

## بررسی عوامل موثر بر شکل پذیری دیوار برشی فولادی با ورق موج دار تحت بارگذاری چرخه‌ای

زمان مجیدی‌نیا

کارشناسی ارشد، گروه عمران، واحد آبادان، دانشگاه آزاد اسلامی، آبادان، ایران

کوروش مهدی‌زاده\*

گروه عمران، واحد گرمسار، دانشگاه آزاد اسلامی، گرمسار، ایران

عباسعلی صادقی

دانشجوی دکتری، گروه عمران، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران

سیده وحیده هاشمی

دانشجوی دکتری، گروه عمران، دانشکده مهندسی شهید نوبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان،

ایران

Ko\_ma751@mail.um.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۸/۰۸/۱۹ تاریخ پذیرش نهایی: ۹۹/۰۶/۰۲

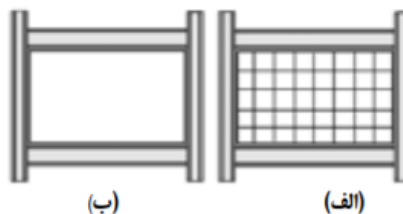
### چکیده

امروزه استفاده از دیوار برشی فولادی بدون سخت کننده توصیه می‌شود. یکی از نوآوری‌های دیوار برشی فولادی، استفاده از ورق‌های موج دار به جای ورق‌های ساده است. بنابراین برای به تعویق انداختن وقوع کمانش از ورق‌های موج دار استفاده می‌شود. در این تحقیق، با توجه به اهمیت موضوع، برای اطمینان از صحت مدل‌سازی، نمونه‌ی آزمایشگاهی چوبی و پارک برای راستی آزمایی انتخاب و پس از اطمینان از درستی نتایج، تعداد ۸ نمونه‌ی دیوار برشی فولادی با ورق موج دار توسط نرم‌افزار آباکوس (ABAQUS) مدل‌سازی گردید. در این نمونه‌ها به بررسی پارامترهایی از قبیل ضخامت ورق فولادی، نسبت طول به عرض ورق ( $a/b$ ) و تغییر مشخصات هندسی المان‌های محیطی پرداخته شده است. نتایج عددی نشان دادند که پایداری چرخه‌های منحنی هیستریزس در نمونه با ضخامت ورق ۸ میلی‌متر ثابت نبوده، به طوری که در گام‌های آخر بارگذاری، افت مقاومت و کمانش موضعی در چرخه‌های بارگذاری مشاهده شده است. از نظر عددی می‌توان گفت که نمونه با ضخامت ورق ۸ میلی‌متر نسبت به نمونه‌هایی با ضخامت ورق‌های ۴ و ۶ میلی‌متر دارای بیشترین ظرفیت باربری می‌باشد. تأثیر المان‌های مرزی در عملکرد نمونه‌ها ناچیز بوده است. در نهایت مشخص شد که با افزایش طول ورق نسبت به ارتفاع آن، میزان شکل پذیری افزایش قابل توجهی یافته است.

**کلید واژگان:** ظرفیت باربری، شکل‌پذیری، دیوار برشی فولادی، ورق موج‌دار، بارگذاری چرخه‌ای.

## ۱- مقدمه

دیوار برشی فولادی (Steel Plate Shear Wall) SPSW، به عنوان یک سیستم جایگزین برای افزایش مقاومت در برابر نیروهای جانبی در ساختمان‌های فولادی توانسته است، جایگاه مناسبی را به دست آورد. در طی سه دهه‌ی اخیر مطالعات و تحقیقات گسترده‌ای در خصوص دیوارهای برشی فولادی صورت گرفته است که منجر به استفاده روز افزون این سیستم ابتکاری هم در سازه‌های نوساز و هم برای مقاوم‌سازی سازه‌های موجود شده است. دیوارهای برشی فولادی معمولاً در دو نوع سخت شده و سخت نشده ساخته می‌شوند. به‌طور کلی انواع سخت شده از نظر عملکرد لرزه‌ای و نیز مسائل بهره‌برداری مناسب‌تر می‌باشند، ولی به خاطر وجود سخت‌کننده‌های متعدد و جزئیات اجرایی فراوان، باید وقت و هزینه زیادی برای ساخت آن‌ها صرف گردد. بنابراین ایده دیوار برشی فولادی موج‌دار (Steel Corrugated Shear Wall) به عنوان جایگزینی برای دیوارهای برشی سخت شده مطرح گردیده است و انتظار می‌رود که این ورق‌ها به دلیل دارا بودن سختی ذاتی برون صفحه‌ای، از مقاومت کم‌انرژی بالایی برخوردار بوده و در نهایت عملکردی مشابه دیوارهای برشی سخت شده داشته باشند [۱].



شکل ۱- دیوار برشی فولادی (الف) سخت شده (ب) سخت نشده [۱]

در این تحقیق، با بررسی مشخصات هندسی ورق دیوار برشی بدون سخت‌کننده و تأثیر آن در شکل‌پذیری از نرم‌افزار آباکوس (ABAQUS) [۲] استفاده می‌شود. در سال‌های اخیر با روی کار آمدن کامپیوترهایی با پردازش سریع، آنالیز اجزای محدود یکی از روش‌های نیرومند در بررسی رفتار دیوارهای برشی و همچنین سایر پدیده‌ها گردیده است. در این تحقیق، به منظور صحت‌سنجی، ابتدا یک نمونه‌ی آزمایشگاهی از مقاله‌ی معتبر توسط نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی و نتایج حاصله با یکدیگر مقایسه می‌شود. پس از تأیید مدل‌سازی و اطمینان از درستی نتایج، توسعه مدل‌های مختلف صورت می‌گیرد و تأثیر پارامترهای متنوع بر روی رفتار دیوارهای برشی فولادی موج‌دار بررسی و تحلیل گردیده و سپس حالت بهینه انتخاب و ارائه می‌شود. در نهایت در این تحقیق در قالب چندین نمونه، پارامترهایی از قبیل ضخامت ورق فولادی، نسبت عرض به ارتفاع ورق، مشخصات هندسی المان‌های محیطی به‌عنوان متغیرهای اصلی مورد بررسی قرار داده می‌شود و به استخراج نمودارهای چرخه‌ای نیرو-جابجایی، جذب انرژی و نحوه گسترش تنش در سطح ورق فولادی و مکانیسم تحمل بار از برش درون صفحه‌ای و تبدیل آن به میدان کشش قطری و بهره‌گیری از مقاومت پس‌کمانشی و نقش آن در شکل‌پذیری، که به‌عنوان چالش اصلی این تحقیق می‌تواند مدنظر قرار بگیرد، پرداخته شده است. با توجه به‌مرور ادبیات فنی تحقیق، مشاهده شد که در سال‌های اخیر، دیوار برشی فولادی، موضوعی جدید و مورد توجه نزد پژوهشگران بوده است

و پژوهش‌های مختلفی بر روی دیوارهای برشی فولادی تحت بارهای مختلف به‌صورت نرم‌افزاری و آزمایشگاهی انجام شده است. اما در این تحقیقات توجه به تأثیر مشخصات هندسی ورق موج‌دار در شکل‌پذیری، آن هم در زمان اعمال بارهای چرخه‌ای نشده است. لذا مشخصات هندسی ورق موج‌دار و تأثیر آن در المان‌های محیطی می‌تواند از جنبه‌های نوآورانه‌ی تحقیق حاضر باشد.

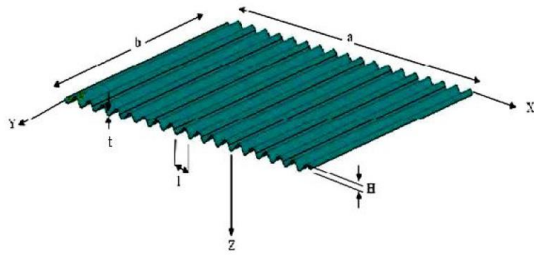
## ۲- دیوار برشی فولادی با ورق‌های موج‌دار

دیوارهای برشی فولادی را می‌توان بر حسب فلسفه طراحی‌شان به دو دسته تقسیم کرد: دسته‌ی اول، دیوارهای برشی فولادی سخت شده که در آن‌ها از کمانش صفحات فولادی پرکننده تحت بارهای خدمت قبل از تسلیم برشی جلوگیری شده است و دسته‌ی دوم، دیوارهای برشی صفحه فولادی سخت نشده، که در آن‌ها از مقاومت پس‌کمانشی پانل‌ها استفاده می‌شود. از آنجایی که مقاومت حد کمانش در ورق‌ها حتی اگر پانل‌ها تقویت شده باشند بسیار کمتر از مقاومت پس‌کمانشی همان ورق‌ها به‌صورت تقویت نشده می‌باشد، توجه به استفاده از ظرفیت پس‌کمانشی صفحات فولادی زیاده‌تر شده است. علاوه بر آن، امکان ساخت سازه‌هایی با قابلیت شکست نرم و امکان بازسازی سریع و کم‌هزینه سازه‌های آسیب‌دیده در این روش بر مزایای سیستم دیوار برشی فولادی با استفاده از ورق نازک (بدون سخت‌کننده) می‌افزاید. بنابراین دیوار برشی فولادی موج‌دار را از نظر عملکرد سازه‌ای می‌توان جزء دیوارهای برشی سخت شده محسوب نمود. دیوارهای برشی فولادی موج‌دار می‌توانند مزایای هر دو نوع دیوار برشی سخت شده و سخت نشده را دارا باشند. از آنجایی که دیوار برشی فولادی موج‌دار دارای ظرفیت باربری، اتلاف انرژی و سختی مناسبی می‌باشد و از سوی دیگر دارای هزینه اجرایی و وزن کمتری در شرایط یکسان طراحی خواهد بود بنابراین مطالعه‌ی پارامتریک بر روی این دیوارها موضوعیت پیدا می‌کند [۱]. قوانین محاسبه‌ی مقاومت طراحی اعضای فولادی با جان‌های موج‌دار در پیوست D بخش سیزدهم آیین‌نامه‌ی اروپا Eurocode [۳] موسوم به المان‌های سازه صفحه‌ای وجود دارد. این ضوابط منحصراً مربوط به تیرهای با جان موج‌دار می‌باشد. قوانین این قسمت از آیین‌نامه ورق‌های با موج‌های سینوسی و دوزنقه‌ای را در برمی‌گیرد اگرچه حالات حدی مربوط به ورق‌های با جان موج‌دار مشابه تیر ورق‌های با جان ساده می‌باشد. با توجه به رفتار مشابه دیوارهای برشی فولادی با تیر ورق‌ها که به‌صورت قائم در سازه قرار می‌گیرند، از این قوانین می‌توان در ارزیابی‌های رفتاری و طراحی آن‌ها نیز استفاده نمود. در تیر ورق‌های با جان موج‌دار مقاومت خمشی توسط بال‌های کششی و فشاری و مقاومت برشی منحصراً توسط جان تیر ورق‌ها تحمل می‌گردد. مقاومت برشی در ورق‌های برشی در ورق‌های موج‌دار همانند ورق‌های صاف می‌باشد با این تفاوت که در ورق‌های موج‌دار این مقاومت در یک ضریب کاهش ناشی از کمانش کلی و محلی ضرب می‌گردند. در ورق‌های موج‌دار، کمانش کلی در کل ورق رخ داده ولی کمانش محلی تنها در قسمت‌های صاف موجود در ورق‌های موج‌دار مانند ورق‌های دوزنقه‌ای شکل رخ می‌دهد.

