



## بررسی اثرات نسبت لاغری بر رفتار خرابی دیوار برشی فولادی تحت بارگذاری چرخه‌ای

حسین سیدی، کارشناسی ارشد سازه، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز\*

کریم عابدی، دانشیار دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز\*\*

\* تلفن: ۰۴۱۲-۳۴۴۴۳۴۳، پست الکترونیکی: [h\\_seyyedi@sut.ac.ir](mailto:h_seyyedi@sut.ac.ir)

\*\* تلفن: ۰۴۱۲-۳۴۴۴۳۴۳، پست الکترونیکی: [k\\_abedi@sut.ac.ir](mailto:k_abedi@sut.ac.ir)

### چکیده:

دیوار برشی فولادی یکی از سامانه‌های باربر جانبی می‌باشد که در سه دهه اخیر مورد توجه قرار گرفته و در چندین ساختمان مهم در جهان بکار رفته است. در مقاله حاضر، رفتار خرابی قاب یک دهانه یک طبقه که از سامانه دیوار برشی فولادی در آن بهره گرفته شده، ارائه می‌شود. بدین منظور، یک مدل تحلیلی عناصر محدود ساخته شده و صحت آن با نمونه‌های آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است. سپس مطالعه پارامتریک برای بررسی اثرات نسبت لاغری بعنوان یکی از پارامترهای اساسی پائل برشی بر مشخصه‌های رفتار لرزه‌ای نظیر مقاومت، سختی، شکل پذیری و رفتار هیستریزس انجام پذیرفته است. نتایج مطالعه حاضر نشان می‌دهد که بهره‌گیری از ورق نازک فولادی بعنوان سامانه باربر جانبی در قاب به شرطی که نسبت لاغری بهینه در آن رعایت شود، به گونه‌ای ساده و مؤثر شکل پذیری و جذب انرژی را افزایش و آسیب‌دیدگی سازه‌ای را کاهش می‌دهد.

**کلیدواژه‌ها:** تحلیل غیرخطی، عناصر محدود، نسبت لاغری، جذب انرژی، شکل پذیری، مدل هیستریزس

### ۱- مقدمه

دیوار برشی فولادی سامانه نسبتاً جدیدی است که از دهه ۱۹۷۰ میلادی بدلیل مزایای فراوانی که نسبت به سایر سامانه‌های باربر جانبی دارد، مورد توجه قرار گرفته است. از جمله این مزایا می‌توان به شکل پذیری زیاد، جذب انرژی فوق‌العاده، سختی و مقاومت بالا و در عین حال اقتصادی بودن و اجرای بسیار راحت آن اشاره کرد. این سامانه در ساختمانهای مهمی در آمریکای شمالی و ژاپن بکار رفته و در زلزله‌های قوی رفتار لرزه‌ای مطلوبی را به نمایش گذاشته است. بکارگیری این سامانه همچنین صرفه‌جویی در مصرف فولاد را نیز در پی دارد. بطور کلی سامانه دیوار برشی فولادی، متشکل از تعدادی صفحه فولادی مجزا می‌باشد که هر صفحه در داخل دو تیر و ستون محاط شده و به آنها متصل گردیده است. این نوع استقرار، دیوار برشی فولادی را به تیر ورقی طره‌ای که ستون‌ها در حکم بال آن، تیرها در حکم سخت‌کننده‌های قائم و ورق نیز در حکم جان می‌باشد، شبیه می‌سازد. [۱]

بمنظور بررسی رفتار خرابی دیوار برشی فولادی تحت بارگذاری رفت و برگشتی، یک نمونه یک دهانه یک طبقه در نظر گرفته شده است. با استفاده از این نمونه تحلیلی به بررسی اثر لاغری (نسبت عرض دهانه به ضخامت ورق) بر روی مشخصه‌های لرزه‌ای دیوار نظیر سختی، مقاومت، شکل پذیری، جذب انرژی و ... پرداخته خواهد شد.

