

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده عمران و معماری

گروه عمران

بررسی رفتار دیوار برشی فولادی با ورق موج‌دار

دانشجو:

حامد کلالی

استاد راهنما:

دکتر فرشید علایی

استاد مشاور:

مهندس محمدحاج صادقی

پایان‌نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

بهمن ۱۳۹۲

تقدیم به:

پدر و مادرم

که همیشه مدیون محبت‌ها، نوازش‌ها،
راهنمایی‌ها و حمایت‌های بی‌دریغ آنها
می‌باشم.

تقدیر و تشکر:

اینجانب لازم می‌دانم که بدین وسیله از زحمات بی‌دریغ و نیز همراهی و راهنمایی‌های مستمر جناب آقای دکتر فرشید علایی، استاد راهنمای این پایان‌نامه و استاد همیشگی بنده در درس و زندگی و همچنین جناب آقای مهندس محمد حاج‌صادقی، استاد مشاور این پایان‌نامه که همیشه دوست و یاور بنده بوده و هستند تشکر و قدردانی نمایم و برای هر دو ایشان آرزوی توفیق الهی داشته باشم.

همچنین از اعضای هیأت محترم داوران جناب آقای دکتر وحیدرضا کلات‌جاری، جناب آقای دکترسید مهدی توکلی که قبول زحمت فرمودند و در جلسه دفاع حضور یافته و اینجانب را از نظرات ارزشمند خود بی‌دریغ نگذاشتند، کمال تشکر را دارم.

در ضمن از کلیه اساتید و معلمانم که با فداکاری خود مرا تا این مرحله از زندگی راهنمایی و هدایت کرده‌اند، تشکر و قدردانی می‌نمایم.

تعهد نامه

اینجانب حامد کلالی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی عمران گرایش

سازه دانشکده عمران و معماری دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه بررسی رفتار دیوار

برشی فولادی با ورق موج دار تحت راهنمایی جناب دکتر فرشید علایی متعهد می شوم .

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهش های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

* متن این صفحه نیز باید در ابتدای نسخه های تکثیر شده پایان نامه وجود داشته باشد .

چکیده

مطالعات آزمایشگاهی و عددی انجام شده در سه دهه گذشته نشان داده است که دیواربرشی فولادی یک سیستم موثر و اقتصادی برای مقاومت در برابر بارهای جانبی باد و زلزله است. طراحی مناسب این دیوارها، شکل پذیری بیشتر، سختی زیاد، چرخه هیستریزیس پایدار و ظرفیت جذب انرژی بیشتری را در پی خواهد داشت. این دیوارها معمولاً در دو نوع سخت شده و سخت نشده ساخته می‌شوند. انواع سخت شده از نظر عملکرد لرزه‌ای و نیز مسائل بهره‌برداری مناسب‌تر می‌باشد، ولی به خاطر وجود سخت‌کننده‌های متعدد و جزئیات اجرایی فراوان، باید وقت و هزینه زیادی برای ساخت آنها صرف گردد. در سال‌های اخیر به کارگیری ورق موج‌دار به عنوان جان شاستیر پل‌ها و سوله‌های صنعتی رو به افزایش است. با توجه به سختی خارج از صفحه قابل ملاحظه ورق‌های موج‌دار، این نوع ورق‌ها از مقاومت کم‌انرژی به مراتب بیش‌تری نسبت به ورق تخت برخوردار بوده که با به کارگیری آن به عنوان جان تیرورق، علاوه بر کاهش ضخامت مورد نیاز جان، ضرورت استفاده از سخت‌کننده نیز مرتفع می‌شود. در این پایان‌نامه به بررسی رفتار این ورق‌ها در دیوار برشی فولادی می‌پردازیم.

در این پایان‌نامه ۳۰ مدل دیوار برشی فولادی با ورق صاف در ضخامت‌های متفاوت و ورق موج‌دار در ضخامت، زاویه موج و تعداد نیم‌موج متفاوت تحت بار سیکلیک مورد بررسی قرار گرفته است. ۴۲ مدل نیز شامل ورق صاف با سخت‌کننده تحت بار یک‌طرفه قرار گرفته است. این بررسی با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود ANSYS12 و با در نظرگیری تحلیل غیرخطی هندسه و مصالح انجام شده است. یافته‌های این مطالعه نشان می‌دهد که طراحی مناسب و انتخاب موثر ضخامت، تعداد نیم‌موج‌ها و زاویه موج‌ها می‌تواند نتایج مطلوبی بر عملکرد سازه‌ای بالای دیوار برشی فولادی با ورق موج‌دار و مشخصات اتلاف انرژی داشته باشد.

همچنین استفاده از سخت‌کننده در دیوارهای فولادی با ضخامت کم تاثیر چندانی در رفتار دیوارها ندارد، هر چند استفاده از سخت‌کننده در دیوارهایی با ضخامت متوسط اثر قابل ملاحظه‌ای بر رفتار

دیوارها داشته، به ویژه در مورد دیوار با ضخامت ۴ میلی‌متر که با افزایش سخت‌کننده‌های افقی و عمودی رفتار آن بهبود یافته است.

