۹	ضریب اصلاح انرژی، $(\gamma)$
۰/۸۷	۰/۸۷	۰/۸۷	۰/۸۷	۰/۸۷	۰/۸۷	۰/۸۷	شبه شتاب، $(S_d)$
۰/۰۹۷	۰/۰۷۶	۰/۰۸۹	۰/۰۹۹	۰/۰۸۲	۰/۰۹۱	۰/۰۶۸	ضریب برش پایه (v/w)
۲۰۶	۱۶۰	۱۸۹	۲۰۹	۱۷۳	۱۹۲	۱۴۶	نیرو برشی کل (ton)

### ۳-۳- طراحی اعضای سیستم مرکب

در ادامه طبق برش پایه ی به دست آمده در بخش ۳-۲، اعضای سیستم مرکب به نحوی طراحی خواهند شد که مقادیر  $\alpha$  و  $\beta$  فرض شده در گام ۱، بخش ۳-۱، تأمین شوند.

گام ۱: بر اساس مقدار فرض شده برای  $\beta$ ، سهم هرکدام از سیستم‌های تشکیل دهنده‌ی سیستم مرکب، یعنی سیستم بادبند کمانش ناپذیر و سیستم قاب پس کشیده از برش پایه طراحی تعیین و طبق رابطه‌ی ۱۸ بین طبقات توزیع شده است. در ادامه در هر دو سیستم، برش طبقات محاسبه خواهد شد.

گام ۲: سیستم بادبندی مانند سایر سیستم‌های شکل پذیر برای مقدار نیروی برشی مشخص شده، برای هر طبقه طراحی شده است.

گام ۳: میزان نیروی پس کشیدگی در کابل هر طبقه قاب پس کشیده، بر اساس نیروی برشی آن طبقه، محاسبه می‌گردد.

گام ۴: مقدار مساحت مورد نیاز کابل در هر طبقه به نحوی تعیین شده که سه شرط زیر تأمین گردد.

<sup>5</sup> buckling-restrained braced frames with eccentric configurations

الف) کابل در هر طبقه تا ایجاد دررفت ۲٪ در آن طبقه تسلیم نشود و مقدار کرنش در کابل با استفاده از رابطه‌ی (۲۱) به دست آمده است.

$$\varepsilon_i = \frac{T_{0i}}{A_{pt,i} E_{pt,i}} + \frac{d_{bi} \theta_i}{2L_{pt,i}} \quad (21)$$

در این روابط  $E_{pt}$  مدول الاستیسیته‌ی کابل،  $T_{0i}$  نیروی کششی اولیه‌ی کابل،  $A_{pt,i}$  مساحت کابل،  $d_{bi}$  عمق تیر،  $\theta_i$  دررفت و  $L_{pt,i}$  طول کابل در طبقه  $i$  ام می‌باشند. با جایگذاری دررفت  $(\theta_i)$  برابر با ۲٪ در رابطه‌ی بالا، میزان کرنش کابل در دررفت دو درصد محاسبه می‌شود. این کرنش باید از حد کرنش تسلیم کابل که ۰/۸٪ است، کمتر باشد.

ب) کابل در هر طبقه تا ایجاد دررفت ۳٪ گسیخته نشود، کرنش گسیخته‌ی کابل برابر با ۱٪ است. میزان کرنش کابل در دررفت ۳٪ با جایگذاری  $(\theta_i=3\%)$  در رابطه‌ی (۲۱) به دست آمده است.

ج) مقدار فرض شده برای  $\alpha$ ، در گام اول بخش ۳-۱، طبق رابطه‌ی (۵) تأمین گردد.

گام ۵: چک شود که تیر و ستون در قاب پس کشیده تا ایجاد دررفت ۲٪ تسلیم نشوند.

در ادامه طبق روش طراحی ارایه شده در بالا، اعضای سیستم مرکب طراحی شده‌اند. نتایج طراحی قاب‌های ۳ طبقه در جداول ۳، ۴ و ۵ و نتایج طراحی قاب ۶ طبقه در جداول ۶، ۷ و ۸ ارائه شده است. لازم به ذکر است که در جداول ۳ و ۶ نتایج طراحی قاب مهارشده با مهاربند کمانش‌ناپذیر خارج از مرکز ۳ و ۶ طبقه، جداول ۴ و ۷ نتایج طراحی قاب برگشت‌پذیر ۳ و ۶ طبقه و جداول ۵ و ۸ مساحت کابل پس کشیده در قاب‌های ۳ و ۶ طبقه نشان داده شده است. در تمامی جداول مساحت‌ها بر اساس  $in^2$  آورده شده است.

جدول ۳: نتایج طراحی قاب مهاربندی کمانش‌ناپذیر ۳ طبقه

عضو	بدون قاب پس کشیده	3s-0.1a-1.5β	3s-0.1a-1.71β	3s-0.05a-1.5β	3s-0.05a-1.71β	3s-0.2a-1.5β	3s-0.2a-1.71β
تیر (طبقه‌ی ۱-۳)	W24x103	W24x84	W24x76	W24x84	W24x84	W21x68	W21x68
مهاربند طبقه‌ی ۱	6.12	3.95	3.86	4.48	4.42	2.87	3.03
مهاربند طبقه‌ی ۲	5.25	3.39	3.31	3.85	3.80	2.47	2.60
مهاربند طبقه‌ی ۳	3.45	2.23	2.18	2.53	2.50	1.62	1.71
ستون طبقه‌ی ۱-۳	W14x176	W14x145	W14x132	W14x132	W14x132	W12x106	W12x120

جدول ۴: نتایج طراحی قاب برگشت‌پذیر ۳ طبقه

عضو	مقاطع ( برای همه‌ی نمونه‌ها)
تیر طبقه‌ی ۱-۳	W30x261
ستون طبقه‌ی ۱-۳	W14x311

جدول ۵: مساحت کابل پس کشیده برای نمونه‌های مختلف در قاب ۳ طبقه

طبقه	3s-0.1a-1.5β	3s-0.1a-1.71β	3s-0.05a-1.5β	3s-0.05a-1.71β	3s-0.2a-1.5β	3s-0.2a-1.71β
طبقه‌ی ۱ ( $in^2$ )	88.9	127	7.62	6.35	250	202
طبقه‌ی ۲ ( $in^2$ )	88.9	127	7.62	6.35	250	202
طبقه‌ی ۳ ( $in^2$ )	88.9	127	7.62	6.35	250	202

جدول ۶: نتایج طراحی قاب مهاربندی کمانش ناپذیر ۶ طبقه

6s-0.2α-1 β	6s-0.2α-1.5β	6s-0.05α-1.71β	6s-0.05α-1.5β	6s-0.1α-1.71β	6s-0.1α-1.5β	بدون قاب پس کشیده	عضو
W24x94	W24x103	W21x111	W21x111	W21x101	W21x101	W21x111	تیر (طبقه ۱-۳)
W24x84	W24x94	W21x101	W21x101	W21x101	W21x101	W21x101	تیر (طبقه ۴-۶)
4.98	5.83	7.85	7.61	7.16	6.97	7.1	مهاربند طبقه ۱
4.79	5.61	7.56	7.33	6.89	6.71	6.8	مهاربند طبقه ۲
4.41	5.17	6.96	6.74	6.35	6.18	6.3	مهاربند طبقه ۳
3.83	4.48	4.04	5.85	5.51	5.36	5.5	مهاربند طبقه ۴
2.99	3.50	4.71	4.57	4.30	4.18	4.3	مهاربند طبقه ۵
1.91	2.23	3.01	2.92	2.75	2.67	2.7	مهاربند طبقه ۶
W14x233	W14x233	W14x283	W14x283	W14x283	W14x257	W14x283	ستون طبقه ۱
W14x159	W14x211	W14x257	W14x257	W14x257	W14x257	W14x283	ستون طبقه ۲ و ۳
W14x109	W14x109	W14x145	W14x132	W14x132	W14x132	W14x176	ستون طبقه ۴-۶