در روابط فوق  $E$  مدول الاستیسته،  $v$  ضریب پواسون،  $I$  طول گام موج صفحه،  $h$  ضخامت صفحه،  $I_y$  ممان اینرسی صفحه در جهت  $y$  مطابق رابطه (۱۰)،  $H$  ارتفاع گام موج صفحه،  $a$  بعد صفحه در راستای ورق،  $b$  بعد صفحه در راستای ورق و  $s$  طول غیر تاشده یک موج مطابق با رابطه (۱۱) می‌باشند.

$$I = 0.5H^2h \left[ 1 - \frac{0.81}{1 + 2.5(H/2l)^2} \right] \quad (10)$$

$$s = l \left( 1 + \frac{\pi^2 H^2}{4l^2} \right) \quad (11)$$



شکل ۲- مشخصات هندسی ورق موج‌دار سینوسی [۴]

### ۳- تاریخچه مطالعات

دیوار برشی فولادی یکی از سیستم‌های مقاومت جانبی در سازه‌های ساختمان‌های است. این سیستم به‌طور مناسب در اصلاح لرزه‌ای ساختمان‌های کنونی و ساخت ساختمان‌های مقاوم در برابر زمین‌لرزه کاربرد دارد. در دیوار برشی فولادی لاغر، ورق جان، علت مقدار کمی از نیروهای جانبی دچار کمانش می‌شود و بدین ترتیب بعد از رفتار کمانش افزایش می‌یابد. این سیستم دارای جزئیات اجرایی ساده و ظرفیت تغییر شکل بالا در مقایسه با سیستم‌های مقاوم بار جانبی دیگر است. قاب‌های SPSW در طول سال‌های گذشته توجه چشمگیری را به خود جلب کرده است. دیوار برشی فولادی مرکب به‌منظور اجتناب از کمانش و همچنین تسلیم کامل صفحه جان در SPSW به کار گرفته می‌شود. برخی از محققان به‌منظور گسترش رفتار SPSWs از قبیل استفاده از سبک بودن صفحه‌های جان، استفاده از فولاد دارای مقاومت نقطه تسلیم پایین‌تر و به‌کارگیری شکاف‌ها چندین روش پیشنهاد کردند [۴].

فیورینیو در سال ۲۰۰۳، دیوار برشی فولادی موج‌دار و تخت را به وسیله‌ی المان پوسته‌ای به‌عنوان مدل پایه ساخت. در سازه‌های بلندمرتبه که تقاضای نیروی جانبی بالاتر است، SPSWs یکی از سیستم‌های مقاوم باربر جانبی قابل استفاده می‌باشد [۵]. وایان و برانو در سال ۲۰۰۵، برای بررسی شکل‌پذیری دیوار برشی فولادی یک طبقه‌ای را مورد آزمایش قرار دادند. مصالح فولادی ورق از جنس فولاد با تنش تسلیم پایین و نسبت عرض به ارتفاع دیوار برابر ۲ بوده است. نتایج نشان داد که نمونه تا تغییر مکان ۶/۴ برابر تغییر مکان تسلیم ( $6/4\delta_y$ ) در هر طرف از خود مقاومت نشان داده است. بنابراین ضریب شکل‌پذیری آن مطابق پروتکل ATC-24 و نظریه پوپوف به ترتیب ۶/۴ و ۱۲/۸ می‌باشد. همچنین حلقه‌ها کاملاً پایدار بوده و افزایش جذب انرژی مشهود است [۶]. خرازی در سال ۲۰۰۵، دو نمونه یک طبقه (با

مقاومت برشی ورق‌های موج‌دار مطابق با رابطه (۱) محاسبه می‌گردد [۴].

$$V_{Rd} = \chi_c \frac{f_y}{\gamma_{M1} \sqrt{3}} a.t \quad (1)$$

در رابطه‌ی فوق  $t$  ضخامت ورق،  $a$  پهنای ورق در راستای موج،  $V_{Rd}$  مقاومت برشی ورق موج‌دار،  $f_y$  مقاومت تسلیم،  $\chi_c$  ضریب کاهش مقاومت بر اساس کمانش جان که از روابط (۲) و (۳) بر اساس نوع کمانش موضعی یا کلی جان حاصل می‌شود.

$$\chi_{c,1} = \frac{1.15}{0.9 + \bar{\lambda}_{c,1}} \leq 1.0 \quad (2)$$

$$\chi_{c,g} = \frac{1.15}{0.9 + \bar{\lambda}_{c,g}^2} \leq 1.0 \quad (3)$$

در رابطه‌ی فوق  $\bar{\lambda}_{c,1}$  و  $\bar{\lambda}_{c,g}$  لاغری جان و به‌صورت تابعی از تنش کمانش برشی بحرانی الاستیک و مقاومت تسلیم در کمانش محلی و کلی می‌باشند که از روابط (۴) و (۵) محاسبه می‌گردد.

$$\bar{\lambda}_{c,1} = \sqrt{\frac{f_y}{\tau_{cr,1} \sqrt{3}}} \quad (4)$$

$$\bar{\lambda}_{c,g} = \sqrt{\frac{f_y}{\tau_{cr,g} \sqrt{3}}} \quad (5)$$

اساساً مد حاکم در ورق‌های موج‌دار سینوسی کمانش برشی کلی است چرا که به دلیل عدم وجود قسمت صاف در ورق‌های موج‌دار با موج‌های سینوسی نسبت به ورق‌های با موج‌های دوزنقه‌ای از ایجاد کمانش محلی ممانعت به عمل می‌آورد. در آیین‌نامه‌ی اروپا Eurocode مقاومت کمانش برشی کلی بر اساس اینکه جان ورق موج‌دار به‌عنوان یک ورق ارتوتروپیک با سختی‌های  $D_x$  و  $D_y$  در جهت‌های طولی و عرضی جان عمل نماید محاسبه می‌شود. سختی‌های ورق در جهات  $x$  و  $y$  جهت محاسبه لاغری‌های جان  $\bar{\lambda}_{c,g}$  منجر به مقادیری می‌گردد که در محاسبه فاکتور کاهش جهت کمانش برشی کلی استفاده می‌شوند. تنش بحرانی الاستیک کمانش برشی کلی جان مطابق با رابطه (۶) به دست می‌آید. در رابطه‌ی (۷) نیز تنش کمانش بحرانی کمانش برشی محلی ارائه شده است.

$$\tau_{cr,g} = \frac{32.4}{t.a^2} \sqrt{D_x \cdot D_y^3} \quad (6)$$

$$\tau_{cr,1} = \left( 5.34 + \frac{2.H.s}{2.t.a} \right) \frac{\pi^2 E}{12(1-v^2)} \frac{2.t}{s} \quad (7)$$

در روابط فوق مطابق شکل (۲)  $D_x$  و  $D_y$  سختی صفحه در جهات  $x$  و  $y$  بوده که برابر است با:

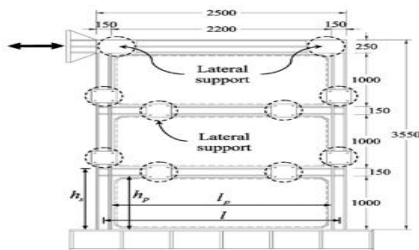
$$D_x = \frac{1}{s} \frac{Eh^3}{12(1-v^2)} \quad (8)$$

$$D_y = EI_y \quad (9)$$

کائو و هانگ در سال ۲۰۱۸، در تحقیقی به توصیف مطالعات عددی و آزمایشگاهی رفتار پسماند در دیوار برشی فولادی موجدار پرداختند. نتایج نشان داد که با طراحی، دیوار برشی فولادی موجدار از وقوع کمناش الاستیک جلوگیری می‌کند. [۱۲]. خیزآب و همکاران در سال ۲۰۲۰، سازه‌های فولادی قاب خمشی با و بدون دیوار برشی فولادی (۳، ۶ و ۹ طبقه) به صورت سه بعدی بر اساس ضوابط آئین‌نامه‌ای طراحی و سپس قاب دو بعدی کناری استخراج و تحلیل دینامیکی غیرخطی تاریخچه زمانی تحت بارگذاری انفجاری در دو سناریو داخل و خارج صفحه‌ی قاب در نرم‌افزار اجزا محدودی ABAQUS انجام داده‌اند. نتایج نشان داد که در سناریوی بارگذاری انفجار داخل صفحه‌ی قاب، سیستم دوگانه‌ی دیوار برشی فولادی عملکرد مناسبی در مقایسه با سیستم قاب خمشی داشته و باعث محدود شدن فروریزش پیش‌رونده گردیده درحالی‌که در سناریوی بارگذاری انفجار خارج از صفحه‌ی قاب به دلیل انتشار موج انفجار بر دیوار برشی فولادی، سیستم قاب خمشی عملکرد بهتری داشته است [۱۳].

#### ۴- صحت‌سنجی مدل‌سازی

در این تحقیق، صحت‌سنجی بر اساس مقاله‌ی چوی و پارک در سال ۲۰۰۹ با نرم‌افزار آباکوس انجام شده است [۱۴]. در این تحقیق به منظور اطمینان از صحت نتایج مدل‌سازی از مقاله‌ی چوی و پارک در سال ۲۰۰۹ که در طی یک کار آزمایشگاهی به بررسی رفتار دیوارهای برشی فولادی پرداخته‌اند، استفاده شده است. مشخصات هندسی و نمای کلی نمونه‌ی آزمایش شده در آزمایشگاه در شکل‌های (۴) و (۵) نشان داده شده است.



