

# کاربرد سیستم دیوار برشی غیرمتصل به ستون‌های کناری به همراه مهاربندهای کششی در مقاوم‌سازی سازه‌ها

تقی مفید (دانشجوی دکتری)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

یوسف حسین زاده (دانشیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تبریز

حمیدرضا نوکلی\* (استادیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

مهندسی عمران شریف، زمستان ۱۳۹۷ (دوره ۲ - شماره ۴/۱، ص. ۱۲-۳)

دیوار برشی فولادی غیرمتصل به ستون‌های کناری به همراه مهاربندهای کششی (سیستم SW-TB) گونه‌ی خاصی از دیوارهای برشی است که در مقایسه با نوع سنتی دیوار برشی، عملکرد بسیار مناسبی دارد. استفاده از سیستم مذکور، موجب کاهش نیروهای وارده به ستون‌های اطراف دیوار برشی (ستون‌های فرعی) و نیز کاهش نیروهای وارده به ستون‌های کناری (اصلی) می‌شود. در نوشتار حاضر، کاربرد دیوارهای مذکور در مقاوم‌سازی سازه‌ها بررسی شده است. برای این منظور، مدل اجزاء محدود یک نمونه دیوار برشی SW-TB، در نرم‌افزار آباکوس ایجاد و نتایج تحلیل آن با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه شده است. پس از اطمینان از صحت مدل ایجادشده، مدل اجزاء محدود قاب خمشی فولادی مقاوم‌سازی شده با روش SW-TB ساخته و نتایج تحلیل اجزاء محدود مدل مذکور، با نتایج سه روش مقاوم‌سازی دیگر مقایسه شده است. نتایج تحلیل اجزاء محدود نشان می‌دهد که استفاده از سیستم SW-TB، باعث افزایش مقاومت جانبی سازه به اندازه ۵۰٪ با شکل‌پذیری مناسب می‌شود و نیاز به تقویت ستون‌های کناری و پی سازه، محدود خواهد بود.

**واژگان کلیدی:** دیوارهای برشی فولادی، قاب‌های خمشی فولادی، دیوار برشی غیرمتصل به ستون، رفتار غیرخطی استاتیکی، مهاربند کششی.

mofid.t@chmail.ir  
hosseinzadeh@tabrizu.ac.ir  
tavakoli@nit.ac.ir

## ۱. مقدمه

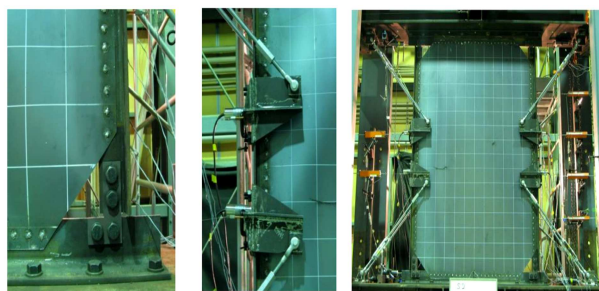
در دهه‌های اخیر، سیستم دیوار برشی فولادی به عنوان یک سیستم باربر جانبی مناسب شناخته و در بسیاری از سازه‌های بلندمرتبه‌ی جهان استفاده شده است. تاکنون مطالعات زیادی در مورد دیوارهای برشی در کشورهای مختلف، مانند کانادا و ژاپن، صورت گرفته است.<sup>[۱-۱۱]</sup> یکی از معایب سیستم دیوار برشی، انتقال نیروی کششی ایجادشده در صفحه‌ی دیوار به ستون‌های متصل شده به آن است و این امر موجب افزایش چشمگیر مقاطع تیر و ستون به کار رفته در اطراف دیوار برشی می‌شود.<sup>[۱۲-۱۵]</sup> از جمله مطالعاتی که برای مقابله با مشکل ذکرشده صورت گرفته است، استفاده از دیوارهای برشی نیمه‌مقید در لبه‌هاست که برای اولین بار در سال ۲۰۰۱، ارائه شد.<sup>[۵]</sup> مطابق شکل ۱ در سیستم مذکور، ورق دیوار به جای اتصال به ستون‌های اصلی سازه که بارهای قائم را تحمل می‌کنند، به ستون‌های فرعی متصل

می‌شود و شرایطی را در سازه ایجاد می‌کند که به وسیله‌ی آن، سیستم باربر جانبی و قائم از همدیگر جدا می‌شوند و در نتیجه، نیروی برشی ناشی از بارهای جانبی به ستون‌های اصلی سازه انتقال نمی‌یابد و توسط دیوار برشی و ستون‌های فرعی تحمل می‌شود. ایده‌ی استفاده از مهاربندهای کششی در اطراف دیوارهای برشی که موسوم به دیوارهای SW-TB<sup>۱</sup> هستند، برای اولین بار در دانشگاه توکیو ژاپن، ارائه و آزمایش شد که موجب بهبود عملکرد دیوارها شد.<sup>[۱۶]</sup> در واقع، افزودن میلگردها منجر به افزایش ۴۵ درصدی مقاومت تسلیم و سختی برشی اولیه‌ی سیستم SW-TB نسبت به حالت بدون مهاربندهای کششی می‌شود. مطابق شکل ۲، اجزاء تشکیل‌دهنده‌ی سیستم SW-TB عبارتند از: ورق فولادی نازک، مهاربندهای کششی، المان‌های مرزی عمودی (VBE) و المان‌های مرزی افقی (HBE). دو میله‌ی کششی در هر گوشه‌ی قرار می‌گیرد و انتهای هر میله، با شیب ۴۵ به المان‌های مرزی عمودی متصل می‌شود. در مجموع، با استفاده از ۸ میله‌ی کششی، انتهای هر میله به تیرها و در محلی بدون حفاظ مهار می‌شود.

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۵/۳/۲۶، اصلاحیه ۱۳۹۵/۱۱/۱۸، پذیرش ۱۳۹۵/۱۲/۷.

DOI: 10.24200/J30.2019.1434



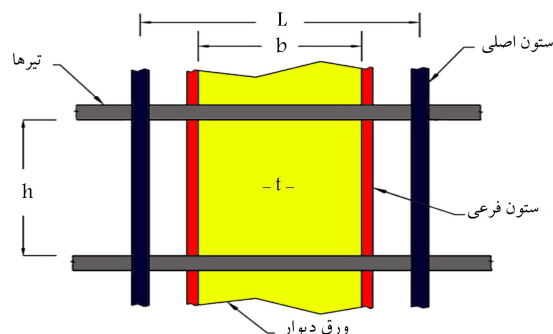
الف) سیستم مهاربندی SW-TB؛ ب) نحوه قرار گیری براکت‌ها؛ ج) جزئیات اتصال اجزای مرزی قائم به اجزای مرزی افقی.