جدول ۷: نتایج طراحی قاب برگشت پذیر ۶ طبقه

مقاطع	عضو
W36x487	تیر طبقه ۱-۴
W30x261	تیر طبقه ۵ و ۶
W14x283	ستون طبقه ۱-۶

جدول ۸: مساحت کابل پس کشیده برای نمونه‌های مختلف در قاب ۶ طبقه

6s-0.2α-1 β	6s-0.2α-1.5β	6s-0.05α-1.71β	6s-0.05α-1.5β	6s-0.1α-1.71β	6s-0.1α-1.5β	طبقه
177	215	6.8	5.1	22.8	25.4	طبقه ۱ (in <sup>2</sup> )
177	215	6.8	5.1	22.8	25.4	طبقه ۲ (in <sup>2</sup> )
177	215	6.8	5.1	25.4	33.02	طبقه ۳ (in <sup>2</sup> )
165	190	5.5	3.5	22.8	25.4	طبقه ۴ (in <sup>2</sup> )
165	190	5.5	3.5	22.8	25.4	طبقه ۵ (in <sup>2</sup> )
165	190	5.5	3.5	22.8	25.4	طبقه ۶ (in <sup>2</sup> )

لازم به ذکر است که با زیاد شدن  $\beta$  سهم المان شکل پذیر از نیرو کم شده است و به این ترتیب با زیاد شدن  $\beta$  مساحت المان کمانش ناپذیر کم تر شده و هم چنین با توجه به طراحی نمونه بر اساس ظرفیت مقطع استفاده شده برای تیر و ستون نیز کوچک تر شده است و در ضمن برگشت پذیر کردن سیستم و کم کردن دررفت پسماند با توجه به کمتر بودن مساحت المان اتلاف کننده انرژی، در این سیستم به نظر آسان تر می رسد. هم چنین برای رسیدن به شیب بازشدگی اتصال، مساحت کابل های مورد استفاده بسیار موثر است و همان طور که نشان داده شده است، برای رسیدن به برگشت پذیری کامل در سیستم که با ضریب  $\beta \leq 1$  فراهم شده است، نسبت به سایر نمونه ها، مساحت کابل بیشتری نیاز است.

#### ۴- مدل سازی

برای مطالعه ای عددی بر روی رفتار این سیستم نیاز به نرم افزار اجزا محدود است. در این مطالعه قاب های ۳ و ۶ طبقه طراحی شده در قسمت قبل با استفاده از نرم افزار اجزا محدود آباکوس مدل سازی شده و تحلیل پوش آور و چرخه ای بر روی مدل ها انجام شده است. در نرم افزار به منظور مدل سازی تیر و ستون از المان تیر (B31) و به منظور مدل سازی کابل ها و مهاربند کمانش ناپذیر از المان غیر خطی تراس استفاده شده است. برای مدل سازی اتصال از ۲ فنر در بالا و پایین اتصال تیر به ستون استفاده شده که دارای سختی زیاد در فشار و سختی کم در کشش به منظور ایجاد فاصله و حرکت اتصال می باشد و هم چنین محل اتصال در راستای نیروی ثقلی بسته شده است. اتصال کابل به پشت ستون به صورت اتصال مفصلی می باشد و نیروی اولیه پس کشیدگی در کابل ها با کاهش دما به وجود آمده است.

استفاده از خصوصیات حرارتی مصالح فولادی برای ایجاد پس کشیدگی در کابل‌ها کاربرد دارد. زمانی که دو انتهای عضوی بسته شود و سپس دما کاهش یابد، عضو تحت کشش قرار خواهد گرفت. هندسه‌ی کلی مدل‌سازی نیز در قسمت ۳-۲ در شکل ۵ نشان داده شده است.

در تعریف مصالح، رفتار تنش کرنش بصورت دوخطی فرض شده است. تیر، ستون و الوان کمانش‌ناپذیر دارای تنش تسلیم Mpa ۳۴۵ و تنش نهایی Mpa ۴۵۰ می‌باشند، هم‌چنین در این مدل‌سازی کابل پس کشیده رده‌ی ۲۷۰ با تنش تسلیم Mpa ۱۶۲۰ و تنش نهایی Mpa ۱۹۰۰ به کار برده شده است. مدول یانگ، ضریب پواسون و ضریب انبساط حرارتی کابل‌ها به ترتیب ۱۹۹ گیگاپاسکال، ۰/۳ و ۶- $10^{-6}$  می‌باشد. در تحلیل چرخه‌ای به منظور بررسی میزان جابه‌جایی پسماند در چرخه‌های مختلف، به میزان ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵، ۱، ۱/۵ و ۲ درصد جابه‌جایی نسبی پسماند به سازه جابه‌جایی داده شده و چرخه‌ها بررسی شده است.

#### ۴-۱- راست‌آزمایی مدل‌سازی عددی

باید توجه شود که تا آنجایی که نویسندگان اطلاع دارند، تاکنون عملکرد سیستم بصورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار نگرفته است، لذا به منظور راست‌آزمایی مدل‌سازی عددی، بصورت بیان شده در زیر عمل شده است:

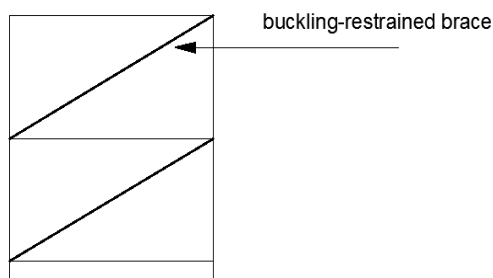
#### ۴-۱-۱- راست‌آزمایی مدل‌سازی عددی با استفاده از نتایج آزمایشگاهی

در این بخش، به منظور ارزیابی دقت مدل اجزا محدود پاسخ هیستریزس قاب قاب با اتصالات پس کشیده و قاب بادبند کمانش‌ناپذیر به صورت جداگانه مورد بررسی قرار گرفته است. به منظور بررسی قابلیت مدل اجزا محدود در شبیه‌سازی رفتار قاب قاب بادبند کمانش‌ناپذیر از نمونه‌ی آزمایشگاهی، مطالعه شده توسط مین مینگ و همکاران [۲۶] استفاده شده است. مشخصات مقاطع و هم‌چنین مصالح استفاده شده در این نمونه‌ی آزمایشگاهی در جدول ۹ ارائه شده است. همان‌طور که در شکل ۷ نشان داده شده است، این نمونه یک قاب ۲ طبقه مهارشده با مهاربند کمانش‌ناپذیر می‌باشد. در ضمن بارگذاری آن در آزمایش به صورت جانبی و برای دریافت ۰/۲۵، ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ درصد صورت گرفته است. در مطالعه حاضر، این مدل آزمایشگاهی با روش مدل‌سازی ارائه شده در بالا شبیه‌سازی شده است. بارگذاری بر اساس جابجایی مطابق با آزمایش بر مدل عددی اعمال شده است. در تصویر ۴ نتایج شبیه‌سازی شده با پاسخ آزمایشگاه با هم مقایسه شده است. واضح است که سختی اولیه و مقاومت نهایی شبیه‌سازی عددی و آزمایشگاهی تقریباً با هم برابر هستند. هم‌چنین مشخص است که پاسخ هیستریزس قاب بادبند کمانش‌ناپذیر در حد قابل قبول به وسیله مدل اجزای محدود شبیه‌سازی شده است. بنابراین صحت مدل اجزا محدود در شبیه‌سازی قاب قاب بادبند کمانش‌ناپذیر تحت بارگذاری سیکلیک مورد تایید می‌باشد