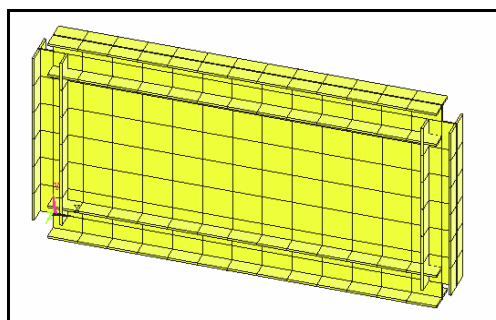
## ۲- مدل‌سازی عناصر محدود و بررسی صحت آن

مطالعه رفتار سازه‌ها با روشهای مختلفی از قبیل روشهای تجربی و نظری امکان پذیر است. یکی از روشهای مناسب که به دلیل سرعت و دقت بالا و هزینه کم، نسبت به سایر روشها رواج بیشتری دارد، روش عناصر محدود می‌باشد. لکن صحت مدل‌سازی عناصر محدود مورد استفاده باید در مقایسه با مدل‌های آزمایشگاهی و نیز مدل‌های نظری تأیید شود تا بتوان از آن در جهت بررسی سازه‌های موردنظر بهره گرفت. [۱]

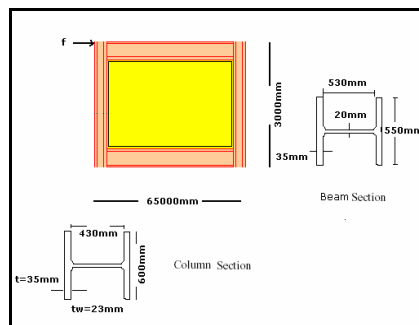
در مدل‌سازی عناصر محدود رفتار خرابی دیوار برشی فولادی از عنصر تیر تیموشنکو برای مدل کردن تیرها و ستونها استفاده شده است که اثرات برش را در نظر می‌گیرد و در تحلیلهای غیرخطی کاربرد مؤثری دارد. برای مدل کردن ورق فولادی از یک عنصر پوسته چهارگره‌ای با شش درجه آزادی در هر گره (سه درجه آزادی انتقالی و سه درجه آزادی دورانی) استفاده می‌شود. عنصر از توانایی مناسبی برای مدل کردن اعوجاج و کمانش موضعی برخوردار است و نیز دارای قابلیت‌های اعمال تغییر شکلهای پلاستیک، سخت‌شدگی تنش و تغییرشکلها و کرنشهای بزرگ می‌باشد.

برای توزیع یکنواخت تنش در محل اتصال ورق به پی از عنصر تیری استفاده شده است. البته با بررسیهای صورت گرفته مشخص گردید که افزودن تیر صلب در محل اتصال ورق به پی در نتایج تأثیری نمی‌گذارد و صرفاً در نحوه توزیع تنش نقش پیدا می‌کند.

برای ارزیابی صحت مدل‌سازی بکاررفته از مدل نظری صبوری قمی [۱] استفاده شده است. مشخصات دیوار (عرض و ارتفاع دهانه، ضخامت ورق) و بار وارده، به همراه مشخصات مقطع ستونها و تیر در شکل ۱ ارائه گردیده است. در سامانه مورد نظر اتصال تیر به ستون بصورت گیردار بوده و ورق نیز بصورت گیردار به قاب متصل شده است. شکل ۲ مدل عناصر محدود را نشان می‌دهد.