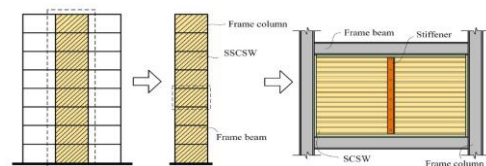
شکل ۴- مشخصات دیوار برشی فولادی در مطالعه‌ی چوی و پارک [۱۴]



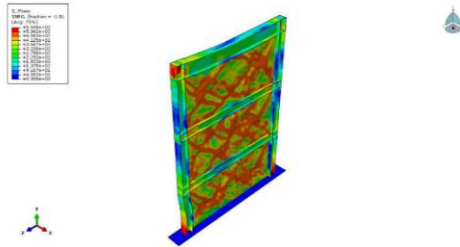
شکل ۵- مدل دیوار برشی فولادی در مطالعه‌ی چوی و پارک [۱۴]

نام‌های DSW-1 و DSW-2 را مورد مطالعه قرار داد. نتایج نشان داد ضریب شکل‌پذیری قاب مطابق با پروتکل ATC-24 و نظریه‌ی پوپوف به ترتیب ۳/۴ و ۵/۹ می‌باشد. براساس نتایج به دست آمده از هر دو آزمایش ضریب شکل‌پذیری نمونه DSW-1 برابر ۲/۱۸ و ۲/۲۲ و ضریب شکل‌پذیری نمونه DSW-2 برابر ۲/۴۴ و ۲/۷۳ به دست آمده است [۷]. امامی و همکاران در سال ۲۰۱۳، در مطالعات آزمایشگاهی رفتار دیوارهای برشی فولادی با ورق موجدار تحت بار چرخه‌ای را مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق نمونه‌های مورد مطالعه آزمایشگاهی به صورت قاب یک دهانه و یک طبقه با ورق موجدار و بدون سخت‌کننده ساخته شده‌اند. در این مطالعه آزمایشگاهی، پارامترهایی از قبیل سختی، مقاومت، ضریب شکل‌پذیری و ظرفیت جذب انرژی در سه مدل مختلف دیوار برشی با ورق ساده (سخت نشده)، ورق موجدار افقی و ورق موجدار عمودی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان داد میزان جذب انرژی، شکل‌پذیری و سختی اولیه نمونه‌های دارای ورق موجدار نسبت به نمونه‌های با ورق ساده افزایش یافته است [۸]. تانگ و گو در سال ۲۰۱۵، با استفاده از ورق موجدار در دیوار برشی فولادی باعث افزایش نیروهای برشی شده‌اند [۹]. در سال‌های اخیر، دیوارهای برشی موجدار فولادی (SCSW) مطابق شکل (۳) در سازه‌های ساختمانی استفاده می‌شوند و به عنوان اعضای مقاوم در برابر نیروی جانبی به کار می‌روند. برای برخی از برنامه‌های مهندسی کاربردی که اندازه عرض SCSW میانقاب در سازه‌ی قاب بیشتر از اندازه‌ی ارتفاع آن است، اضافه کردن سیستم‌های تقویت کننده عمودی به SCSW امری رایج است. از این رو، SCSW تقویت شده تشکیل می‌شود. سیستم تقویت کننده از یک جفت سخت‌کننده عمودی تشکیل می‌شود که در هر دو طرف ورق موجدار نصب و به پیچ‌هایی با مقاومت بالا متصل می‌شوند.

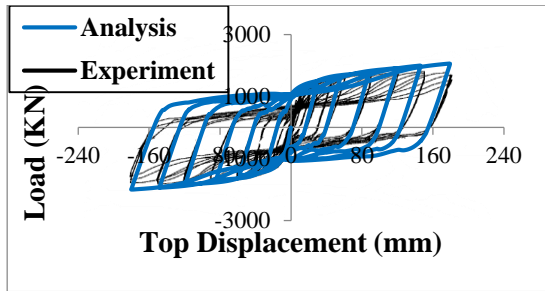
وانگ و همکاران در سال ۲۰۱۵، در پژوهشی به بررسی رفتار دیوارهای برشی فولادی دارای بازو با ورق موجدار پرداختند. آن‌ها در این پژوهش عنوان کردند این سیستم سازه‌ای یک ساختار مقاوم در برابر نیروی جانبی قابل قبول و کارآمد است. نتایج تحقیق حاضر نشان داد که استفاده از دیوارهای برش فولادی موجدار باعث افزایش سختی جانبی، افزایش جذب انرژی و افزایش انعطاف‌پذیری می‌شود در حالی که مقاومت نهایی را کاهش می‌دهد [۱۰]. تونگ و ژو در سال ۲۰۱۸، از طریق تحلیل‌های المان محدود رفتار مقاومت برشی در SCSW و هر دو غیر خطی‌های مصالح و هندسی مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد سیستم تقویت کننده می‌تواند به طور موثری جابجایی‌های خارج از ورق را در دیوار موجدار محدود کند و مقاومت برشی و شکل‌پذیری دیوارها برشی موجدار فولادی تقویت شده را بهبود بخشد [۱۱].



شکل ۳-نمایی از شکل هندسی دیوار برشی موجدار [۱۱]



شکل ۷- کانتور تنش مدل اجزا محدودی دیوار برشی فولادی در مطالعه‌ی چوی و پارک



شکل ۸- صحت سنجی مدل اجزا محدودی دیوار برشی فولادی

نام مش مورد استفاده برای المان‌ها S4R می‌باشد که یک المان ۴ گرهی با روش حل تحلیل کاهش یافته می‌باشد. در این مرحله از تحقیق، انجام تحلیل همگرایی مش می‌باشد که برای این منظور برای نمونه مورد نظر ۶ اندازه المان 30-40-50-70-90-110 در نظر گرفته شده است.

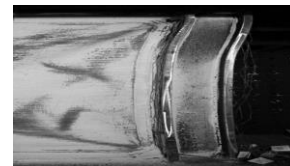
در شکل (۹) منحنی هیستریزس حاصل از بارگذاری چرخه‌ای برای نمونه شماره ۱ با ۶ مش مختلف نشان داده شده است. برای مقایسه بهتر، نمودار پوش هر دو نمونه آزمایشگاهی و نمونه عددی با مش ۳۰ در شکل (۱۰) نشان داده شده است. همانطور که مشخص می‌باشد در نمونه با مش ۳۰ تقریباً همگرایی بهتری هم از نظر ماکزیمم نیرو و هم از نظر سختی سیکل‌های بارگذاری حاصل شده و نتیجه مدل‌سازی عددی به نتیجه‌ی نمونه‌ی آزمایشگاهی بسیار نزدیک بوده و این نشان می‌دهد که منطق شبیه‌سازی نرم‌افزار برای این نمونه با نتایج آزمایشگاهی انطباق خوبی داشته است

مشخصات مدل آزمایشگاهی دیوار برشی فولادی در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول ۱- مشخصات مدل دیوار برشی فولادی [۱۴]

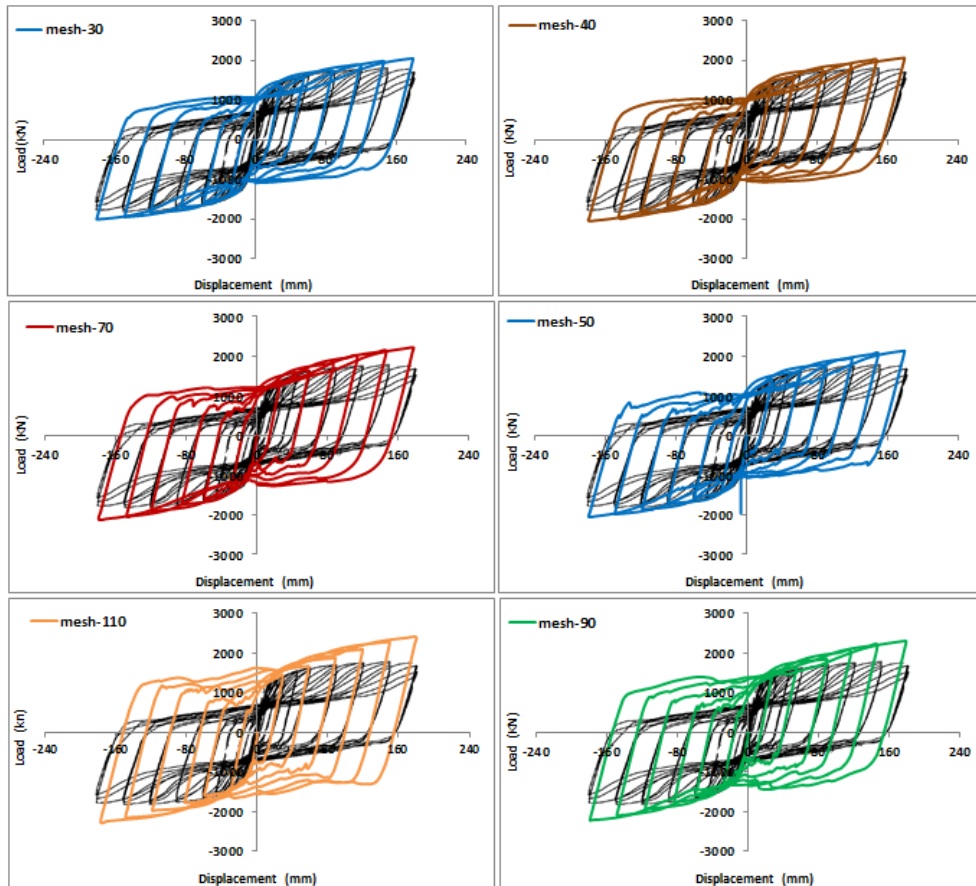
نوع المان	مقاطع	مقاومت نهایی (MPa)	مقاومت تسلیم (MPa)	ضخامت (mm)
ستون	H-150X150X22X22	۴۰۰	۲۴۰	-
تیر طبقه اول و دوم	H150x100x12x20	۵۲۷	۳۷۷	-
تیر طبقه آخر	H250x150x12x20	۵۲۷	۳۷۷	-
ورق	PL 1x2 m	۵۵۶	۴۰۷	۴

در این مدل‌سازی کلیه‌ی المان‌ها از نوع Shell می‌باشد. مصالح فولادی بکار رفته در نمونه‌ها ایزوتروپیک فرض می‌شوند. برای معرفی روابط تنش و کرنشی مصالح در برنامه تحلیل المان محدود، این روابط به صورت نمودار چندخطی در نظر گرفته می‌شوند. اما باید توجه کرد که افزایش تعداد ناپیوستگی‌های نمودار تنش و کرنش، تعداد تکرارهای لازم برای رسیدن به جواب را بیشتر می‌کند. بنابراین باید نمودار تنش-کرنش را با تعداد کمی ناپیوستگی معرفی نمود. در این تحقیق، نمودار تنش-کرنش به صورت دوخطی در نظر گرفته شده است. این منحنی تنش-کرنش دوخطی، شامل یک خط در منطقه‌ی الاستیک و یک خط در مرحله‌ی پلاستیک می‌باشد. بارگذاری نیز به صورت چرخه‌ای به بالای قاب وارد شده و برای تکیه‌گاه‌ها نیز شرایط مرزی گیردار در نظر گرفته شده است. شایان ذکر می‌باشد که برای جلوگیری از کمانش خارج از صفحه قاب در جهت عمود بر قاب در نقاطی که در نمونه آزمایشگاهی نشان داده شده است از قیدهایی جهت جلوگیری از کمانش خارج صفحه قاب استفاده شده است. برای تحلیل نمونه عددی نیز از روش استاتیکی غیرخطی استفاده شده است. در مش‌بندی نام المان‌ها S4R استفاده شده است که یک المان ۴ گرهی می‌باشد. در شکل‌های (۶) و (۷) به ترتیب تغییر شکل برشی در ستون طبقه اول مدل آزمایشگاهی و کانتور تنش مدل اجزا محدودی ارائه شده است. با توجه به شکل (۸)، مشخص شد که صحت‌سنجی سازه‌ی مدل‌سازی شده در نرم‌افزار اجزا محدودی آباکوس با نمونه‌ی آزمایشگاهی چوی و پارک، مطابقت قابل‌توجهی دارد.