شکل ۳. نمونه‌ی آزمایشی کوراتا و همکاران. [۱۶]

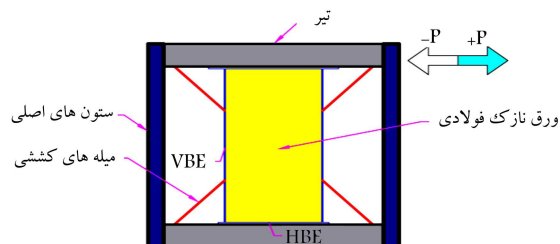
است. در سیستم SW-TB، دو میله‌ی کششی در هر گوشه‌ی قرار گرفته و انتهای هر میله با شیب ۴۵ به المان‌های مرزی عمودی (VBE) و با استفاده از براکت (صفحه لچکی) متصل و در مجموع ۸ میله‌ی کششی استفاده شده است (شکل ۳ الف). انتهای دیگر هر میله، به تیرها و در فاصله‌ی به اندازه‌ی نصف عمق تیر از ستون مهار شده است. هر دو انتهای میله‌ها، عملکرد مفصلی دارند. براکت‌های نشان داده شده در شکل ۳ ب، با هدف محدود کردن نیروی میله‌ی کششی وارد به محل اتصال المان‌های مرزی عمودی که موجب تغییر شکل غیرکشسان در المان‌های مذکور می‌شوند، طراحی شده‌اند. همچنین میله‌های کششی، موجب ایجاد حرکت دورانی در المان‌های مرزی عمودی و در محل براکت‌ها و موجب افزایش پایداری سیستم می‌شوند. مطابق شکل ۳ ج، اجزاء مرزی افقی و قائم با استفاده از ورق فولادی L شکل به ضخامت ۱/۲ میلی‌متر به همدیگر متصل شده‌اند. همچنین عملکرد اتصال مذکور، مفصلی محسوب می‌شود و صفحه‌ی نازک فولادی، به عناصر مرزی اطراف خود جوش شده است. بارگذاری نمونه‌ی موردنظر، براساس روش جابه‌جایی - کنترل و در دررفت‌های ۰/۳۷۵، ۰/۵ و ۰/۷۵ درصد، به صورت جابه‌جایی افقی بر نمونه‌ی آزمایشگاهی اعمال شده است.

برای اعضای تیرها از نیمرخ  $21 \times 13 \times 400 \times H$ ، ستون‌ها از نیمرخ  $16 \times 9 \times 250 \times H$ ، میله‌های کششی از  $16M$  و جنس آن‌ها فولاد نرمه‌ی  $SS400$  در نظر گرفته شده است. برای اجزاء مرزی قائم از  $9 \times 6 \times 100 \times CT$ ، اجزاء مرزی افقی از  $11 \times 7.5 \times 175 \times CT$  و صفحه‌ی فولادی از ورق نازک با ضخامت  $1.6mm$  استفاده شده است. مشخصات مکانیکی اجزاء تشکیل دهنده‌ی نمونه‌ی آزمایشی مذکور، با استفاده از آزمایش کشش و طبق استاندارد ژاپنی JIS صورت گرفته و تنش و کرنش‌های واقعی مصالح، در جدول ۱ خلاصه شده است.

عملکرد سیستم SW-TB به گونه‌ی بی‌اشتباه است که وارد شدن یک بار جانبی به قاب آزمایش، موجب ایجاد کماتش در صفحه‌ی فولادی می‌شود و این کماتش، موجب



شکل ۱. دیوار برشی فولادی نیمه‌مقید در لبه‌ها. [۱۳]



شکل ۲. دیوار برشی غیرمتصل به ستون‌های اصلی به همراه مهاربندهای کششی (SW-TB). [۱۶]

در پژوهش حاضر، کاربرد سیستم SW-TB در مقاوم‌سازی سازه‌ها بررسی شده است. برای این کار، یک قاب خمشی فولادی با استفاده از روش SW-TB، مقاوم‌سازی و رفتار لرزه‌ی آن با سه روش مقاوم‌سازی دیگر (مهاربند ضربدری نبشی، مهاربند ضربدری کابلی و مهاربند ضربدری کابلی که از داخل غلاف استوانه‌ی عبور داده شده است)، مقایسه شده است. برای مدل‌سازی اجزاء محدود قاب خمشی مقاوم‌سازی شده با سیستم SW-TB، از داده‌های آزمایشگاهی دو نمونه‌ی آزمایشگاهی استفاده شده است. نمونه‌ی اول، یک قاب مفصلی است که با استفاده از سیستم SW-TB مقاوم‌سازی شده و نمونه‌ی دوم، یک قاب خمشی است که با استفاده از مهاربندی ضربدری مقاوم‌سازی شده است که در ادامه، به معرفی دقیق‌تر هر دو نمونه پرداخته شده است.

## ۲. معرفی سیستم SW-TB

سیستم SW-TB در سال ۲۰۱۲، [۱۶] ارائه و آزمایش شده است. شکل ۳، نمونه‌ی آزمایشگاهی سیستم SW-TB را نشان می‌دهد که شامل یک قاب مفصلی مقاوم‌سازی شده با استفاده از دیوار برشی غیرمتصل به ستون‌های کناری و مهاربند

جدول ۱. مشخصات مکانیکی اجزاء نمونه‌ی آزمایش. [۱۶]

نام	$E(Gpa)$ مدول کشسانی	$\sigma_y(Mpa)$ تنش تسلیم	$\epsilon_{p1}$ کرنش خمیری	$\sigma_u(Mpa)$ تنش نهایی	$\epsilon_{p3}$ کرنش خمیری
صفحه‌ی فولادی	۲۱۵	۲۰۲	۰	۴۴۲/۹	۰/۲۹۴
VBE	۲۱۵	۳۲۹/۴	۰	۵۶۰/۷	۰/۲۴۴
HBE	۲۱۵	۳۴۳/۹	۰	۵۷۸	۰/۱۷۹
میله‌ی کششی	۲۱۵	۳۰۱/۳	۰	۵۴۴/۷	۰/۲۹۳

تقارن از المان‌های مرزی عمودی و  $\alpha$  شیب میدان کششی صفحه است. باید توجه کرد که رابطه‌ی ۱، زمانی معتبر است که نسبت ابعاد صفحه‌ی فولادی، بزرگ‌تر از ۰/۸ باشد و عناصر مرزی بتوانند محدودیت سختی تعیین شده را تأمین کنند. [۱۹، ۲۰]