لیست مقالات

- کلالی، ح. علایی، ف. حاج‌صادقی، م. (۱۳۹۲). "بررسی رفتار دیوار برشی فولادی با سخت-کننده"، چهارمین کنفرانس ملی سازه و فولاد و چهارمین کنفرانس ملی کاربردهای پراستحکام در صنعت سازه، ص ۹۵۳، تهران
- کلالی، ح. علایی، ف. حاج‌صادقی، م. (۱۳۹۲). "بررسی رفتار دیوار برشی فولادی با ورق موج-دار"، چهارمین کنفرانس ملی سازه و فولاد و چهارمین کنفرانس ملی کاربردهای پراستحکام در صنعت سازه، ص ۹۶۱، تهران

فهرست مطالب

۱- دیوارهای برشی فولادی.....	۱
۱-۱- مقدمه	۲
۲-۱- دیوار برشی فولادی	۳
۱-۲-۱- انواع دیوارهای برشی فولادی	۵
۲-۲-۱- مزایای استفاده از دیوارهای برشی	۶
۳-۲-۱- معایب استفاده از دیوارهای برشی	۷
۳-۱- تاریخچه استفاده از دیوارهای برشی فولادی و رفتار آنها طی زلزله‌های اخیر	۸
۴-۱- مطالعات آزمایشگاهی و تحلیلی و نتایج حاصل از آنها	۱۰
۵-۱- نحوه انتخاب میان دیوارهای برشی فولادی سخت شده یا سخت نشده	۱۰
۶-۱- رفتار لرزه‌ای دیوارهای برشی فولادی و روابط طراحی آنها.....	۱۷
۱-۶-۱- ارزیابی سختی.....	۱۷
۲-۶-۱- ارزیابی مقاومت.....	۱۷
۳-۶-۱- فراهم آوردن شرایط شکل پذیری.....	۱۹
۱-۳-۶-۱- زوال‌های شکل پذیر و ترد.....	۲۰
۲-۳-۶-۱- ترتیب یا اهمیت زوال‌ها	۲۰
۳-۳-۶-۱- طراحی اجزاء و اجزای سیستم دارای دیوار برشی فولادی.....	۲۲
۲- ورق‌های فولادی موج‌دار.....	۲۵
۱-۲- مقدمه	۲۶
۲-۲- معرفی موارد استفاده از ورق‌های موج‌دار	۲۷
۳-۲- تیروورق با جان موج‌دار	۳۰

۳۳	دیوارهای برشی فولادی موج‌دار
۳۴	۱-۳- مقدمه
۳۴	۲-۳- معرفی دیوارهای برشی موج‌دار
۳۷	۳-۳- خصوصیات مورد انتظار از دیوار برشی فولادی موج‌دار
۳۸	۴-۳- مطالعات انجام شده بر روی دیوار برشی فولادی موج‌دار
۴۱	۴- نحوه مدل‌سازی دیوار برشی فولادی در نرم‌افزار ANSYS و اعتبارسنجی مدل‌ها
۴۲	۱-۴- مقدمه
۴۲	۲-۴- معرفی خصوصیات و قابلیت‌های نرم‌افزار ANSYS
۴۳	۱-۲-۴- تحلیل کمانشی
۴۴	۲-۲-۴- تحلیل غیرخطی هندسی
۴۵	۳-۲-۴- تحلیل غیر خطی مادی
۴۶	۱-۳-۲-۴- رفتار خمیری غیر وابسته به زمان
۴۹	۴-۲-۴- معرفی المان متناسب با فیزیک مسأله
۵۰	۵-۲-۴- روش‌های حل
۵۱	۳-۴- مدل‌سازی دیوار برشی فولادی
۵۱	۱-۳-۴- فرضیات بکارگرفته شده در مدل‌سازی
۵۱	۱-۱-۳-۴- نوع تحلیل
۵۲	۲-۱-۳-۴- مصالح بکار برده شده در شبیه‌سازی فولاد
۵۳	۳-۱-۳-۴- نحوه مدل‌سازی یک عضو فولادی در ANSYS
۵۶	۴-۱-۳-۴- زبان پارامتری ANSYS و ساخت مکترو
۵۸	۴-۴- جایگاه و اهمیت اعتبارسنجی (Validation) نمونه‌ها
۵۸	۵-۴- مدل‌سازی و کالیبراسیون دیوار برشی فولادی با ورق صاف

- ۵۹-۴-۵-۱- مدل آزمایشگاهی جفری برمن و مایکل برونو با ورق صاف
- ۶۰-۴-۵-۱-۱- اعمال نقص اولیه ساخت
- ۶۱-۴-۵-۱-۲- انتخاب المان و نحوه مشبندی دیواربرشی فولادی F-1
- ۶۱-۴-۵-۱-۳- مقایسه نتایج تحلیل اجزای محدود با نتایج آزمایشگاهی
- ۶۲-۴-۵-۲- مدل آزمایشگاهی فرشته امامی و همکارانش با ورق صاف
- ۶۳-۴-۵-۲-۱- اعمال نقص اولیه ساخت
- ۶۴-۴-۵-۲-۲- انتخاب المان و نحوه مشبندی دیواربرشی فولادی F-1.25
- ۶۵-۴-۵-۲-۳- مقایسه نتایج تحلیل اجزای محدود با نتایج آزمایشگاهی
- ۶۶-۴-۶-۱- مدل سازی و کالیبراسیون دیوار برشی فولادی با ورق موج دار
- ۶۶-۴-۶-۱- انتخاب المان و نحوه مشبندی دیواربرشی فولادی T-30-8-1.25
- ۶۷-۴-۶-۲- اعمال نقص اولیه ساخت
- ۶۸-۴-۶-۳- مقایسه نتایج تحلیل اجزای محدود با نتایج آزمایشگاهی
- ۷۱-۵- مطالعه پارامتریک دیواربرشی فولادی با ورق موج دار در نرم افزار ANSYS**
- ۷۲-۵-۱- مقدمه
- ۷۲-۵-۲- نحوه نام گذاری نمونه ها
- ۷۵-۵-۳- نتایج تحلیل اجزای محدود
- ۷۶-۵-۳-۱- نمودارهای هیستریزیس بار- دوران در نمونه های با ورق صاف
- ۸۱-۵-۳-۲- بررسی اثر ضخامت ورق های صاف و موج دار در جذب انرژی دیوار برشی
- ۸۵-۵-۳-۳- بررسی اثر زاویه ورق های موج دار در جذب انرژی دیوار برشی
- ۸۷-۵-۳-۴- بررسی اثر تعداد نیم موج ورق های موج دار در جذب انرژی دیوار برشی
- ۸۵-۵-۳-۵- ارائه کانتورهای تنش، کرنش و تغییر مکان خارج از صفحه ورق دیوار