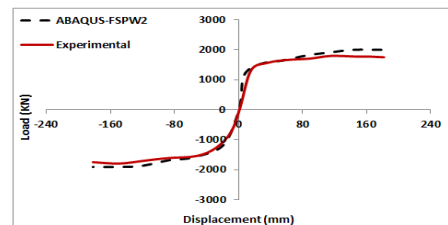
شکل ۶- تغییر شکل برشی در ستون طبقه اول مدل آزمایشگاهی دیوار برشی فولادی در مطالعه‌ی چوی و پارک [۱۴]





شکل ۹- منحنی هیستریزیس نمونه‌ی صحت‌سنجی با ۶ مش مختلف

فعال در گره‌های تراز سقف، درجات آزادی انتقالی داخل صفحه و چرخش حول محورها است و برای اعضای تیر و ستون، درجات آزادی انتقالی، خارج از صفحه بسته شده است، درگره‌های تراز پایه، همه‌ی درجات آزادی انتقالی، عمود بر صفحه بسته شده است. همه‌ی مدل‌ها با اعمال تغییر مکان کناری در گره‌های اتصال تیر به ورق فولادی بارگذاری شده است. برای مشاهده‌ی رفتار کامل نمونه‌ها، تغییر مکان اعمال شده بیشتر از حد تغییر مکان هدف در آیین‌نامه‌ی FEMA [۱۵] (0.02d) در نظر گرفته شد. پیشبینی رفتار مدل‌های مورد نظر بر اساس تحلیل استاتیکی غیر خطی بار افزون شامل غیرخطی هندسی و مصالح انجام شده است. معیار سنجش تحلیل شبه استاتیکی با بررسی انرژی جنبشی سیستم کنترل می‌شود که باید طی تحلیل، مقدار آن ناچیز باشد. لاغری نمونه‌ها در محدوده‌ی ۵۰۰ و ۱۲۵۰ قرار دارد که مناسب است [۳]. نوع تحلیل انجام شده غیرخطی هندسی و مصالح است و معیار گسیختگی، Von-Mises است. برای تحلیل غیرخطی از نرم‌افزار (ABAQUS) استفاده شده است. این نرم‌افزار قادر به حل مسائل مهندسی با درجات غیرخطی بالا است. در نرم‌افزار دو روش برای تحلیل سازه‌ها وجود دارد: در تحلیل- ABAQUS/Explicit از یک روش ضمنی ولی در تحلیل تحلیل- ABAQUS/Standard از یک روش دینامیکی صریح غیرخطی استفاده می‌شود. تغییر شکل ناگهانی خارج از صفحه ورق فولادی



شکل ۱۰- مقایسه‌ی پوش منحنی هیستریزیس برای نمونه‌ی اجزا محدودی و آزمایشگاهی

## ۵- مدل‌سازی

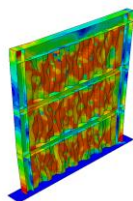
در این تحقیق برای اینکه بتوان تا حد مطلوبی رفتار مورد نظر را مطالعه کرد، ۸ نمونه‌ی دیوار برشی فولادی موج‌دار با مدل‌سازی شد. در مدل‌سازی تیر و ستون در همه‌ی مدل‌ها از مقطع H شکل استفاده شده است. در این مدل‌ها اتصال تیر به ستون در همه‌ی مدل‌ها به صورت صلب در نظر گرفته و اتصال ورق به تیر و ستون به شکل مفصلی مدل شده است. اعضای مرزی را می‌توان با المان BEAM مدل کرد؛ با این وجود در صورتی که کمانش موضعی در آن‌ها اتفاق افتد این مورد در تحلیل در نظر گرفته نخواهد شد. برای در نظر گرفتن کمانش جانبی، ورق و اعضای مرزی با المان پوسته‌ی S4r مدل‌سازی شده که یک المان چهارگره‌ی دو انحنایی با انتگرال‌گیری کاهش یافته است. هر گره از این المان ۶ درجه آزادی یعنی ۳ درجه انتقال و ۳ درجه دوران دارد. در مدل‌ها، درجات آزادی

جدول ۲- مشخصات هندسی نمونه‌های عددی

نام گروه	شماره نمونه	نام نمونه	مقطع المان محیطی	ضخامت ورق (میلی-متر)	طول ورق a (متر)	عرض ورق b (متر)
گروه ۱	M1	Infill-Plate 4mm	HEB150	۴	۲/۲	۱
	M2	Infill-Plate 6mm	HEB150	۶	۲/۲	۱
	M3	Infill-Plate 8mm	HEB150	۸	۲/۲	۱
گروه ۲	M4	Column180	HEB180	۴	۲/۲	۱
	M5	Column210	HEB210	۴	۲/۲	۱
گروه ۳	M6	Infill-Plate4mm-a/b-1	HEB150	۴	۱	۱
	M7	Infill-Plate4mm-a/b-0.75	HEB150	۴	۱/۳	۱
	M8	Infill4mm-a/b-0.50	HEB150	۴	۲	۱

#### ۶-۱- بررسی عملکرد نمونه‌ی شماره ۱

در این نمونه از المان‌های محیطی با مقطع HEB150 و از ورق به ضخامت ۴ میلی‌متر استفاده شده است. در شکل (۱۳) توزیع تنش فون میز نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود تغییرشکل‌هایی در ورق فولادی دیواربرشی ایجاد شده که بیشترین مقدار تغییرشکل پلاستیک مربوط به ناحیه میانی ورق می‌باشد. از نظر توزیع تنش نیز بیشترین مقدار در پای ستون و به مقدار ۵۵۰ مگاپاسکال ایجاد شده است. در شکل (۱۴) مقایسه نتایج نمونه‌ی شماره ۱ با نتایج نمونه آزمایشگاهی صحت سنجی شده نشان داده شده است. علاوه بر اینکه هر دو نمونه در سیکل‌های بارگذاری دارای چرخه‌های بارگذاری پایداری هستند، همانطور که از روی نمودار قابل مشاهده هست نمونه آزمایشگاهی با نیروی ۱۷۹۸ کیلونیوتن در حدود ۴/۶۸ درصد نسبت به نمونه‌ی شماره ۱ با نیروی ۱۷۱۴ کیلونیوتن دارای ظرفیت باربری بیشتری می‌باشد. از نظر جذب انرژی نیز نمونه با ضخامت ورق ۴ میلی‌متر با توجه به اینکه مساحت زیر منحنی بیشتری نسبت به نمونه آزمایشگاهی دارد، مقدار جذب انرژی بیشتری داشته که از نظر عددی این مقدار برابر ۱۷ درصد می‌باشد.



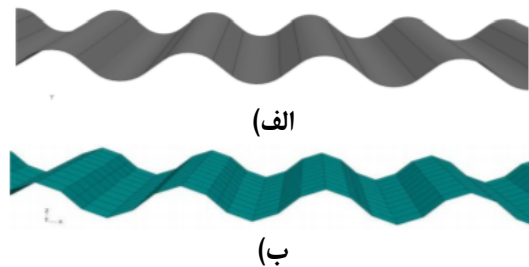
شکل ۱۳- کانتور تنش فون میز نمونه‌ی شماره ۱

به علت توسعه میدان کشش سبب ایجاد مشکلات همگرایی در آنالیز سیستم‌های SSW می‌شود؛ بنابراین با توجه به عملکرد ضعیف روش ضمنی (Implicit Method) که در آن از روش‌های تکراری سعی و خطای مختلفی همانند روش نیوتون-رافسون و نیوتون-رافسون اصلاح شده و الگوریتم ریکس استفاده می‌شود و نیز به علت این که این روش‌ها در مجاورت پاسخ‌های ناپایداری شامل ناپایداری موضعی در همگرایی، منجر به شکست می‌شوند، روش صریح دینامیکی برای آنالیز SSW انتخاب شد. منحنی رفتار مصالح نیز به صورت سه خطی سخت شونده با مشخصات زیر در نظر گرفته شده است [۱۶ و ۱۷]:

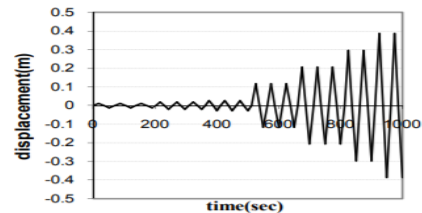
$$E=2.1E10 \text{ kg/m}^2 \quad G=8.077E10 \text{ kg/m}^2 \quad E_{t1}=1.07E9 \text{ kg/m}^2 \quad (12)$$

$$E_{t2}=37.2E6 \text{ kg/m}^2 \quad \nu=3$$

همانگونه که در شکل (۱۱) دیده می‌شود اعضای پیرامونی دیوارهای برشی موج‌دار از نیمرخ I شکل تشکیل شده است تا رفتاری نزدیک به واقعیت داشته باشد. اندازه‌ی المان‌ها در این مدل‌سازی به میزان کافی ریز انتخاب شده تا خطای عددی آن به کمترین مقدار برسد. در شکل (۱۱) بخش‌های الف و ب به ترتیب هندسه‌ی مقطع ورق موج‌دار و شکل مش‌بندی شده آن نشان داده شده است. برای تحلیل بارگذاری دوره‌ای از منحنی بارگذاری چرخه‌ای شکل (۱۲) استفاده شده است [۱۷].



شکل ۱۱- نمای ورق موج‌دار. الف) هندسه‌ی مقطع ورق موج‌دار ب) شکل مش‌بندی شده آن

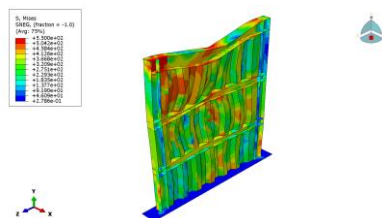


شکل ۱۲- منحنی بارگذاری چرخه‌ای

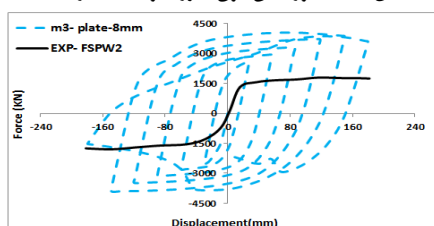
#### ۶-۲- بررسی نتایج

در این تحقیق به مدل‌سازی ۸ مدل دیواربرشی فولادی با نرم‌افزار آباکوس پرداخته شده است. در این نمونه‌ها به بررسی پارامترهایی از قبیل ضخامت ورق فولادی، نسبت طول به عرض ورق فولادی (a/b) و تغییر مشخصات هندسی المان‌های محیطی پرداخته خواهد شد. جدول (۲) مشخصات کلیه نمونه‌ها نشان داده شده است.