مقاومت برشی صفحه‌ی دیوار، به‌عنوان مقاومت برشی کل سیستم در نظر گرفته می‌شود؛ زیرا که مفصل‌های متصل به عناصر مرزی، نیروی برشی زیادی تحمل نمی‌کنند. شیب میدان کششی، ۴۵ درجه در نظر گرفته شده است. هنگامی که ضخامت صفحه‌ی فولادی انتخاب شد، یک مقطع آزمایشی برای المان‌های مرزی قائم انتخاب می‌شود. در اولین تحلیل کشسان غیرخطی پوش‌آور فرض می‌شود رفتار میله‌ی کششی به‌صورت خطی است. به میله‌ها و بازوهای کششی، ابعادی معقول، اختصاص داده می‌شود و با استفاده از نتایج تحلیل اول، التزام اینکه گسیختگی صفحه‌ی فولادی، قبل از المان‌های مرزی قائم اتفاق بیافتد، بررسی می‌شود. لازم به ذکر است که در بررسی مذکور، همه‌ی قسمت‌های صفحه‌ی فولادی، گسیخته نمی‌شوند و معیار اتخاذ شده این است که آیا حدود ۶۰٪ ناحیه‌ی وسط از صفحه‌ی فولادی و یا بیشتر گسیخته می‌شود یا نه؟ معیار ذکر شده با این هدف در نظر گرفته شده است که گسیخته شدن صفحه در تمامی ارتفاع آن و بعد از یک چرخه‌ی پوش‌آور رفت و برگشت اتفاق بیافتد. اگر معیار انتخاب شده، متعادل‌کننده باشد، آنگاه قطر میله‌های کششی براساس نیروی متناسب با دریافت ۱٪ (به‌منظور ساده‌سازی روند طراحی) انتخاب می‌شود. سپس تحلیل دومی انجام می‌شود تا مشخص شود که مقاومت برشی کل سیستم قابل قبول است یا نه. اگر خطا در محدوده‌ی مجاز باشد، آنگاه ابعاد بازوی براکت‌ها با یک فرایند تکراری تعیین می‌شود، تا اطمینان حاصل شود که میله‌های کششی تا کمینه‌ی دریافت ۲/۵٪، در حالت خطی باقی می‌مانند؛ در غیر این صورت ضخامت صفحه‌ی دیوار، نیاز به افزایش دارد (دریافت ۲/۵٪)، برای حفظ مقاومت سیستم دیوار برشی تحت تغییرشکل‌های بسیار بزرگ‌تر از دریافت مجاز طراحی در آیین‌نامه‌ی ASCEV تعریف شده است). محل براکت‌ها از قبل و براساس آنالیز اولیه و با هدف کمینه‌سازی ابعاد میله‌ی کششی و براکت‌ها و با در نظر گرفتن سختی مؤثر المان‌های مرزی عمودی طراحی می‌شود. طراحی المان‌های مرزی عمودی، نیاز به یک فرایند تکراری دارد؛ زیرا که رفتار المان‌های مرزی عمودی به رفتار میله‌های کششی و هندسه‌ی محلی براکت وابسته است. مقاومت و سختی المان‌های مرزی عمودی تا حد زیادی در رفتار کلی سیستم تأثیر می‌گذارد ولی رفتار المان‌های مرزی افقی مادامی که قوی‌تر از صفحات دیوار طراحی شده باشند، تأثیر زیادی در رفتار کلی سیستم ندارد. طراحی صحیح المان‌های مرزی افقی، کار نسبتاً آسانی است، چرا که مستقیماً به تیرهای بالا و پایین قاب متصل شده است. این تذکر لازم است که المان‌های مرزی عمودی را می‌توان با استفاده از اعضا غیرفشرده نیز طراحی کرد؛ چرا که آن‌ها نیروی محوری فشاری زیادی تحمل نمی‌کنند و بارهای قائم موجود، توسط ستون‌های سازه که در طرفین دیوار برشی قرار دارند، تحمل می‌شوند. شکل ۵، مشخصات هندسی نهایی مربوط به نمونه‌ی آزمایشگاهی کوراتا، را نشان می‌دهد. [۱۶]

### ۳. معرفی جزئیات المان‌ها و مصالح در نرم‌افزار آباکوس

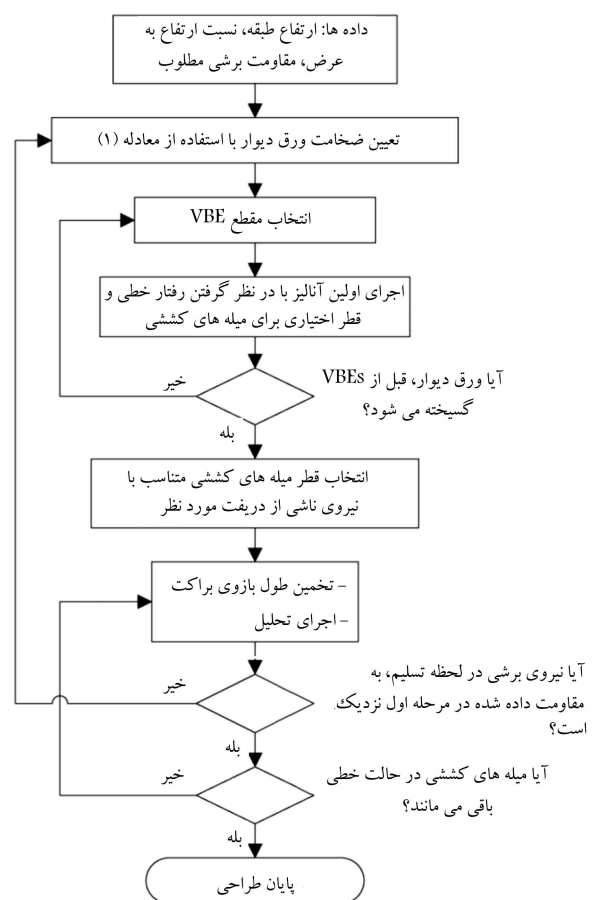
در نمونه‌ی آزمایشگاهی کوراتا، [۱۶] برای مدل‌سازی ورق فولادی در نرم‌افزار آباکوس از المان Shell، برای میله‌های کششی از المان Wire، و برای سایر اعضا از المان Solid استفاده شده است. برای مش‌بندی المان مورد استفاده برای تیر، ستون، VBEs و

ایجاد نیروی داخلی در میله‌های کششی و المان‌های مرزی می‌شود. بنابراین میله‌های کششی و المان‌های مرزی، به‌ویژه المان‌های مرزی عمودی (VBEs) باید سختی و مقاومت کافی را برای جلوگیری از گسیختگی صفحه‌ی فولادی داشته باشند. اگر گسیختگی دیوار برشی به ظرفیت میله‌های کششی و المان‌های مرزی وابسته باشد، آنگاه فقط یک افزایش ناچیز در مقاومت اجزاء مذکور، موجب هدر رفتن ضخامت اضافی استفاده شده در صفحه‌ی دیوار خواهد شد. بنابراین یکی از الزامات اصلی طراحی سیستم SW-TB، این است که صفحه‌ی دیوار برشی قبل از المان‌های مرزی به گسیختگی برسد. سپس المان‌های مرزی عمودی به دلیل نیروهای داخلی ایجاد شده در صفحه به‌صورت غیرکشسان تغییرشکل خواهند داد، ولی میله‌های کششی تا زمانی که تغییرشکل بسیار بزرگی اتفاق نیافتد، به‌صورت کشسان باقی خواهند ماند.

برای طراحی سیستم SW-TB، نمودار شکل ۴ توسط کوراتا، پیشنهاد شده است. [۱۶] با توجه به هندسه‌ی قاب و مقاومت برشی  $(V_n)$  برای سیستم SW-TB، ضخامت تقریبی صفحه‌ی دیوار با استفاده از رابطه‌ی ۱ طبق آیین‌نامه‌ی لرنه‌بی ایالات متحده و کانادا که برای محاسبه‌ی مقاومت برشی اسمی صفحه در سیستم دیوار برشی متداول SPSW ارائه شده است، به‌دست می‌آید، [۱۷، ۱۸] که شامل ضریب افزایش مقاومتی برابر ۱/۲ است:

$$t_w = V_n / 0.42 F_y L \sin \alpha \quad (1)$$

که در آن،  $F_y$  تنش حد تسلیم،  $t_w$  ضخامت صفحه‌ی دیوار،  $L$  فاصله‌ی خط

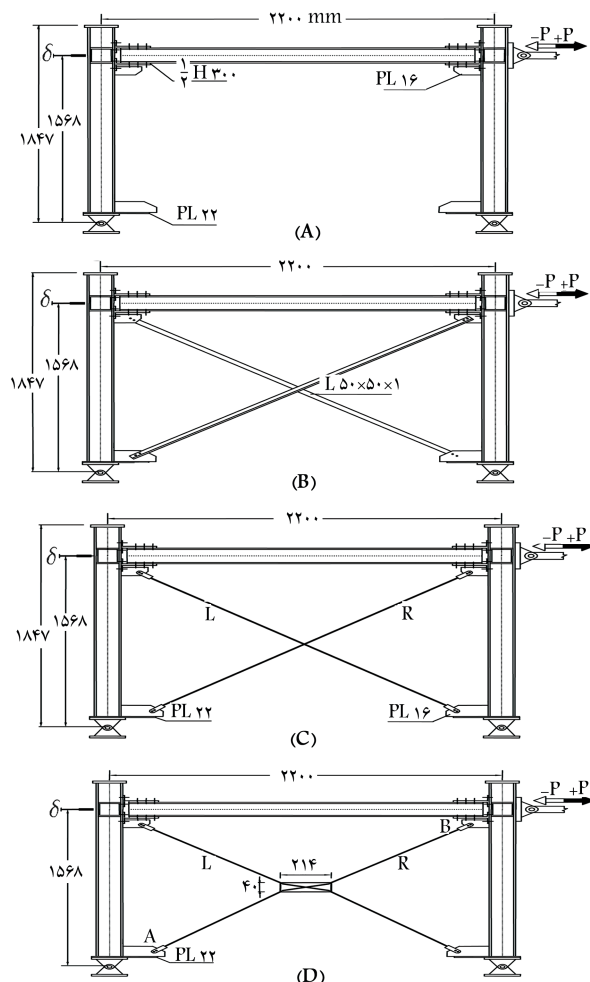


شکل ۴. فلوجارت طراحی سیستم SW-TB. [۱۶]