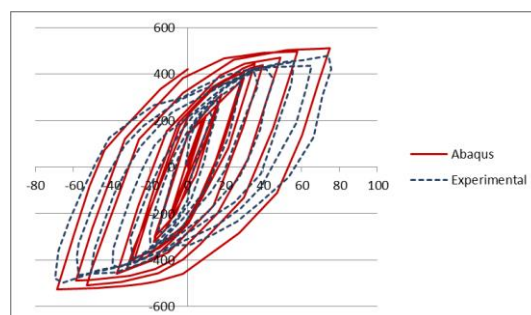
در ادامه، مدل عددی مطابق با نمونه آزمایشگاهی 8S100K که توسط wang و همکاران [۲۷] مورد بررسی قرار گرفته است، تهیه شده است. لازم به ذکر است مشخصات این نمونه که یک قاب قاب با اتصالات پس کشیده دو طبقه می‌باشد، در مطالعه‌ی [۲۷] آورده شده است. همان‌طور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود نمونه آزمایشگاهی پاسخ هیستریزس الاستیک از خود نشان می‌دهد. هم‌چنین در شکل ۹ پاسخ هیستریزس مدل عددی و مدل آزمایشگاهی با هم مقایسه شده‌اند. مشخص است که سختی اولیه و سختی ثانویه و هم‌چنین نیروی بازشدگی اتصال در مدل عددی و نمونه آزمایشگاهی با هم تطابق خوبی دارند.

جدول ۹: مشخصات مقاطع و مصالح استفاده شده به منظور مدل‌سازی [۲۶]

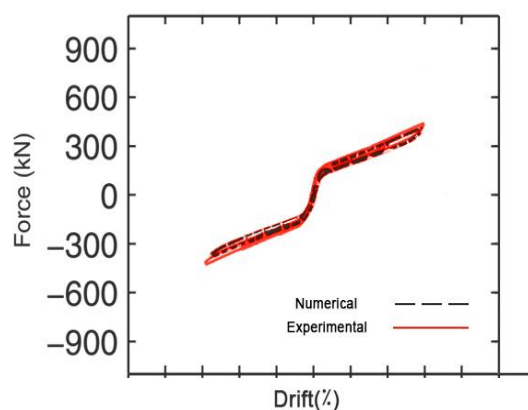
Fu (Mpa)	Fy (Mpa)	E(Mpa)	مقطع	عضو
413e6	261e6	205e9	H300x150x6.5x9	تیر طبقه ی ۱ و ۳
413e6	261e6	205e9	H194x150x6x9	تیر طبقه ی ۲
366e6	298e6	203e9	219x4	ستون با مقطع استوانه‌ای
379e6	263e6	203e9	20.32(in <sup>2</sup> )	هسته‌ی مهاربند کمانش‌ناپذیر



شکل ۷: قاب فولادی به همراه مهاربند کمانش ناپذیر آزمایش شده توسط مین مینگ و همکاران [۲۶]



شکل ۸: مقایسه‌ی رفتار هیستریزیس مدل آزمایشگاهی قاب مهاربند کمانش ناپذیر و مدل شبیه سازی شده آن در نرم افزار آباکوس



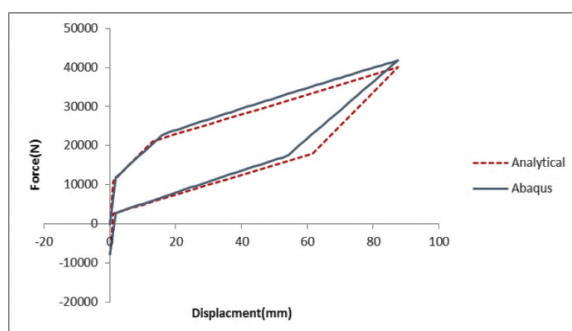
شکل ۹: مقایسه‌ی رفتار هیستریزیس مدل آزمایشگاهی قاب با اتصالات پس کشیده و مدل شبیه سازی شده آن در نرم افزار آباکوس

#### ۴-۱-۲- راست آزمایی مدل سازی عددی با استفاده از روابط تحلیلی

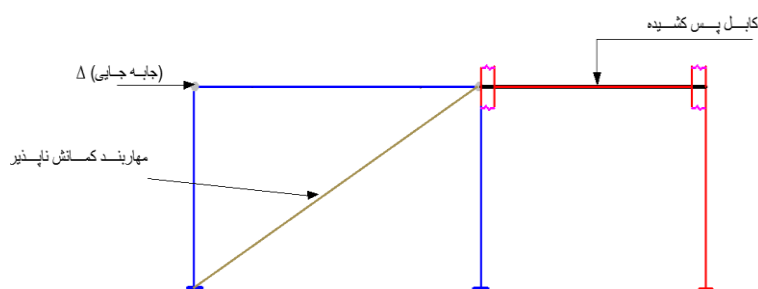
در این بخش به منظور راست آزمایی، پاسخ هیستریزیس یک نمونه از سیستم که در ادامه مشخصات آن آورده شده است، یک بار با استفاده از روابط تحلیلی و بار دیگر با استفاده از نرم افزار اجزا محدود تعیین می گردند و با هم مقایسه می شوند. مشخصات نمونه‌ی مورد بررسی به شرح زیر می باشد:

قاب نمونه که نمای کلی آن در شکل ۱۰ (الف) نشان داده شده است، دارای ۱ طبقه و ۲ دهانه می باشد که ارتفاع طبقه ۳/۶۸ متر، طول دهانه‌ی بادبندی ۷/۵ متر و طول دهانه‌ی برگشت پذیر ۴ متر می باشد. مقطع استفاده شده برای ستون W14x120، مقطع استفاده شده برای تیر W14x109 و سطح مقطع مهاربند کمانش ناپذیر برابر با ۲/۵ سانتی متر مربع می باشد. نیروی پیش کشیدگی اولیه در کابل پس کشیده برابر با ۹/۲ است. در ضمن بار اعمالی به صورت جابه جایی کنترل بوده و به نمونه جابه جایی نسبی ۲/۵٪ به صورت یک چرخه‌ی ۰ و ۱ اعمال شده است. همان طور که در شکل ۱۰ (ب) نشان داده شده است، جابه جایی پسماند منتج از شبیه سازی عددی و روابط

تحلیلی تقریباً برابر با صفر می باشد. همچنین همان طور که در شکل ۱۰ نشان داده شده است، تطابق قابل قبولی بین رفتار چرخه‌ای مدل سازی عددی و روابط تحلیلی وجود دارد که نشان دهنده صحت مدل سازی عددی می باشد.



ب) مقایسه‌ی چرخه‌ی بارگذاری منتج از روابط تحلیلی



الف) هندسه‌ی قاب کمانش ناپذیر برگشت پذیر.

سازه و عددی.