هست نمونه با ضخامت ورق ۸ میلی‌متر با نیروی ۴۰۴۸ کیلونیوتن در حدود ۵۶ درصد نسبت به نمونه آزمایشگاهی با نیروی ۱۷۹۸ کیلونیوتن دارای ظرفیت باربری و سختی بیشتری می‌باشد. از نظر جذب انرژی نیز نمونه با ضخامت ورق ۸ میلی‌متر با توجه به اینکه مساحت زیر منحنی بیشتری نسبت به نمونه آزمایشگاهی دارد، مقدار جذب انرژی بیشتری داشته که از نظر عددی این مقدار برابر ۶۴ درصد می‌باشد.



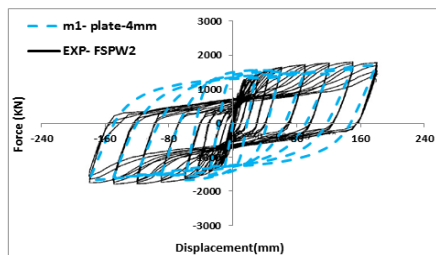
شکل ۱۷- کانتور تنش فون میزز نمونه‌ی شماره‌ی ۳



شکل ۱۸- مقایسه‌ی نتایج نمونه‌ی شماره‌ی ۳ با نمونه‌ی آزمایشگاهی

#### ۴-۶- بررسی عملکرد نمونه‌ی شماره‌ی ۴

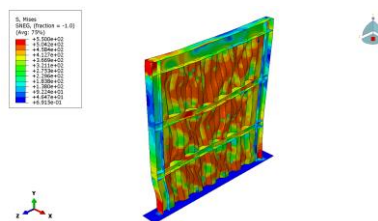
در این نمونه به بررسی تأثیر المان‌های محیطی در عملکرد دیواربرشی پرداخته شده است. این نمونه دارای المان محیطی با مقطع HEB 180 و از ورق به ضخامت ۴ میلی‌متر استفاده شده است. در شکل (۱۹) توزیع تنش فون میزز نشان داده شده است. در شکل (۲۰) مقایسه نتایج نمونه‌ی شماره‌ی ۴ با نتایج نمونه آزمایشگاهی صحت سنجی شده نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود هر دو نمونه دارای چرخه‌های بارگذاری پایداری بوده و با افزایش مقطع ستون از HEB 150 به HEB 180 شکل منحنی هیستریز چاق‌تر شده و همانطور که از روی نمودار قابل مشاهده هست نمونه با مقطع ستون HEB 180 (نمونه‌ی شماره‌ی ۴) با نیروی ۱۸۶۸ کیلونیوتن در حدود ۳/۷۵ درصد نسبت به نمونه آزمایشگاهی با نیروی ۱۷۹۸ کیلونیوتن دارای ظرفیت باربری و سختی بیشتری می‌باشد. با افزایش ۱۷ درصدی مقطع ستون، و با محاسبه‌ی مساحت زیر منحنی هیستریز مشاهده می‌شود که جذب انرژی در حدود ۲۲/۴۲ درصد افزایش یافته است.



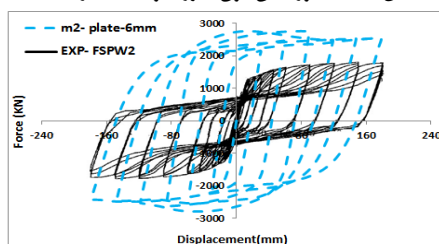
شکل ۱۴- مقایسه‌ی نتایج نمونه‌ی شماره‌ی ۱ با نمونه‌ی آزمایشگاهی

#### ۲-۶- بررسی عملکرد نمونه‌ی شماره‌ی ۲

در این نمونه از المان‌های محیطی با مقطع HEB 150 و از ورق به ضخامت ۶ میلی‌متر استفاده شده است. در شکل (۱۵) توزیع تنش فون میزز نشان داده شده است. در شکل (۱۶) مقایسه نتایج نمونه‌ی شماره‌ی ۲ با نتایج نمونه آزمایشگاهی صحت سنجی شده نشان داده شده است. در نمونه‌ی شماره‌ی ۲ در سیکل‌های ابتدایی سختی افزایش و سپس با ادامه سیکل‌های بارگذاری در منحنی شاهد افت و زوال مقاومت در چرخه‌های انتهایی می‌باشیم. همانطور که از روی نمودار قابل مشاهده هست نمونه با ضخامت ورق ۶ میلی‌متر با نیروی ۲۶۷۱ کیلونیوتن در حدود ۹۳ درصد نسبت به نمونه آزمایشگاهی با نیروی ۱۷۹۸ کیلونیوتن دارای ظرفیت باربری و سختی بیشتری می‌باشد. از نظر جذب انرژی نیز نمونه با ضخامت ورق ۶ میلی‌متر با توجه به اینکه مساحت زیر منحنی بیشتری نسبت به نمونه آزمایشگاهی دارد، مقدار جذب انرژی بیشتری داشته که از نظر عددی این مقدار برابر ۵۳ درصد می‌باشد.



شکل ۱۵- کانتور تنش فون میزز نمونه‌ی شماره‌ی ۲



شکل ۱۶- مقایسه نتایج نمونه‌ی شماره‌ی ۲ با نمونه‌ی آزمایشگاهی

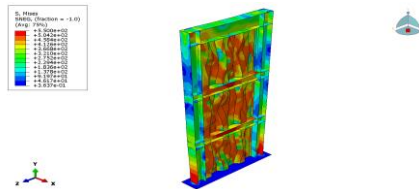
#### ۳-۶- بررسی عملکرد نمونه‌ی شماره‌ی ۳

در این نمونه از المان‌های محیطی با مقطع HEB 150 و از ورق به ضخامت ۸ میلی‌متر استفاده شده است. در شکل (۱۷) توزیع تنش فون میزز نشان داده شده است. در شکل (۱۸) مقایسه نتایج نمونه‌ی شماره‌ی ۳ با نتایج نمونه آزمایشگاهی صحت سنجی شده نشان داده شده است. در نمونه شماره ۳ در سیکل‌های ابتدایی سختی افزایش و سپس با ادامه سیکل‌های بارگذاری در منحنی شاهد افت و زوال مقاومت در چرخه‌های انتهایی می‌باشیم. همانطور که از روی نمودار قابل مشاهده

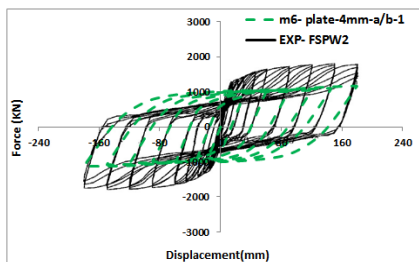


### ۶-۶- بررسی عملکرد نمونه‌ی شماره‌ی ۶

در این نمونه به بررسی تأثیر ابعاد ورق دیواربرشی پرداخته شده است. در این نمونه نسبت ابعادی  $a/b$  برابر ۱ در نظر گرفته شده است. منظور از پارامتر  $a$  طول و منظور از پارامتر  $b$  عرض ورق دیواربرشی می‌باشد. این نمونه دارای المان محیطی با مقطع HEB150 و از ورق به ضخامت ۴ میلی‌متر استفاده شده است. در شکل (۲۳) توزیع تنش فون میز نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود. در شکل (۲۴) مقایسه‌ی نتایج نمونه‌ی شماره‌ی ۶ با نتایج نمونه آزمایشگاهی صحت سنجی شده نشان داده شده است. هر دو نمونه دارای چرخه‌های بارگذاری پایداری بوده و با یکسان در نظر گرفتن ابعاد ورق‌های دیواربرشی  $(a/b=1)$  همانطور که از روی نمودار قابل مشاهده هست نمونه با نسبت ابعادی ۱ (نمونه‌ی شماره‌ی ۶) با نیروی ۱۱۶۷ کیلونیوتن در حدود ۳۵ درصد نسبت به نمونه آزمایشگاهی با نیروی ۱۷۹۸ کیلونیوتن دارای ظرفیت باربری و سختی کمتری می‌باشد. همچنین در صورت برابری ابعاد ورق دیواربرشی، مقدار جذب انرژی کاهش چشمگیری یافته است. این مقدار از نظر عددی چیزی در حدود ۱۸/۵ درصد می‌باشد.



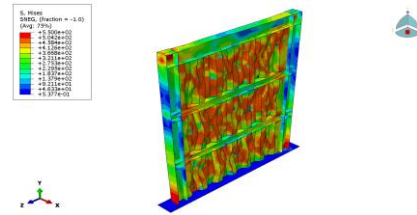
شکل ۲۳- کانتور تنش فون میز نمونه‌ی شماره‌ی ۶



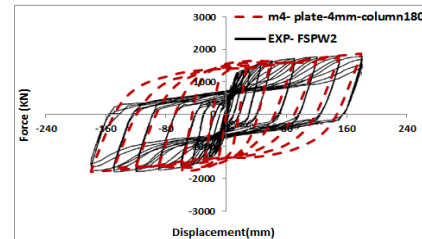
شکل ۲۴- مقایسه نتایج نمونه‌ی شماره‌ی ۶ با نمونه‌ی آزمایشگاهی

### ۷-۶- بررسی عملکرد نمونه‌ی شماره‌ی ۷

در این نمونه به بررسی تأثیر ابعاد ورق دیواربرشی پرداخته شده است. در این نمونه نسبت ابعادی  $a/b$  برابر ۰/۷۵ در نظر گرفته شده است. منظور از پارامتر  $a$  طول و منظور از پارامتر  $b$  عرض ورق دیواربرشی می‌باشد. این نمونه دارای المان محیطی با مقطع HEB150 و از ورق به ضخامت ۴ میلی‌متر استفاده شده است. در شکل (۲۵) توزیع تنش فون میز نشان داده شده است. در شکل (۲۶) مقایسه‌ی نتایج نمونه‌ی شماره‌ی ۷ با نتایج نمونه آزمایشگاهی صحت سنجی شده نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود هر دو نمونه دارای چرخه‌های بارگذاری پایداری بوده و با در نظر گرفتن ابعاد ورق‌های دیواربرشی با نسبت  $a/b=0.75$  همانطور که از روی نمودار قابل مشاهده هست نمونه شماره ۷ با نیروی ۱۳۲۵ کیلونیوتن در حدود ۲۶ درصد نسبت به نمونه آزمایشگاهی با نیروی ۱۷۹۸ کیلونیوتن دارای ظرفیت باربری و سختی کمتری می‌باشد. از نظر جذب انرژی نیز نمونه آزمایشگاهی در حدود ۷ درصد از نمونه با نسبت ابعادی ۰/۷۵ عملکرد بهتری داشته است.