۵-۳-۶- نمودارهای بارگذاری یک طرفه بار درصد تغییر مکان نسبی دیوار برشی فولادی با	
ورق صاف سخت شده	۹۰
۵-۳-۶-۱- نحوه مدل سازی سخت کننده ها	۹۰
۵-۳-۶-۲- نمودارهای بارگذاری یک طرفه بدون قاب محیطی	۹۱
۶- جمع بندی و ارائه پیشنهادات جهت مطالعات آتی	۹۵
۶-۱- مقدمه	۹۶
۶-۲- جمع بندی نتایج	۹۶
۶-۳- ارائه پیشنهادات برای مطالعات آتی	۱۰۰
منابع و مأخذ	۱۰۱
پیوست (۱)	۱۰۳

فهرست شکل‌ها

۱- دیوارهای برشی فولادی

- شکل (۱-۱): انواع دیوارهای برشی؛ الف- دیوار برشی کوتاه یا چاق، (ب)-دیوار برشی طره‌ای یا لاغری. ۲
- شکل (۲-۱): دیوار برشی همبند ۳
- شکل (۳-۱): مقایسه دیوار برشی فولادی (الف) و تیر ورق فولادی (ب). ۴
- شکل (۴-۱): دیوار برشی فولادی سخت شده (الف) و دیوار برشی فولادی سخت نشده (ب). ۶
- شکل (۵-۱): نمودار محدوده‌های رفتاری دیوار فولادی موج دار بر اساس میزان لاغری (h/t_w). ۱۸

۲- ورق‌های فولادی موج‌دار

- شکل (۱-۲): استفاده از ورق‌های موج‌دار در عرشه کف‌ها، سقف‌ها، پانل دیوارها و سقف‌ها و پوشش‌های موج‌دار ۲۷
- شکل (۲-۲): عملیات نورد سرد با غلطک، برای تولید ورق‌های موج‌دار ۲۷
- شکل (۳-۲): بکارگیری ورق‌های موج‌دار با مقطع استاندارد، به‌عنوان دیوارهای اطراف ساختمان ۲۸
- شکل (۴-۲): بکارگیری ورق‌های موج‌دار بزرگ (غیراستاندارد) به‌عنوان اجزاء سازه‌ای ۲۸
- شکل (۵-۲): استفاده از ورق‌های موج‌دار در کف‌های مرکب ۲۹
- شکل (۶-۲): استفاده از ورق‌های موج‌دار در ساخت لوله‌های فولادی موج‌دار گالوانیزه. ۲۹
- شکل (۷-۲): نمایی از پیل در حال ساخت دارای مقطع صندوقه‌ای مرکب با جان فولادی موج‌دار ۳۱

۳- دیوارهای برشی فولادی با ورق موج‌دار

- شکل (۱-۳): نمایی از یک دیوار برشی فولادی موج‌دار به همراه قاب پیرامونی ۳۶

۴- نحوه مدل‌سازی دیوار برشی فولادی در نرم‌افزار ANSYS و اعتبارسنجی مدل‌ها

- شکل (۱-۴): معیار تسلیم فون میسز در حالت دو بعدی و سه بعدی ۴۷

- شکل (۲-۴): معیار تسلیم دراگر-پراگر در حالت دو بعدی و سه بعدی. ۴۷.....
- شکل (۳-۴): مقایسه نحوه تغییرات سطوح تسلیم در قواعد سخت‌شدگی سینماتیکی و ایزوتروپیک. ۴۸.....
- شکل (۴-۴): مقایسه معادلات رفتاری محیط‌های دارای سخت‌شدگی سینماتیکی و ایزوتروپیک در حالات دو خطی و چند خطی. ۴۹.....
- شکل (۵-۴): SH93 SHELL93 المان. ۵۰.....
- شکل (۶-۴): مفهوم گام بارگذاری و زیرگام در تحلیل غیرخطی. ۵۵.....
- شکل (۷-۴): جزئیات نمونه آزمایشگاهی جفری برمن و مایکل برونو (Specimen F2). ۵۹.....
- شکل (۸-۴): میزان نقص اولیه مورد نیاز برای تحلیل غیر خطی بر اساس آیین‌نامه اروپا. ۶۰.....
- شکل (۹-۴): مد اول کمانش دیواربرشی فولادی F-1. ۶۰.....
- شکل (۱۰-۴): نحوه مش‌بندی دیواربرشی فولادی F-1. ۶۱.....
- شکل (۱۱-۴): نمودار مقایسه‌ای بار درصد تغییر مکان نسبی مدل آزمایشگاهی و مدل اجزای محدود F-1. ۶۱.....
- شکل (۱۲-۴): منحنی تنش کرنش فولاد تیر و ستون و ورق دیوار برشی فولادی F-1.25. ۶۲.....
- شکل (۱۳-۴): جزئیات دیوار برشی F-1.25 با ابعاد کامل. ۶۳.....
- شکل (۱۴-۴): مد اول کمانش دیواربرشی فولادی F-1.25. ۶۳.....
- شکل (۱۵-۴): اعمال نقص اولیه در دیواربرشی F-1.25 با استفاده از تحلیل کمانش خطی (۲۰ برابر بزرگ‌نمایی). ۶۴.....
- شکل (۱۶-۴): نحوه مش‌بندی دیواربرشی فولادی F-1.25. ۶۴.....
- شکل (۱۷-۴): نمودار مقایسه‌ای بار درصد تغییر مکان نسبی مدل آزمایشگاهی و مدل اجزای محدود F-1.25. ۶۵.....
- شکل (۱۸-۴): جزئیات دیوار برشی T-30-8-1.25 با ابعاد کامل. ۶۶.....
- شکل (۱۹-۴): نحوه اتصال ورق به بال ستون دیواربرشی فولادی با ورق موج‌دار دوزنقه‌ای (نمونه T-30-8-1.25). ۶۶.....
- شکل (۲۰-۴): نحوه مش‌بندی بال ستون دیواربرشی فولادی با ورق موج‌دار دوزنقه‌ای (نمونه T-30-8-1.25). ۶۶.....
- شکل (۲۱-۴): نحوه مش‌بندی دیواربرشی فولادی T-30-8-1.25. ۶۷.....