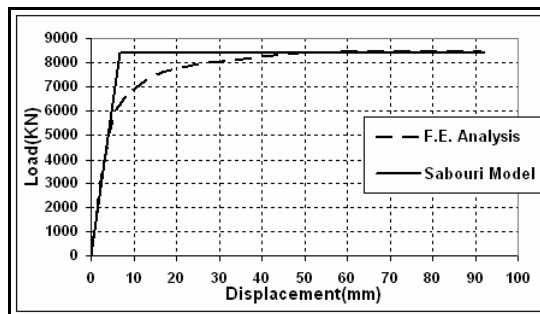


شکل ۲: مدل عناصر محدود دیوار برشی فولادی



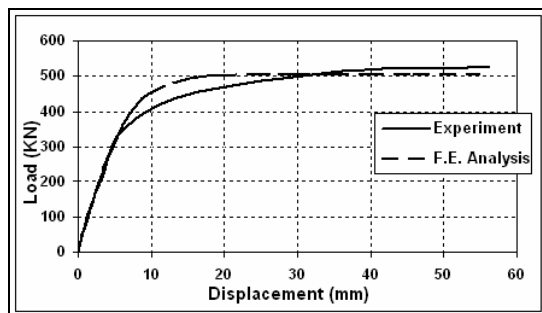
شکل ۱: نمونه دیوار برشی فولادی

شکل ۳ نمودارهای بار-تغییر مکان را در محل اعمال بار نشان می‌دهد. این نمودارها مربوط به نتایج بدست آمده از تحلیل عناصر محدود و روش نظری صبوری قمی است.

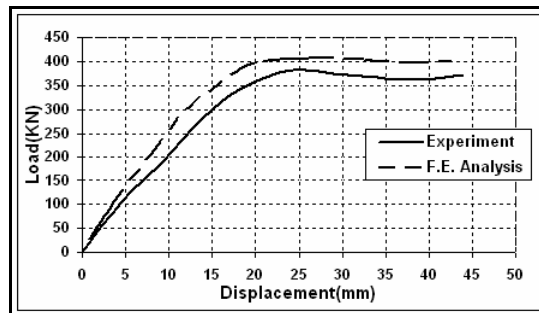


شکل ۳: مقایسه نتایج تحلیل عناصر محدود با نمونه تحلیل نظری صبوری قمی

همچنین مدلسازی عناصر محدود مورد استفاده با نتایج آزمایشگاهی دیگری نظیر آزمایش یک نمونه سه طبقه توسط Elgaaly و V. Caccese [۲] و یک نمونه یک طبقه دهانه توسط Berman و Bruneau [۳] نیز بررسی و صحت آن تصدیق شد که نتایج آن در شکل‌های ۴ و ۵ ارائه می‌شود.



شکل ۵: مقایسه نتایج تحلیلی با نتایج مدل چهار طبقه [۳]



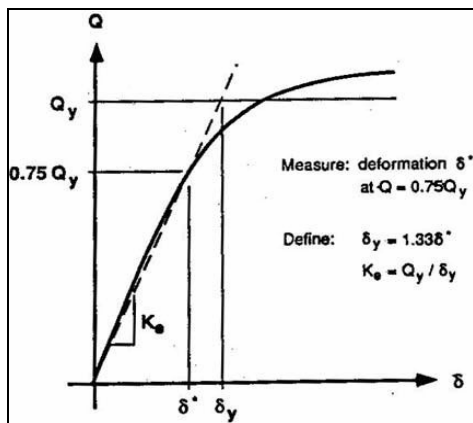
شکل ۴: مقایسه نتایج تحلیلی با نتایج مدل سه طبقه [۲]

نمودارهای مذکور در ۳ مدل مختلف نشان می‌دهد که با توجه به خطاهای آزمایشگاهی و میزان دقت وسایل اندازه‌گیری، مدل سازی عناصر محدود از دقت مناسبی برخوردار است. بنابراین از مدل ساخته شده می‌توان در مطالعات پارامتریک رفتار خرابی دیوارهای برشی فولادی بهره جست.

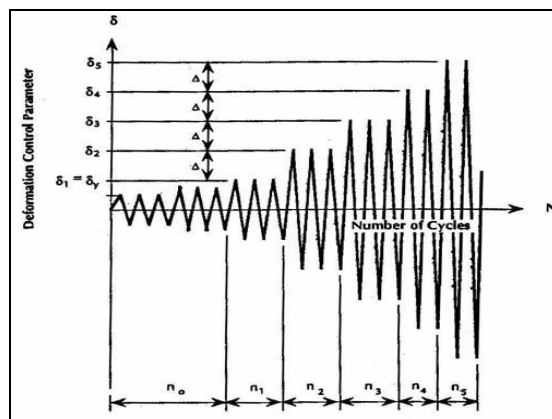
### ۳- نحوه اعمال بارگذاری بر روی نمونه

نحوه اعمال بارگذاری بر روی مدل مورد نظر که به صورت چرخه‌ای (Cyclic) می‌باشد، از آیین‌نامه ATC 24 پیروی می‌کند. تاریخچه زمانی بارگذاری بصورت شکل ۶ می‌باشد. این نحوه بارگذاری شامل اعمال تغییر مکان بر شاه‌تیر بالایی متصل شده به ستونها و ورق می‌باشد که مقدار آن با توجه به قواعد ATC 24 بدست می‌آید. [۴]