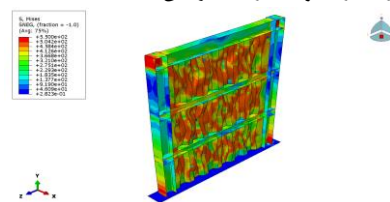
شکل ۱۹- کانتور تنش فون میز نمونه‌ی شماره‌ی ۴



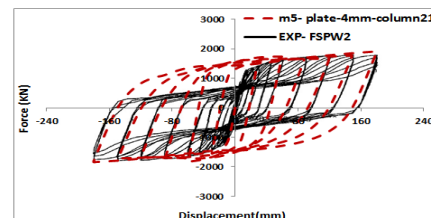
شکل ۲۰- مقایسه‌ی نتایج نمونه‌ی شماره‌ی ۴ با نمونه‌ی آزمایشگاهی

### ۵-۶- بررسی عملکرد نمونه‌ی شماره‌ی ۵

در این نمونه به بررسی تأثیر المان‌های محیطی در عملکرد دیواربرشی پرداخته شده است. این نمونه دارای المان محیطی با مقطع HEB210 و از ورق به ضخامت ۴ میلی‌متر استفاده شده است. در شکل (۲۱) توزیع تنش فون میز نشان داده شده است. در شکل (۲۲) مقایسه‌ی نتایج نمونه‌ی شماره‌ی ۵ با نتایج نمونه آزمایشگاهی صحت سنجی شده نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود هر دو نمونه دارای چرخه‌های بارگذاری پایداری بوده و با افزایش مقطع ستون از HEB150 به HEB210 شکل منحنی هیستریزس چاق‌تر شده و همانطور که از روی نمودار قابل مشاهده هست نمونه با مقطع ستون HEB210 (نمونه‌ی شماره‌ی ۵) با نیروی ۱۹۱۳ کیلونیوتن در حدود ۶ درصد نسبت به نمونه آزمایشگاهی با نیروی ۱۷۹۸ کیلونیوتن دارای ظرفیت باربری و سختی بیشتری می‌باشد. با افزایش ۲۹ درصدی مقطع ستون، و با محاسبه‌ی مساحت زیر منحنی هیستریزس مشاهده می‌شود که جذب انرژی در حدود ۲۷ درصد افزایش یافته است.



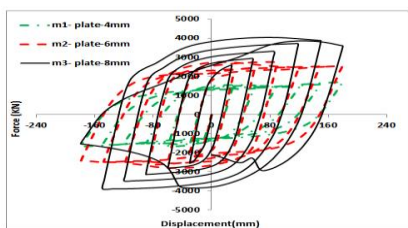
شکل ۲۱- کانتور تنش فون میز نمونه‌ی شماره‌ی ۵



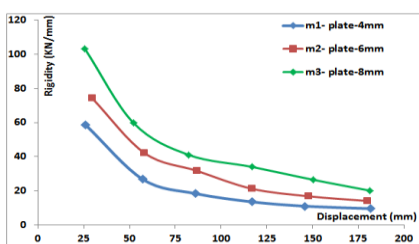
شکل ۲۲- مقایسه‌ی نتایج نمونه‌ی شماره‌ی ۵ با نمونه‌ی آزمایشگاهی

۷- مقایسه‌ی نتایج نمونه‌های مورد مطالعه

شکل (۲۹) مقایسه‌ی نتایج نمونه‌های گروه اول را نشان می‌دهد. در این گروه پارامتر متغیر ضخامت ورق دیوار برشی در نظر گرفته شده است. همانطور که مشاهده می‌شود نمونه‌ها دارای چرخه‌های پایداری بوده و به دلیل شکل تقریباً متقارنی که دارند سازه رفتار یکنواختی در برابر بارهای رفت و برگشتی از خود نشان داده است. ولی پایداری چرخه‌ها در نمونه با ضخامت ورق ۸ میلی‌متر ثابت نبوده، بطوری‌که در گام‌های آخر بارگذاری افت مقاومت و کماتش موضعی در چرخه‌های بارگذاری مشاهده می‌شود. همچنین با افزایش ضخامت ورق مقدار ظرفیت باربری افزایش یافته است. از نظر عددی می‌توان گفت که نمونه با ضخامت ورق ۸ میلی‌متر نسبت به نمونه‌هایی با ضخامت ورق ۶ و ۴ میلی‌متر دارای بیشترین ظرفیت باربری که به ترتیب به مقدار ۲۲درصد و ۵۸ درصد می‌باشد. در شکل (۳۰) نمودار جابجایی - سختی نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش جابجایی در هر سه نمونه میزان سختی به مقدار قابل توجهی کاهش یافته و ماکزیمم سختی به مقدار ۱۰۳ کیلونیوتن بر میلیمتر مربوط به نمونه با ضخامت ورق ۸ میلی‌متر بوده که به‌طور متوسط در حدود ۳۶ درصد نسبت به سایر نمونه‌ها با افزایش همراه بوده است. از نظر جذب انرژی نمونه با ضخامت ورق ۸ میلی‌متر نسبت به نمونه با ضخامت‌های ۶ و ۴ میلی‌متر به ترتیب ۲۴درصد و ۵۷ درصد عملکرد بهتری داشته است.

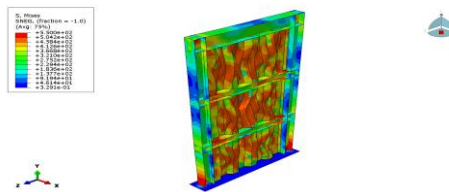


شکل ۲۹- مقایسه‌ی منحنی هیستریزس نیرو- جابجایی نمونه‌هایی با ضخامت ورق ۴، ۶ و ۸ میلی‌متری

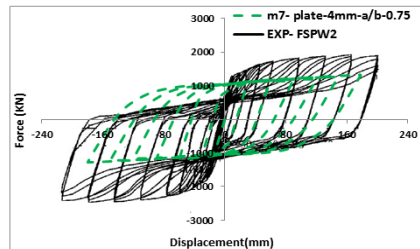


شکل ۳۰- مقایسه‌ی منحنی جابجایی - سختی نمونه‌هایی با ضخامت ورق ۴، ۶ و ۸ میلی‌متری

شکل (۳۱) مقایسه نتایج نمونه‌های گروه دوم را نشان می‌دهد. در این گروه پارامتر متغیر مقطع المان مرزی (ستون‌ها) دیوار برشی در نظر گرفته شده است. همانطور که مشاهده می‌شود نمونه‌ها دارای چرخه‌های پایداری بوده و به دلیل شکل تقریباً متقارنی که دارند سازه رفتار یکنواختی در برابر بارهای رفت و برگشتی از خود نشان داده است. از نظر عددی می‌توان گفت که هر دو نمونه دارای ظرفیت باربری یکسانی می‌باشند. در شکل (۳۲) نمودار جابجایی - سختی نشان داده



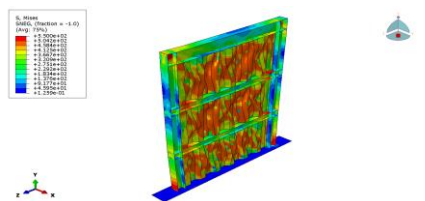
شکل ۲۵- کانتور تنش فون میزز نمونه‌ی شماره‌ی ۷



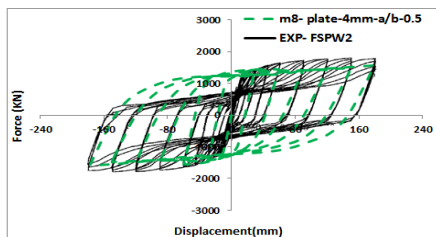
شکل ۲۶- مقایسه‌ی نتایج نمونه‌ی شماره‌ی ۷ با نمونه‌ی آزمایشگاهی

۸-۶- بررسی عملکرد نمونه‌ی شماره‌ی ۸

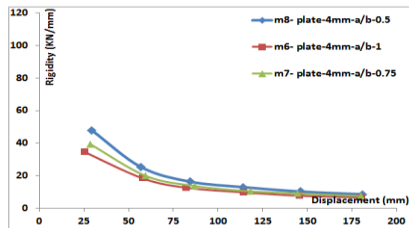
در این نمونه به بررسی تأثیر ابعاد ورق دیواربرشی پرداخته شده است. در این نمونه نسبت ابعادی a/b برابر ۰/۵ در نظر گرفته شده است. منظور از پارامتر a طول و منظور از پارامتر b عرض ورق دیواربرشی می‌باشد. این نمونه دارای المان محیطی با مقطع HEB150 و از ورق به ضخامت ۴ میلی‌متر استفاده شده است. در شکل (۲۷) توزیع تنش فون میزز نشان داده شده است. در شکل (۲۸) مقایسه‌ی نتایج نمونه‌ی شماره‌ی ۸ با نتایج نمونه آزمایشگاهی صحت سنجی شده نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود هر دو نمونه دارای چرخه‌های بارگذاری پایداری بوده و با در نظر گرفتن ابعاد ورق‌های دیواربرشی با نسبت  $a/b=0.5$  همانطور که از روی نمودار قابل مشاهده هست نمونه شماره ۸ با نیروی ۱۵۶۴ کیلونیوتن در حدود ۱۳ درصد نسبت به نمونه آزمایشگاهی با نیروی ۱۷۹۸ کیلونیوتن دارای ظرفیت باربری و سختی کمتری می‌باشد. از نظر جذب انرژی نیز نمونه با نسبت ابعادی ۰/۵ نسبت به نمونه آزمایشگاهی در حدود ۱۲ درصد عملکرد بهتری داشته است.



شکل ۲۷- کانتور تنش فون میزز نمونه‌ی شماره‌ی ۸

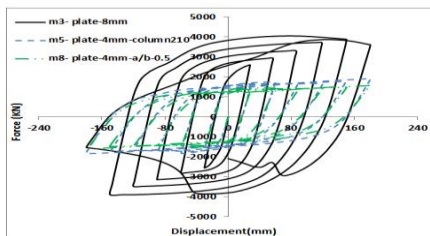


شکل ۲۸- مقایسه‌ی نتایج نمونه‌ی شماره‌ی ۸ با نمونه‌ی آزمایشگاهی

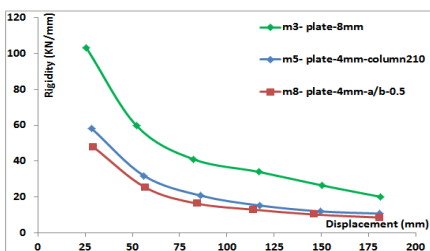


شکل ۳۴- مقایسه‌ی منحنی جابجایی- سختی نمونه‌هایی با نسبت ابعادی مختلف

همانطور که از شکل‌های (۳۵) و (۳۶) مشخص می‌باشد تأثیر افزایش ضخامت ورق نسبت به افزایش مقطع المان مرزی و نسبت ابعادی ورق کاملاً مشهود می‌باشد. از نظر عددی نمونه با ضخامت ورق ۸ میلی‌متر نسبت به نمونه با المان مرزی با مقطع HEB210 و نسبت ابعادی ۰/۵ به ترتیب ۵۳ درصد و ۶۲ درصد ظرفیت باربری، و ۵۲ درصد و ۶۰ درصد جذب انرژی بیشتری داشته است. همچنین از نظر سختی هم چیزی در حدود ۴۰ درصد و ۵۳ درصد نسبت به نمونه‌های مشابه عملکرد بهتری داشته است.