شکل (۴-۲۲): مد اول کمانش دیواربرشی فولادی T-30-8-1.25 ۶۷

شکل (۴-۲۳): اعمال نقص اولیه در دیواربرشی T-30-8-1.25 با استفاده از تحلیل کمانش خطی

..... (۸۰ برابر بزرگ‌نمایی) ۶۸

شکل (۴-۲۴): نمودار مقایسه‌ای بار درصد تغییر مکان نسبی مدل آزمایشگاهی و مدل اجزای محدود

..... T-30-8-1.25 ۶۸

شکل (۴-۲۵): پروتکل بارگذاری چرخه‌ای ۶۹

۵- مطالعه پارامتریک دیوار برشی فولادی با موج‌دار با استفاده از روش اجزای محدود

شکل (۵-۱): مشخصات مقاطع تیر و ستون دیوار برشی فولادی فرشته‌امامی و همکارانش ۷۳

شکل (۵-۲): نمودار هیستریزیس مدل F-1.25 ۷۶

شکل (۵-۳): نمودار هیستریزیس مدل T-30-8-1.25 ۷۶

شکل (۵-۴): نمودار هیستریزیس مدل F-3 ۷۷

شکل (۵-۵): نمودار هیستریزیس مدل T-30-8-3 ۷۷

شکل (۵-۶): نمودار هیستریزیس مدل F-6 ۷۷

شکل (۵-۷): نمودار هیستریزیس مدل T-30-8-6 ۷۷

شکل (۵-۸): نمودار هیستریزیس مدل T-45-8-3 ۷۷

شکل (۵-۹): نمودار هیستریزیس مدل T-60-8-3 ۷۷

شکل (۵-۱۰): نمودار هیستریزیس مدل T-45-6-3 ۷۸

شکل (۵-۱۱): نمودار هیستریزیس مدل T-45-10-3 ۷۸

شکل (۵-۱۲): نمودار جذب انرژی نمونه‌های صاف در ضخامت‌های متفاوت ۷۸

شکل (۵-۱۳): نمودار جذب انرژی نمونه‌های موج‌دار با زاویه ۳۰ درجه در ضخامت‌های متفاوت ۷۹

شکل (۵-۱۴): نمودار هیستریزیس ضخامت‌های متفاوت ۷۹

شکل (۵-۱۵): نمودار جذب انرژی در ضخامت‌های متفاوت ۷۹

شکل (۵-۱۶): نمودار هیستریزیس ضخامت‌های متفاوت ۸۰

شکل (۵-۱۷): نمودار جذب انرژی در ضخامت‌های متفاوت ۸۰

- شکل (۵-۱۸): نمودار هیستریزیس ضخامت‌های متفاوت در ضخامت ۳ میلی‌متر..... ۸۱
- شکل (۵-۱۹): نمودار جذب انرژی در ضخامت‌های متفاوت در ضخامت ۳ میلی‌متر..... ۸۱
- شکل (۵-۲۰): نمودار میله‌ای جذب انرژی در زاویه‌های متفاوت در ضخامت ۳ میلی‌متر..... ۸۱
- شکل (۵-۲۱): نمودار هیستریزیس در زاویه‌های متفاوت در ضخامت ۶ میلی‌متر..... ۸۲
- شکل (۵-۲۲): نمودار جذب انرژی در زاویه‌های متفاوت در ضخامت ۶ میلی‌متر..... ۸۲
- شکل (۵-۲۳): نمودار میله‌ای جذب انرژی در زاویه‌های متفاوت در ضخامت ۶ میلی‌متر..... ۸۲
- شکل (۵-۲۴): نمودار هیستریزیس در زاویه‌های متفاوت در ضخامت ۹ میلی‌متر..... ۸۳
- شکل (۵-۲۵): نمودار جذب انرژی در زاویه‌های متفاوت در ضخامت ۹ میلی‌متر..... ۸۳
- شکل (۵-۲۶): نمودار میله‌ای جذب انرژی در زاویه‌های متفاوت در ضخامت ۹ میلی‌متر..... ۸۳
- شکل (۵-۲۷): نمودار هیستریزیس در نیم‌موج‌های متفاوت در ضخامت ۳ میلی‌متر..... ۸۴
- شکل (۵-۲۸): نمودار جذب انرژی در نیم‌موج‌های متفاوت در ضخامت ۳ میلی‌متر..... ۸۴
- شکل (۵-۲۹): نمودار هیستریزیس در نیم‌موج‌های متفاوت در ضخامت ۶ میلی‌متر..... ۸۵
- شکل (۵-۳۰): نمودار جذب انرژی در نیم‌موج‌های متفاوت در ضخامت ۶ میلی‌متر..... ۸۵
- شکل (۵-۳۱): نمایش تغییر مکان خارج از صفحه در مدل F-3..... ۸۷
- شکل (۵-۳۲): نمایش تغییر مکان خارج از صفحه در مدل T-30-8-3..... ۸۷
- شکل (۵-۳۳): نمایش تغییر مکان خارج از صفحه در مدل T-45-8-3..... ۸۷
- شکل (۵-۳۴): نمایش تغییر مکان خارج از صفحه در مدل T-60-8-3..... ۸۷
- شکل (۵-۳۵): نمایش تغییر مکان خارج از صفحه در مدل T-45-6-3..... ۸۷
- شکل (۵-۳۶): نمایش تغییر مکان خارج از صفحه در مدل T-45-10-3..... ۸۷
- شکل (۵-۳۷): نمایش کانتور تنش فون میسز در مدل F-3..... ۸۸
- شکل (۵-۳۸): نمایش کانتور تنش فون میسز در مدل T-30-8-3..... ۸۸
- شکل (۵-۳۹): نمایش کانتور تنش فون میسز در مدل T-45-8-3..... ۸۸
- شکل (۵-۴۰): نمایش کانتور تنش فون میسز در مدل T-60-8-3..... ۸۸
- شکل (۵-۴۱): نمایش کانتور تنش فون میسز در مدل T-45-6-3..... ۸۸
- شکل (۵-۴۲): نمایش کانتور تنش فون میسز در مدل T-45-10-3..... ۸۸
- شکل (۵-۴۳): نمایش کانتور کرنش فون میسز در مدل F-3..... ۸۹