جدول ۲. مشخصات مصالح آزمایشی مدل هو و تاگاو. [۲۱]

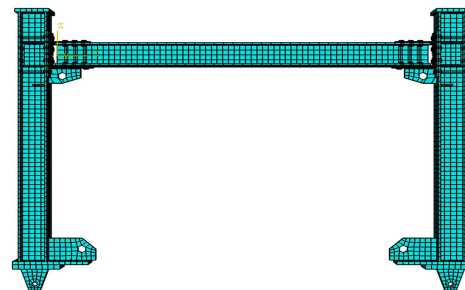
نوع فولاد	$E (Gpa)$	$\sigma_y (Mpa)$	$\epsilon_{p1}$	$\epsilon_{p2}$	$\sigma_r (Mpa)$	$\epsilon_{p3}$
SN۴۰۰	۱۸۰	۲۸۱۰	۰	۰/۲۰	۴۲۹۰	۰/۳۳
SS۴۰۰	۱۸۰	۲۵۳۰	۰	۰/۱۹۱	۴۱۵۰	۰/۳۲
A۴۹۰	۲۱۰	۸۰۲۰	۰	۰/۰۰۷۹	۱۰۶۳۰	۰/۲۸



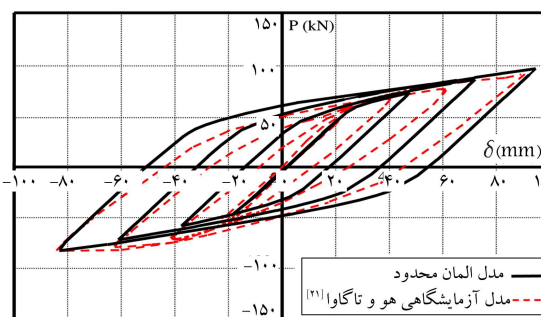
شکل ۱۰. روش‌های مقاوم‌سازی قاب خمشی فولادی. [۲۲]

به قاب‌های مذکور مشاهده می‌شود، که مطابق آن در قاب‌های B، C و D عضو مهاربندی در نقطه‌ی J شکسته می‌شود؛ به همین دلیل، مقدار بیشینه‌ی جابه‌جایی جانبی قاب‌های مذکور نمی‌تواند به ۱۰۰ میلی‌متر برسد. نتایج مطالعات اخیر، [۲۲] نشان می‌دهد که قاب مقاوم‌سازی شده با مهاربندهای کابلی به همراه غلاف استوانه‌یی، از نظر جذب انرژی و افزایش مقاومت جانبی سیستم، رفتار بهتری نسبت به سایر روش‌ها داشته است. در پژوهش حاضر، برای مقاوم‌سازی قاب خمشی فولادی، از دیوار برشی SW-TB استفاده و نتایج تحلیل اجزاء محدود آن، با روش‌های مقاوم‌سازی اشاره شده در شکل ۱۰ مقایسه شده است.

برای مقاوم‌سازی قاب خمشی با استفاده از سیستم SW-TB لازم است ابعاد دیوار برشی SW-TB متناسب با ابعاد قاب خمشی طراحی شود. برای این کار، از فلوجارت شکل ۴ و روش صحیح و خطا استفاده شده است. برای اینکه مقایسه‌ی بین نمودارهای هیستریزس مربوط به روش‌های مختلف مقاوم‌سازی، به صورت



الف) مدل اجزای محدود؛



ب) منحنی هیستریزس روش اجزای محدود و نمونه آزمایشی.

شکل ۹. مدل اجزاء محدود نمونه.

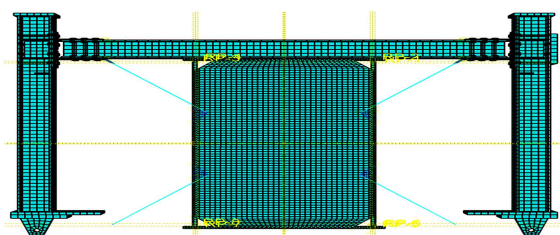
A۴۹۰ به صورت سه خطی معرفی شده است. در جدول ۲، مشخصات مصالح آزمایشی ارائه شده است.

## ۵. معرفی جزئیات المان‌ها و مصالح در نرم‌افزار آباکوس<sup>۲</sup>

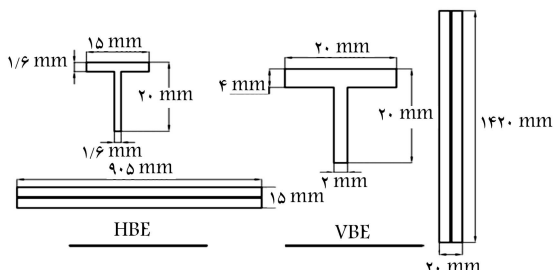
در مدل اجزاء محدود، المان مورد استفاده برای تیر، ستون و اجزاء اتصال، از نوع شش وجهی کاهش یافته‌ی C3D8R، با ۸ گره و از مرتبه‌ی خطی است که در شکل ۹ الف مشاهده می‌شود. در شکل ۹ ب، منحنی هیستریزس به دست آمده از تحلیل مدل اجزاء محدود، با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه شده است. اختلاف ناچیز دو منحنی ذکر شده (۲/۵٪) نشانگر صحت مدل اجزاء محدود ایجاد شده است. نتایج تحلیل مدل مذکور، محل تنش‌های بیشینه و نیروی وارده به اعضا را به خوبی نشان می‌دهند.

## ۶. مقاوم‌سازی قاب خمشی فولادی

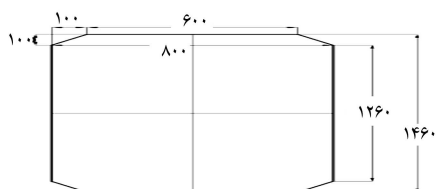
در پژوهشی در سال ۱۳۹۰، [۲۲] سه روش مقاوم‌سازی قاب خمشی فولادی بررسی شد. شکل ۱۰، نمای کلی ۴ قاب خمشی فولادی را نشان می‌دهد، که حالت A مربوط به قاب بدون مقاوم‌سازی و حالت B الی D، به ترتیب مربوط به روش‌های مقاوم‌سازی: مهاربند ضربدری نبشی شکل، بادبند ضربدری کابلی و بادبند ضربدری کابلی به همراه غلاف استوانه‌یی است. در شکل ۱۱، نمودار هیستریزس مربوط



الف) مدل اجزای محدود ایجاد شده؛



ب) ابعاد اجزای مرزی قائم و افقی؛



ج) ورق فولادی به ضخامت ۰/۴ mm.