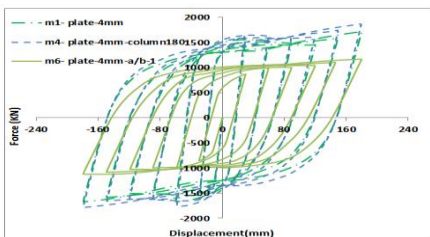


شکل ۳۵- مقایسه‌ی منحنی هیستریزس نیرو- جابجایی نمونه‌های ۳، ۵ و ۸



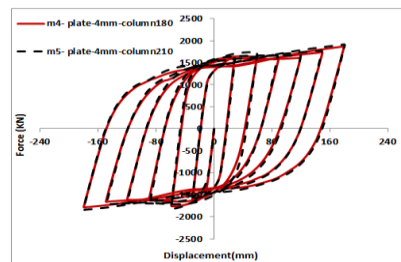
شکل ۳۶- مقایسه‌ی منحنی جابجایی- سختی نمونه‌های ۳، ۵ و ۸

همانطور که از شکل‌های (۳۷) و (۳۸) مشخص می‌باشد المان مرزی تأثیرگذاری کمتری در عملکرد نمونه‌ها داشته است. همچنین در صورت استفاده از نسبت ابعادی ۱ که ورق فولادی حالت مربعی به خود می‌گیرد شاهد کاهش ظرفیت باربری و سایر پارامترها از جمله سختی و جذب انرژی هستیم. در جدول (۲) به‌طور خلاصه، نتایج ظرفیت باربری، جذب انرژی و سختی نمونه‌های مورد مطالعه نشان داده شده است.

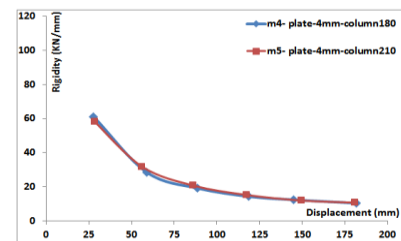


شکل ۳۷- مقایسه‌ی منحنی هیستریزس جابجایی- نیرو نمونه‌های ۱، ۴ و ۶

شده است. با توجه به نمودارهای ارائه‌شده، مشاهده می‌شود که هر دو نمونه دارای سختی‌های برابر در جابجایی‌های مختلف می‌باشند.

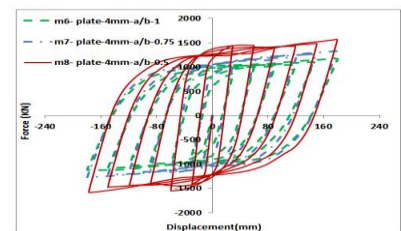


شکل ۳۸- مقایسه‌ی منحنی هیستریزس نیرو- جابجایی نمونه‌هایی با المان مرزی مختلف



شکل ۳۹- مقایسه‌ی منحنی جابجایی- سختی نمونه‌هایی با المان مرزی مختلف

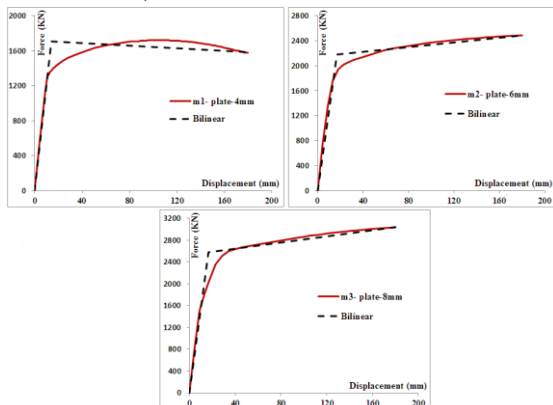
شکل (۳۳) مقایسه نتایج نمونه‌های گروه سوم را نشان می‌دهد. در این گروه پارامتر متغیر نسبت ابعاد طول به عرض ورق دیوار برشی در نظر گرفته شده است. همانطور که مشاهده می‌شود نمونه‌ها دارای چرخه‌های پایداری بوده و به دلیل شکل تقریباً متقارنی که دارند سازه رفتار یکنواختی در برابر بارهای رفت و برگشتی از خود نشان داده است. از نظر عددی می‌توان گفت که نمونه با نسبت ابعادی ۰/۵ دارای بیشترین ظرفیت باربری نسبت به نمونه‌های شماره ۷ و ۶ به ترتیب به مقدار ۱۵ درصد و ۲۵ درصد می‌باشد. در شکل (۳۴) نمودار جابجایی- سختی نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش جابجایی در هر سه نمونه میزان سختی به مقدار قابل‌توجهی کاهش یافته و ماکزیمم سختی به مقدار ۴۸ کیلو نیوتن بر میلی‌متر مربوط به نمونه با نسبت ابعادی ۰/۵ می‌باشد که نسبت به نمونه با نسبت ابعادی ۱ و ۰/۷۵ به ترتیب ۲۹ درصد و ۱۸/۷۵ درصد دارای سختی بیشتری می‌باشد.



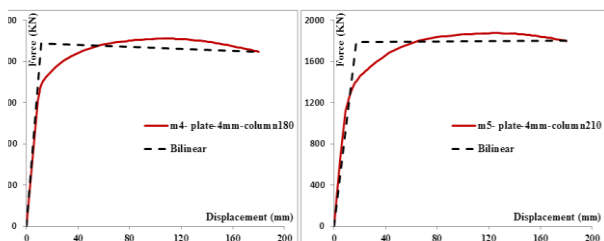
شکل ۴۰- مقایسه‌ی منحنی هیستریزس نیرو- جابجایی نمونه‌هایی با نسبت ابعادی ورق مختلف

قابلیت یک سازه در داشتن تغییرمکان بالاتر از حد خطی و جذب انرژی در تغییرشکل‌های بزرگ به وسیله رفتار غیرخطی را شکل‌پذیری می‌گویند. معمولاً نسبت شکل‌پذیری به صورت زیر تعریف می‌شود:

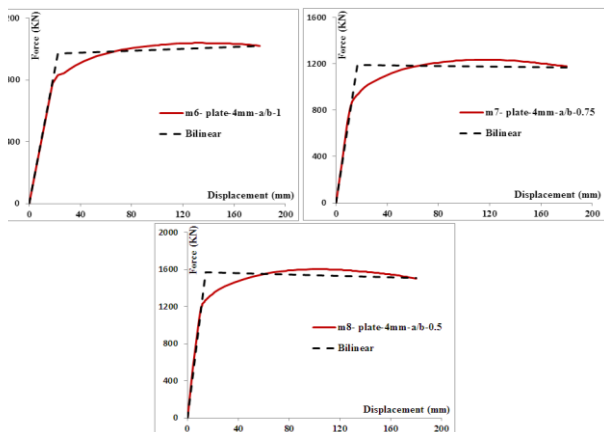
$$\mu = \frac{\Delta_m}{\Delta_y}, \quad \mu_{max} = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \quad (2)$$



شکل ۴۰- دوخطی سازی نمودار نیرو-تغییرمکان نمونه‌های گروه ۱

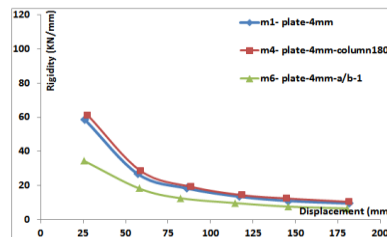


شکل ۴۱- دوخطی سازی نمودار نیرو-تغییرمکان نمونه‌های گروه ۲



شکل ۴۲- دوخطی سازی نمودار نیرو-تغییرمکان نمونه‌های گروه ۳

در شکل‌های (۴۰) الی (۴۲) نمودارهای دوخطی نمونه‌های اجزا محدودی ارائه شده است و سپس بر اساس نتایج به دست آمده مشاهده می‌شود که در گروه ۱ نمونه‌ی شماره ۱ با ضخامت ورق ۴ میلی‌متر دارای بیشترین نسبت شکل‌پذیری و ضریب ناشی از شکل‌پذیری در بین سایر نمونه‌ها بوده است. از نظر پارامتر اضافه مقاومت نیز نمونه با ضخامت ورق ۸ میلی‌متر دارای بیشترین مقدار می‌باشد. با بررسی گروه ۲ نیز مشخص می‌شود که نمونه شماره ۴ با المان مرزی HEB180 دارای نسبت شکل‌پذیری بالایی بوده است. همچنین با بررسی گروه ۳



شکل ۳۸- مقایسه‌ی منحنی جابجایی-سختی نمونه‌های ۱، ۴ و ۶

جدول ۳- خلاصه‌ی نتایج نمونه‌های مورد مطالعه

نمونه	Pmax (Kn)	E (Kn.m)	K (Kn/mm)
M1	۱۴۱۴	۲۵۵۳	۵۸
M2	۲۶۷۱	۴۵۱۳	۷۴
M3	۴۰۴۸	۵۹۳۴	۱۰۳
M4	۱۸۶۸	۲۷۳۳	۵۸
M5	۱۹۱۳	۲۸۷۰	۶۱
M6	۱۱۶۷	۱۷۲۸	۳۴
M7	۱۳۲۵	۱۹۶۸	۳۹
M8	۱۵۶۴	۲۴۰۶	۴۸

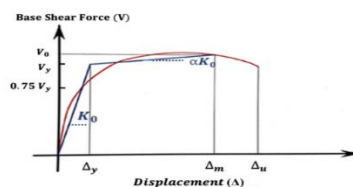
### ۸- تحلیل استاتیکی غیرخطی بار افزون

#### ۸-۱- نحوه دو خطی کردن منحنی بار افزون

روش‌های مختلفی برای دو خطی کردن نمودار بار افزون وجود دارد که می‌توان به موارد ذیل اشاره کرد:

#### ۸-۱-۱- روش پریستلی و پائولی

در این روش که توسط پریستلی و پائولی بیان شد یک مقدار برای  $V_y$  (مقاومت تسلیم سازه) فرض شده، سپس از مبدأ به نقطه  $0.75V_y$  روی منحنی تغییرمکان- نیروی برش پایه شکل (۳۹) وصل نموده و تا خط  $V_y$  ادامه داده می‌شود. از محل تقاطع این دو خط منحنی مذکور افقی فرض می‌شود.



شکل ۳۹- دوخطی سازی نمودار برش پایه-تغییرمکان به روش پریستلی و پائولی

در شکل (۳۹) که مربوط به روش پریستلی و پائولی می‌باشد یک نمودار دو خطی برش پایه- تغییرمکان نشان داده شده است.  $K_0$  سختی الاستیک نمودار دو خطی می‌باشد که در واقع همان شیب قسمت خطی منحنی نیرو- تغییرمکان است و  $K_1$  سختی سازه بعد از تسلیم می‌باشد که به صورت ضریبی از  $K_0$  خواهد بود:

$$K_1 = \alpha K_0 = \frac{V_0 - V_y}{\Delta_m - \Delta_y} \quad (1)$$

در رابطه‌ی فوق  $V_y$  نیروی برش تسلیم،  $V_0$  نیروی برشی ماکزیمم (بر روی منحنی دو خطی)،  $\Delta_m$  تغییرمکان متناظر با  $V_0$ ،  $\Delta_y$  تغییرمکان متناظر با  $V_y$  و  $\Delta_u$  تغییرمکان در آستانه شکست سازه می‌باشد.