- شکل (۴۴-۵): نمایش کانتور کرنش فون میسز در مدل T-30-8-3..... ۸۹
- شکل (۴۵-۵): نمایش کانتور کرنش فون میسز در مدل T-45-8-3..... ۸۹
- شکل (۴۶-۵): نمایش کانتور کرنش فون میسز در مدل T-60-8-3..... ۸۹
- شکل (۴۷-۵): نمایش کانتور کرنش فون میسز در مدل T-45-6-3..... ۸۹
- شکل (۴۸-۵): نمایش کانتور کرنش فون میسز در مدل T-45-10-3..... ۸۹
- شکل (۴۹-۴): دیوار با یک سخت کننده افقی [H] با یک سخت کننده قائم [V] با یک سخت کننده قائم و افقی [V+H]..... ۹۰
- شکل (۵۰-۴): دیوار با دو سخت کننده قائم [2V] با دو سخت کننده افقی [2H] با دو سخت کننده قائم و افقی [2V+2H]..... ۹۰
- شکل (۵۱-۵): دیوار برشی فولادی سخت شده با ضخامت ۱ میلیمتر..... ۹۱
- شکل (۵۲-۵): دیوار برشی فولادی سخت شده با ضخامت ۲ میلیمتر..... ۹۱
- شکل (۵۳-۵): دیوار برشی فولادی سخت شده با ضخامت ۴ میلیمتر..... ۹۱
- شکل (۵۴-۵): دیوار برشی فولادی سخت شده با ضخامت ۶ میلیمتر..... ۹۲
- شکل (۵۵-۵): دیوار برشی فولادی سخت شده با ضخامت ۸ میلیمتر..... ۹۲
- شکل (۵۶-۵): دیوار برشی فولادی سخت شده با ضخامت ۱۰ میلیمتر..... ۹۲
- شکل (۵۷-۵): منحنی های بار درصد تغییر مکان نسبی دیوار برشی فولادی بدون قاب محیطی در ضخامت های متفاوت ۹۳

۶- جمع بندی و ارائه پیشنهادات جهت مطالعات آتی

- شکل (۱-۶): مقایسه نمودار جذب انرژی ورق موج دار و صاف در زاویه ۳۰ درجه و ضخامت های متفاوت..... ۹۷
- شکل (۲-۶): مقایسه نمودار جذب انرژی ورق موج دار و صاف در زاویه ۳۰ درجه و ضخامت های متفاوت..... ۹۷
- شکل (۳-۶): نمایش نمودار میله ای ورق موج دار در زاویه ها و ضخامت های متفاوت در دوران ۰/۰۳۶ رادیان..... ۹۸
- شکل (۴-۶): نمایش نمودار میله ای ورق موج دار در زاویه ۴۵ درجه و ضخامت های ۳ و ۶ میلی متر با نیم موج های متفاوت در دوران ۰/۰۳۶ رادیان..... ۹۸

شکل (۵-۶): نمودار میله‌ای جذب انرژی نمونه صاف و موج‌دار در زوایا و تعداد نیم‌موج‌های

متفاوت در ضخامت ۳ میلی‌متر ۹۹

شکل (۶-۶): نمودار میله‌ای جذب انرژی نمونه صاف و موج‌دار در زوایا و تعداد نیم‌موج‌های

متفاوت در ضخامت ۶ میلی‌متر ۹۹

پیوست (۱)

شکل (پ-۱): نمودار هیستریزیس مدل F-2 ۱۰۴

شکل (پ-۲): نمودار هیستریزیس مدل T-30-8-2 ۱۰۴

شکل (پ-۳): نمودار هیستریزیس مدل F-4 ۱۰۴

شکل (پ-۴): نمودار هیستریزیس مدل T-30-8-4 ۱۰۴

شکل (پ-۵): نمودار هیستریزیس مدل F-5 ۱۰۴

شکل (پ-۶): نمودار هیستریزیس مدل T-30-8-5 ۱۰۴

شکل (پ-۷): نمودار هیستریزیس مدل F-7 ۱۰۵

شکل (پ-۸): نمودار هیستریزیس مدل T-30-8-7 ۱۰۵

شکل (پ-۹): نمودار هیستریزیس مدل F-8 ۱۰۵

شکل (پ-۱۰): نمودار هیستریزیس مدل T-30-8-8 ۱۰۵

شکل (پ-۱۱): نمودار هیستریزیس مدل F-9 ۱۰۵

شکل (پ-۱۲): نمودار هیستریزیس مدل T-30-8-9 ۱۰۵

شکل (پ-۱۳): نمودار هیستریزیس مدل F-10 ۱۰۶

شکل (پ-۱۴): نمودار هیستریزیس مدل T-30-8-10 ۱۰۶

شکل (پ-۱۵): نمودار هیستریزیس مدل T-45-6-6 ۱۰۶

شکل (پ-۱۶): نمودار هیستریزیس مدل T-45-10-6 ۱۰۶

شکل (پ-۱۷): نمودار هیستریزیس مدل T-45-8-6 ۱۰۶

شکل (پ-۱۸): نمودار هیستریزیس مدل T-60-8-6 ۱۰۶

شکل (پ-۱۹): نمودار هیستریزیس مدل T-45-8-9 ۱۰۷

شکل (پ-۲۰): نمودار هیستریزیس مدل T-60-8-9 ۱۰۸

فهرست جداول

۱- دیوارهای برشی فولادی

- جدول (۱-۱): تاریخچه استفاده از دیوارهای برشی فولادی و رفتار آنها طی زلزله‌های اخیر ۹
- جدول (۲-۱): مطالعات آزمایشگاهی و تحلیلی و نتایج حاصل از آنها ۱۰
- جدول (۳-۱): مقایسه دیوارهای برشی فولادی سخت شده و سخت نشده ۱۵
- جدول (۴-۱): دسته‌بندی زوال‌های یک قاب دارای دیوار برشی فولادی ۲۰
- جدول (۵-۱): ترتیب یا اهمیت زوال‌ها ۲۱

