

EXTENDED ABSTRACT

Assessment of the Role of Element Arrangement in Uniform Stress Distribution within the StrongBack Braced System with Steel Brace

Aryan Fatahzadeh^a, Ali Biglarifadafan^{b,*}

^a MSc Graduate, Faculty of Engineering, University of Golestan, Golestan, Iran

^b Assistant Professor, Faculty of Engineering, University of Golestan, Golestan, Iran

Received: 20 April 2025; **Reviewed:** 01 October 2025; **Accepted:** 20 October 2025

Keywords:

Strongback Braced Frame, cyclic static loading, elastic truss, soft story.

1. Introduction

The steel concentrically braced frame (CBF) is among the most widely used structural systems, offering economic efficiency, adequate stiffness, and high strength. However, despite these advantages, the system exhibits several critical limitations. One of the main issues is that brace buckling frequently leads to a reduction in ductility, energy dissipation capacity, and a significant decrease in strength and stiffness, often resulting in the formation of a soft-story mechanism.

To overcome this problem, the strongback braced frame has been introduced in recent years as a solution. This system comprises an elastic truss, which promotes uniform lateral deformation along the height of the structure, and a nonlinear segment, which is responsible for yielding behavior and energy dissipation.

This study presents a numerical investigation of the impact of different strongback system configurations on structural performance. Initially, the modeling approach is validated by comparing it with existing experimental and numerical results. Once validated, cyclic analyses are carried out on various models to assess their behavior. The evaluation of system configuration is organized into three parts: (1) analyzing the effect of yielding ties, (2) examining the arrangement of elastic and inelastic braces, and (3) studying the influence of bay geometry on the overall performance of the strongback frame.

2. Methodology

In this study, nonlinear modeling of the specimens was performed using the finite element software OpenSees. Subsequently, the models were evaluated through nonlinear static analysis under three different categories. To assess the effects of the applied configurations, the inter-story drift diagrams and the internal forces developed in the elastic truss members were investigated.

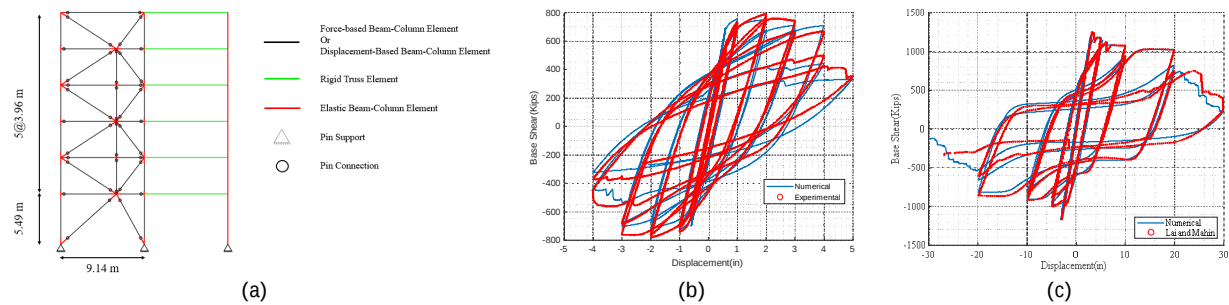


Fig. 1. a) Schematic of numerical model, **b)** Model verification of experimental specimen, **c)** Model verification of numerical specimen.

3. Results and discussion

3.1. Effects of Ties

By incorporating yielding ties in the middle stories, the forces induced in other members of the elastic truss can be reduced. However, this reduction is accompanied by an increase in inter-story drifts. Additionally, adding a yielding tie in the first story reduces the forces in other ties by up to 30%, but leads to an approximate 20% increase in the uplift force of the column.

3.2. Effects of Different Configurations

The use of various configurations, including V-type and inverted V-type arrangements, has demonstrated that this factor significantly influences the forces developed in the elastic truss of the structural system. This is primarily attributed to the moment effects in the elastic truss and the influence of element arrangement on force transfer to other members. It was also observed that by employing yielding ties, it is possible to mitigate these effects effectively.

3.2. Effects of the Length of the Elastic Region

With the increase in the length of the elastic region and the corresponding reduction in the inelastic region, the forces generated in the elastic braces and columns decrease, while the force developed in the ties is also reduced. However, the elongation of the elastic region results in greater strains in the inelastic braces, which leads to premature failure of these members and consequently a drop in the structural resistance.

4. Conclusions

In this study, various configurations of the elastic truss and inelastic bracing members were investigated to evaluate their effects on the structural behavior and force distribution in the elastic truss members under cyclic static loading. The results indicate that the use of yielding ties can reduce the forces in other members of the elastic truss by up to 30%. However, after buckling occurs, these ties lead to a concentration of deformation up to 30% in a single story, which consequently increases the forces in other members. Implementing a yielding tie in the first story not only increases the overall structural strength, but also reduces the force in other ties by up to 30%. Nevertheless, it leads to an increase of up to 20% in the uplift force of the column. The evaluation of different configurations also revealed that using V- and inverted V-shaped (chevron) layouts significantly increases the forces in elastic truss members-by up to 100%. However, by applying yielding ties, it is possible to reduce these forces by approximately 50%. Furthermore, reducing the length of the inelastic region, although initially decreasing the induced forces, leads to premature failure of the braces during higher displacement cycles, resulting in a significant drop in structural strength at large deformations.

سنجش نقش چیدمان المان‌ها در توزیع یکنواخت تنش در سیستم مهاربندی پشتیبان قوی با مهاربند فولادی

آرین فتاح‌زاده¹، علی بیگلری فدافن^{2*}

¹ کارشناس ارشد مهندسی سازه، دانشکده مهندسی گرگان، دانشگاه گلستان

² استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی گرگان، دانشگاه گلستان

دریافت: 1404/1/31، بازنگری: 1404/7/9، پذیرش: 1404/7/28، نشر آنلاین: 1404/7/28

چکیده

قاب مهاربندی پشتیبان قوی از جمله سیستم‌های نوین معرفی شده به منظور جلوگیری از مکانیزم طبقه نرم است. در این سیستم، با استفاده از یک خرپا الاستیک نیازهای لرزه‌ای را در ارتفاع طبقه توزیع کرده و از تشکیل طبقه نرم جلوگیری می‌کند. با وجود رفتار مناسب این سیستم در مطالعات صورت گرفته، این مطالعات محدود بوده و جنبه‌های مختلف مؤثر بر طراحی این سیستم نیازمندی بررسی بیشتر است. در این مطالعه، پیکربندی‌های متفاوت خرپا الاستیک و مهاربندهای ناحیه غیرارتجاعی مورد بررسی قرار گرفته تا اثرات آن در رفتار سازه و توزیع نیروهای ایجاد شده در اعضای خرپا الاستیک تحت بارگذاری استاتیکی چرخه‌ای ارزیابی شود. نتایج این مطالعه بیانگر آن بود که استفاده از قید تسلیم‌شونده می‌تواند موجب کاهش نیرو تا 30% در سایر اعضای خرپا الاستیک شود اما بعد از کماتش، موجب تجمع تغییرشکل تا 30% در یک طبقه می‌شود و نیروی سایر اعضا را افزایش می‌دهد. استفاده از قید تسلیم‌شونده در طبقه اول، ضمن افزایش مقاومت سازه، نیروی ایجاد شده در قیده‌ها را تا 30% کاهش داده اما موجب افزایش نیروی آپلیفت ستون تا 20% می‌شود. ارزیابی پیکربندی‌های متفاوت بیانگر آن بود که استفاده از پیکربندی هفتی و هشتی موجب افزایش قابل‌توجه نیرو در اعضای خرپا الاستیک تا 100% شده است که می‌توان با استفاده از قیده‌های تسلیم‌شونده، نیروهای ایجاد شده در خرپا الاستیک را تا میزان 50% کاهش داد. کاهش طول ناحیه غیرارتجاعی، موجب گسیختگی سریع‌تر مهاربندها و در نتیجه افت مقاومت قابل توجه در تغییر مکان‌های بالا می‌شود.

کلیدواژه‌ها: قاب مهاربندی پشتیبان قوی، بارگذاری استاتیکی چرخه‌ای، خرپا الاستیک، طبقه نرم.

1- مقدمه

قابل توجه مهاربندها، طبقه‌ای که در آن مهاربند دچار کماتش شده دچار تغییر شکل‌های غیرخطی قابل توجه شده که موجب تمرکز تغییر شکل در یک یا چند طبقه می‌شود و در نتیجه مکانیزم طبقه نرم تشکیل می‌شود (Kazemzadeh Azad و همکاران، 2017; Mahin و Uriz، 2008).

جهت افزایش ظرفیت جذب انرژی در قاب‌های مهاربندی، قاب‌های مهاربندی واگرا (Kazemzadeh Azad و Topkaya، 2017) و مهاربندهای کماتش‌تاب (Zhou و همکاران، 2021) معرفی شدند و به منظور جلوگیری از مکانیزم طبقه نرم، قاب‌های مهاربندی زیپی شکل¹ (Khatib و همکاران، 1988)، سیستم‌های

قاب مهاربندی همگرای فولادی از محبوب‌ترین سیستم‌های سازه‌ای محسوب می‌شود، اما با وجود مزایای اقتصادی، سختی و مقاومت مناسب، دارای برخی اشکالات قابل توجه است. در این سیستم، کماتش مهاربندها در اغلب مواقع موجب کاهش شکل‌پذیری، ظرفیت جذب انرژی و همچنین کاهش مقاومت و سختی قابل توجه می‌شود و در صورت عدم وجود سیستم پشتیبان، امکان جلوگیری از خرابی در زمین‌لرزه‌های شدید فراهم نخواهد بود (Mahin و Chen، 2012; Li و همکاران، 2018).

کوماتش عضو فشاری مهاربند و در پی آن، کاهش مقاومت

1. Zipper braced frame



شاپا الکترونیکی: 2717-4077

ناشر: معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه تبریز

<https://doi.org/10.22034/CEEJ.2025.66873.2431>

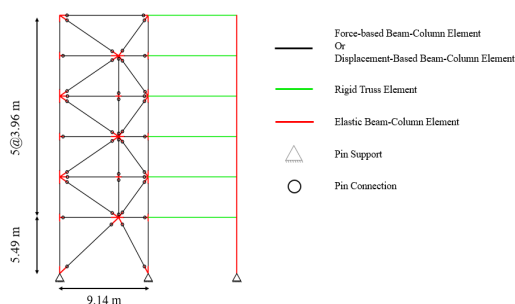
* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: 017-32441003

* Orcid Code Corresponding Author: 0000-0002-9616-1823

آدرس ایمیل: aryanfatahzadeh@gmail.com (آ. فتاح‌زاده)، biglari.a@gmail.com (ع. بیگلری فدافن).

2. Tied eccentrically braced frame

به صورت دوبعدی انجام شد. تصویر شماتیک مدل مبنا در شکل (2) نشان داده شده است و در جدول (2) مقاطع اعضای قاب مهاربندی ذکر شده است. به منظور لحاظ اثرات پی-دلتا، یک ستون متکی به نمایندگی از سایر ستون‌های تحت بار ثقلی قرار داده شد. مساحت و ممان اینرسی این ستون برابر با مجموع مساحت و ممان اینرسی سایر ستون‌های گرانشی در مدل بوده و این ستون به وسیله المان خربایی با سختی بسیار بالا به قاب اصلی متصل شده است. برای مدل‌سازی تمامی المان‌ها از مصالح Steel02 استفاده شد. جهت مدل‌سازی تیرها و ستون‌ها از المان force Beam Column و جهت مدل‌سازی مهاربندها از المان disp Beam Column استفاده شده است. در این مدل جهت در نظرگیری اثرات کمانش، برای مدل‌سازی ستون‌ها از دو المان و جهت مدل‌سازی مهاربندها از چهار المان با نقص اولیه به میزان یک هزارم طول مهاربند، در وسط مهاربندها در نظر گرفته شد. در تمامی المان‌ها از 5 نقطه انتگرال‌گیری استفاده شده است. جهت در نظرگیری مقاطع المان‌ها نیز از مقاطع رشته‌ای یا فایبر⁴ استفاده شد. اتصالات مفصلی به صورت کاملاً مفصلی و اتصالات گیردار جهت سادگی، به صورت صلب با استفاده از المان Zero Length Element مدل‌سازی شد. همچنین در انتهای المان‌ها به منظور در نظرگیری اثرات ناحیه صلب انتهایی، المان الاستیک با طول متناسب با هر عضو استفاده شد. تکیه‌گاه‌ها نیز به صورت مفصلی مدل شده است.