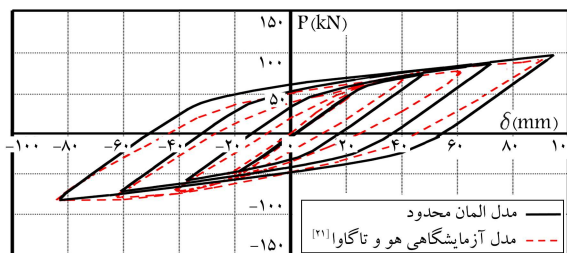
شکل ۱۲. مشخصات هندسی قاب خمشی فولادی مقاوم‌سازی شده با سیستم SW-TB (قاب E).

## ۷. نتایج تحلیل المان محدود

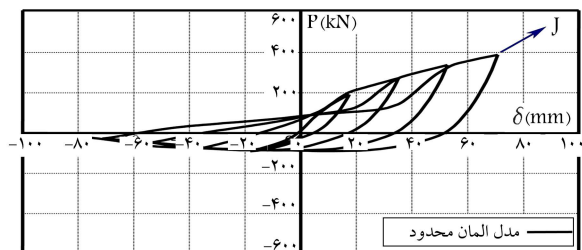
شکل ۱۳ الف، نمای هندسی قاب مقاوم‌سازی شده با سیستم SW-TB و شکل ۱۳ ب، مدل المان محدود سیستم SW-TB را بعد از انجام تحلیل نشان می‌دهند. مطابق شکل ۱۳ ب، مدل اجزاء محدود ساخته شده، رفتار کماتشی، تشکیل میدان کششی قطری، محل تنش‌های بیشینه و نیروی وارده به تیرها و ستون‌ها را به خوبی نشان می‌دهند و همچنین نحوه‌ی شکست سیستم SW-TB به گونه‌ی بی‌اشکال و بدون آسیب به دیوار برشی گسیخته و سپس اتصال جوشی ورق به المان‌های مرزی عمودی شکسته می‌شود.

## ۸. مقایسه‌ی رفتار سیستم‌ها

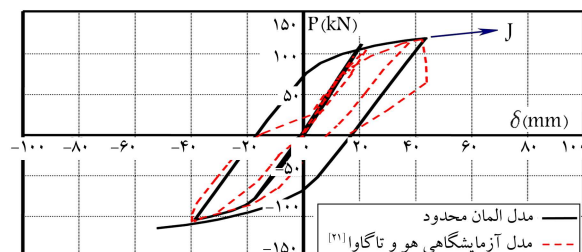
در شکل ۱۴، نمودار هیستریزیس حاصل از تحلیل اجزاء محدود برای قاب E مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، نقطه‌ی J محل شکست دیوار برشی است، که به صورت شکست جوش در محل اتصال دیوار برشی به المان‌های مرزی عمودی (VBEs) اتفاق می‌افتد. با مقایسه‌ی محل نقطه‌ی J در مدل مذکور نسبت به سایر مدل‌های مقاوم‌سازی شده می‌توان نتیجه گرفت که قاب E نسبت به قاب‌های B و C، تغییر مکان جانبی بیشتری را تحمل می‌کند و شکست سیستم SW-TB نسبت به سیستم مهاربندی کابلی ضربدری و نبشی ضربدری دیرتر اتفاق می‌افتد. از اتصال نقاط اوج منحنی‌ها در یک مجموعه منحنی بارگذاری و باربرداری،



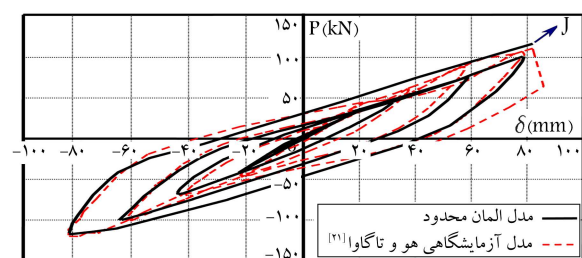
الف) چرخه هیستریزیس قاب (A)؛



ب) چرخه هیستریزیس قاب (B)؛



ج) چرخه هیستریزیس قاب (C)؛



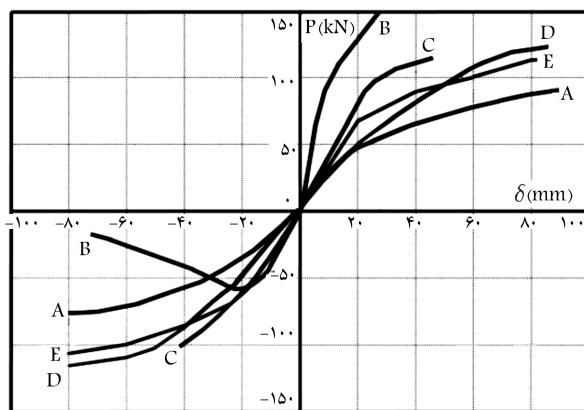
د) چرخه هیستریزیس قاب (D)؛

شکل ۱۱. نمودار هیستریزیس حاصل از تحلیل اجزاء محدود. [۲۲]

منطقی صورت گیرد، لازم است مقاومت جانبی سیستم SW-TB به اندازه‌ی در نظر گرفته شود که تقریباً معادل یا نزدیک به مقاومت جانبی سیستم‌های مذکور باشد که در پژوهش حاضر مقاومت جانبی سیستم دیوار برشی SW-TB تقریباً معادل مقاومت جانبی قاب D در نظر گرفته شده است.

شکل ۱۲ (ب، ج)، هندسه‌ی جدید سیستم SW-TB را نشان می‌دهد. در شکل ۱۲ الف، مدل اجزاء محدود قاب مقاوم‌سازی شده با سیستم SW-TB مشاهده می‌شود که در آن از ۸ میله‌ی کششی به طول ۶۰۰ میلی‌متر و با مقطع دایره‌ی به قطر ۸ میلی‌متر استفاده شده است. نحوه‌ی بارگذاری مدل مذکور، مطابق شکل ۸ ب به صورت جابه‌جایی افقی بر نمونه اعمال شده است. همچنین در مدل اشاره شده، از مصالح و اجزاء استفاده شده در قاب خمشی هو و تاگوا، [۲۱] با همان جزئیات استفاده شده و اجزاء دیوار برشی داخل قاب نیز از نظر جنس مشابه دیوار برشی کوراتا، [۱۶] بوده است ولی مشخصات هندسی آن به تناسب ابعاد قاب تغییر کرده است.





شکل ۱۵. نمودار پوش هیستریزس قاب‌های A، B، C، D و E.

جدول ۳. نسبت‌های سختی اولیه، بار نهایی و جابه‌جایی لحظه‌ای خرابی قاب‌ها به مقادیر نظیر قاب A.