۲- ورق‌های فولادی موج‌دار

۳- دیوارهای برشی فولادی با ورق موج‌دار

- جدول (۱-۳): مطالعات آزمایشگاهی و تحلیلی دیوار برشی فولادی با ورق موج‌دار و نتایج حاصل از آنها ۳۷

۴- نحوه مدل‌سازی دیوار برشی فولادی در نرم‌افزار ANSYS و اعتبارسنجی مدل‌ها

- جدول (۱-۴): مقایسه نتایج آزمایشگاهی و اجزای محدود ۶۶

۵- مطالعه پارامتریک دیوار برشی فولادی با ورق موج‌دار با استفاده از روش اجزای

محدود

- جدول (۱-۵): مشخصات نمونه‌ها ۷۱
- جدول (۲-۵): اندازه عرض زیرصفحه‌ها در زاویه‌ها و نیم‌موج‌های متفاوت ۷۱

۶- جمع‌بندی و ارائه پیشنهادات جهت مطالعات آتی

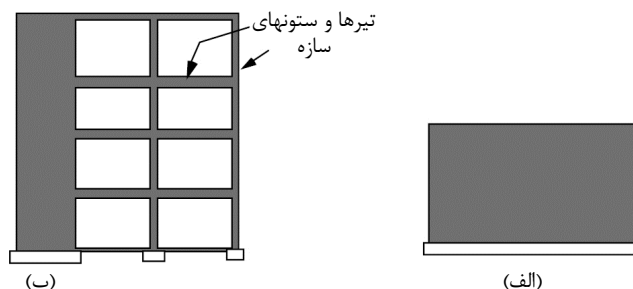
۱- دیوارهای برشی فولادی^۱



¹ Steel Shear Walls

۱-۱- مقدمه

دیوار برشی، یکی از سیستم‌های باربر جانبی لرزه‌ای می‌باشد. در این سیستم، نوع رفتار سازه‌ای، خمشی و برشی بوده و رفتار غالب آن باتوجه به شکل آن و نحوه قرارگیری در سیستم ساختمان می‌تواند خمشی و یا برشی باشد. همانطوری که در شکل (۱-۱) آورده شده‌است، در صورتیکه نسبت ارتفاع کل دیوار به عرض آن بزرگتر از سه باشد، دیوار برشی، طره‌ای یا لاغر و در صورتیکه نسبت ارتفاع کل دیوار به عرض آن کوچکتر از یک و نیم باشد دیوار برشی، کوتاه یا چاق می‌گردد. در دیوارهای برشی لاغر، رفتار خمشی و در دیوارهای برشی کوتاه، رفتار برشی حاکم است. در نسبت‌های ارتفاع به عرض مابین یک و نیم و سه، رفتار خمشی و برشی توأمان می‌باشند.

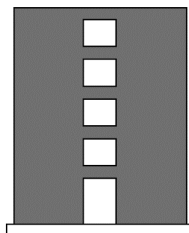


شکل (۱-۱): انواع دیوارهای برشی؛ الف-دیوار برشی کوتاه یا چاق، ب-دیوار برشی طره‌ای یا لاغر. [۱]

بخاطر سختی زیاد دیوارهای برشی، معمولاً درصد بالایی از برش طبقه، توسط این سیستم باربر جانبی، تحمل می‌گردد. همچنین این سیستم باربر، از طریق تغییرشکل‌های خمیری برشی، انرژی لرزه‌ای را مستهلک می‌نماید. به این دلایل است که این دیوارها، "دیوار برشی" خوانده می‌شوند. در واقع کلمه برشی به این معنا نمی‌باشد که دیوار همیشه دارای رفتار برشی است، بلکه برش، پارامتر اصلی طراحی لرزه‌ای این سیستم می‌باشد.

دیوارهای برشی وقتی که در سیستم سازه قرار می‌گیرند، می‌توانند با دیوارهای برشی دیگر و یا المان‌های دیگر سازه ترکیب گردند. نوع رایجی از دیوارهای برشی که عمدتاً در سازه‌های بتنی استفاده

می‌شود، دیوارهای برشی همبند^۱ (کوپله) هستند. وجود اجزاء متصل‌کننده دیوارها که تیر همبند^۲ نامیده می‌شود، علاوه بر بسیج کردن مقاومت محوری دیوارها در باربری جانبی، بسته به سختی نسبی دیوار و تیر همبند، می‌تواند شکل تغییرشکل دیوار را نیز از حالت انحنای ساده، به انحنای مرکب تغییر دهد. یک نمونه دیوار برشی همبند در شکل (۲-۱)، نشان داده شده است.



شکل (۲-۱): دیوار برشی همبند. [۱]

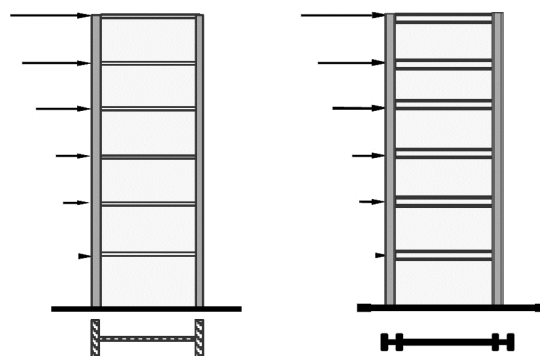
۲-۱- دیوار برشی فولادی

در صورتیکه در یک سازه فولادی بوسیله یک دیوار مناسب فولادی، جریان برشی میان دو ستون مجاور برقرار گردد ترکیب حاصل دیوار برشی فولادی خواهد بود.