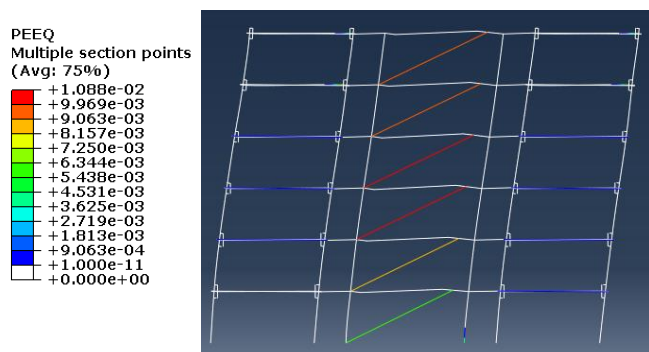
شکل ۱۰: قاب کمانش ناپذیر برگشت پذیر

## ۵- ارائه نتایج عددی

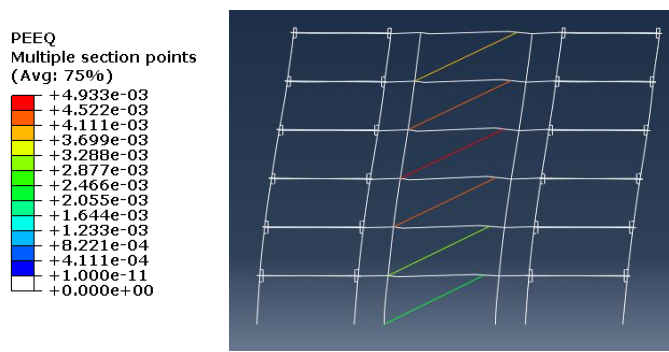
نتایج در این قسمت برای تجلیل پوش آور و تحلیل تاریخچه زمانی غیر خطی به صورت جداگانه ارائه شده اند.

### ۵-۱- تحلیل پوش آور

در این قسمت رفتار نمونه‌ها با تحلیل پوش آور مورد بررسی قرار گرفته است. جهت لحاظ تأثیر  $P-\Delta$  در این تحلیل‌ها، ابتدا نیروی ثقلی بر قاب‌ها بارگذاری شده و سپس بار جانبی با الگوی مشخص شده در رابطه‌ی (۱۸)، به قاب‌ها اعمال شده است. دررفت بام به عنوان نقطه‌ی کنترلی انتخاب شده است و تا دررفت ۳٪ جابه‌جا شده است. توجه شود که دررفت ۳٪ همان حد گسیختگی می باشد. در شکل ۱۱ اندیس کرنش پلاستیک معادل و تغییر شکل قاب ۶s در دررفت ۲٪ و ۳٪ نشان داده شده است، در دررفت ۲٪، فقط بادبندها تسلیم شده‌اند، در حالی که در دررفت ۳٪، هم بادبندها و هم کابل‌ها تسلیم شده‌اند ولی کرنش پلاستیک معادل در کابل‌ها از حد کرنش گسیختگی که ۱٪ می باشد، کمتر است. اندیس کرنش پلاستیک در کابل‌ها در دررفت ۲٪ و ۳٪ صحت رابطه‌ی (۲۱) را تأیید می کند. فرم تقریباً خطی تغییر شکل سازه نشان می دهد که توزیع دررفت در ارتفاع ساختمان تقریباً یکنواخت است و در هیچ طبقه‌ای تمرکز تغییر شکل مشاهده نشده است. با نشان دادن اندیس کرنش پلاستیک معادل در سایر قاب‌ها، نتیجه‌ای به غیر از نتایج ارائه شده مشاهده نمی گردد لذا در جهت اختصار نشان داده نشده‌اند.



ب) اندیس کرنش پلاستیک معادل در دررفت ۳٪

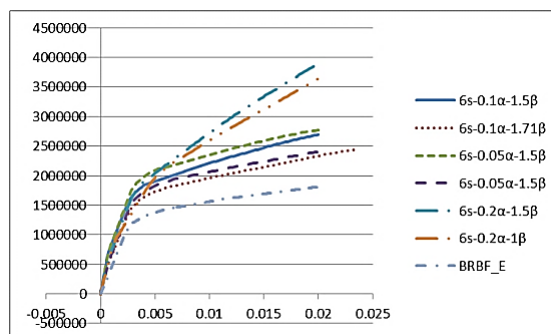


الف) اندیس کرنش پلاستیک معادل در دررفت ۲٪

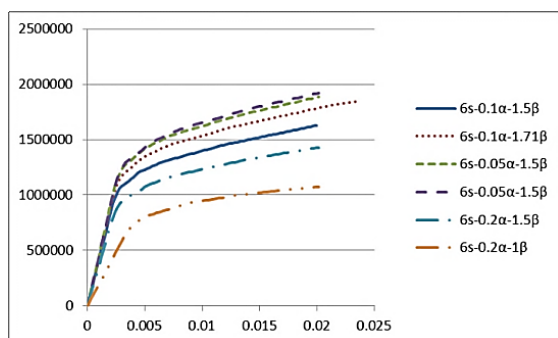
شکل ۱۱: بررسی اندیس کرنش پلاستیک.

در پیوست ۲ تصاویر مربوط به منحنی پوش آور ۱۲ مدل آورده شده ولی در اینجا فقط نتایج مربوط به ۷ مدل مربوط به قاب ۶ طبقه مورد بررسی قرار گرفته است. نمودار نیرو- جابه‌جایی در نمونه‌های مربوط به قاب ۶ طبقه، به همراه بادبند BRBF\_E بررسی شده در مطالعات پرینز [۲۱] در شکل ۱۲ الف- نشان داده شده است. دریافت تسلیم قاب‌ها تقریباً با مقدار محاسبه شده توسط رابطه‌ی (۱۰) است. پس در اینجا صحت رابطه‌ی (۱۰) تایید می‌گردد. در دریافت ۲٪ برش تسلیم و مقاومت نهایی قاب‌های ۶ طبقه در جدول ۱۰ آورده شده است. دلیل بیشتر بودن مقاومت نهایی در نمونه‌های قاب ۶ طبقه، نسبت به قاب BRBF\_E این است که سختی پس از تسلیم آن‌ها از سختی پس از تسلیم BRBF\_E بیشتر می‌باشد. سختی پس از تسلیم نمونه‌های قاب ۶ طبقه در جدول ۱۱ مشخص شده توجه شود که در جدول ۱۱، با توجه به نسبت شیب ثانویه به شیب اولیه،  $\alpha$  به دست آمده است و با توجه به این نتایج صحت فرض اولیه‌ی طراحی اثبات شده است. همچنین در تصویر ۱۲ ب- نمودار نیرو- جابه‌جایی قاب پس‌کشیده مربوط به مدل‌های ۶ طبقه نشان داده شده است، نمودارهای مشخص شده تقریباً دو خطی هستند، میزان برش پایه‌ی مربوط به این قاب‌ها در لحظه‌ی تغییر سختی در جدول ۱۲ نشان داده شده است، این مقادیر با اختلاف ناچیز برابر با مقادیر لحاظ شده جهت طراحی قاب‌ها می‌باشد و این نشان دهنده‌ی صحت روابط طراحی می‌باشد. در ضمن در این تصویر مشاهده شده که از پس از تغییر سختی تا دریافت ۲٪ شیب ثانویه‌ی نمودارها تغییری ندارد، این بدین مفهوم است که تا دریافت ۲٪، هیچ کدام از اعضای قاب پس‌کشیده که شامل تیر، ستون و کابل پس‌کشیده می‌باشد، تسلیم نشده‌اند که این مورد نیز یکی از اهداف طراحی بوده است تا قاب پس‌کشیده، برگشت‌پذیر باشد.