شکل 2- تصویر شماتیک مدل عددی ارائه شده

جدول 1- پارامترهای مدل‌سازی مصالح Steel02

پارامتر مدل‌سازی	مقدار	پارامتر مدل‌سازی	مقدار
F_y (kip/in ²)	45	a_1	0/03
E (kip/in ²)	29000	a_2	1
b	0/003	a_3	0/02
R_0	18/5	a_4	1
cR_1	0/925	m	0/458
cR_2	0/15	ε_0	0/099

Simpson (2020) به بررسی اثرات مودهای بالاتر در سیستم پشتیبان‌قوی پرداخت. وی بیان نمود که با استفاده از آیین‌نامه‌های طراحی سازه فعلی، که تنها اثرات مود اول در نظر گرفته می‌شود، امکان طراحی مناسب خرپا الاستیک فراهم نمی‌باشد.

Faramarzi و Taghikhany (2021) نیز به بررسی اثرات میزان صلبیت خرپا و طول ناحیه غیرارتجاعی در سیستم پشتیبان‌قوی با مهاربند معمولی پرداختند. آن‌ها به مقایسه قاب‌ها با محل تقاطع یک‌سوم، یک‌دوم و دوسوم طول دهانه پرداختند و متوجه شدند افزایش طول ناحیه غیرارتجاعی و همچنین افزایش صلبیت خرپا الاستیک موجب افزایش شکل‌پذیری، افزایش اضافه مقاومت و همچنین افزایش ظرفیت فروریزش سازه می‌شود.

Martin و Deierlein (2021) به بررسی سیستم‌هایی که امکان توزیع تغییرمکان تحت مود اول را فراهم می‌کنند پرداختند و آن‌ها را تحت عنوان سیستم‌های ستون فقراتی دسته‌بندی کردند. آن‌ها متوجه شدند روش‌های طراحی مرسوم از قبیل نیروی جانبی معادل و طیف پاسخ برای طراحی سیستم‌های ستون فقراتی مناسب نبوده و تخمین مناسبی از نیروهای ایجاد شده در زلزله، توسط این روش‌ها پیش‌بینی نمی‌شود. همچنین آن‌ها به بررسی عملکرد این سیستم‌ها پرداختند و متوجه شدند سیستم پشتیبان‌قوی در مقایسه با سیستم‌های مرکزگرا، دررفت کمتر و جذب انرژی بیشتر را از خود نشان می‌دهد در حالی که سیستم‌های مرکزگرا به علت وجود رفتار مرکزگرایی خود، تغییرشکل باقی‌مانده ناچیزی را نشان می‌دهند.

با توجه به پژوهش‌های انجام شده و ضعف آیین‌نامه‌های مرسوم در طراحی قاب پشتیبان‌قوی، پژوهشگران روش‌های مختلف طراحی از جمله طیف فرکانس تسلیمی (Faramarzi و Taghikhany, 2020)، روش برهم‌نهی مودال ساده شده (Martin و Deierlein, 2021) و روش پوش‌آور مودال ساده شده (Simpson و Rivera Torres, 2021) را پیشنهاد داده‌اند.

در این پژوهش، ارزیابی عددی تأثیر پیکربندی سیستم پشتیبان‌قوی در رفتار این سیستم مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. ابتدا صحت‌سنجی مطالعه آزمایشگاهی و عددی انجام شده و پس از بررسی صحت مدل‌سازی، نتایج تحلیل چرخه‌ای مدل‌های مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است. بررسی پیکربندی در سه بخش بررسی اثرات قیدها، بررسی چینش مهاربندهای ارتجاعی و غیرارتجاعی و بررسی اثر ابعاد دهانه انجام شده است.

2- مدل‌سازی عددی

به منظور ارزیابی پیکربندی قاب پشتیبان‌قوی، مدل عددی ارائه شده در پژوهش Lai و Mahin (2015) به عنوان نمونه مبنا در نظر گرفته شد. مدل‌سازی‌ها با استفاده از نرم‌افزار OpenSees

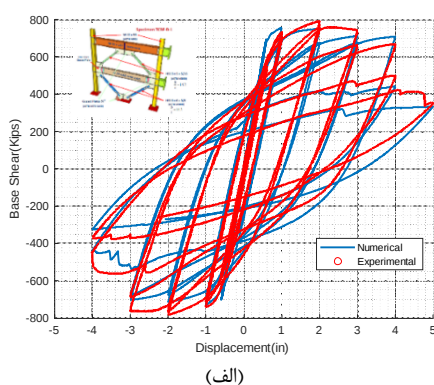
در شکل (2)

شکل تصویر شماتیک مدل عددی نشان داده شده است. به منظور ارزیابی امکان گسیختگی در مهاربندها، از مصالح خستگی⁵ استفاده شد. رفتار مصالح نیز مطابق جدول (1) در نظر گرفته شد. در این جدول، پارامتر b نسبت سخت‌شوندگی کرنشی، R_0 ، CR_1 و CR_2 پارامترهای کنترل‌کننده تغییر حالت الاستیک به

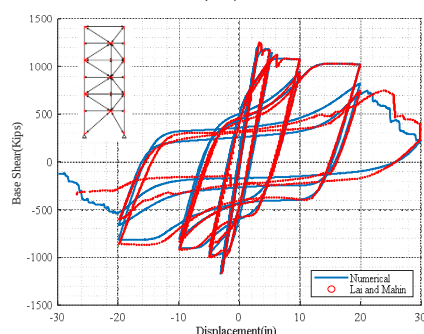
پلاستیک، a_1 تا a_4 پارامترهای سخت‌شوندگی همگن هستند پارامتر m شیب منحنی کافین-مانسون⁶ در فضای لگاریتمی و ε_0 مقدار کرنش گسیختگی در هر سیکل است (Mazzoni و همکاران، 2006). در جدول (2) مقاطع اعضا بیان شده است. لازم به ذکر است با توجه به هندسه مهاربند، در طبقات اول و ششم از قید استفاده نشده است.

جدول 2- مشخصات مقاطع اعضای دهانه مهاربندی

طبقه	ستون	تیر	مهاربند ناحیه الاستیک	قید	مهاربند ناحیه غیرخطی
1	W14x342	W18x86	W14x132	-	HSS12x12x5/8
2	W14x342	W18x86	HSS12x12x5/8	HSS12x12x5/8	HSS10x10x5/8
3	W14x342	W18x86	HSS12x12x5/8	HSS12x12x5/8	HSS9x9x5/8
4	W14x132	W18x86	HSS10x10x1/2	HSS8x8x1/2	HSS9x9x5/8
5	W14x132	W18x86	HSS10x10x1/2	HSS8x8x1/2	HSS8x8x1/2
6	W14x132	W18x86	HSS8x8x1/2	-	HSS7x7x1/2



(الف)



(ب)

شکل 1- نتایج صحت‌سنجی تحلیل چرخه‌ای نمونه؛
الف) آزمایشگاهی (Lai، 2012)، ب) عددی (Lai و Mahin، 2015)

3- اثرات قید

در این بخش اثرات حذف و یا تضعیف قیدها در این سیستم بررسی شد. بدین منظور چندین مدل در نظر گرفته شد تا اثرات این المان در رفتار سازه مورد ارزیابی قرار گیرد. در جدول (4)

در این مطالعه، مدل‌های معرفی شده توسط تحلیل استاتیک چرخه‌ای مورد ارزیابی قرار گرفت و پروتکل بارگذاری چرخه‌ای نیز طبق جدول (3) در نظر گرفته شد.

جدول 3- پروتکل بارگذاری چرخه‌ای

شماره ترتیب	تعداد چرخه	تغییر مکان سقف هدف (اینچ)
1	2	$\pm 2/9$
2	2	$\pm 4/98$
3	2	$\pm 9/96$
4	2	$\pm 19/92$
5	1	$\pm 29/88$

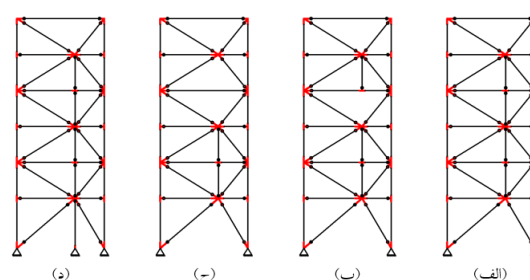
2-1- اعتبارسنجی عددی

جهت صحت‌سنجی مدل‌سازی عددی، مدل آزمایشگاهی Lai (2012) در نرم‌افزار Opensees شبیه‌سازی شد. همچنین نتایج تحلیل چرخه‌ای قاب پشتیبان‌قوی مدل عددی Lai و Mahin مورد مقایسه با نتایج مدل‌سازی این پژوهش قرار گرفت. در شکل (3) نتایج صحت‌سنجی نشان داده شده است و تطابق مناسبی بین نتایج مدل‌سازی عددی و نتایج پژوهش‌های پیشین دیده می‌شود.

لیست مدل‌های ایجاد شده و در شکل (4) تصاویر شماتیک مدل‌ها ارائه شده است.

جدول 4- نام مدل‌ها با بررسی اثرات قیدها

نام مدل	توضیحات
SBS-Base	مدل اصلی و ارائه شده توسط Mahin و Lai
SBS-T4-0.7	قید طبقه چهارم ضعیف شد تا زودتر به کمانش برسد.
SBS-T4-0.5	قید طبقه چهارم ضعیف شد تا زودتر به کمانش برسد.
SBS-T4R	قید طبقه چهارم حذف شد.
SBS-3S	قید طبقات سوم و چهارم حذف شدند.
SBS-T1	در طبقه اول مدل پایه قید در نظر گرفته شد.
SBS-T1-NT4	قید طبقه چهارم مدل SBS-T1 نیز ضعیف شد.



شکل 2- تصویر شماتیک مدل‌ها: الف) مدل‌های SBS-Base و

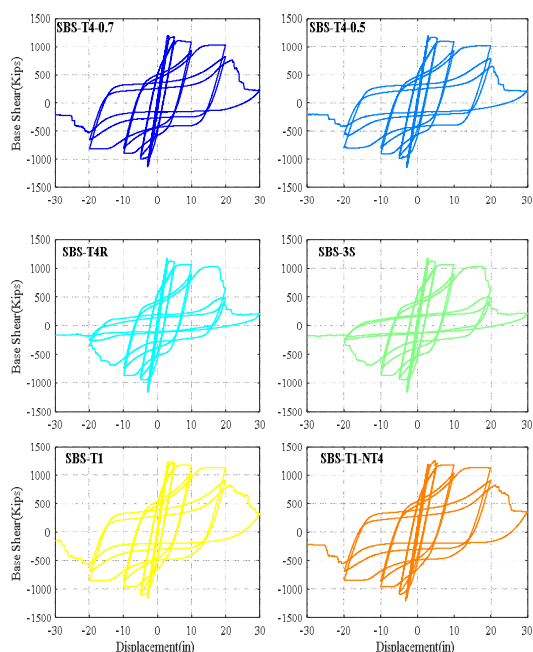
ب) مدل SBS-T4-0.5 و SBS-T4R،

ج) مدل SBS-3S و د) مدل‌های SBS-T1 و SBS-T1-T4

در مدل SBS-T1 در طبقه اول مدل پایه نیز یک قید اضافه شد (شکل 4-د)). مقطع این المان به‌نحوی در نظر گرفته شد تا در سیکل‌های ابتدایی دچار کمانش شود تا نیروهای ایجاد در قیدهای طبقات بالاتر، افزایش پیدا نکند. بدین‌منظور مقطع این المان، $HSS8 \times 8 \times 1/2$ در نظر گرفته شد. در مدل SBS-T1-NT4 قید طبقه چهارم مدل SBS-T1 نیز مجدداً کاهش یافت و از مقطع $HSS6 \times 6 \times 1/2$ استفاده شد تا اثرات این تغییر در عملکرد سازه بررسی شود. لازم به‌ذکر است در تمامی مدل‌ها، مقاطع اعضای خرپا الاستیک به‌نحوی تغییر یافت، تا این اعضا الاستیک باقی بمانند.