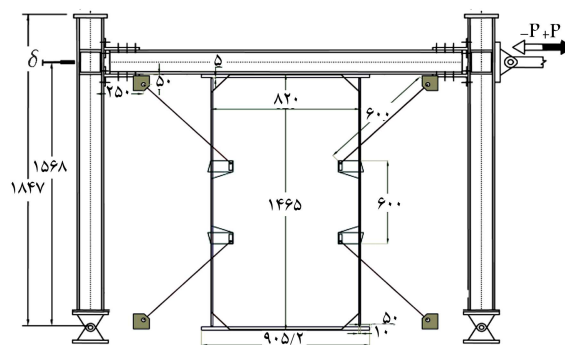
نمونه	نسبت سختی اولیه	نسبت بار نهایی	نسبت تغییر مکان نهایی
قاب B	۴/۰۳	۲/۴۰	۰/۹۳
قاب C	۱/۴۴۳	۱/۴۳	۰/۵۷
قاب D	۱/۰۱۸	۱/۶۲	۱
قاب E	۱/۴	۱/۵۰	۱

(قاب A) دارد و می‌توان گفت که در قاب‌های D و E، مهاربند جانبی، تأثیر کمتری در شکل‌پذیری قاب خمشی دارد. در قاب E، دیوار برشی در مقابل تغییر مکان‌های بیشتر قاب مقاومت می‌کند و مقاومت لحظه‌ای خرابی به اندازه‌ی ۵۰٪ افزایش می‌یابد. سطح زیر منحنی هیستریزس قاب E، ظرفیت مناسب آن را در جذب انرژی نشان می‌دهد. به این ترتیب، در سیستم SW-TB با حفظ شکل‌پذیری قاب، مقاومت آن ۱/۵ برابر افزایش می‌یابد. همان‌طوری که ملاحظه می‌شود، استفاده از نیم‌رخ نبشی برای مقاوم‌سازی قاب خمشی فولادی در قاب B، سختی اولیه و بار نهایی قاب را به ترتیب به ۴/۰۳ و ۲/۴ برابر افزایش و نسبت جابه‌جایی نهایی قاب مذکور را به ۰/۹۳ کاهش داده است. به این ترتیب شکل‌پذیری قاب B کاهش یافته است و انتظار می‌رود که ظرفیت جذب انرژی قاب کاهش یابد. چرخه‌های بار یک و ناپایدار هیستریزس قاب B مطابق شکل ۱۲ موضوع مطرح شده را تأیید می‌کند. از دیدگاه شکل‌پذیری و ظرفیت جذب و همچنین تغییر شکل ماندگار، غیر قابل قبول بودن روش مقاوم‌سازی ذکر شده نتیجه‌گیری می‌شود.

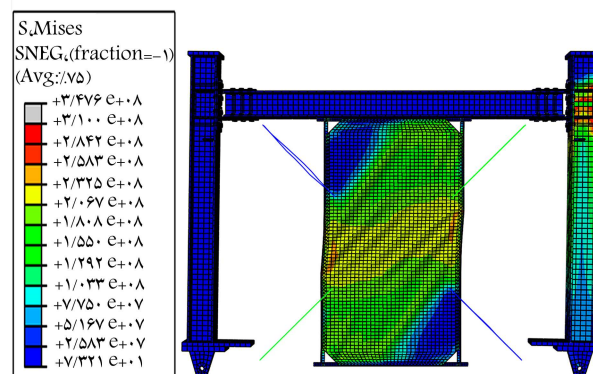
## ۹. نقش ضعف یا قوت المان‌های کششی در رفتار

### سیستم SW-TB

نتایج تحلیل اجزاء محدود مربوط به مدل سیستم SW-TB بدون مهاربند‌های کششی نشان می‌دهد که حذف مهاربند‌های کششی، موجب کاهش مقاومت برشی سیستم به اندازه‌ی ۳۴٪ می‌شود. مطابق شکل ۱۶، وجود میله‌های کششی، موجب ایجاد حرکت دورانی در المان‌های مرزی عمودی و در محل براکت‌ها می‌شوند و با افزایش مساحت ناحیه‌ی کششی دیوار برشی، رفتار سیستم را بهبود می‌بخشند.

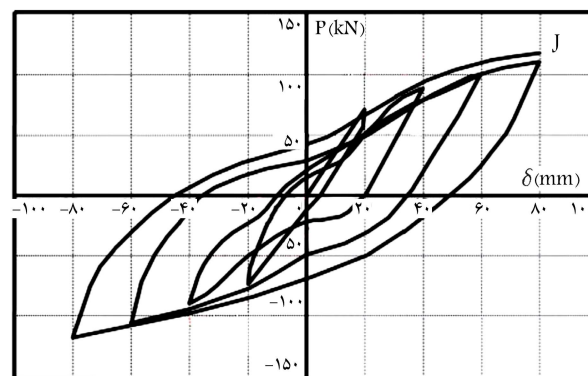


الف) جزئیات هندسی قاب E



ب) مدل اجزای محدود قاب E بعد از انجام تحلیل.

شکل ۱۳. نمای قاب خمشی فولادی مقاوم‌سازی شده با سیستم SW-TB.

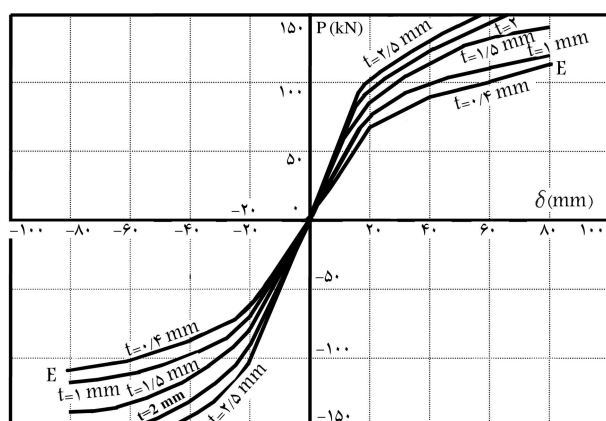


شکل ۱۴. نمودار هیستریزس حاصل از تحلیل اجزاء محدود قاب E.

منحنی پوش هیستریزس به دست می‌آید و برای به دست آوردن سختی اولیه و یا بررسی شکل‌پذیری سیستم، از منحنی مذکور استفاده می‌شود. در شکل ۱۵، منحنی پوش هیستریزس ۵ نمونه با یکدیگر مقایسه شده است. شیب مماس بر منحنی پوش هیستریزس در لحظه‌ی صفر را سختی اولیه می‌نامند. با استفاده از منحنی پوش هیستریزس می‌توان مقادیر سختی اولیه، بیشینه‌ی بار جانبی که توسط قاب تحمل می‌شود (بار نهایی) و جابه‌جایی لحظه‌ای خرابی قاب‌ها را با یکدیگر مقایسه کرد. در جدول ۳، نسبت‌های سختی اولیه، بار نهایی، و جابه‌جایی لحظه‌ای خرابی قاب‌ها به مقادیر نظیر قاب A که در تحلیل اجزاء محدود تعیین شده است، ارائه شده است. با توجه به شکل‌های ۱۲ و ۱۴ و جدول ۳ ملاحظه می‌شود که سختی اولیه‌ی قاب مقاوم‌سازی شده با دیوار برشی (قاب E) و قاب با مهاربند کابلی عبور داده شده از داخل غلاف (قاب D)، اختلاف کمتری با سختی اولیه‌ی قاب خمشی بدون مهاربند

جدول ۵. نتایج تحلیل اجزاء محدود مربوط به قاب E با ۵ ضخامت مختلف ورق دیوار برشی.

ضخامت دیوار برشی (mm)	سختی اولیه (KN/mm)	بار نهایی (KN)
۰٫۴	۳٫۱۵	۱۱۹٫۱
۱	۳٫۸	۱۲۸٫۰
۱٫۵	۴٫۲	۱۴۳٫۶
۲	۴٫۶	۱۵۶٫۱
۲٫۵	۵٫۰	۱۶۶٫۲



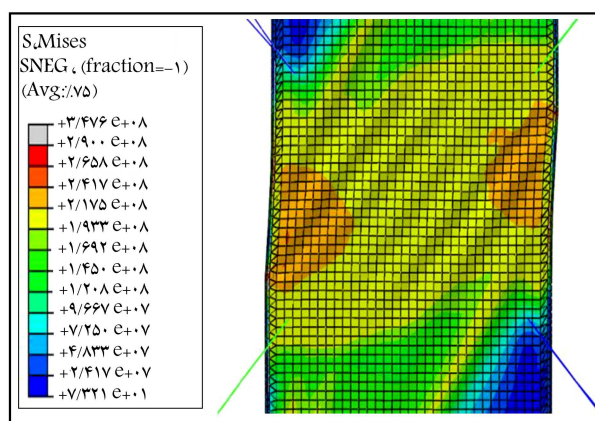
شکل ۱۸. نمودار پوش هیستریزیس مربوط به قاب E به ازاى ضخامت‌هاى مختلف ورق دیوار.