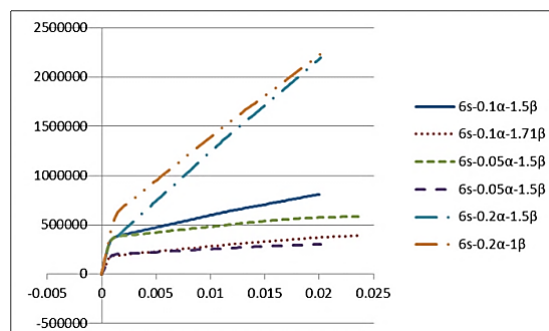
همچنین نمودارهای پوش آور مربوط به بادبندهای قاب ۶ طبقه در شکل ۱۲ ج- نشان داده شده است، مشاهده شده که شیب پس از تسلیم نمودارها ناچیز و تقریباً برابر با صفر است، برش پایه‌ی این بادبندها و نیروی استفاده شده جهت طراحی این بادبندها در جدول ۱۳ مشخص شده است، نزدیک بودن این دو مقدار نشان دهنده‌ی صحت طراحی می‌باشد. (شیب ناحیه‌ی پس از تسلیم در مهاربند کمانش‌ناپذیر اندک است).



الف) نمودار پوش قاب با مهاربند کمانش‌ناپذیر با پیکربندی خارج از مرکز متصل شده به قاب با اتصال پس‌کشیده.



ج) نمودار پوش قاب با مهاربند کمانش‌ناپذیر با پیکربندی خارج از مرکز.



ب) نمودار پوش قاب با اتصالات پس‌کشیده.

شکل ۱۲: نمودار برش پایه در قاب 6s.

جدول ۱۰: مقاومت نهایی و برش طراحی قاب مهارشده ۶ طبقه

نمونه	BRBF_E	$\beta=1/5 \alpha=0/1$	$\beta=1/71 \alpha=0/1$	$\beta=1/5 \alpha=0/0.5$	$\beta=1/71 \alpha=0/0.5$	$\beta=1/5 \alpha=0/2$	$\beta=1 \alpha=0/2$
برش تسلیم (ton)	۱۴۶	۱۹۲	۱۷۳	۲۰۹	۱۸۹	۱۶۰	۲۰۶
مقاومت نهایی (ton)	۱۸۱	۲۶۹	۲۴۵	۲۷۷	۲۴۰	۳۹۱	۳۶۵

جدول ۱۱: سختی اولیه و ثانویه در قاب ۶ طبقه

نمونه	$\beta=1/5 \alpha=0/1$	$\beta=1/71 \alpha=0/1$	$\beta=1/5 \alpha=0/0.5$	$\beta=1/71 \alpha=0/0.5$	$\beta=1/5 \alpha=0/2$	$\beta=1 \alpha=0/2$
شیب اولیه (ton/m)	5.52e8	4.97e8	6.04e8	5.2e8	6.1e8	4.73e8
شیب ثانویه (ton/m)	5.85e7	4.76e7	3.71e7	3.02e7	1.27e8	1.07e7
$\alpha$	0.106	0.096	0.058	0.058	0.208	0.22

جدول ۱۲: برش طراحی و مقاومت بازشدگی در قاب برگشت پذیر مربوط به مدل های ۶ طبقه

نمونه	$\beta=1/5 \alpha=0/1$	$\beta=1/71 \alpha=0/1$	$\beta=1/5 \alpha=0/0.5$	$\beta=1/71 \alpha=0/0.5$	$\beta=1/5 \alpha=0/2$	$\beta=1 \alpha=0/2$
برش طراحی (ton)	۴۸	۲۵	۵۲	۲۷	۴۰	۱۰۳
مقاومت بازشدگی (ton)	۴۵	۲۰	۵۰	۳۰	۴۰	۹۵

جدول ۱۳: برش طراحی و مقاومت نهایی در قاب مهارشده مربوط به مدل های ۶s

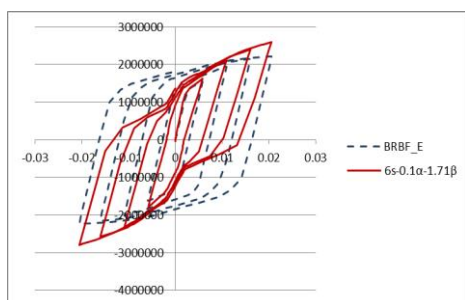
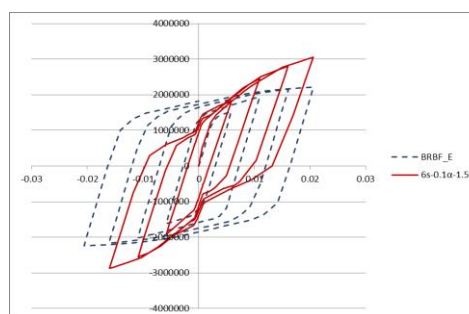
نمونه	$\beta=1/5 \alpha=0/1$	$\beta=1/71 \alpha=0/1$	$\beta=1/5 \alpha=0/0.5$	$\beta=1/71 \alpha=0/0.5$	$\beta=1/5 \alpha=0/2$	$\beta=1 \alpha=0/2$
برش طراحی (ton)	۱۴۴	۱۴۸	۱۵۷	۱۶۲	۱۲۰	۱۰۳
مقاومت بازشدگی (ton)	۱۵۵	۱۶۵	۱۷۵	۱۸۲	۱۳۰	۱۰۷

## ۵-۲- انجام تحلیل چرخه‌ای بر روی مدل‌ها

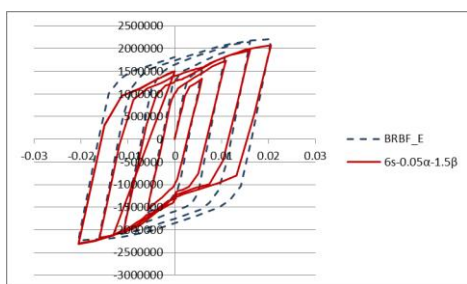
در این قسمت اثر پارامترهای  $\alpha$  و  $\beta$  بر روی میزان اتلاف انرژی و نسبت دررفت پسماند در قاب‌های ۳ و ۶ طبقه مورد بررسی قرار گرفته است. برای انجام تحلیل چرخه‌ای بر روی مدل‌ها از سیکل‌های ۵، ۰، ۱، ۱.۵ و ۲ درصد استفاده شده است.

### ۵-۲-۱- تحلیل چرخه‌ای بر روی قاب ۳ و ۶ طبقه

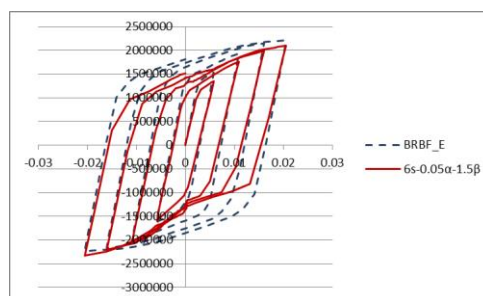
در اشکال ۱۳ و ۱۴ بترتیب نمودار چرخه‌ای برای نمونه‌های BRBF\_E\_SC ۳ و ۶ طبقه با  $\alpha$  و  $\beta$  های مختلف آورده شده است. همچنین در این اشکال نمودار چرخه‌ای برای نمونه‌های BRBF\_E ۳ و ۶ طبقه مشخص می‌باشد. حلقه‌های نمودار چرخه‌ای نمونه‌های BRBF\_E بصورت کامل و بدون باریک شدگی می‌باشند. در حالیکه حلقه‌های نمودار چرخه‌ای نمونه‌های BRBF\_E\_SC دارای باریک شدگی می‌باشند و با افزایش  $\beta$  باریک شدگی در نمودارها بیشتر و مساحت حلقه‌های منحنی چرخه‌ای کمتر شده است. با توجه به نمودارهای منحنی چرخه‌ای انرژی تلف شده و نسبت دررفت پسماند قاب‌ها در دررفت ۲٪ در جدول ۱۴ برای همه‌ی قاب‌ها آورده شده است.