3-1- تحلیل هیستریزیس

در شکل (5) نتایج تحلیل هیستریزیس نشان داده شده است. همچنین در جدول (5) دوره تناوب مود اول و دوم هر مدل به‌همراه حداکثر برش پایه آن‌ها ذکر شده است.



شکل 5- منحنی هیستریزیس مدل‌ها با بررسی اثرات قید

جدول 5- حداکثر برش پایه و دوره تناوب مود اول و دوم

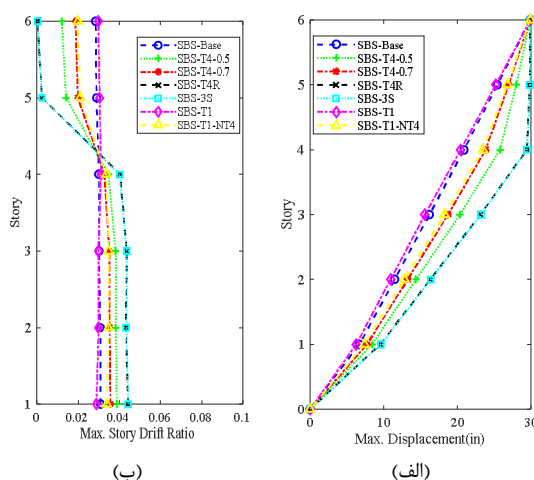
مدل‌ها با بررسی اثرات قید

نام مدل	حداکثر برش پایه (kips)	دوره تناوب سازه	مود اول (Sec)	مود دوم (Sec)
SBS-Base	1207	0/724	0/249	0/249
SBS-T4-0.7	1197	0/724	0/249	0/249
SBS-T4-0.5	1193	0/724	0/249	0/249
SBS-T4R	1173	0/708	0/244	0/244
SBS-3S	1173	0/708	0/244	0/244
SBS-T1	1268	0/724	0/249	0/249
SBS-T1-NT4	1268	0/724	0/249	0/249

مدل SBS-Base همان مدل اصلی بوده و جهت مقایسه با سایر مدل‌ها مورد ارزیابی قرار گرفته است. جهت بررسی اثرات کمانش قیدها، مدل SBS-T4-0.7 توسعه داده شد و در این مدل مقطع قید طبقه چهارم به $HSS6 \times 6 \times 1/2$ تغییر یافت تا این المان دچار کمانش و یا تسلیم شود (شکل 4-الف)).

جهت بررسی دقیق‌تر اثر کمانش قید در سیکل‌های پایین‌تر، مقطع قید طبقه چهارم به $HSS5 \times 5 \times 1/2$ تغییر یافت. با توجه به آن‌که مساحت این مقطع تقریباً نصف مساحت قید طبقه بالای آن است، نام آن SBS-T4-0.5 گذاشته شد (شکل 4-الف)). با توجه به پژوهش‌های گذشته در سیستم‌های مشابه از قبیل سیستم‌های مرکزگرا و سیستم مهاربند واگرای مقیدشده، انتظار می‌رود با تسلیم این عضو، ضمن پذیرش افزایش جابه‌جایی نسبی طبقات، نیروهای ایجاد شده در سایر اعضای خرپا الاستیک کاهش پیدا کرده و سیستم اقتصادی‌تری حاصل شود. این کاهش نیرو از آن جهت خواهد بود که نیروی اعمال شده از این قید به سایر طبقات، به مقاومت فشاری آن محدود می‌شود. جهت بررسی آثار حذف قید طبقه چهارم، مدل SBS-T4R ارائه داده شد تا اثرات حذف این المان مورد ارزیابی قرار بگیرد (شکل 4-ب)). در مدل SBS-3S قید طبقات چهارم و پنجم حذف شدند (شکل 4-ج)).

دیده شد. همچنین در این مدل‌ها، در چرخه انتهایی بیشترین افت مقاومت مشاهده شده است.



شکل 3- الف) حداکثر جابه‌جایی، ب) حداکثر جابه‌جایی نسبی طبقات با بررسی اثرات قیدها

3-3- نیروی خرابی الاستیک

در شکل (7) نیروهای محوری ایجاد شده در خرابی الاستیک نشان داده شده است. با توجه به آن که نیروی ایجاد شده در اعضای غیرالاستیک بیانگر مقاومت آن‌ها (و نه نیروی ایجاد شده در آن‌ها) است، نیروی قید طبقه اول در مدل‌های دارای آن گفته نشد و با توجه به نبود قید در طبقه ششم، نیروی ایجاد شده در قید سایر طبقات مورد بررسی قرار گرفت. کاهش قابل توجه سطح مقطع قید طبقه چهارم، (مدل SBS-T4-0.5)، موجب کاهش 12 و 9 درصدی نیروی ایجاد شده در قیده‌های طبقات دوم و سوم و مقدار 29% در طبقه پنجم، نسبت به مدل پایه شده است. لازم به ذکر است نیروی نشان داده شده برای قید طبقه چهارم، مقاومت نهایی این مهاربند بوده و این قید دچار تسلیم شده است. همچنین نیروهای ایجاد شده در مهاربند ارتجاعی در طبقه اول و دوم تقریباً برابر، در طبقه سوم افزایش 4%، در طبقه چهارم کاهش 20% و در طبقه پنجم و ششم افزایش 21 و 23 درصدی مشاهده می‌شود. افزایش نیروی مهاربند طبقه پنجم و ششم، از آن جهت است که کماتش قید طبقه چهارم، موجب افزایش جابه‌جایی نسبی طبقه چهارم و در پی آن، اعمال نیروی قابل توجه به مهاربند ارتجاعی طبقه بالاتر است. نیروهای ایجاد شده در ستون نیز در طبقات اول تا چهارم تقریباً یکسان بوده و در طبقات پنجم و ششم افزایش 15 و 21 درصدی مشاهده می‌شود. علت افزایش نیرو در ستون‌ها در مقایسه با مدل پایه، اعمال نیروی بیشتر به مهاربندهای ارتجاعی و انتقال این نیرو به ستون‌ها است. کاهش سطح مقطع قید طبقه چهارم به میزان تقریبی 30%، (مدل SBS-T4-0.7)، موجب کاهش 10 و 6 درصدی نیروی ایجاد شده در قیده‌های طبقات دوم

در مدل SBS-T4-0.5 قید طبقه چهارم در ابتدای چرخه پنجم دچار کماتش شد و نحوه تشکیل سازوکار در سایر المان‌ها مشابه مدل اصلی بود. در مدل SBS-T4-0.7 قید طبقه چهارم در چرخه انتهایی دچار کماتش شد. در این مدل‌ها مهاربندهای طبقات پنجم و ششم دچار گسیختگی نشد. در مدل SBS-T1 نیز عملکرد مشابه مدل پایه دیده شد و قید طبقه اول در انتهای چرخه سوم دچار کماتش شد. در مدل SBS-T1-NT4، قید طبقه اول در چرخه چهارم و قید طبقه چهارم در چرخه انتهایی دچار کماتش شد و همچنین مهاربندهای دو طبقه آخر دچار گسیختگی نشدند. در مدل SBS-3S و SBS-T4R اولین تسلیم در مهاربند طبقه چهارم و در حالت فشاری رخ داد و بعد از آن مهاربند طبقه سوم در دچار کماتش شد. در چرخه دوم به ترتیب مهاربند طبقه دوم و اول دچار کماتش شد و مهاربندهای طبقات پنجم و ششم در محدوده الاستیک باقی ماندند. دوره تناوب این دو مدل‌ها از مدل پایه بیشتر بوده که به علت افزایش مقاطع خرابی الاستیک، به منظور حفظ عملکرد الاستیک آن‌ها است. همچنین مود دوم مدل‌ها بدون تغییر بوده که بیانگر غالب بودن مود اول سازه در تمامی نمونه‌ها است.

3-2- جابه‌جایی نسبی

در شکل (6) حداکثر جابه‌جایی و حداکثر جابه‌جایی نسبی طبقات با بررسی اثر قیدها نشان داده شده است. با توجه به این شکل، دو مدل SBS-T1 و SBS-Base که قید آن‌ها الاستیک باقی مانده بود، توزیع تغییر مکان یکنواختی را از خود نشان داده و از تجمع تغییر مکان‌ها در یک طبقه جلوگیری کردند. کماتش قید طبقه چهارم در مدل‌های SBS-T4-0.7 و SBS-T1-NT4 موجب افزایش جابه‌جایی 2 تا 2/5 اینچی تراز طبقه چهارم، به نسبت حالت‌های الاستیک این المان بود. در مدل SBS-T4-0.5 نیز اختلاف جابه‌جایی 4/3 اینچی در تراز طبقه چهارم، نسبت به حالت الاستیک مشاهده شد. افزایش جابه‌جایی نسبی طبقات در طبقات اول و کاهش آن در طبقات آخر، موجب گسیختگی سریعتر مهاربندهای غیرارتجاعی طبقات پایینتر، و اعمال تغییر مکان کمتر به مهاربندهای طبقات آخر شده است. در نتیجه این رفتار، در چرخه انتهایی منحنی هیستریزس این مدل‌ها افت مقاومت بیشتری نسبت به مدل‌هایی که تمامی اعضای خرابی الاستیک، الاستیک در نظر گرفته شده دیده می‌شود.

در دو مدل SBS-3S و SBS-T4R نیز با توجه حذف قیدها، حداکثر جابه‌جایی یکسانی را نشان داده و در تراز طبقه چهارم، اختلاف حداکثر جابه‌جایی آن‌ها با حالت الاستیک برابر با 8/86 اینچی بود. در این دو مدل به علت تفاوت تمرکز بیشتر تغییر مکان در طبقات ابتدایی و کاهش جابه‌جایی نسبی کمتر طبقات آخر، کاهش مقاومت بیشتری در چرخه انتهایی نسبت به سایر مدل‌ها