- نمونه با نسبت ابعادی (طول به عرض)  $0.5$  دارای بیشترین ظرفیت باربری جانبی در قیاس با نسبت‌های  $0.75$  و  $1$  به ترتیب  $15$  درصد و  $25$  درصد می‌باشد.
- نمونه با ضخامت ورق  $8$  میلی‌متر نسبت به نمونه با امان مرزی با مقطع HEB210 و نسبت ابعادی  $0.5$  به ترتیب  $53$  درصد و  $62$  درصد ظرفیت باربری، و  $52$  درصد و  $60$  درصد جذب انرژی بیشتری دارد. همچنین از نظر سختی نیز در حدود  $40$  درصد و  $53$  درصد نسبت به نمونه‌های مشابه عملکرد بهتری داشته است.
- در صورت استفاده از نسبت ابعادی (طول به عرض) برابر  $1$  ورق فولادی کاهش ظرفیت باربری و سایر پارامترها از جمله سختی و جذب انرژی گردید.
- نمونه  $M1$  با ضخامت ورق  $4$  میلی‌متر دارای بیشترین نسبت شکل‌پذیری در بین سایر نمونه‌ها می‌باشد.
- از نظر پارامتر اضافه مقاومت نیز نمونه با ضخامت ورق  $8$  میلی‌متر دارای بیشترین مقدار می‌باشد.
- نمونه  $M4$  با امان مرزی HEB180 دارای نسبت شکل‌پذیری بالایی است.
- با بررسی نتایج مشخص شد که هر چقدر طول ورق نسبت به ارتفاع افزایش یابد، نسبت شکل‌پذیری نیز افزایش قابل توجهی خواهد داشت.

#### مراجع

- [1] Astaneh-Asl, A. (2001). Seismic behavior and design of steel shear walls. AISC, Steel Tips.
- [2] ABAQUS, Abaqus/standard, (2012) version 6.11, ABAQUS, Inc., Pawtucket, R.I.
- [3] Eurocode 3 (2003), Design of steel structures Part 1.5: Plated structural elements, European Committee for Standardization.
- [4] AISC, (2010), Seismic provisions for structural steel buildings, American Institute Of Steel Construction, Chicago.
- [5] Fiorino, L. (2003), Seismic Behavior of Sheathed Cold-Formed Steel Stud Shear Walls an Experimental Investigation, Ph.D. thesis. University of Napoli Federico II Italy.
- [6] Vian, D, Bruneau, M, (2005), Steel Plate Shear Walls for Seismic Design and Retrofit of Building Structures, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, State Univ. Of New York At Buffalo, Buffalo, N.Y.
- [7] Kharrazi Mhk, (2005), Rational Method for Analysis and Design of Steel Plate Shear Walls. Ph.D. Dissertation, University of British Columbia.
- [8] Ni F. Emami, M. Mofid, A. Vafai, (2013), Experimental study on cyclic behavior of trapezoidally corrugated steel shear walls. Engineering Structures, Volume 48, pp 750-762.
- [9] J. Tong, Y. Guo, (2015), Elastic buckling behavior of steel trapezoidal corrugated shear walls with vertical stiffeners, Thin-Walled Structures, Volume 95, pp 31-39.

مشخص می‌شود که هر چقدر طول ورق نسبت به ارتفاع افزایش یابد نسبت شکل‌پذیری افزایش قابل توجهی یافته است (نمونه‌ی شماره‌ی ۸). این در حالی است که ضریب اضافه مقاومت در هر سه نسبت ابعادی تغییر آنچنانی نکرده است.

جدول ۴- نتایج نمودارهای دوخطی نمونه‌ها

نمونه	Rs	R <sub>μ</sub>	R	μ
M1	۱,۳۲	۴,۸۷	۶,۴۳	۱۲,۷۶
M2	۱,۲۴	۴,۶۷	۵,۸	۱۰,۷۴
M3	۱,۵۶	۴,۷۳	۷,۳۷	۱۰,۸۱
M4	۰,۶۸	۵,۴۶	۳,۷۵	۱۵,۷۴
M5	۱,۴۴	۴,۵	۶,۵	۱۰,۶۳
M6	۱,۲۴	۳,۹۳	۴,۸۹	۸,۰۳
M7	۱,۳۶	۴,۵	۶,۱۵	۱۰,۷۳
M8	۱,۳۳	۴,۸۹	۶,۴۹	۱۲,۷۱

در جدول (۴)،  $R_s$  ضریب اضافه مقاومت،  $R_{\mu}$  ضریب ناشی از شکل‌پذیری،  $R$  ضریب رفتار و  $\mu$  نسبت شکل‌پذیری می‌باشد.

#### ۹- نتیجه‌گیری

- با استفاده از نرم‌افزار آباکوس به مدل‌سازی  $8$  نمونه‌ی دیواربرشی فولادی دارای ورق موج‌دار تحت تحلیل‌های استاتیکی غیرخطی بار افزون و چرخه‌ای پرداخته و خروجی‌های مورد نظر استخراج شده است. برای اطمینان از نتایج تحقیق، نمونه آزمایشگاهی که به‌عنوان مرجع جهت صحت‌سنجی انتخاب شده را مدل‌سازی نموده و پس از اطمینان از صحت نتایج به بررسی متغیرهای مدنظر در نمونه‌های عددی پرداخته و در ادامه به ارائه نتایج کلی به شرح ذیل پرداخته شده است.
- نتایج صحت‌سنجی مدل آزمایشگاهی نشان داد که نتایج این تحقیق قابل اعتماد و از دقت خوبی برخوردار است.
- پایداری چرخه‌های منحنی هیستریزس در نمونه با ضخامت ورق  $8$  میلی‌متر ثابت نبوده، به‌طوری‌که در گام‌های آخر بارگذاری افت مقاومت و کمانش موضعی در چرخه‌های بارگذاری مشاهده شده است. مدل با ضخامت ورق  $8$  میلی‌متر نسبت به مدل‌هایی با ضخامت ورق‌های  $6$  و  $4$  میلی‌متر دارای بیشترین ظرفیت باربری می‌باشد. این میزان افزایش به ترتیب به مقدار  $32$  درصد و  $58$  درصد است.
- در دیوارهای برشی فولادی با ورق‌های موج‌دار در صورتی‌که ضخامت ورق افزایش یابد، تغییرات در میزان ظرفیت باربری جانبی، شکل‌پذیری و اتلاف انرژی بسیار قابل ملاحظه می‌باشد.
- با افزایش ضخامت ورق دیوار برشی فولادی، جذب انرژی و سختی به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته است. به‌عنوان نمونه از نظر جذب انرژی عملکرد مدل با ضخامت ورق  $8$  میلی‌متر نسبت به مدل‌هایی با ضخامت‌های  $6$  و  $4$  میلی‌متر به ترتیب  $24$  درصد و  $57$  درصد بهینه‌تر می‌باشد.
- تأثیر امان‌های مرزی در عملکرد نمونه‌های مورد مطالعه ناچیز بوده است.



- [10] Wang, M, Shi, Y, Xu, J, Yang, W, Li, Y, (2015), Experimental and numerical study of unstiffened steel plate shearwall structures, *Journal of Constructional Steel Research*, Volume 112, pp 373-386
- [11] Jing-Zhong Tong, Yan-Lin Guo, (2018), Shear resistance of stiffened steel corrugated shear walls, *Thin-Walled Structures*, Volume 127, pp 76-89.
- [12] Qiang Caoa, Jingyu Huang, (2018), Experimental study and numerical simulation of corrugated steel plate shear walls subjected to cyclic loads. *Thin-Walled Structures*, Volume 127, pp 306-317.
- [13] Khizab, B., Sadeghi, A., Hashemi, S., Mehdizadeh, K., Nasser, H. Investigation the performance of Dual Systems Moment-Resisting Frame with Steel Plate Shear Wall Subjected to Blast Loading. *Journal of Structural and Construction Engineering*, (2020).
- [14] Choi, I.R. Park, H.G. (2008). Ductility and Energy Dissipation Capacity of Shear-Dominated Steel Plate Walls. *Journal of Structural Engineering*, 134(9).
- [15] FEMA 273 (1997). NEHRP Guidelines for Seismic Rehabilitation of Buildings. Washington, D.C. Federal Emergency Management Agency, USA.
- [16] Hibbit, Karlsson, & Sorenson, Inc., (HKS), 2007b. ABAQUS/Explicit User's Manual. Version 6.7, Hibbit, Karlsson, & Sorenson Inc., Pawtucket, Rhode Island.
- [17] Ricky W.K. Chana, b, Faris Albermania, (2008), Experimental study of steel slit damper for passive energy dissipation. *Engineering Structures* 30 1058-1066.

# Investigation of the Factors affecting the Ductility of Steel Plate Shear Wall with Corrugated Sheet under Cyclic Loading

Zaman Majidinia

M.Sc., Department of Civil Engineering, Abadan Branch, Islamic Azad University, Abadan, Iran

\*Kourosh Mehdizadeh

Department of Civil Engineering, Garmsar Branch, Islamic Azad University, Garmsar, Iran

Abbasali Sadeghi

Ph.D. Candidate, Department of Civil Engineering, Mashhad Branch, Islamic Azad University, Mashhad, Iran

Seyede Vahide Hashemi

Ph.D. Candidate, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering (Shahid Nikbakht), University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran

## Abstract

Nowadays, it is recommended to use non-stiffened steel plate shear wall. One of the innovations that can be applied to the steel plate shear wall is the use of corrugated sheets instead of flat sheets. Therefore, corrugated sheets are utilized to delay the occurrence of buckling. In this study, regarding to the importance of the subject, to ensure the accuracy of the modeling, a laboratory sample of Choi and Park was selected for verification and after ensuring the accuracy of the results, 8 samples of corrugated sheet steel plate shear wall were modelled by ABAQUS software. In these samples, parameters such as thickness of the steel sheet, the length-to-width ratio of the sheet ( $a/b$ ) and change in the geometric characteristics of the perimeteral elements are investigated. Numerical results presented that the stability of the hysteresis curve cycles in the specimen with a plate thickness of 8 mm was not constant, as observed in the final loading steps, loss of resistance and local buckling in the loading cycles. Numerically, it can be said that the sample with a sheet thickness of 8 mm has the highest bearing capacity compared to the samples with a sheet thickness of 4 and 6 mm. The effect of boundary elements on the performance of the specimens was negligible. Finally, it was revealed that with increasing the length of the sheet relative to its height, the amount of plasticity has significantly increased.

**Keywords:** Bearing Capacity, Ductility, Steel Plate Shear Wall, Corrugated Sheet, Cyclic Loading.