ب)  $3s-0.1\alpha-1.71\beta$ الف)  $3s-0.1\alpha-1.5\beta$

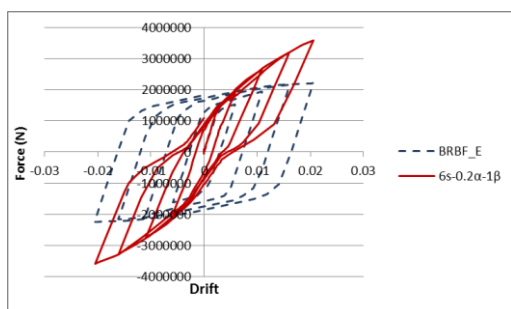




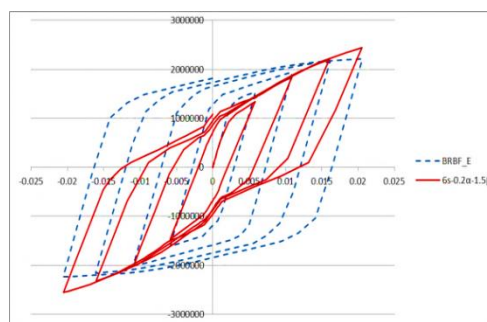
3s-0.05α-1.71β (د)



3s-0.05α-1.5β (ج)

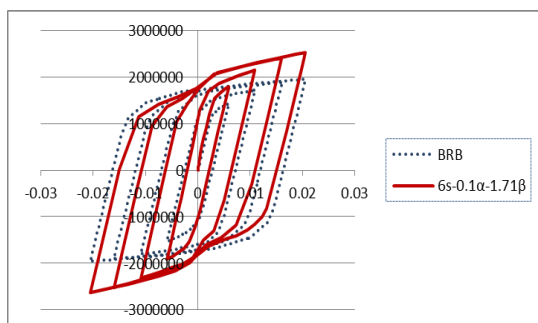


3s-0.2α-1β (و)

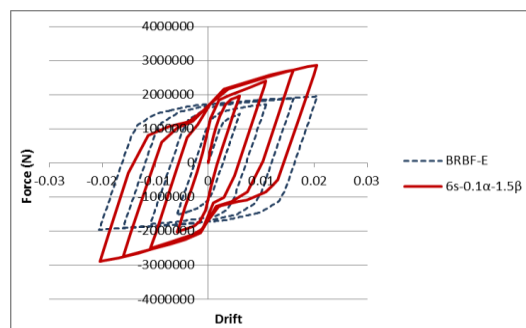


3s-0.2α-1.5β (ه)

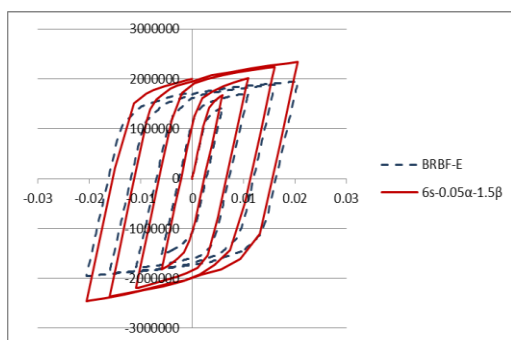
شکل ۱۳: مقایسه‌ی منحنی چرخه‌ای در حالت بدون قاب برگشت پذیر و همراه با قاب برگشت پذیر در قاب ۳ طبقه.



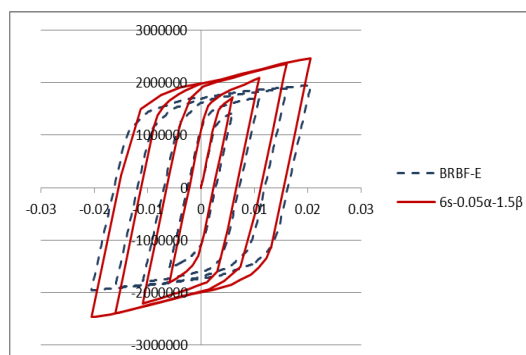
6s-0.1α-1.71β (ب)



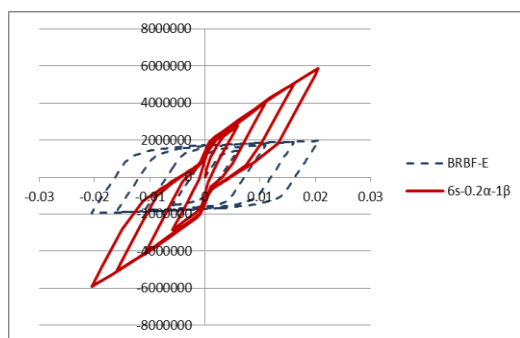
6s-0.1α-1.5β (الف)



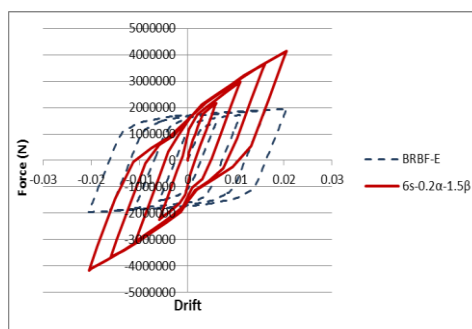
6s-0.05α-1.71β (د)



6s-0.05α-1.5β (ج)



و) 6s-0.2α-1β



ه) 6s-0.2α-1.5β

شکل ۱۴: مقایسه‌ی منحنی چرخه‌ای در حالت بدون قاب برگشت پذیر و همراه با قاب برگشت پذیر در قاب ۶ طبقه

جدول ۱۴: دریفت پسماند و اتلاف انرژی در تحلیل چرخه‌ای در قاب ۳ و ۶ طبقه

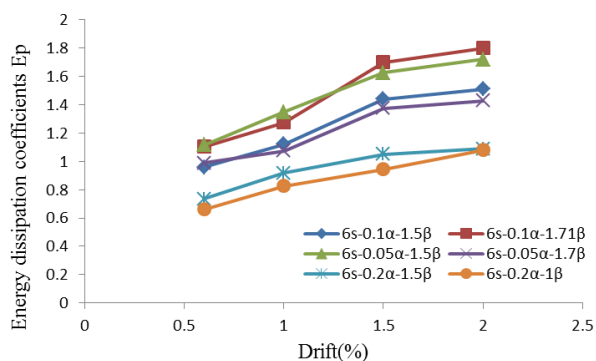
نمونه	دریفت پسماند	اتلاف انرژی (J)	درصد کاهش دریفت پسماند	درصد کاهش اتلاف انرژی
3s				
BRBF_E	۰/۰۱۶	۲۷۹۰۰۰۰	-	-
3s-0.1α-1.5β	۰/۰۱۲۵	۲۲۹۰۰۰۰	۲۲٪	۱۸٪
3s-0.1α-1.71β	۰/۰۱۳	۲۲۳۰۰۰۰	۱۸/۸٪	۲۰٪
3s-0.05α-1.5β	۰/۰۱۵	۲۴۹۰۰۰۰	۶/۳٪	۱۱٪
3s-0.05α-1.7β	۰/۰۱۵	۲۴۶۰۰۰۰	۶/۳٪	۱۳٪
3s-0.2α-1.5β	۰/۰۱۱	۱۸۳۰۰۰۰	۳۱/۳٪	۳۴/۴٪
3s-0.2α-1β	۰/۰۲۵	۸۶۰۰۰۰	۸۴/۸٪	۶۹٪
6s				
BRBF_E	۰/۰۱۷۵	۶۱۹۰۰۰۰	-	-
6s-0.1α-1.5β	۰/۰۱۳	۵۴۷۰۰۰۰	۲۵٪	۱۳٪
6s-0.1α-1.71β	۰/۰۱۴۲	۵۶۵۰۰۰۰	۱۹٪	۸/۷٪
6s-0.05α-1.5β	۰/۰۱۶۵	۵۷۹۰۰۰۰	۵/۷٪	۶/۵٪
6s-0.05α-1.71β	۰/۰۱۷	۵۸۱۰۰۰۰	۳٪	۶٪
6s-0.2α-1.5β	۰/۰۱	۴۹۵۰۰۰۰	۴۳٪	۲۰٪
6s-0.2α-1β	۰/۰۰۳	۴۸۴۰۰۰۰	۸۳٪	۲۲٪