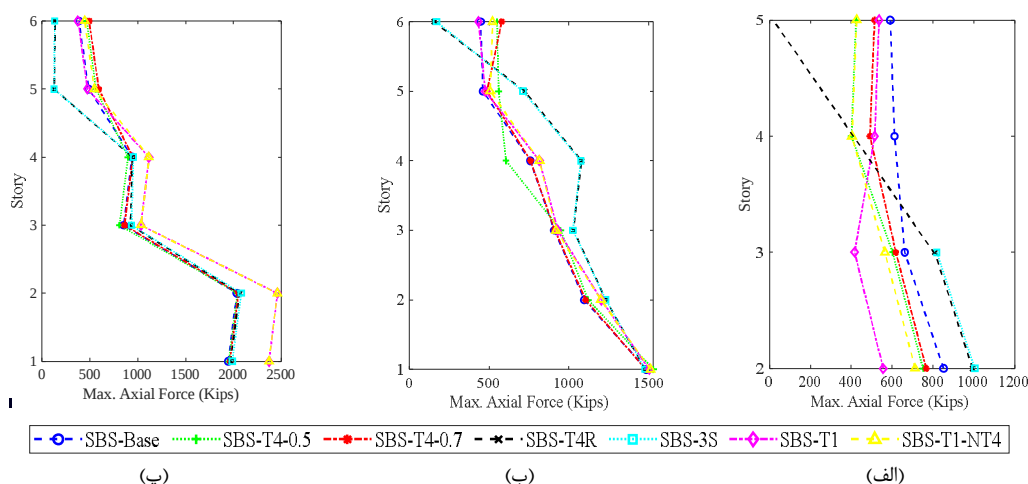
در مدل SBS-T1-NT4، کمانش قید طبقه چهارم موجب کاهش 19% نیروهای ایجاد شده در طبقات دوم و سوم و کاهش 35% در طبقه پنجم، نسبت به حالت تماماً الاستیک شده است. نیروهای ایجاد شده در مهاربندهای ارتجاعی تقریباً مشابه مدل SBS-T1 بوده و به علت کمانش قید طبقه چهارم، نیروهای ایجاد شده در مهاربندهای ارتجاعی طبقه پنجم و ششم، به ترتیب 5 و 10 درصد نسبت به این مدل افزایش داشته است. نیروهای ایجاد شده در ستون نیز در چهار طبقه اول افزایش 20% و در دو طبقه آخر افزایش 12 و 16 درصدی داشته است. با حذف قید طبقه چهارم (مدل SBS-T4R) تغییر قابل توجهی در نیروهای قید طبقه دوم و سوم، نسبت به حالت تماماً الاستیک ایجاد نشده و در طبقه پنجم، نیروی ایجاد شده در قید بسیار ناچیز است. همچنین نیروهای ایجاد شده در مهاربندهای ناحیه ارتجاعی (به جز طبقه ششم) به علت کمانش مهاربند طبقه چهارم افزایش قابل توجهی داشته است. مقدار افزایش نیرو از طبقه دوم تا پنجم به ترتیب برابر با 12، 12، 42 و 55 درصد و در طبقه ششم، 64% کاهش نیرو ایجاد شده است. نیروهای ایجاد شده در ستون نیز در طبقات پنجم و ششم به ترتیب 75 و 65 درصد کاهش داشته است. در مدل SBS-3S نیز دقیقاً همین رفتار مشاهده شد که بیانگر عدم تأثیر قید طبقه پنجم، در حالت نبود قید طبقه چهارم در رفتار سازه است.

و سوم و مقدار 13% در طبقه پنجم، نسبت به مدل پایه شده است. نیروهای ایجاد شده در مهاربند ارتجاعی در چهار طبقه اول تقریباً برابر و در طبقه پنجم و ششم به ترتیب افزایش 5 و 30 درصد مشاهده می‌شود. افزایش متفاوت نیرو با مدل قبل، به علت کمانش قید این مدل در چرخه آخر است که موجب شد تمامی نیروهای جدید که از کمانش قید به وجود آمده، به این مهاربند اعمال شود. نیروهای ایجاد شده در ستون نیز در طبقات اول تا چهارم تقریباً یکسان بوده و در طبقات پنجم و ششم افزایش 21 و 27 درصدی مشاهده می‌شود.

استفاده از قید در طبقه اول (مدل SBS-T1) نیز موجب شده تا نیروهای ایجاد شده در قیده‌های طبقه دوم و سوم 27 و 28 درصد کاهش پیدا کرده و در طبقات چهارم و پنجم، 17% کاهش نیرو نسبت به حالت تماماً الاستیک مشاهده می‌شود. نیروهای ایجاد شده در مهاربندهای ارتجاعی در طبقات دوم و چهارم افزایش 10 و 8 درصدی داشته و در سایر طبقات مقادیر حداکثر نیرو تقریباً برابر است. نیروهای ایجاد شده در ستون در چهار طبقه اول افزایش 20% و در طبقات پنجم و ششم کاهش 3% داشته است. این افزایش نیرو از آن جهت است که اضافه کردن قید طبقه اول، تغییر مکان جانبی خرابی را محدود کرده و در نتیجه برای رسیدن به یک تغییر مکان یکسان، نیروی بیشتری به ستون وارد می‌شود.

جدول 6- مشخصات مقاطع اعضای دهانه مهاربندی

طبقه	ستون	تیر	مهاربند ناحیه الاستیک	قید	مهاربند ناحیه غیرخطی
1	W14x342	W18x86	W14x132	-	HSS12x12x5/8
2	W14x342	W18x86	HSS12x12x5/8	HSS12x12x5/8	HSS10x10x5/8
3	W14x342	W18x86	HSS12x12x5/8	HSS12x12x5/8	HSS9x9x5/8
4	W14x132	W18x86	HSS10x10x1/2	HSS8x8x1/2	HSS9x9x5/8
5	W14x132	W18x86	HSS10x10x1/2	HSS8x8x1/2	HSS8x8x1/2
6	W14x132	W18x86	HSS8x8x1/2	-	HSS7x7x1/2



4- اثرات پیکربندی‌های متفاوت

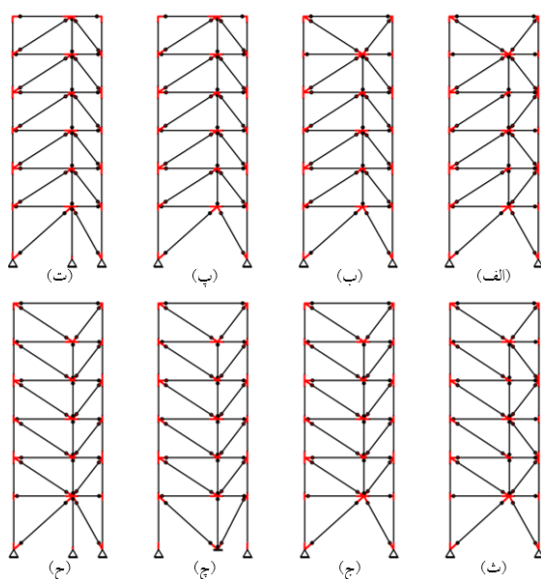
در این بخش، چند پیکربندی متفاوت خرپای الاستیک و مهاربندهای ناحیه غیرالاستیک مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. هدف از انجام این بخش، مطالعه رفتار پیکربندی‌های متفاوت سیستم پشتیبان قوی در توزیع نیرو در اعضای الاستیک و بررسی میزان اثرگذاری آن، در رفتار این سیستم است. باتوجه به آن که در مقاوم‌سازی، پیکربندی مهاربندها می‌تواند دارای حالت‌های مختلف باشد، بررسی میزان تأثیر پیکربندی این ناحیه در رفتار کلی سیستم، می‌تواند در طراحی سیستم‌های پشتیبان قوی به‌منظور مقاوم‌سازی سازه‌های موجود، کارآمد باشد. در این بخش، مشابه بخش قبلی، رفتار چرخه‌ای مهاربندها مورد ارزیابی قرار گرفته و پروتکل بارگذاری، مشابه پروتکل گفته شده در بخش صحت‌سنجی است. در این بخش مهاربندها با پیکربندی هفتی و هشتی، که از پیکربندی‌های مرسوم در سیستم مهاربند همگرای فولادی است توسعه داده شده و خرپا الاستیک نیز در حالت خرپا وارن⁷، که مشابه مهاربند ضربدری است در نظر گرفته شده تا اثر تغییرات خرپا و مهاربندها، مطالعه شود. در جدول (6) جدول 7 لیست مدل‌های این بخش ارائه شده و در شکل (8) تصویر شماتیک مدل‌ها، نشان داده شده است.

مدل‌های SB-W-V و SB-W-1/ SB-W-1/5S به‌منظور ارزیابی تأثیر استفاده از پیکربندی مختلف خرپا با اعضای ناحیه غیرخطی، مدل‌های SB-1/5S و SB-1/ SB-W-1/5S به‌همراه SB-V و SB-V-5S به‌منظور ارزیابی اثر استفاده از پیکربندی یکسان در تمامی طبقات، مدل‌های SB-1/5S-T1 و SB-V-5S-T1 نیز به‌منظور بررسی مجدد اثر اضافه کردن قید در طبقه اول، توسعه پیدا کردند.

در تمامی مدل‌ها به‌جز مدل SB-1/5S-T4 مقاطع المان‌های خرپا الاستیک به‌نحوی تغییر یافت تا عملکرد الاستیک حفظ شود. در مدل SB-1/5S-T4 تمامی مقاطع مشابه مدل اصلی است؛ اما کمانش قید طبقه چهارم، موجب تغییرات قابل توجه در نیروی ایجاد شده در سازه شده که این اثرات مورد بررسی قرار گرفته است. ابعاد تیرها و ستون‌ها در تمامی مقاطع یکسان بوده و قید طبقه اول اضافه شده به مدل‌ها، مقطع HSS8x8x1/2 است و به‌نحوی در نظر گرفته شده است تا در چرخه‌های اولیه دچار کمانش شود. اضافه کردن این المان بدین‌منظور صورت گرفت تا امکان بهبود عملکرد سازه در سایر پیکربندی‌ها، مورد ارزیابی قرار بگیرد. در مدل SB-V به‌منظور کمانش مهاربند ناحیه غیرارتجاعی طبقه اول، از مقطع HSS10x10x1/2 استفاده شد تا این المان در چرخه‌های اولیه دچار کمانش شود.

جدول 7- نام مدل‌ها با بررسی اثرات پیکربندی متفاوت

نام مدل	توضیحات
SB-W-1/	در خرپا الاستیک از پیکربندی وارن و در بخش غیرالاستیک (به‌جز طبقه آخر) از مهاربند هشتی استفاده شده است.
SB-1/5S	بخش الاستیک و بخش غیرالاستیک به‌صورت هشتی مدل شده است و در طبقه آخر از مهاربند هفتی استفاده شده است.
SB-1/	در تمامی طبقات از مهاربند هشتی استفاده شده است.
SB-1/5S-T4	قید طبقه چهارم مدل SB-1/5S ضعیف شد.
SB-1/5S-T1	در طبقه اول مدل SB-1/5S قید در نظر گرفته شد.
SB-W-V	در خرپا الاستیک از پیکربندی وارن، و در بخش غیرالاستیک (به‌جز طبقه اول) از مهاربند هفتی استفاده شده است.
SB-V-5S	بخش الاستیک و بخش غیرالاستیک به‌صورت هفتی مدل شده است و در طبقه آخر از مهاربند هفتی استفاده شده است.
SB-V	در تمامی طبقات از مهاربند هفتی استفاده شده است.
SB-V-5S-T1	در طبقه اول مدل SB-V-5S قید در نظر گرفته شد.



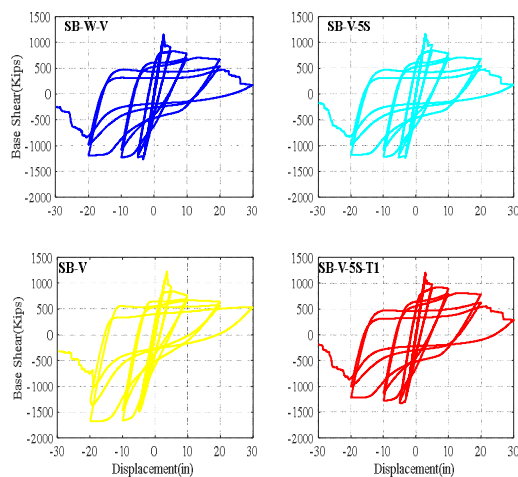
شکل 5- تصاویر شماتیک مدل‌ها با پیکربندی‌های متفاوت:
الف) SB-W-V، ب) SB-1/5S، پ) SB-1/ و SB-1/5S-T4، ت) SB-1/5S-T1، ث) SB-W-V، ج) SB-V-5S، چ) SB-V، ح) SB-V-5S-T1

4-1- تحلیل هیستریزیس

در منحنی مدل‌هایی که دارای مهاربند غیرارتجاعی هشتی هستند، نشان داده شده است. در این مدل‌ها با توجه به آن که مهاربندهای ناحیه غیرارتجاعی در تغییر مکان منفی، تحت نیروی فشار قرار می‌گیرند، افت مقاومت قابل توجهی را در این ناحیه از

در شکل (10) منحنی هیستریزس مدل‌هایی که دارای مهاربند غیرارتجاعی هفتی هستند، نشان داده شده است. در این مدل‌ها با توجه به آن‌که مهاربندهای ناحیه غیرارتجاعی در تغییر مکان مثبت، تحت نیروی فشار قرار می‌گیرند، افت مقاومت قابل توجهی را در این ناحیه از خود نشان می‌دهند که علت آن، کماتش مهاربندها است. حداکثر برش پایه و دوره تناوب مود اول و دوم این مدل‌ها در جدول (8) آورده شده است.