کششی، موجب کاهش سختی اولیه و بیشینه بار تحمل شده توسط سیستم می‌شود و وجود یا نبود مهاربندهای کششی، تأثیری در بهبود عملکرد سیستم دیوار برشی نخواهد داشت. از طرفی دیگر، در مدل‌های مربوط به قطرهای ۱۵، ۲۰ و ۲۵، سختی اولیه‌ی سیستم افزایش یافته و نمودار هیستریزیس مربوط به آن‌ها نسبت به مدل مبنا کشیده‌تر و لاغرتر شده است. بنابراین افزایش بیش از حد قطر مهاربندهای کششی نیز موجب کاهش شکل‌پذیری و جذب انرژی سیستم می‌شود و مطلوب نیست. در حالت کلی، بهتر است قطر مهاربندهای کششی به‌گونه‌ی انتخاب شود که تا آخرین لحظه‌ی بارگذاری در حالت خطی باقی بمانند و گسیخته نشوند؛ در غیراین صورت، موجب تضعیف عملکرد سیستم دیوار برشی خواهند شد.

## ۱۰. نقش افزایش ضخامت ورق در رفتار سیستم

### SW-TB

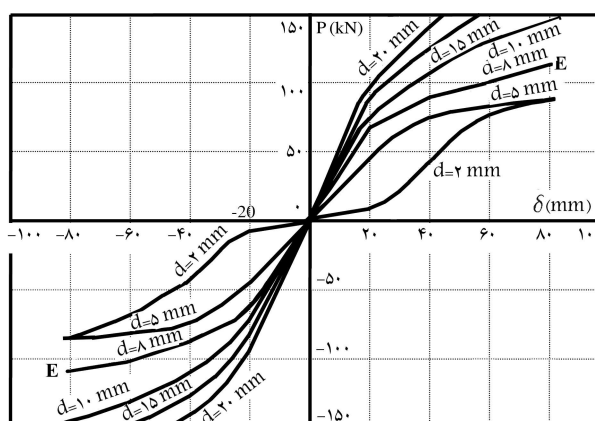
برای بررسی تأثیر افزایش ضخامت دیوار برشی در رفتار سیستم SW-TB، مدل اجزاء محدود مربوط به قاب E به ازاى ۵ ضخامت مختلف دیوار، تحلیل و سختی اولیه و بار نهایی تحمل شده توسط آن‌ها با یکدیگر مقایسه شده‌اند (جدول ۵). در شکل ۱۸، نمودار پوش هیستریزیس مربوط به مدل‌های مذکور نشان داده شده است. نتایج تحلیل اجزاء محدود نشان می‌دهد که با افزایش ضخامت ورق دیوار برشی، سختی اولیه‌ی سیستم افزایش و شکل‌پذیری و جذب انرژی آن کاهش می‌یابد. از طرف دیگر، در مدل‌های با ضخامت دیوار ۱، ۱٫۵ و ۲ میلی‌متر، المان‌های مرزی عمودی در خارج از صفحه‌ی دیوار، کمانش می‌کنند و در مدل با ضخامت ۲٫۵ میلی‌متر، المان‌های مرزی و مهاربندهای کششی قبل از دیوار



شکل ۱۶. حرکت دورانی در المان‌های مرزی عمودی در محل براکت‌ها.

جدول ۴. نتایج تحلیل اجزاء محدود مربوط به قاب E با ۶ قطر مختلف مهاربندهای کششی.

قطر مهاربندهای کششی (mm)	سختی اولیه (KN/mm)	بار نهایی (KN)
۲	۰٫۲۲	۷۸٫۵
۵	۲٫۱۹	۷۸٫۵
۸	۳٫۰۶	۱۱۹٫۱
۱۰	۳٫۹۲	۱۵۴٫۷
۱۵	۴٫۳۵	۱۸۸٫۲
۲۰	۴٫۵۵	۲۲۱٫۷



شکل ۱۷. نمودار پوش هیستریزیس مربوط به قاب E به ازاى قطرهای مختلف المان‌های کششی.

در ادامه، برای بررسی دقیق‌تر تأثیر مهاربندهای کششی در رفتار سیستم SW-TB، مدل اجزاء محدود مربوط به قاب E به ازاى مهاربندهایی با ۵ ضخامت مختلف، مطابق جدول ۴، تحلیل و نمودار پوش هیستریزیس مربوط به قطرهای مختلف المان‌های کششی در شکل ۱۷ ارائه شده است.

همان‌طوری که در شکل ۱۷ مشاهده می‌شود، اگر قطر ۸ میلی‌متر به عنوان مدل مبنا در نظر گرفته شود (قاب E)، در مدل‌های مربوط به قطرهای ۲ و ۵ میلی‌متر، مهاربندهای کششی قبل از دیوار برشی گسیخته می‌شوند و بار نهایی تحمل شده توسط سیستم، به اندازه‌ی ۳۴٪ نسبت به مدل مبنا، تقلیل یافته و برابر ۷۸٫۵ کیلو نیوتن شده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که کاهش بیش از اندازه‌ی قطر مهاربندهای



دقت مناسب مدل‌های المان محدود را نشان می‌دهد. رفتار چرخه‌ای نیرو- جابه‌جایی برای ۵ قاب فولادی خمشی و با تمرکز بیشتر بر روی روش مقاوم‌سازی SW-TB، بررسی شده و این نتایج به‌دست آمده است:

۱. تغییر مکان جانبی تحمل‌شده توسط سیستم SW-TB، تقریباً ۲ برابر تغییر مکان جانبی سیستم مهاربندی کابلی ضربدری و نبشی ضربدری است. بنابراین، سیستم SW-TB موجب افزایش شکل‌پذیری قاب خمشی فولادی می‌شود.
۲. استفاده از سیستم SW-TB، ضمن حفظ شکل‌پذیری قاب خمشی، مقاومت برشی آن را به اندازه‌ی ۵۰٪ افزایش می‌دهد.
۳. سختی اولیه‌ی قاب خمشی مقاوم‌سازی‌شده با سیستم SW-TB، ۱/۴ برابر سختی اولیه‌ی قاب خمشی بدون مهاربند است و نسبت به مهاربند نبشی و مهاربند کابلی ضربدری، شکل‌پذیری بهتری دارد.
۴. میله‌های کششی موجب افزایش مساحت ناحیه‌ی کششی دیوار برشی می‌شوند و رفتار آن را بهبود می‌بخشند، به گونه‌ای که در صورت حذف میله‌های کششی، مقاومت برشی سیستم SW-TB به اندازه‌ی ۳۴٪ کاهش می‌یابد.
۵. کاهش قطر مهاربند‌های کششی موجب گسیختگی المان‌های مذکور قبل از ورق دیوار می‌شود و منجر به کاهش سختی اولیه و بیشینه‌ی بار تحمل‌شده توسط سیستم SW-TB می‌شود. در حالت کلی، بهتر است قطر مهاربند‌های کششی به گونه‌ای انتخاب شود که تا آخرین لحظه‌ی بارگذاری در حالت خطی باقی بمانند و گسیخته نشوند؛ در غیر این صورت، موجب تضعیف عملکرد سیستم دیوار برشی خواهند شد.
۶. افزایش ضخامت ورق دیوار برشی یا قطر المان‌های کششی، موجب افزایش سختی اولیه و کاهش شکل‌پذیری و جذب انرژی سیستم SW-TB می‌شود.
۷. کاهش ابعاد مقطع ستون‌های فرعی موجب کاهش بارگذاری از صفحه‌ی ورق دیوار و افزایش ابعاد آن‌ها موجب می‌شود که بیشتر نیروهای وارد شده بر ورق، توسط المان‌های مذکور تحمل شود و منجر به هدر رفتن ضخامت اضافی استفاده‌شده در صفحه‌ی دیوار شود.