### ۵-۲-۲- بررسی نتایج تحلیل چرخه‌ای

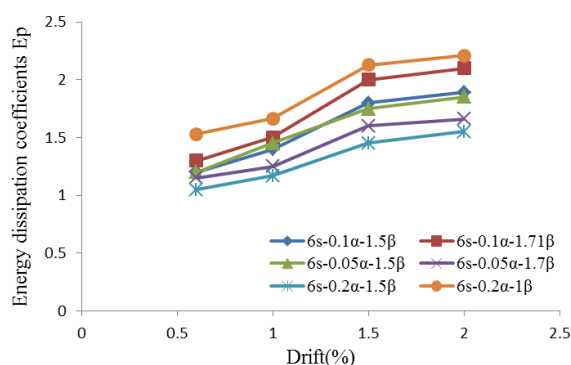
با توجه به نتایج جدول ۱۴ مشخص است که با فرض ثابت بودن  $\beta$ ، با افزایش  $\alpha$ ، میزان اتلاف انرژی کاهش و نسبت دریفت پسماند نیز کاهش می‌یابد، مثلاً در قاب ۶ طبقه، با فرض  $\beta=1/5$ ، برای مقادیر  $\alpha=0/5$ ،  $\alpha=0/1$  و  $\alpha=0/2$  مقدار اتلاف انرژی برابر است با،  $5810000$ ،  $4950000$  و  $4840000$  و مقادیر دریفت پسماند به ترتیب برابر است با  $0/165$ ،  $0/13$  و  $0/1$ . هم چنین در جدول ۱۳ مشاهده شده با فرض ثابت بودن  $\alpha$ ، با کاهش  $\beta$ ، مقدار اتلاف انرژی و دریفت پسماند کاهش می‌یابد، برای مثال در قاب ۶ طبقه با فرض  $\alpha=0/2$  برای مقادیر  $\beta=1/5$  و  $\beta=1$  مقدار اتلاف انرژی به ترتیب برابر است با  $4950000$  و  $4840000$  و مقدار دریفت پسماند به ترتیب برابر با  $0/17$  و  $0/04$  می‌باشد. بدین ترتیب افزایش  $\alpha$  و  $\beta$  سبب کاهش دریفت پسماند شده است، اما در این بین اتلاف انرژی سیستم را نیز کاهش داده است. این رفتار را می‌توان این‌طور توجیه کرد که با افزایش  $\beta$ ، سهم قاب از برش پایه‌ی طراحی افزایش و سهم بادبند کاهش می‌یابد در نتیجه مقاطع اعضای قاب با اتصالات پس کشیده بزرگ‌تر و مقاطع اعضای بادبندی کوچک‌تر می‌شود. از طرفی در این سیستم،

قاب با اتصالات پس کشیده و قاب بادبندی به ترتیب نقش کاهش دررفت پسماند و افزایش اتلاف انرژی را در برابر زلزله دارند و مشخص است که قاب پس کشیده، دارای اعضای با مقطع بزرگتر سبب کاهش دررفت پسماند و بادبند دارای اعضای با مقطع کوچکتر سبب کاهش انرژی می شود و از طرفی افزایش  $\alpha$ ، سبب افزایش سختی پس از تسلیم سیستم شده و این موضوع سبب کاهش دررفت پسماند می شود. از طرفی کاهش اتلاف انرژی باعث افزایش تقاضای لرزه ای، مانند ماکزیمم دررفت طبقات و ماکزیمم شکل پذیری طبقات می گردد و ممکن است سبب ایجاد خسارت به سازه شود. برای مشخص شدن این موضوع که افزایش این پارامترها تا چه اندازه مجاز می باشد، نیاز به انجام تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی می باشد.

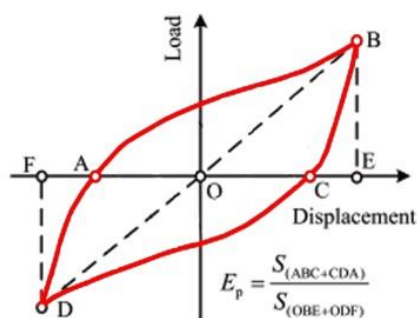
در شکل ۱۵ ضریب اتلاف انرژی  $E_p$  برای نمونه های ۳ طبقه و ۶ طبقه مشخص شده است ضریب اتلاف انرژی یک کمیت نرمالیز شده می باشد که جهت نشان دادن ظرفیت اتلاف انرژی سازه مورد استفاده قرار می گیرد. نحوه محاسبه این کمیت در شکل ۱۶ نشان داده شده است  $S_{abc}$  و  $S_{cda}$  به ترتیب برابر با مساحت بالا و پایین حلقه اتلاف انرژی می باشند و  $S_{ode}$  و  $S_{obe}$  به ترتیب برابر با انرژی کرنشی الاستیک مربوط به نقطه ماکسیمم جابجایی حلقه می باشند. همانطور که در تصویر ۱۵ مشخص می باشد، در همه مدل ها با افزایش دررفت، مقدار ظرفیت اتلاف انرژی افزایش می یابد. همچنین تصویر ۱۵ نشان می دهد که با افزایش  $\alpha$  و یا  $\beta$  مقدار ضریب ظرفیت اتلاف انرژی کاهش می یابد.



ب) برای نمونه های ۶ طبقه



الف) برای نمونه های ۳ طبقه

شکل ۱۵: ضریب اتلاف انرژی  $E_p$ شکل ۱۶: نحوه محاسبه ضریب  $E_p$

## ۶- نتیجه گیری

در این مطالعه تأثیر اضافه کردن قاب پس کشیده به قاب مهارشده با مهاربند کمانش ناپذیر با پیکربندی خارج از مرکز جهت کاهش دررفت پسماند مورد بررسی قرار گرفت، بدین منظور ۱۴ قاب ۳ و ۶ طبقه با ترکیب‌های مختلفی از پارامترهای چرخه‌ای طراحی شده‌اند، برش پایه‌ی طراحی مدل‌ها با روش طراحی پلاستیک بر اساس عملکرد محاسبه شده است و سپس اعضای مدل‌ها طبق ضوابط ارائه شده در این مطالعه طراحی شده‌اند. در ادامه با استفاده از نرم افزار اجزا محدود آباکوس تحلیل پوش‌آور و چرخه‌ای بر روی مدل‌ها انجام شده است و نمودارهای تحلیل چرخه‌ای و پوش‌آور برای نمونه‌های مختلف ارائه شده و مشاهده شده است که با اضافه کردن قاب با اتصال پس کشیده به مهاربند کمانش ناپذیر با پیکربندی خارج از مرکز می‌توان دررفت پسماند را کاهش داد و به صورت کلی نتایج به صورت زیر ارائه می‌گردد:

۱- صحت ضوابط ارائه شده جهت طراحی اعضای سیستم مرکب مورد تأیید قرار گرفت.