در تمامی مدل‌ها به جز مدل SB-V خرابی الاستیک عملکرد خود را حفظ کرد که در این مدل ستون طبقه اول در چرخه پنجم و تغییر مکان منفی 10 اینچ دچار تسلیم شد. قید طبقه اول در مدل SB-V در چرخه سوم و مدل SB-V-5S-T1 در چرخه دوم وارد ناحیه غیرخطی شد. در مدل SB-V با توجه آنکه مهاربند طبقه اول به صورت هفتی در نظر گرفته شد، تغییر مکان طبقه اول محدود شده و مشارکت خرابی الاستیک طبقه اول در تحمل بار جانبی، موجب افزایش برش پایه این مدل شده است و دوره تناوب بیشتری را نسبت به سایر مدل‌ها از خود نشان داده است. استفاده از خرابی وارن (مدل SB-W-V) در مقایسه با مدل SB-V-5S موجب افزایش جزئی برش پایه و دوره تناوب کمتر شده است. همچنین اضافه کردن قید طبقه اول (مدل SB-V-5S-T1) موجب افزایش برش پایه و کاهش دوره تناوب شده است.



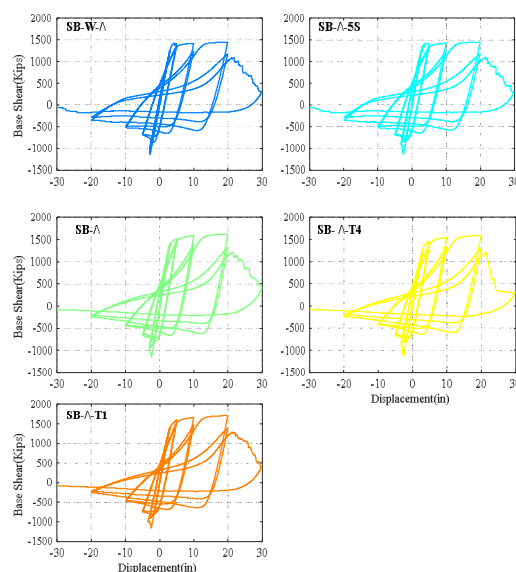
شکل 6- منحنی هیستریزس مدل‌های دارای مهاربندی غیرارتجاعی هفتی

جدول 9- حداکثر برش پایه و دوره تناوب مود اول و دوم مهاربندهای هفتی

نام مدل	حداکثر برش		دوره تناوب سازه	
	پایه (kips)	مود اول (Sec)	مود دوم (Sec)	
SB-W-V	1278	0/732	0/251	
SB-V-5S	1247	0/741	0/251	
SB-V	1683	0/786	0/245	
SB-V-5S-T1	1322	0/725	0/246	

خود نشان می‌دهند که علت آن، کماتش مهاربندها است. حداکثر برش پایه و دوره تناوب مود اول و دوم این مدل‌ها در جدول آورده شده است.

در مدل‌های SB-W-V/1 و SB-V/1-5S و SB-W-V/1 تمامی مهاربندهای ناحیه غیرارتجاعی در چرخه‌های اولیه دچار کماتش شده و سایر اعضا عملکرد الاستیک خود را تا انتهای تحلیل حفظ کردند. استفاده از مهاربند هشتی در تمامی طبقات، موجب افزایش حداکثر برش پایه در سازه در تغییر مکان مثبت و کاهش این مقدار در تغییر مکان منفی شده است که این اتفاق به علت عدم کماتش مهاربندها ایجاد شده است. استفاده از خرابی وارن موجب افزایش جزئی دوره تناوب سازه، نسبت به حالت پایه شده است. همچنین در این مدل‌ها تمامی مهاربندها دچار گسختگی شدند. در مدل SB-V/1-T4 قید طبقه چهارم در چرخه آخر دچار کماتش شد و مهاربندهای طبقات چهارم تا ششم دچار گسختگی نشد. در مدل SB-V/1-T1 قید طبقه اول در چرخه سوم وارد ناحیه غیرخطی شد. دوره تناوب مدل SB-V/1-T4 از مدل SB-V/1 بیشتر بوده که از دلایل آن می‌توان به بزرگتر بودن مقاطع خرابی الاستیک در مدل SB-V/1 اشاره کرد.



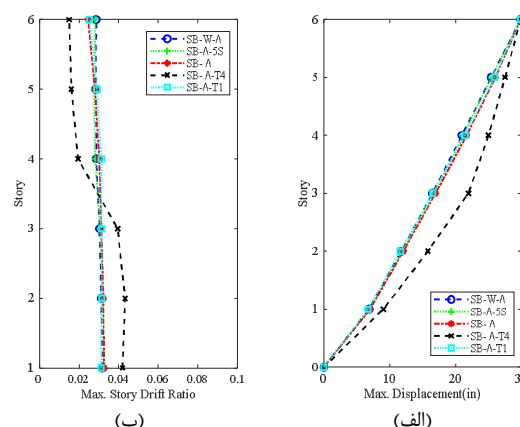
شکل 9- منحنی هیستریزس مدل‌های دارای مهاربندی غیرارتجاعی هشتی

جدول 8- حداکثر برش پایه و دوره تناوب مود اول و دوم مهاربندهای هشتی

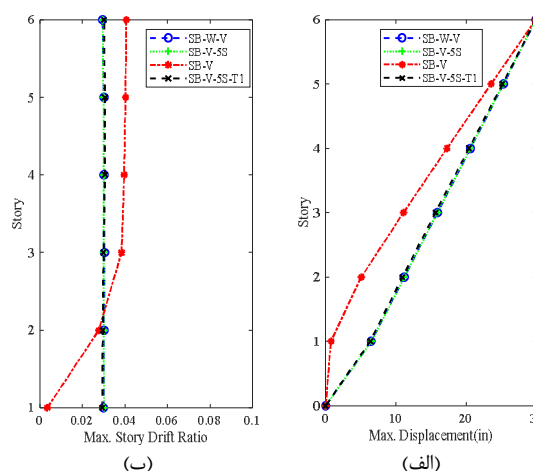
نام مدل	حداکثر برش		دوره تناوب سازه	
	پایه (kips)	مود اول (Sec)	مود دوم (Sec)	
SB-W-V/1	1450	0/727	0/251	
SB-V/1-5S	1451	0/69	0/247	
SB-V/1	1625	0/67	0/24	
SB-V/1-T4	1594	0/714	0/253	
SB-V/1-T1	1691	0/672	0/238	

2-4- جابه‌جایی نسبی

در شکل (11) مقدار حداکثر جابه‌جایی جانبی و حداکثر جابه‌جایی نسبی طبقات در مدل‌های دارای مهاربندی هشتی نشان داده شده است. با توجه به این اشکال، تمامی مدل‌ها بجز مدل SB-1-T4 تغییر شکل یکنواخت در کل ارتفاع سازه مشاهده می‌شود. کماتش قید طبقه چهارم موجب افزایش 4/7 اینجی جابه‌جایی تراز طبقه چهارم نسبت به سایر مدل‌ها شده است. این تمرکز تغییر مکان قابل توجه، همانند مدل‌های توسعه داده شده در بخش قبل، به علت گسیختگی سریعتر مهاربندهای طبقات ابتدایی، افت مقاومت قابل توجهی را در چرخه آخر نشان می‌دهد. در شکل 8 مقدار حداکثر جابه‌جایی جانبی و حداکثر جابه‌جایی نسبی طبقات در مدل‌های دارای مهاربندی هفتی نشان داده شده است. در مدل SB-V به علت چینش مهاربند ارتجاعی طبقه اول، جابه‌جایی نسبی طبقه اول محدود شده و این طبقه تغییر شکل ناچیزی را از خود نشان می‌دهد (0/77 اینجی).



شکل 7- الف) حداکثر جابه‌جایی، ب) حداکثر جابه‌جایی نسبی طبقات در مدل‌های دارای مهاربندی هشتی



شکل 8- الف) حداکثر جابه‌جایی، ب) حداکثر جابه‌جایی نسبی طبقات در مدل‌های دارای مهاربندی هفتی

3-4- نیروی خرابا

در (Error! Reference source not found.) حداکثر نیروهای ایجاد شده در قیدها و مهاربندهای ناحیه ارتجاعی در مدل‌های دارای مهاربندی هفتی نشان داده شده است. در مدل SB-W-1/ SB-W-1/ ایجاد شده در المان طبقه اول، 48٪ از نیروی ایجاد شده در مدل SB-1/5S بیشتر بود و در طبقات چهارم و پنجم به ترتیب 6 و 4 درصد کاهش نیرو مشاهده می‌شود. افزایش نیرو قابل توجه در قید طبقه دوم، به علت عدم اتصال‌های مهاربندهای ارتجاعی به این قید است. نیروهای ایجاد شده در مهاربندهای ارتجاعی در دو مدل تقریباً برابر بوده و حداکثر اختلاف 13٪ در آن دیده می‌شود. نیروهای ایجاد شده در ستون نیز در طبقات دو و چهارم افزایش 50٪ داشته است که از دلایل آن، اتصال مهاربندهای ارتجاعی به این ستون‌ها است.

در مدل SB-1/ استفاده از مهاربند هشتی در طبقه انتهایی و اضافه کردن قید به آن، موجب افزایش نیروی قابل توجه در قیدها و همچنین نحوه توزیع نیرو در میان قیدها شده است. افزایش نیرو در طبقات، از پایین به بالا نسبت به مدل SB-1/5S به ترتیب برابر با 19، 39، 83 و 80 درصد است. در این مدل با توجه به آن که تمامی مهاربندها در یک جهت قرار دارند، مؤلفه افقی نیروی تمامی مهاربندها در یک سمت قرار گرفته و موجب ایجاد لنگر قابل توجه در خرابا الاستیک می‌شود. از طرفی استفاده از مهاربندی هشتی در طبقه آخر، موجب شده تا نیروی فشاری ناشی از نیروی جانبی در ستون بسیار ناچیز شده و این ستون در تحمل لنگر خمشی، سهمی نداشته باشد. با توجه به آن که دو انتهای خرابا الاستیک اتصال مفصلی دارند، توزیع خمش در خرابا مشابه تیر دو سر مفصل بوده و قیدهای میانی، بیشترین تأثیر را از این پدیده می‌پذیرند. اضافه شدن قید طبقه ششم نیز در افزایش لنگر تأثیر قابل توجهی دارد، زیرا خود لنگر قابل توجه‌ای ایجاد کرده و با حذف مهاربند هفتی غیرارتجاعی طبقه ششم، یک مؤلفه لنگر که خلاف جهت بقیه مهاربندها بوده، حذف شده است. نیروهای ایجاد شده در مهاربندهای ناحیه ارتجاعی از طبقات پایین به بالا 21، 28، 37، 36، 22 درصد افزایش و در طبقه ششم 24 درصد کاهش نسبت به مدل SB-1/5S داشته است. نیروی ایجاد شده در ستون‌ها نیز در طبقه دوم تا چهارم کاهش 9، 23 و 4 درصد، در طبقه پنجم افزایش 13٪ و در طبقه ششم کاهش 70٪ داشته است.