ترکیب حاصل از صفحه جان و ستون‌های اطراف در دیوار برشی فولادی، با مقطع یک تیرورق قابل مقایسه است. دیوارهای برشی فولادی را می‌توان از نظر رفتار مکانیکی شبیه یک تیر طره قائم فرض نمود. وظیفه اصلی این طره قائم تحمل برش‌ها و لنگرهای حاصل از بارهای جانبی است. با مقایسه مقطع یک دیوار برشی با سطح مقطع یک تیر این نکته حاصل می‌شود که اعضای کنار دیوار تحت اثر لنگرهای حاصل از بارهای جانبی عمدتاً تحت اثر نیروهای محوری و خود دیوار نیز تحت اثر برش‌های حاصل از بارهای جانبی عمدتاً تنش‌های برشی را تحمل می‌نماید.

¹ Coupled

² Coupling Beam



شکل (۳-۱): مقایسه دیوار برشی فولادی (الف) و تیر ورق فولادی (ب). [۲]

در دیوارهای برشی فولادی، ستون‌ها نقش بال‌های تیروورق و دیوار برشی، نقش جان تیروورق را ایفا کرده و تیرهای طبقات نیز مانند سخت‌کننده‌های عرضی در تیروورق‌ها عمل می‌نمایند.

تفاوت اصلی رفتاری تیر ورق‌ها و دیوارهای برشی، مربوط به عملکرد برشی آنها می‌شود. تیروورق‌ها در حالت بارگذاری استاتیکی، باید برش و لنگر حاصل از بارها را تحمل نمایند. در این حالت کافی است که برش و لنگر حاصل از تحلیل، از ظرفیت برشی و خمشی تیر کمتر باشد. ظرفیت برشی تیروورق می‌تواند، از ظرفیت کمانشی آن و با اعمال ضرایب اطمینان، بدست آید و در واقع رفتار تیر ورق، فرای بارهای طراحی، مورد بحث نمی‌باشد. ولی در دیوارهای برشی در حالت بارگذاری زلزله، دیوار باید در برش، از ظرفیت تغییر شکل‌های خمیری و یا شکل‌پذیری برشی برخوردار باشد. بنابراین در دیوارهای برشی، فقط عامل مقاومت در تعیین کفایت جان دخیل نمی‌باشد، بلکه رفتار پس‌کمانشی و ظرفیت تغییر شکل‌های خمیری نیز از پارامترهای طراحی محسوب می‌شوند. از دیدگاه آیین‌نامه‌های عملکردی، برش در تیروورق کنترل‌شونده توسط نیرو، ولی در دیوارهای برشی، کنترل‌شونده توسط تغییر مکان می‌باشد. تفاوت‌های دیگر دیوارهای برشی فولادی و تیروورق‌ها عبارتند از:

- (۱) تیروورق‌ها به ندرت تحت اثر نیروهای محوری قرار می‌گیرند، در حالیکه دیوارهای برشی معمولاً تحت اثر بارهای محوری ثقلی هستند. این بارها به طور عمده توسط ستون‌های اطراف تحمل می‌شوند. بنابراین تأثیرات $p - \Delta$ ستون‌های اطراف دیوار بر پایداری کل سیستم دیوار برشی فولادی، باید در تحلیل در نظر گرفته شود.

۲) بال‌های تیروورق‌ها به‌طور معمول، ورق‌هایی با سختی خمشی اندک در صفحهٔ جان هستند. در حالیکه در دیوارهای برشی، ستون‌ها که نقش بال‌ها را ایفا می‌نمایند، در صفحهٔ دیوار از سختی و مقاومت خمشی بالایی برخوردارند. این اختلاف در وهلهٔ اول در عرض و زاویهٔ ناحیهٔ حوزهٔ کشش مؤثر است، و به‌طور کلی شرایط سرحدی دیوار برشی را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

۳) سخت‌کننده‌ها در تیروورق‌ها، ورق‌هایی هستند که به یک طرف یا دو طرف جان جوش می‌شوند. در دیوارهای برشی فولادی تیرهای کف در تراز طبقات نقش سخت‌کننده‌ها را ایفا می‌نمایند. تیرهای کف به همراه دیافراگم کف، نسبت به سخت‌کننده‌های تیروورق‌ها بسیار سخت‌تر و مقاوم‌تر هستند. بنابراین شرایط مرزی مربوط به کمانش ورق بهبود می‌یابد و شرط مرزی تقریباً گیردار برای ورق فراهم می‌شود. همچنین تیرهای سخت و قوی کف تکیه‌گاه مناسبی برای ایجاد حوزهٔ کششی در ورق دیوار می‌باشند.

۴) تیروورق‌ها عمدتاً تحت بارهای یکنوا و کم‌دامنه بررسی شده‌اند، در حالیکه دیوارهای برشی تحت چرخه‌های خمیری شدیدی قرار می‌گیرند.

هیچ‌یک از تفاوت‌های ذکر شده به طراحی غیرایمن دیوارهای برشی منجر نمی‌شوند و استفاده از روش‌های رایج در طراحی تیروورق‌ها در مورد دیوارهای برشی معمولاً محافظه‌کارانه است.