۲- روش پیشنهادی به منظور کاهش دررفت پسماند در بادبندهای کمانش ناپذیر با پیکربندی خارج از مرکز مؤثر می‌باشد.

۳- افزایش نسبت سختی ثانویه به سختی اولیه سیستم ( $\alpha$ )، سبب کاهش دررفت پسماند و کاهش اتلاف انرژی شده است. مثلاً در قاب ۶ طبقه، با فرض  $\beta=1/5$ ، برای مقادیر  $\alpha=0/1$ ،  $\alpha=0/05$  و  $\alpha=0/2$  مقدار اتلاف انرژی برابر است با، ۵۸۱۰۰۰۰، ۵۴۷۰۰۰۰ و ۴۹۵۰۰۰۰ و مقادیر دررفت پسماند به ترتیب برابر است با ۰/۱۶۵، ۰/۰۱۳ و ۰/۰۱.

۴- کاهش ضریب برگشت پذیری ( $\beta$ )، سبب کاهش دررفت پسماند و اتلاف انرژی می‌شود. برای مثال در قاب ۶ طبقه با فرض  $\alpha=0/2$  برای مقادیر  $\beta=1/5$  و  $\beta=1$  مقدار اتلاف انرژی به ترتیب برابر است با ۴۹۵۰۰۰۰ و ۴۸۴۰۰۰۰ و مقدار دررفت پسماند به ترتیب برابر با ۰/۰۱۱ و ۰/۰۰۴ می‌باشد.

۵- با افزایش  $\alpha$  و یا کاهش  $\beta$  مقدار ضریب ظرفیت اتلاف انرژی کاهش می‌یابد.

## مراجع

- [1] López, WA. Sabelli, R. (2004). Seismic design of buckling-restrained braced frames. Moraga (CA): Structural Steel Educational Council.
- [2] Huang, YC. Tsai, KC. (2002). Experimental responses of large scale buckling restrained brace frames. Report no, CEER/R91-03, National Taiwan University.
- [3] Richard, RM. (2009). Braced frame steel structures 402: when and why frame action matters. Struct Eng.
- [4] Fahnestock, LA. Ricles, JM. Sause, R. (2007). Experimental evaluation of a large-scale buckling-restrained braced frame. J Struct Eng; 133(9):1205\_14.
- [5] Prasad, BK. (2004). Current status of buckling-restrained braced frame design: currently available buckling-restrained braces. In: Proceedings of 72nd annual convention, SEAOC.
- [6] Prinz, G S. Richards, P W. (2012). Seismic Performance of Buckling-Restrained Braced Frames with Eccentric Configurations. Journal of Structural Engineering, Vol. 138, No. 3.
- [7] McCormick, J. Aburano, H. Ikenaga, M. and Nakashima, M. (2008). Permissible residual deformation levels for building structures considering both safety and human elements. In Proc., 14th World Conf. on Earthquake Engineering. Beijing, China.
- [8] Iwata, Y., Sugimoto, K., Kuwamura, H. (2005). Reparability limit of steel structural buildings: Study on performance-based design of steel structural buildings Part 2. Journal of Structural and Construction Engineering, 588, 165-172. (in Japanese)
- [7] Qiu, C. Zhu, S. (2017). Shake table test and numerical study of self-centering steel frame with SMA braces. Earthq Eng Struct Dyn;46(1):117-37.
- [9] Hall, K. S., Eatherton, M., and Hajjar, J. F. (2010). "Nonlinear behaviour of controlled rocking steel-framed building systems with replaceable energy dissipating fuses." **Rep. No. NSEL-026**, Newmark Structural Engineering Laboratory Report Series, Urbana, IL

- [10] Kiggins, S. Uang, C. (2006). Reducing residual drift of buckling-restrained braced frames as a dual system. *Eng. Struct.*, 28 (11): 1525–1532.
- [11] Pettinga, D. Christopoulos, C. Pampanin, S. Priestley, M. (2006). Effectiveness of simple approaches in mitigating residual deformations in buildings. *Earthquake Eng. Struct, Dyn.* 36 (12): 1763–1783.
- [12] Ariyaratana, C. Fahnestock, A. (2011). Evaluation of buckling-restrained braced frame seismic performance considering reserve strength. *Eng. Struct, Dyn.* 33 (1): 77–89.
- [13] Clayton P M, Berman J W, Lowes L N. Seismic design and performance of self-centering steel plate shear walls. *Journal of Structural Engineering*, 2012, 138(1): 22–30
- [14] Qiu, C. Zhu, S. (2017). Performance-based seismic design of self-centering steel frames with SMA-based braces. *Engineering Structures.* 130: 67\_82.
- [15] Deierlein GG, Krawinkler H, Cornell CA (2008). A framework for performance-based earthquake engineering. In: *Pacific conference on earthquake engineering.* p.1–8.
- [16] Goel SC, Chao SH (2008). Performance-based plastic design of special truss moment frames. *AISC Eng J*;45(2):127–50.
- [17] SEAOC. Performance based seismic engineering of buildings. Vision 2000 report, vols. I and II. Sacramento (California): Structural Engineers Association of California; 1995.
- [18] Yang TY, Li YJ, Leelataviwat S (2014). Performance-based design and optimization of buckling restrained knee braced truss moment frame. *J Perform Constr Facil*;28:A4014007. SPECIAL ISSUE: Performance of Timber and Hybrid Structures.
- [19] Sahoo, D. Chao, Sh. (2010). Performance-based plastic design method for buckling-restrained braced frames. *Engineering Structures*, 32: 2950\_2958.
- [20] Lee, SS. Goel, SC. (2001). Performance-based design of steel moment frames using target drift and yield mechanism. Research report UMCEE 01-07. Ann Arbor, USA: University of Michigan.
- [21] Kharmale, S. Ghosh, S. (2013). Performance-based plastic design of steel plate shear walls. *Journal of Constructional Steel*, Research 90: 85–97.
- [22] Chao, Sh. Goel, S. (2006). Performance-based design of eccentrically braced frames using target drift and yield mechanism. *AISC Eng*, 173\_200. 3rd Quarter.
- [23] Grigorian, M. Tavousi, Sh. (2017). Innovations in rocking wall-frame systems-theory and development. *Struct Eng*, 9:205–217
- [24] Federal Emergency Management Agency. FEMA. (2006). Next-generation performance-based seismic design guidelines\_program plan for new and existing buildings. FEMA-445. Washington (DC).
- [25] Sullivan TJ (2013). “Direct displacement-based seismic design of steel eccentrically braced frame structures” *Bull Earthquake Eng*, 11:2197–2231.
- [26] Mingming, J. Lu, D. Guo, L. Sun, L. (2014), Experimental research and cyclic behaviour of buckling-restrained braced composite frame, *Journal of Constructional Steel Research*, 90-105.
- [27] Clayton P M, Winkley T B, Berman J W, Lowes L N. Experimental investigation of self-centering steel plate shear walls. *Journal of Structural Engineering*, 2012, 138(7): 952–960