برای اعمال تغییر مکان تعیین مقدار  $\delta_y$  ضروری است. لذا نخست با اعمال یک بار  $Q$  به شاه‌تیر بالایی نمودار بار-تغییر مکان را همانطور که در شکل ۷ مشخص است، بدست آورده و مقدار  $Q_y$  با توجه به روابط مقاومت مصالح محاسبه می‌شود. تغییر شکل متناظر با تراز بار  $Q=0.75Q_y$  را که مقدار آن  $\delta^*$  است مشخص کرده و از روی آن مقدار  $\delta_y = 1.33\delta^*$  بدست می‌آید. [۴]



شکل ۷: تعیین  $Q_y$ ،  $\delta_y$  و سختی ارتجاعی  $K_e$



شکل ۸: تاریخچه تغییر مکان جانبی تیر بالایی

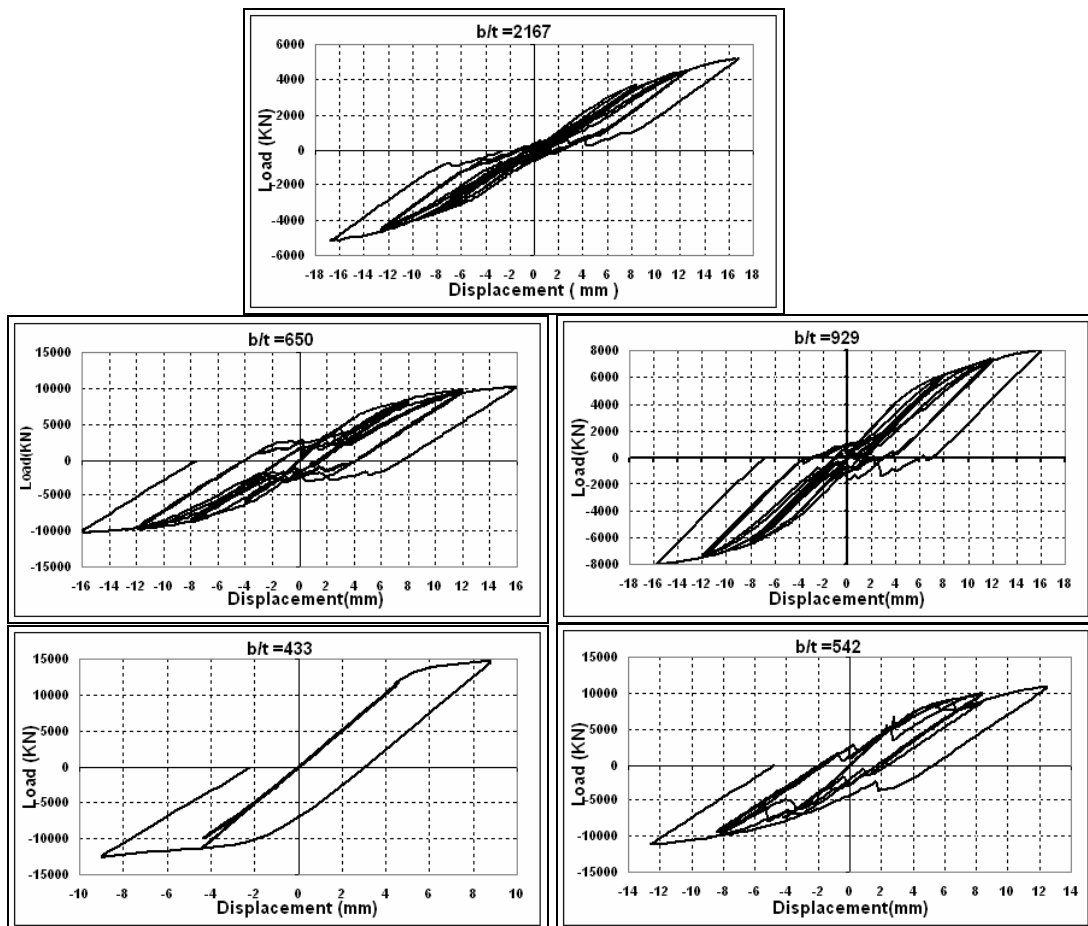
#### ۴- بررسی نتایج عددی

برای بررسی اثرات نسبت لاغری بر رفتار خرابی دیوار برشی فولادی تحت بارگذاری چرخه ای مدل مورد استفاده توسط صبوری قمی با توجه به اندازه های معمول آن در ساختمانها، و نیز بدلیل طراحی بر اساس رفتار شکست نرم، بعنوان نمونه تحلیلی انتخاب گردید. برای بررسی تأثیر نسبت لاغری که بصورت نسبت عرض دهانه به ضخامت ورق تعریف می شود، تحلیلهایی بر روی ۵ مدل با نسبت های مختلف لاغری صورت گرفته است. مشخصات هندسی نمونه های تحلیلی مزبور در جدول ۱ آورده شده است و شکل ۸ منحنی های هیستریزس بدست آمده از تحلیل غیرخطی مدل عناصر محدود را برای پنج مدل مختلف نشان می دهد.