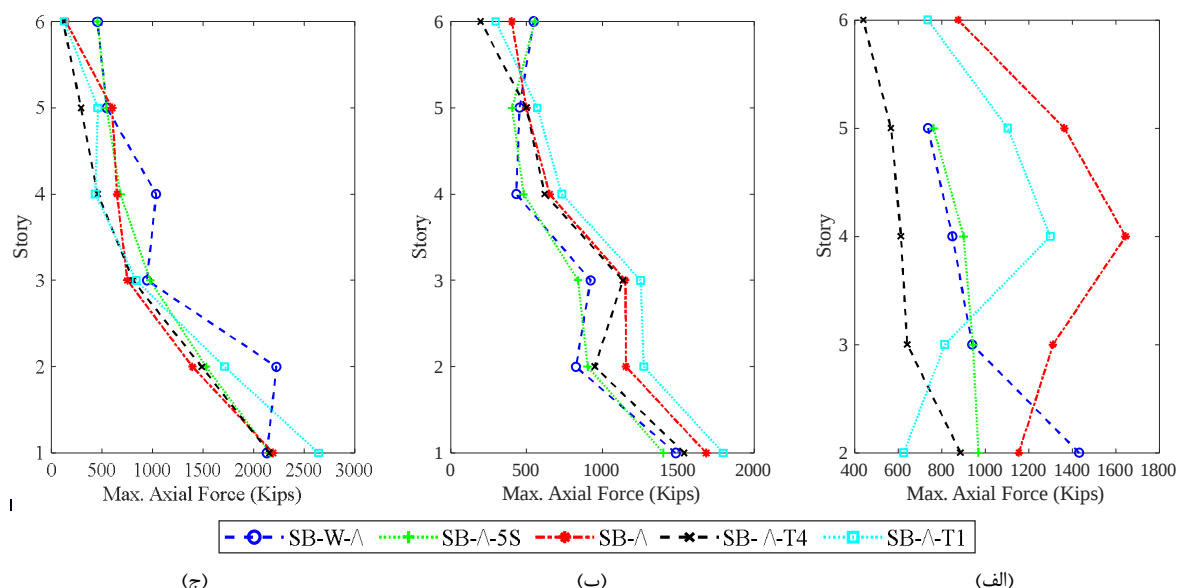
کوماتش قید طبقه چهارم (SB-1-T4) موجب کاهش قابل توجه نیرو قیدها سایر طبقات شده است. میزان کاهش نیرو در طبقات، نسبت به مدل SB-1/ در طبقات دوم و سوم به ترتیب برابر با 32 و 51 درصد و طبقات پنجم و ششم به ترتیب برابر با 59 و 51 درصد به دست آمده است. همچنین نیروهای ایجاد شده در مهاربندهای ارتجاعی در تمامی طبقات به ترتیب 16، 18، 2، 5، 0 و 52 درصد کاهش یافته است. نیروهای ایجاد شده در ستون

پیکربندی مشاهده می‌شود. نیروهای ایجاد شده در مهاربندهای ناحیه ارتجاعی به‌طور میانگین 10% در طبقات اول تا پنجم افزایش پیدا کرده و در طبقه ششم، مقدار نیروها تقریباً برابر است. نیروهای ایجاد شده در ستون نیز در سه طبقه اول به‌ترتیب 20، 23 و 11 درصد افزایش و در سه طبقه آخر به‌ترتیب 27، 10 و 11 درصد کاهش داشته است.

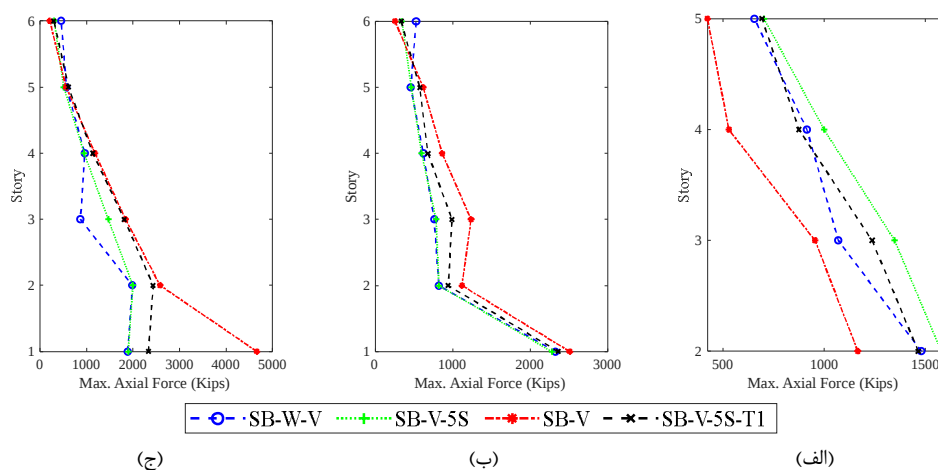
در شکل 10 حداکثر نیروهای ایجاد شده در قیدها و مهاربندهای ناحیه ارتجاعی در مدل‌های دارای مهاربندی هفتی نشان داده شده است. استفاده از خرپا الاستیک با پیکربندی وارن (مدل SB-W-V)، در مقایسه با مدل SB-V-5S، موجب کاهش نیروهای ایجاد شده در قیدها شده است. این کاهش نیرو از طبقه دوم تا پنجم، به‌ترتیب برابر با 7، 21، 9 و 7 درصد است.

نیز در سه طبقه اول و همچنین طبقه آخر تقریباً برابر بوده، اما در طبقات چهارم و پنجم به‌ترتیب 30 و 52 درصد کاهش نیرو دیده می‌شود. کاهش نیرو در اعضای خرپا الاستیک از آن جهت است که استفاده قید تسلیم شونده در خرپا الاستیک، مانند مفصل پلاستیک عمل کرده و موجب کاهش اثرات لنگر شده که این اتفاق منجر به کاهش نیرو می‌شود.

اضافه کردن قید طبقه اول (مدل SB-/ \-T1) موجب کاهش قابل‌توجه نیروهای ایجاد شده در قیدهای سایر طبقات در مدل SB-/ \ شده است. میزان کاهش نیرو در طبقات از پایین به بالا به‌ترتیب برابر با 47، 48، 24، 15 و 4 درصد به‌دست آمده است. با وجود آن که به‌علت استفاده از قید طبقه اول، نیروهای ایجاد شده در قید کاهش یافته، اما همچنان اثرات قابل توجه لنگر به‌علت این



شکل 9- حداکثر نیروی ایجاد شده در مدل‌های دارای مهاربندی هشتی در: الف) قیدها (طبقات دوم تا ششم)، ب) مهاربندهای ارتجاعی، ج) ستون متصل به خرپا الاستیک



شکل 10- حداکثر نیروی ایجاد شده در مدل‌های دارای مهاربندی هفتی در: الف) قیدها (طبقات اول تا پنجم)، ب) مهاربندهای ارتجاعی، ج) ستون متصل به خرپا الاستیک

افزایش پیدا می‌کند. این تغییر در برخی مدل‌های ارائه شده در این مطالعه اعمال شد تا صحت این نتایج در مدل‌های چندطبقه بررسی شود. در جدول 10) مدل‌های مورد بررسی در این بخش معرفی شده است. مقاطع مهاربندهای ناحیه غیرارتجاعی تغییری نداشته و مقاطع مهاربندهای ناحیه ارتجاعی، به‌نحوی تغییر یافته است تا عملکرد الاستیک خود را حفظ کند.

جدول 10- مدل‌ها با بررسی اثر تغییر محل تقاطع مهاربندها

نام مدل	توضیحات
SBS-L/2	محل تقاطع مهاربندها در مدل SBS-Base به وسط دهانه منتقل شد.
SB-/1-5S-L/2	محل تقاطع مهاربندها در مدل SB-/1-5S به وسط دهانه منتقل شد.
SB-/1-L/2	محل تقاطع مهاربندها در مدل SB-/1-L/2 به وسط دهانه منتقل شد.
SB-V-5S-L/2	محل تقاطع مهاربندها در مدل SB-V-5S به وسط دهانه منتقل شد.

5-1- تحلیل هیستریزیس

منحنی هیستریزیس مدل‌های ارائه شده به‌همراه مدل‌های مشابه آن‌ها در شکل 11) آورده شده است. در تمامی مدل‌ها خرابی الاستیک عملکرد خود را حفظ نمود و تمامی مهاربندهای ناحیه غیرارتجاعی دچار تسلیم و کماتش شدند. با توجه به آن‌که در این بخش خرابی الاستیک عملکرد خود را حفظ کرده است، رفتار غیرخطی به‌خوبی در بخش غیرخطی توزیع شده است.

در جدول 11) حداکثر برش پایه مدل‌ها به‌همراه مود اول و دوم آن‌ها نشان داده شده است. با توجه به این جدول، مقادیر برش پایه مدل‌ها با تغییر محل تقاطع مهاربندها به وسط دهانه، با افزایش تقریباً 20% مواجه شده و دوره تناوب تمامی مدل‌ها نسبت به حالت‌های قبلی کاهش یافته است که از دلایل آن می‌توان به افزایش سختی سازه اشاره کرد. تغییر محل تقاطع مهاربندها به وسط دهانه، موجب افت مقاومت بیشتر در چرخه‌های انتهایی شده است. مقادیر تغییر مقاومت سازه در انتهای چرخه‌های مختلف در جدول 12) آورده شده است. لازم به‌ذکر است در این جدول، برای مدل SB-V-5S-L/2، تغییرات مقاومت در تغییر مکان منفی و برای سایر مدل‌ها، تغییر مکان در ناحیه مثبت مورد ارزیابی قرار گرفته است. مطابق این جدول، انتقال محل تقاطع مهاربندها به وسط دهانه موجب کاهش مقاومت قابل توجه نسبت به حالت معمولی شده است و در چرخه‌های نهایی، مقاومت سازه دچار کاهش قابل توجه می‌شود. در ادامه این بخش، با بررسی رفتار غیرخطی مهاربندهای ناحیه غیرارتجاعی به بررسی علت این رفتار پرداخته خواهد شد.

نیروهای ایجاد شده در مهاربندهای ارتجاعی در طبقات اول تا پنجم تغییر قابل توجهی نداشته و در طبقه ششم، نیروی ایجاد شده در مهاربند این طبقه هفت درصد کاهش یافته است. این کاهش نیرو از آن جهت است در این پیکربندی، نیروها به‌خوبی میان اعضای خرپا الاستیک توزیع شده است. نیروهای ایجاد شده در ستون طبقات اول، دوم و چهارم تغییر قابل توجهی نداشته اما نیروی طبقه سوم 41% کاهش و نیروی طبقه ششم 12% افزایش داشته است.

در مدل SB-V استفاده از مهاربندی هفتی در تمامی طبقات موجب کاهش نیرو در قیدها نسبت به مدل SB-V-5S شده است. کاهش نیرو از طبقه دوم تا پنجم به‌ترتیب برابر با 26، 29، 47 و 40 درصد است. اما برخلاف قیدها، نیروهای ایجاد شده در مهاربندهای ارتجاعی در این مدل افزایش قابل توجهی را داشته و میزان افزایش نیرو در مقایسه با مدل SB-V-5S از طبقه اول تا پنجم به‌ترتیب 9، 34، 52، 39 و 76 درصد افزایش و در طبقه ششم، 39% کاهش داشته است. با توجه به نوع پیکربندی این مدل و تسلیم ستون طبقه اول، نیروی ایجاد شده در این ستون بیانگر مقاومت آن است. در طبقات دوم تا ششم نیز به‌ترتیب 26، 29، 24 و 10 درصد افزایش نیرو مشاهده می‌شود. لازم به‌ذکر است ظرفیت برش پایه این مدل 20 تا 30% از سایر مدل‌ها بالاتر است که این عامل موجب افزایش نیروهای اعمال شده به بخش الاستیک می‌شود. اضافه‌کردن قید طبقه اول (SB-V-5S-T1) نیز موجب کاهش نیروهای ایجاد شده قیدها شده اما نیروهای ایجاد شده در مهاربندهای ارتجاعی افزایش یافته است. نیروهای ایجاد شده در قیدها در طبقات دوم تا پنجم به‌ترتیب 7، 8، 12 و 1/4 درصد کاهش و نیروهای ایجاد شده در مهاربندهای ارتجاعی از طبقه اول تا پنجم به‌ترتیب 3، 15، 22، 14 و 23 درصد افزایش و در طبقه ششم، 48% کاهش یافته است. نیروی ایجاد در ستون طبقات اول تا پنجم به‌صورت میانگین 20% افزایش داشته و در طبقه ششم، 3% کاهش داشته است.