برشی تسلیم می‌شوند. در واقع، ضخامت دیوار برشی باید به گونه‌ای انتخاب شود تا دیوار برشی قبل از ستون‌های فرعی گسیخته شود. در غیر این صورت، افزایش ضخامت دیوار منجر به هدر رفتن ضخامت اضافی استفاده‌شده در صفحه‌ی دیوار می‌شود.

## ۱۱. نقش ستون‌های فرعی در رفتار سیستم SW-TB

با توجه به اینکه المان‌های مرزی افقی مستقیماً به تیرهای بالا و پایین قاب متصل شده‌اند، تغییر در ابعاد مقطع آن‌ها تأثیر چندانی در رفتار سیستم SW-TB ندارد. وجود المان‌های مرزی عمودی نیز با جلوگیری از کماتش برون‌صفحه‌ی ورق دیوار، موجب بهبود عملکرد رفتار ورق می‌شود. نتایج تحلیل‌های اجزاء محدود نشان می‌دهد که با کاهش ابعاد مقطع المان‌های مرزی عمودی، گسیختگی آن‌ها سریع‌تر از گسیختگی دیوار برشی اتفاق می‌افتد و موجب می‌شود ورق دیوار در خارج از صفحه، کماتش کند. از طرفی دیگر، افزایش ابعاد المان‌های مرزی عمودی موجب می‌شود که بیشتر نیروهای وارد شده بر ورق، توسط المان‌های مذکور تحمل شوند و منجر به هدر رفتن ضخامت اضافی استفاده‌شده در صفحه‌ی دیوار خواهد شد. این تذکر لازم است که با توجه به اینکه نیروهای فشاری عمودی توسط ستون‌های اصلی سازه تحمل می‌شود، المان‌های مرزی عمودی، عملاً نیروی فشاری تحمل نمی‌کنند و می‌توان در طراحی آن‌ها از اعضاء غیرفشارده نیز استفاده کرد.

## ۱۲. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، مدل‌های اجزاء محدود قاب مفصلی مقاوم‌شده با دیوار برشی غیرمتصل به ستون‌های کناری و مهاربند‌های کششی (سیستم SW-TB) و قاب خمشی فولادی مقاوم‌سازی‌شده با سیستم SW-TB به کمک نرم‌افزار آباکوس ایجاد شده است. تحلیل غیرخطی قاب‌ها تحت اثر بارگذاری چرخه‌ای با دامنه‌های افزایش‌یابنده انجام شده است. مقایسه‌ی نتایج تحلیل المان محدود با نتایج تجربی،

## پانویس‌ها

1. steel plate shear wall with tension-bracing
2. Abaqus

## منابع (References)

1. Sugii, K. and M. Yamada. "Steel panel shear walls with and without concrete covering", *In proceedings on CD-Rom, 11th World Conference on Earthquake Eng., Aca-pulco, Mexico, Paper 403* (1996).
2. Driver, R.G., Kulak, G.L. Kennedy, D.J.L. and et al. "Cyclic test of four-story steel plate shear wall", *J. of Structural Engineering*, **124**(2), pp. 112-120 (1998).
3. Torii, S., Teramoto, T., Kihara, H. and et al. "The response control design of high-rise buildings with low yield strength steel wall", *Proc. of Structural Engineering World Wide, Elsevier, CD-ROM, Paper T-190-6* (1998).
4. Lubell, A.S., Prion, H.G.L., Ventura, C.E. and et al. "Unstiffened steel plate shear wall performance under cyclic loading", *J. of Structural Engineering*, **126**(4), pp. 453-460 (2000).
5. Driver, R.G., Gilbert, Y., Grondin, M. and et al. "Recent developments and future directions in steel plate shear wall research", *NASCC Proceedings* (2001).
6. Astaneh-Asl, A. "Seismic behavior and design of composite steel plate shear walls", *USA, Structural Steel Educational Council*, 45 p. (2002).

7. Astaneh-Asl, A. and Zhao, Q. "Cyclic behavior of steel shear wall systems", *In Annual Stability Conference, Seattle, Structural Stability Research Council*, pp. 21-36 (2002).
8. Behbahani-Fard, M.R. "Cyclic behavior of unstiffened steel plate shear walls", Ph.D. Dissertation, University of Alberta, 227 p. (2003).
9. Hitaka, T. and Chiaki M. "Experimental study on steel shear wall with slits", *J. of Structural Engineering*, **129**(5), pp. 586-595 (2003).
10. Alinia, M.M. and Dastfan, M. "Behaviour of thin steel plate shear walls regarding frame members", *J. of Constructional Steel Research*, **62**(7), pp. 730-738 (2006).
11. Vian, D., Bruneau, M. and Purba, R. "Special perforated steel plate shear walls with reduced beam section anchor beams, II: Analysis and design recommendations", *J. of Structural Engineering*, **135**(3), pp. 221-228 (2009).
12. Moharrami, H., Habibnejad, A., Mazrouei, A. and et al. "Semi-supported thin steel shear walls", Research Project No. 1-4679, The Building and Housing Research Centre (2005).
13. Jahanpour, A., Moharrami, H. and Aghakoochak, A. "Evaluation of ultimate capacity of semi-supported steel shear walls", *J. of Constructional Steel Research*, **67**(6), pp. 1022-1030 (2011).
14. Jahanpour, A., Jonsson, J. and Moharrami, H. "Seismic behavior of semi-supported steel shear walls", *J. of Constructional Steel Research*, **74**, pp. 118-133 (2012).
15. Jahanpour, A. and Moharrami, H. "Evaluation of behavior of the secondary columns in semi-supported steel shear walls", *Thin-Walled Structures*, **93**, pp. 94-101 (2015).
16. Kurata, M., Leon, R.T., DesRoches, R. and et al. "Steel plate shear wall with tension-bracing for seismic rehabilitation of steel frames", *J. of Constructional Steel Research*, **71**, pp. 92-103 (2012).
17. Canadian Standard Association, S16-01-CAN/CSA. "limit states design of steel structures Sixth edition", Toronto, Canada (2006).
18. American Institute of Steel Construction, "Seismic provisions for structural steel buildings", Chicago, Illinois (2007).
19. Qu, B., Bruneau, M., Lin, CH. and et al. "Testing of full-scale two-story steel plate shear wall with reduced beam section connections and composite floors", *J. of Structural Engineering*, **134**(3) pp. 364-373 (2008).
20. Rezai, M. "Seismic behavior of steel plate shear walls by shake table testing", PhD Dissertation, Dept of Civil Eng., University of British Columbia, Vancouver, Canada (1999).
21. Hou, X. and Tagawa, H. "Displacement- restraint bracing for Seismic retrofit of Steel moment using wire-rope bracing", *J. of Constructional Steel Research*, **65**(5), pp. 1096-1104 (2009).
22. Hosseinzadeh, Y. and Farajpour, M. "Retrofitting of steel moment frames using cable bracing", *Sharif Journal Civil Engineering*, **2-29**(1), pp. 95-101 (2012).