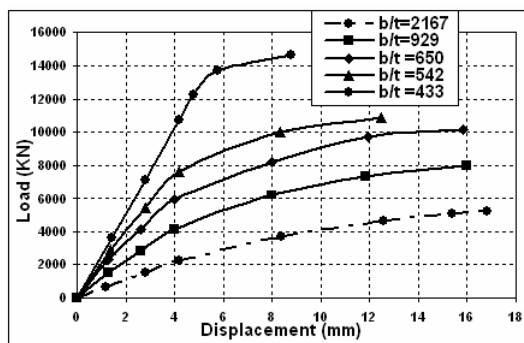
جدول ۱: مشخصات نمونه های تحلیلی

شماره نمونه	ارتفاع طبقه mm	عرض دهانه (b) mm	ضخامت ورق (t) mm	نسبت لاغری (b/t)
۱	۳۰۰۰	۶۵۰۰	۳	۲۱۶۷
۲	۳۰۰۰	۶۵۰۰	۷	۹۲۹
۳	۳۰۰۰	۶۵۰۰	۱۰	۶۵۰
۴	۳۰۰۰	۶۵۰۰	۱۲	۵۴۲
۵	۳۰۰۰	۶۵۰۰	۱۵	۴۳۳

شکل ۹ نمودار پوش منحنی های هیستریزس بدست آمده از تحلیل عناصر محدود را برای نمونه های تحلیلی مذکور نشان می دهد. برای رسم این نمودارها مشخصات بار-تغییر مکان نقاط انتهایی هر سیکل و نیز نقاطی از هر سیکل که حداکثر نیرو را دارا می باشند، انتخاب شده اند. منحنی های عبور داده شده از این نقاط بعنوان منحنی های پوش ارائه شده است.



شکل ۸: نمودارهای هیستریزیس بدست آمده از تحلیل عناصر محدود برای نمونه‌های تحلیلی



شکل ۹: نمودار پوش منحنی‌های هیستریزیس بدست آمده از تحلیل عناصر محدود برای نمونه‌های تحلیلی

اکنون با توجه به نمودارهای ارائه شده می‌توان به بررسی اثر نسبت لاغری بر مشخصه‌های رفتار لرزه‌ای دیوار برشی فولادی نظیر نحوه خرابی دیوار، سختی، مقاومت، شکل‌پذیری و اتلاف انرژی پرداخت.