5- اثرات طول ناحیه الاستیک

در این بخش، برخی از مدل‌هایی که در بخش‌های قبلی مورد ارزیابی قرار گرفته بودند، محل تقاطع مهاربندها از یک- سوم دهانه به وسط دهانه منتقل شد. طبق مطالعه انجام شده توسط سیمپسون (5) در بررسی‌های تئوری صورت گرفته بر مدل یک طبقه، انتظار می‌رود با افزایش ناحیه الاستیک، نیروهای ایجاد شده در خرپا الاستیک افزایش پیدا کرده و سختی سازه افزایش پیدا کند. همچنین مشارکت مهاربندهای ناحیه ارتجاعی در تحمل نیروی جانبی بیشتر شده و موجب افزایش مقاومت جانبی سازه می‌شود. در این حالت نیروهای ایجاد شده در مهاربندهای ناحیه غیرارتجاعی کمتر شده اما تغییر شکل‌های پلاستیک در این ناحیه

5-2- نیروهای ایجاد شده در خرپا الاستیک

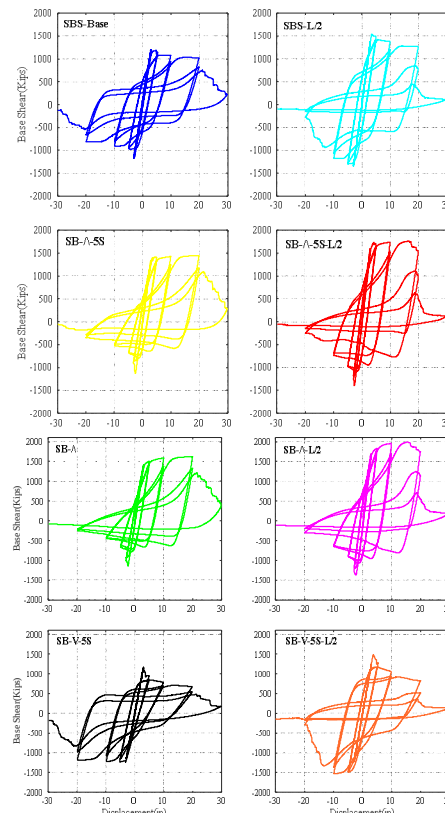
در شکل 12) نیروهای ایجاد شده در قیدها، در شکل 13) نیروهای ایجاد شده در مهاربندهای ارتجاعی و در شکل 14) نیروهای تشکیل شده در ستون‌ها بررسی شده است. در مدل SBS-Base، انتقال محل تقاطع به وسط دهانه موجب شده تا نیروی ایجاد شده در قید طبقات دوم تا پنجم، به ترتیب 15، 11 و 6 درصد کاهش پیدا کند. نیروهای ایجاد شده در مهاربندهای ارتجاعی در طبقه اول 3% کاهش، در طبقات دوم تا پنجم به ترتیب 10، 9، 8 و 21 درصد افزایش و در طبقه ششم 17% کاهش داشته است. نیروهای ایجاد شده در ستون نیز در طبقات اول تا چهارم به ترتیب 19، 13، 18 و 10 درصد افزایش و در دو طبقه آخر به ترتیب 39 و 31 درصد کاهش داشته است.

در مدل SB-/، تغییر ایجاد شده موجب کاهش قابل توجه نیروها در قیدها شده است. نیروی ایجاد شده در المان‌ها از طبقه دوم تا ششم، به ترتیب 68، 67، 47، 45 و 55 درصد کاهش یافته است. نیروی ایجاد شده در مهاربندهای ارتجاعی از طبقات اول تا پنجم به ترتیب 13، 31، 54، 55 و 43 درصد افزایش و در طبقه ششم 42% کاهش داشته است. نیروهای ایجاد شده در ستون نیز در سه طبقه اول به ترتیب 29، 36، 44 درصد افزایش و در سه طبقه آخر به ترتیب 15، 70 و 40 درصد کاهش داشته است.

در مدل SB-V-5S، نیروی تشکیل شده در قیدها، از طبقه دوم تا پنجم به ترتیب 15، 14، 33 و 36 درصد کاهش یافته است. نیروهای ایجاد شده در مهاربندهای ارتجاعی در طبقات اول و ششم به ترتیب 13 و 7 درصد کاهش و در طبقات دوم تا پنجم 25، 24، 26 و 13 درصد افزایش داشته است. نیروهای ایجاد شده در ستون نیز از طبقه اول تا پنجم به ترتیب 17، 11، 7، 4 و 12 درصد افزایش و در طبقه آخر 28 درصد کاهش داشته است.

در مدل SB-/، 5S- نیروهای ایجاد شده در قیدها، از طبقه دوم تا پنجم به ترتیب 66، 40، 49 و 23 درصد کاهش یافته است. نیروهای ایجاد شده در مهاربندهای ارتجاعی از طبقه اول تا پنجم به ترتیب 16، 20، 88، 56 و 60 درصد افزایش داشته و در طبقه آخر بدون تغییر بوده است. نیروهای ایجاد شد در ستون نیز در چهار طبقه اول به ترتیب 20، 29، 21 و 10 درصد افزایش و در دو طبقه آخر 40 و 17 درصد کاهش داشته است.

به‌طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که انتقال محل تقاطع مهاربندها به وسط دهانه موجب کاهش نیروهای وارده به قیدها و افزایش نیروهای وارده به مهاربندها و ستون‌های ناحیه ارتجاعی شده است.



شکل 11- منحنی هستیرزیس مدل‌ها با بررسی تغییر محل تقاطع مهاربندها

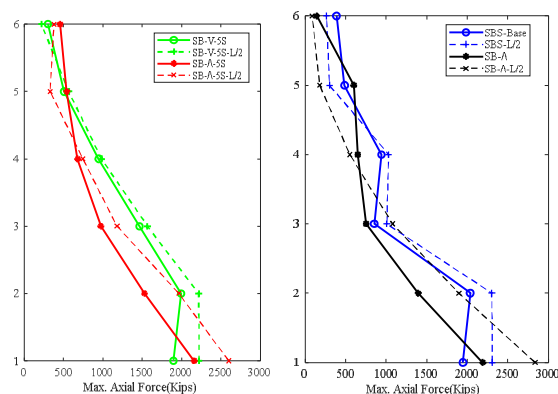
جدول 11- حداکثر برش پایه و دوره تناوب مود اول و دوم مدل‌ها با محل تقاطع وسط دهانه

نام مدل	حداکثر برش پایه (kips)	مود اول (Sec)	مود دوم (Sec)
SBS-L/2	1513	0/685	0/232
SB-/، 5S-L/2	1794	0/631	0/218
SB-/، L/2	2037	0/597	0/207
SB-V-5S-L/2	1524	0/714	0/236

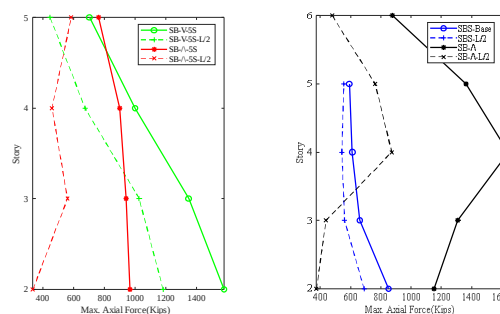
جدول 12- بررسی میزان تغییر مقاومت سازه در انتهای چرخه‌های مختلف با بررسی محل تقاطع مهاربندها

نام مدل	تغییر مقاومت (%)			
	چرخه ششم	چرخه هفتم	چرخه هشتم	چرخه نهم
SBS-Base	-12/29	9/13	-19/94	-71/45
SBS-L/2	-13/03	6/0	-37/16	-85/63
SB-/، 5S	-12/82	16/24	-18/26	-75/97
SB-/، 5S-L/2	-12/12	0/92	-36/88	-87/28
SB-/،	-12/73	17/04	-18/20	-67/8
SB-/، L/2	-12/69	2/87	-35/48	-83/41
SB-V-5S	-12/05	10/72	-17/85	-81/66
SB-V-5S-L/2	-10/88	-79/78	-36/36	-20/0

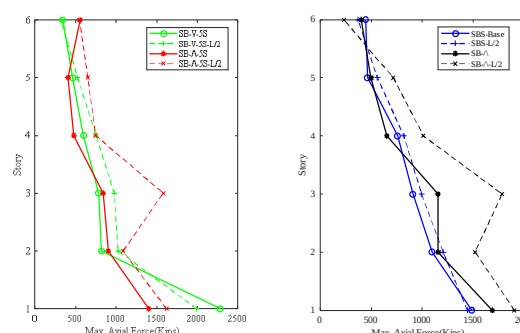
در این بخش، المان میانی مهاربندها که بیشترین رفتار غیرخطی را از خود نشان داده مورد ارزیابی قرار گرفته و در شکل 15) منحنی نیرو- کرنش این المان‌ها نشان داده شده است. با توجه به این شکل، در تمامی مدل‌ها با انتقال محل تقاطع مهاربندها به وسط دهانه، کرنش اعمال شده به مهاربندهای ناحیه غیرارتجاعی بیشتر شده و تمامی مهاربندها تحت بارگذاری معرفی شده، دچار گسختگی شده‌اند. این اتفاق از آنجایی رخ می‌دهد که در تغییر مکان افقی ثابت قاب، مهاربندی که طول کوتاه‌تری دارد کرنش بیشتری را متحمل شده و در نتیجه موجب گسختگی سریع‌تر می‌شود. از طرفی گسختگی سریع‌تر مهاربندهای ناحیه غیرارتجاعی موجب افت مقاومت کل سازه شده که این اتفاق، نتایج به‌دست آمده در جدول 12) را توجیه می‌کند.



شکل 14- نیروهای ایجاد شده در ستون‌ها با بررسی محل تقاطع مهاربندها



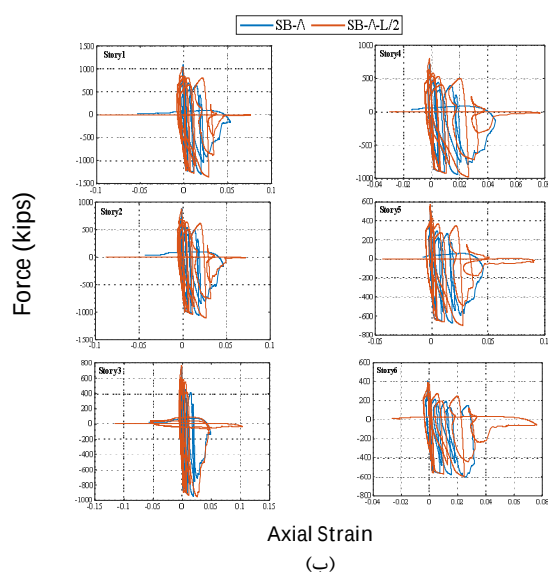
شکل 12- نیروهای ایجاد شده در قیدها با بررسی محل تقاطع مهاربندها



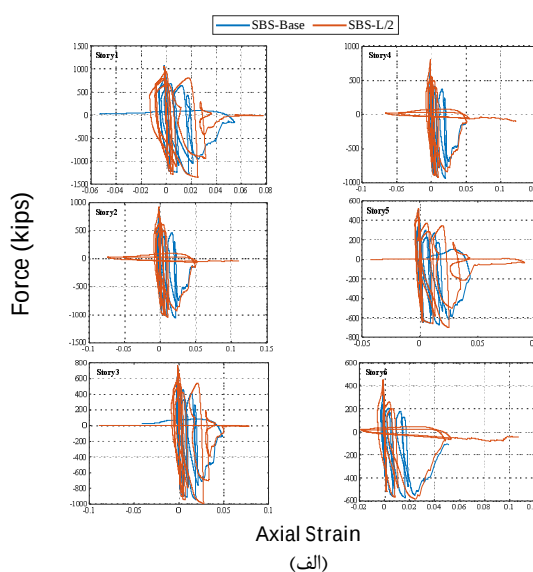
شکل 13- نیروهای ایجاد شده در مهاربندهای ارتجاعی با بررسی محل تقاطع مهاربندها