#### ۴-۱- اثر نسبت لاغری بر تشکیل میدان کششی و نحوه خرابی دیوار

با توجه به تئوری کماتش ارتجاعی ورقها و تحقیقات بعمل آمده توسط Lyse, Basler و Godfrey کماتش ورقها متأثر از نسبت  $b/t$  می‌باشد [۵]. در مجموع دیوار برشی فولادی بر اساس لاغری به سه دسته دیوار برشی فشرده (با نسبت لاغری بسیار کم)، غیرفشرده و بسیار لاغر تقسیم می‌شود [۶]. در دیوار برشی فشرده، خرابی سیستم دیوار برشی فولادی با تشکیل مفصل پلاستیک در ستونها شروع

می‌شود و در حالی که تنش در قسمت عمده‌ای از ورق هنوز دارای مقدار اندکی می‌باشد، در ستونها مفصل پلاستیک ایجاد شده و نمونه خراب می‌شود (شکست ترد). در دیوار برشی غیرفشرده (با ضریب لاغری نسبتاً متوسط)، جاری شدن ستون و ورق همزمان آغاز شده و از نظر رفتار خرابی تقریباً شبیه دیوار فشرده عمل می‌کند. اما نتایج نشان می‌دهند که رفتار نمونه‌های لاغر تفاوت اساسی با سایر حالات دارد. در این نوع دیوار، به ازای مقدار اندک بار جانبی، ورق کمانش کرده و عمده ظرفیت برشی سیستم با عمل میدان کششی ورق فولادی تأمین می‌گردد. در این قسمت، خرابی با جاری شدن ورق شروع می‌شود (شکست نرم) و با افزایش بار با جاری شدن قسمت قابل ملاحظه‌ای از ورق و بوجود آمدن تغییر شکلهای پلاستیک قابل توجه در آن، حداکثر استفاده از ظرفیت آن بعمل می‌آید.

#### ۴-۲- اثر نسبت لاغری بر سختی دیوار برشی

برای تعیین سختی دیوارها از نمودارهای پوش نیرو-تغییر مکان بدست آمده برای هر یک از دیوارها که در قسمت پیشین توضیح داده شده است، استفاده می‌گردد. شیب اولیه این نمودارها بیانگر سختی الاستیک هر یک از دیوارها می‌باشد. سختی دیوارها و نسبتهای آن در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲: سختی دیوارهای برشی تحلیل شده

نمونه اول	نمونه دوم	نمونه سوم	نمونه چهارم	نمونه پنجم	
۲۱۶۷	۹۲۹	۶۵۰	۵۴۲	۴۳۳	نسبت لاغری
۵۴۷	۱۱۷۷	۱۷۵۶	۲۱۰۳	۲۵۵۳	سختی دیوار (KN/mm)
۱	۲/۱۵	۳/۲۱	۳/۸۵	۴/۶۷	نسبت سختی دیوارها

سختی عناصر سازه‌ای مانند دیوار برشی در اصل عامل کنترل کننده جابجایی است. هر قدر سختی بیشتر باشد جابجایی کمتر خواهد بود. لیکن برای اینکه عناصر سازنده یا سازه‌ها بتوانند انرژی قابل ملاحظه‌ای را جذب و استهلاک نمایند لازم است سختی آنها در محدوده معینی تغییر یابد تا با انعطاف پذیری خود بتوانند شکل پذیر شوند.

همانگونه که مشاهده می‌شود کاهش نسبت لاغری، سختی دیوار برشی را افزایش می‌دهد و این افزایش تقریباً رابطه معکوس دارد.

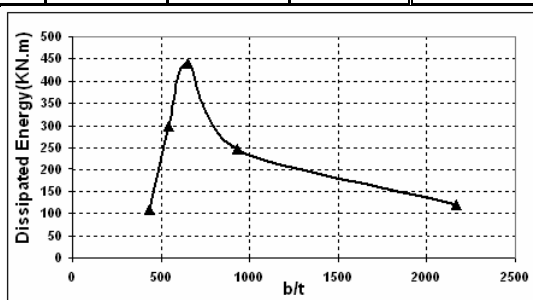
#### ۴-۳- اثر نسبت لاغری بر جذب و اتلاف انرژی

رفتار هیستریزس سازه‌ها بیانگر میزان اتلاف انرژی در اثر وقوع تغییرشکلهای پلاستیک می‌باشد، بگونه‌ای که اگر چرخه‌های هیستریزس به صورت له شده باشند، نشان دهنده استعداد بد مقاومت در برابر زلزله بوده و سازه توان اندکی از خود برای اتلاف بروز می‌دهد و اگر حلقه‌های هیستریزس به صورت پایدار و دارای مساحت بیشتری باشند، نشانگر استعداد خوب مقاومت در برابر زلزله بوده است و سازه ظرفیت زیادی جهت اتلاف انرژی دارد. کاهش توان اتلاف انرژی در بارگذاریهای تناوبی نیز معمولاً به

دو صورت تنزل مقاومت و تنزل سختی صورت می‌گیرد. در این تحقیق نیز برای بررسی میزان جذب و استهلاک انرژی توسط دیوارها و همچنین نحوه اثر نسبت لاغری بر میزان استهلاک انرژی، منحنی‌های هیستریزس نیرو-تغییر مکان هر یک از مدل‌ها رسم گردید و مساحت محصور شده توسط نمودارها که بیانگر میزان جذب و اتلاف انرژی می‌باشد، محاسبه شد که در جدول ۳ آورده شده است. در شکل ۱۰ نیز میزان تجمعی استهلاک انرژی بر اساس نسبت لاغری مدل‌ها قابل مشاهده است. در جد همانطور که ملاحظه می‌شود جذب انرژی و استهلاک آن در سیکل‌های متوالی افزایش می‌یابد و این نشان‌دهنده آن است که منحنی‌های هیستریزس دیوارهای برشی فولادی با ورق نازک، چرخه‌های پایدار و با استعداد خوب رفتار لرزه‌ای می‌باشند. ضمناً در این چرخه‌ها تنزل مقاومت و افت سختی وجود ندارد که بیانگر شکل پذیری زیاد و ظرفیت بالای انرژی در این سامانه می‌باشد. شکل ۱۰ نشان می‌دهد که با کاهش نسبت لاغری، جذب انرژی پلاستیک سامانه بطور مطلوبی افزایش پیدا می‌کند و این روند تا هنگامی که دچار گسیختگی ترد نشود، ادامه می‌یابد. اما پس از این با کاهش نسبت لاغری نمونه تردتر شده، شکل پذیری و جذب انرژی سامانه بشدت کاهش می‌یابد.

جدول ۳: انرژی جذب شده در حلقه‌های کامل هیستریزس (KN.m)

نمونه اول	نمونه دوم	نمونه سوم	نمونه چهارم	نمونه پنجم	
۲۱۶۷	۹۲۹	۶۵۰	۵۴۲	۴۳۳	نسبت لاغری (b/t)
۰	۰	۰	۰	۰	۹ سیکل اول D=Dy
۱۸	۳۵	۷۴	۱۴۳	۱۱۰	۳ سیکل چهارم D=2Dy
۵۹	۱۱۷	۲۱۹	۱۳۲	۰	۳ سیکل پنجم D=3Dy
۴۳	۹۵	۱۴۶	۰	۰	۳ سیکل ششم D=4Dy
۱۲۰	۲۴۷	۴۳۹	۲۷۵	۱۱۰	مجموع انرژی جذب شده
۱	۲/۰۶	۳/۶۶	۲/۲۹	۰/۹۲	نسبت مجموع انرژی جذب شده



شکل ۱۰: انرژی جذب شده بر اساس نسبت لاغری

## ۵- نتیجه گیری

برای بررسی رفتار خرابی دیوار برشی فولادی با استفاده از ورق نازک، اصولاً باید آزمایشهای بارگذاری چرخه‌ای بر روی آن انجام می‌گرفت ولی با توجه به پرهزینه بودن و زمان‌بر بودن انجام چنین آزمایشهایی، و با توجه به کثرت پارامترهای مورد بررسی، از روش عناصر محدود پس از بررسی صحت مدلسازی استفاده گردید. اگر چه افق و حوزه نتایجی که در زیر ارائه می‌شوند، محدود به حالات در