3-5- رفتار هیستریزس مهاربند ناحیه غیرارتجاعی

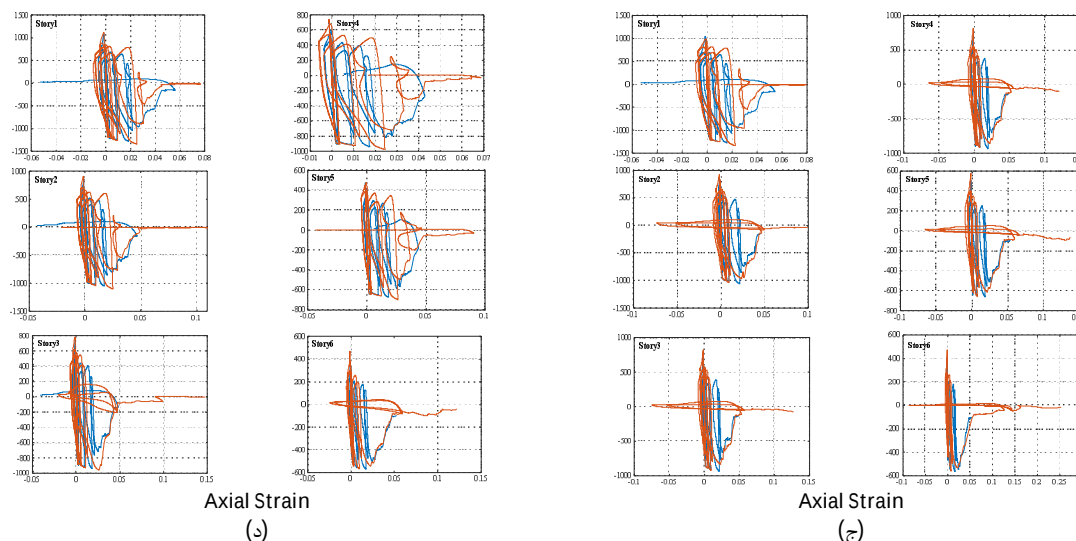
همان‌طور که در بخش مدل‌سازی عنوان شد، جهت مدل‌سازی مهاربندها از چهار المان استفاده شد. استفاده از این تعداد المان، ضمن در نظرگیری اثرات کمانش، این امکان را فراهم می‌سازد تا رفتار بخش‌های مختلف مهاربند مورد ارزیابی قرار بگیرد.



LL



LL



شکل 15- منحنی هیستریزیس مهاربندهای ناحیه غیرارتجاعی مدل‌های الف) SBS-L/2، SBS-Base، ب) SB-1/1-L/2 و SB-1/1، ج) SB-V-5S و SB-V-5S-L/2، د) SB-1/1-5S و SB-1/1-5S-L/2

6- نتیجه‌گیری

در این مقاله، چالش‌های مختلف پیکربندی سیستم قاب مهاربندی پشتیبان‌قوی، با نرم‌افزار OpenSees، تحت بارگذاری استاتیکی چرخه‌ای مورد ارزیابی قرار گرفت تا درک بهتری از رفتار این سیستم به‌دست آید. با توجه به بررسی‌های انجام شده، نتایج زیر قابل ذکر است:

1) حذف قید در طبقه چهارم موجب تجمع تغییر مکان در این طبقه و افزایش 40% حداکثر جابه‌جایی نسبی شده که این تجمع، منجر به تسلیم سریع‌تر مهاربندهای ناحیه غیرارتجاعی در طبقات اول شده است. همچنین استفاده از خرپا الاستیک در سه طبقه اول نیز عملکرد مشابهی را نشان داده و می‌توان ادعان داشت که عملکرد لرزه‌ای مناسبی را نشان نمی‌دهد. با این حال رفتار این سیستم، از قاب مهاربندی فولادی بهتر است.

2) کمانش قید طبقه چهارم در چرخه‌های اولیه، با وجود آن که نیروهای موجود در سایر قیدها را کاهش داده؛ اما از طرفی موجب تجمع تغییر مکان در طبقات اول تا سوم در چرخه انتهایی شده و به علت گسیختگی سریع‌تر مهاربند این طبقات، موجب افت مقاومت در چرخه انتهایی شده است. همچنین با افزایش مقاومت قید تسلیم شونده، حداکثر جابه‌جایی نسبی طبقات تا 8% کاهش پیدا کرده است؛ اما نیرو ایجاد شده در سایر قیدها تا 10% افزایش داشته است.

3) اضافه کردن قید تسلیم‌شونده به طبقه اول، موجب کاهش قابل توجه نیرو در قیدها تا میزان 30% و افزایش نیرو در ستون‌ها و مهاربندهای الاستیک می‌شود. نیروی آپلیفت ستون نیز تا 20% افزایش داشته است. همچنین استفاده از این روش، اتلاف انرژی

سازه بهبود پیدا کرده و مقاومت جانبی سازه تا 5% افزایش داشته است.

4) رفتار سیستم پشتیبان‌قوی وابستگی زیادی به پیکربندی مهاربندهای ارتجاعی و غیرارتجاعی دارد. در میان پیکربندی‌ها، استفاده از مهاربند ضربدری بهترین عملکرد را دارد. استفاده از مهاربند هشتی در ارتفاع سازه، موجب افزایش نیرو تا میزان 100% نسبت به مدل پایه در قیدها شده است. به‌منظور کاهش نیروهای اعمال شده می‌توان در طبقه آخر از مهاربند هفتی استفاده کرد (کاهش تا میزان 40%) یا با استفاده قیدهای تسلیم شونده (تا میزان 50%)، نیرو را در خرپا الاستیک این پیکربندی کاهش داد. 5) چپش اعضای خرپا الاستیک بهتر است باتوجه به پیکربندی مهاربندی صورت بگیرد تا توزیع نیرو مناسب‌تری در اعضای خرپا مشاهده شود. استفاده از خرپا با فرم هندسی وارن، با وجود رفتار مناسب در مهاربند ضربدری، عملکرد بهتری را در سایر پیکربندی‌ها نشان نداده است.

6) با افزایش طول ناحیه الاستیک و کاهش طول ناحیه غیرارتجاعی، کرنش‌های اعمال شده به مهاربندهای غیرارتجاعی بیشتر شده که این امر، موجب گسیختگی سریع‌تر مهاربندها و افت مقاومت سازه می‌شود.

7- مراجع

- Blebo FC, Roke DA, "Seismic-resistant self-centering rocking core system", Engineering Structures, 2015, 101, 193-204.
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.07.016>
 Chen C-H, Mahin SA, Performance-Based Seismic Demand Assessment of Concentrically Braced Steel Frame Buildings, 2012.
 Chen X, Takeuchi T, Matsui R, "Seismic performance and evaluation of controlled spine frames applied in

- Mazzoni S, McKenna F, Scott MH, Fenves GL, "OpenSees command language manual", Pacific Earthquake Engineering Research (PEER) Center, 2006, 264, 137-158.
- Rossi PP, Lombardo A, "Influence of the link overstrength factor on the seismic behaviour of eccentrically braced frames", *Journal of Constructional Steel Research*, 2007, 63, 1529-1545.
<https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2007.01.006>
- Simpson BG, "Higher-mode force response in multi-story strongback-braced frames", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2020.
<https://doi.org/10.1002/eqe.3310>
- Simpson BG, Mahin SA, "Experimental and numerical investigation of strongback braced frame system to mitigate weak story behavior", *Journal of Structural Engineering*, 2018, 144, 1-14.
[https://doi.org/10.1061/\(asce\)st.1943-541x.0001960](https://doi.org/10.1061/(asce)st.1943-541x.0001960)
- Simpson BG, Rivera Torres D, "Simplified modal pushover analysis to estimate first- and higher-mode force demands for design of strongback-braced frames", *Journal of Structural Engineering*, 2021, 147.
[https://doi.org/10.1061/\(asce\)st.1943-541x.0003163](https://doi.org/10.1061/(asce)st.1943-541x.0003163)
- Takeuchi T, Chen X, Matsui R, "Seismic performance of controlled spine frames with energy-dissipating members", *Journal of Constructional Steel Research*, 2015, 114, 51-65.
<https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2015.07.002>
- Tremblay R, Chen L, Tirca L, "High-rise buildings enhancing the seismic performance of multi-storey buildings with a modular tied braced frame system with added energy dissipating devices", *International Journal of High-Rise*, 2014.
- Uriz P, Mahin SA, "Toward earthquake-resistant design of concentrically braced steel-frame structures", University of California, Berkeley, Berkeley, USA, 2008.
- Wiebe L, Christopoulos C, Tremblay R, Leclerc M, "Mechanisms to limit higher mode effects in a controlled rocking steel frame 1: Concept, modelling, and low-amplitude shake table testing", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2013, 42, 1053-1068.
<https://doi.org/10.1002/eqe.2259>
- Zhou Y, Shao H, Cao Y, Lui EM, "Application of buckling-restrained braces to earthquake-resistant design of buildings: A review", *Engineering Structures*, 2021.
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112991>
- Zhu L, Zhao C, "Self-Centering steel frame systems for seismic-resistant structures", *Advances in Civil Engineering*, 2020.
<https://doi.org/10.1155/2020/8859881>
- high-rise buildings", *Earthquake Spectra*, 2018, 34, 1431-1458.
<https://doi.org/10.1193/080817EQS157M>
- Faramarzi MS, Taghikhany TA, "Comparative performance-based seismic assessment of strongback steel braced frames", *Journal of Building Engineering*, 2021 44.
<https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102983>
- Faramarzi MS, Taghikhany T, "Direct performance-based seismic design of strongback steel braced systems, in: Structures", Elsevier, 2020, 482-495.
- Hu S, Wang W, Qu B, Alam MS, "Development and validation test of a novel Self-centering Energy-absorbing Dual Rocking Core (SEDRC) system for seismic resilience", *Engineering Structures*, 2020, 211.
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110424>
- Kazemzadeh Azad S, Topkaya C, "A review of research on steel eccentrically braced frames", *Journal of Constructional Steel Research*, 2017.
<https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2016.07.032>
- Kazemzadeh Azad S, Topkaya C, Astaneh-Asl A, "Seismic behavior of concentrically braced frames designed to AISC341 and EC8 provisions", *Journal of Constructional Steel Research*, 2017, 133, 383-404.
<https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2017.02.026>
- Khatib IF, Mahin SA, Pister KS, "Seismic behavior of concentrically braced steel frames", *Earthquake Engineering Research Center, University of California Berkeley*, 1988.
- Kiggins S, Uang CM, "Reducing residual drift of buckling-restrained braced frames as a dual system", *Engineering Structures*, 2006, 28, 1525-1532.
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2005.10.023>
- Lai J-W, "Experimental and analytical studies on the seismic behavior of conventional and hybrid braced frames", Ph. D. Thesis, UC Berkeley, 2012.
- Lai J-W, Mahin SA, "Strongback system: a way to reduce damage concentration in steel-braced frames", *Journal of Structural Engineering*, 2015, 141, 1-11.
[https://doi.org/10.1061/\(asce\)st.1943-541x.0001198](https://doi.org/10.1061/(asce)st.1943-541x.0001198)
- Li G, Dong Z-Q, Li H-N, "simplified collapse-prevention evaluation for the reserve system of low-ductility steel concentrically braced frames", *Journal of Structural Engineering*, 2018 144.
[https://doi.org/10.1061/\(asce\)st.1943-541x.0002062](https://doi.org/10.1061/(asce)st.1943-541x.0002062)
- Majumder MJE, Dehcheshmeh EM, Broujerdian V, Moradi S, "Self-centering rocking dual-core braced frames with buckling-restrained fuses", *Journal of Constructional Steel Research*, 2022, 194.
<https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2022.107322>
- Martin A, Deierlein GG, "Generalized modified modal superposition procedure for seismic design of rocking and pivoting steel spine systems", *Journal of Constructional Steel Research*, 2021, 183.
<https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2021.106745>
- Martini K, Amin N, Lee PL, Bonowitz D, "The potential role of non-linear analysis in the seismic design of building structures, in: Proc", 4th US National Conference on Earthquake Engineering, 1990, 67-76.