نظر گرفته شده برای تحلیلها می باشد اما احتمال می رود که این نتایج دارای حوزه تأثیر و کاربرد جامع تری باشند. نتایج حاصل از این تحقیق عبارتند از:

- دیوار برشی فولادی بعنوان سامانه باربر جانبی بصورت مؤثری همانگونه که تحلیلهای انجام شده در این تحقیق نیز نشان داد، می تواند باربری جانبی سازه را افزایش دهد. این امر با جذب انرژی از راه تغییر مکان پلاستیک بسیار زیاد آن صورت می گیرد؛ بدین ترتیب که با تسلیم شدن یک نقطه از ورق فولادی نقاط دیگر عمل باربری را بعهد می گیرند خرابی بتدریج رخ می دهد. این سامانه همچنین مقاومت و سختی سازه را نیز افزایش می دهد.

- افزایش نسبت لاغری بر تشکیل میدان کششی و نحوه خرابی دیوار تأثیر مطلوبی می گذارد؛ بگونه ای که در دیوارهای لاغر خرابی با تسلیم شدگی ورق آغاز و با گسترش آن تغییرشکلهای بسیار زیاد پلاستیک را موجب می شود و حداکثر استفاده از میدان کششی بعمل می آید، بطوریکه به تیرها و ستونها که اعضای اصلی سازه ای محسوب می شوند، کمتر آسیب وارد می شود.

- افزایش نسبت لاغری باعث می شود از مقاومت و سختی سازه کاسته شود.

- در نمونه های با نسبت لاغری بسیار زیاد، انرژی کمتری اتلاف می شود و در نمونه های با نسبت لاغری بسیار کم نیز علیرغم افزایش سختی و مقاومت، سامانه بصورت ترد خراب می شود و نمی تواند انرژی زیادی را جذب و مستهلک کند. از اینرو اولاً با توجه به حالت خرابی (شکست ترد) استفاده از دیوار برشی فشرده اساساً توصیه نمی گردد؛ ثانیاً انتخاب ضریب لاغری بهینه (در حد فاصل دیوارهای برشی فشرده و دیوارهای با نسبت لاغری بسیار زیاد) جهت استفاده مطلوب و بهینه از سامانه دیوار برشی فولادی امری ضروری می باشد.

## ۶- مراجع:

- ۱- سعید صبوری، "سیستم های مقاوم در برابر بارهای جانبی مقدمه ای بر دیوار های برشی فولادی"
- 2- Elgaaly, V. Caccese, C. Du " POSTBUCKLING BEHAVIOR OF STEEL –PLATR SHEAR WALLS UNDER CYCLIC LOADS" , Journal of structural Eng. ,Vol. 119, No. 2
- 3- Jeffrey W. Berman, Michel Bruneau (2005). " Experimental Investigation of Light-Gauge Steel Plate Shear Wall", Journal of structural engineering, vol.131, no 2, 259-267.
- 4- ATC-24: Guidelines for seismic testing of components for steel structures California : Applied Technology council, 1992.
- ۵- چارلز جی - سالمن، جان ای - سالمن ، ترجمه فریدون ایرانی ، " طراحی و محاسبه سازه های فولادی " انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد، ۱۳۷۵
- 6- Abolhassan Staneh-Asl, " Seismic Behavior and Design of steel shear walls " STEEL TIPS rEPRT, JAN,2001
- 7- Robert G. Driver, Geoffrey L. Kulak, Alaa E. Elwi, D. J. Laurie Kennedy, " FE AND SIMPLIFIED MODELS OF STEEL PLATE SHEAR WALL " , Journal of structural Eng, vol.124,no. 2, Feb.1998
- ۸- سیدی ، حسین ، بررسی رفتار خرابی دیوار برشی فولادی تحت بارگذاری چرخه ای ، ۱۳۸۴ ، پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران گرایش سازه ، دانشکده مهندسی عمران ، دانشگاه صنعتی سهند