۱-۲-۱- انواع دیوارهای برشی فولادی

در حالت کلی می‌توان دیوارهای برشی فولادی را به سبب ضخامت اندک دیوار برحسب غالب بودن کمانش ورق یا جاری شدن برشی به دو دسته تقسیم‌بندی نمود :

۱) دیوارهای برشی سخت‌شده^۱، دیوارهایی هستند که با بکارگیری سخت

کننده‌های افقی و عمودی کمانش‌های ورق کنترل‌شده و مقاومت کمانشی ورق

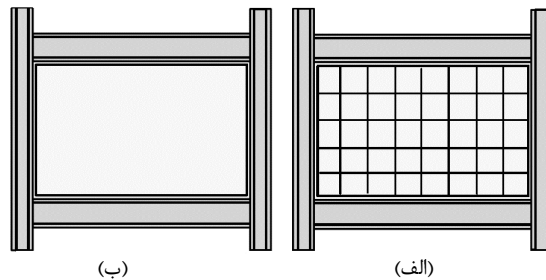
افزایش می‌یابد. شکل (۴-۱) - الف،

۲) دیوارهای برشی سخت‌نشده^۲، دیوارهایی هستند که هیچ‌گونه سخت‌کننده‌ای

سخت‌کننده‌ای در آنها بکار گرفته نمی‌شود. با توجه به اینکه کنترل کمانش

الاستیک ورق از طریق افزایش ضخامت اقتصادی نمی‌باشد، معمولاً رفتار

پس‌کمانشی ورق، عامل تعیین‌کننده مقاومت آنها می‌باشد.



شکل (۴-۱): دیوار برشی فولادی سخت شده (الف) و دیوار برشی فولادی سخت نشده (ب). [۳]

۲-۲-۱- مزایای استفاده از دیوارهای برشی فولادی

۱) دیوار برشی فولادی سیستم باربر جانبی بسیار کارآمد و در عین حال اقتصادی

می‌باشد. در صورتیکه به‌طور مناسبی طراحی و جزئیات‌بندی گردد، می‌تواند

رفتار بسیار شکل‌پذیری از خود نشان داده و نسبت به سیستم‌های دیگر از

توانایی استهلاک انرژی لرزه‌ای بالاتری برخوردار باشد.

۲) دیوار برشی فولادی دارای سختی اولیه مناسبی است و در محدود کردن

جابجایی نسبی سازه، کارآمد می‌باشد.

¹ Stiffened

² Un-stiffened

- ۳) در مقایسه با دیوارهای برشی بتنی سبک‌تر بوده و در نتیجه نیروهای محوری حاصل از وزن مرده و نیز نیروهای زلزله، کاهش می‌یابند.
- ۴) به لحاظ امکان پیش‌ساختگی در اعضاء فولادی، عملیات نصب و همچنین کنترل کیفیت اجرا می‌تواند با سهولت و کیفیت مناسبی انجام گردد.
- ۵) از دید مسائل معماری و به لحاظ ضخامت اندک، دیوارهای برشی فولادی مخصوصاً در طبقات پایین سازه از مطلوبیت بالایی برخوردار هستند.
- ۶) در مقایسه با دیوارهای بتنی، امکان استفاده از آنها در کاربردهای مقاوم‌سازی راحت‌تر و سریع‌تر می‌باشد.
- ۷) امکان نصب دیوار بعد از اعمال بارگذاری‌های ثقیلی سازه و در نتیجه کاهش تنش‌های محوری برای افزایش شکل‌پذیری دیوار، وجود دارد.
- ۸) بعد از زلزله‌های شدید، با هزینه بسیار کمتری نسبت به دیوارهای بتنی، می‌توان آنها را تعمیر نمود.
- ۹) برخلاف دیوارهای بتنی بکارگرفته شده در سازه‌های فولادی، به سبب یکنواختی بین مصالح دیوار و اعضاء پیرامونی آن (ستون‌ها)، هیچ‌گونه نگرانی‌ای در مورد اندرکنش دیوار و اجزاء سازه، وجود ندارد.

۱-۲-۳- معایب استفاده از دیوارهای برشی

- ۱) باتوجه به ضخامت اندک ورق فولادی، در برابر آتش‌سوزی، خوردگی و هرگونه عامل خارجی دیگر، آسیب‌پذیر می‌باشد.
- ۲) در دیوارهای برشی سخت نشده که توسط مکانیزم حوزه کششی قطری به جذب انرژی می‌پردازند، کماتش دیوار که به تغییرشکل‌های خارج صفحه می‌انجامد، ممکن است سبب ایجاد مسائل بهره‌برداری گردد.

۳) در دیوارهای برشی سخت شده جوش کردن سخت‌کننده‌ها به دیوار فولادی کاری پرهزینه و زمان‌بر می‌باشد و اثرات حرارتی مربوط به جوشکاری باعث تغییر خصوصیات مکانیکی فولاد استفاده شده در دیوار می‌شود.

۱-۳- تاریخچه استفاده از دیوارهای برشی فولادی و رفتار آنها طی زلزله‌های

اخیر

از دهه ۱۹۷۰ تاکنون، دیوارهای برشی به عنوان سیستم باربر جانبی اصلی، در ساختمان‌های پیشرفته و مهم متعددی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. طی دهه هفتاد، دیوارهای برشی سخت شده در ساخت و سازهای جدید ژاپن و بهسازی لرزه‌ای در ایالات متحده مورد استفاده قرار گرفتند. در دهه‌های هشتاد و نود، دیوارهای برشی سخت نشده در طراحی ساختمان‌هایی در آمریکا و کانادا بکار برده شدند. در مواردی نیز دیوار برشی فولادی به طرق مختلف با بتن ترکیب شده و دیوار برشی مرکب اجرا شده است. در جدول (۱-۱) به صورت خلاصه، تعدادی از ساختمان‌های دارای دیوار برشی فولادی معرفی گردیده است.

جدول (1-1): تاریخچه استفاده از دیوارهای برشی فولادی و رفتار آنها طی زلزله‌های اخیر [۲]

مشخصات ساختمان	محل	سال ساخت	نوع دیوار فولادی	سیستم باربر جهت طولی	سیستم بابر جهت عرضی	ملاحظات
ساختمان ۲۰ طبقه اداری نیپتون	توکيو - ژاپن	۱۹۷۰	با سخت‌کننده از نوع ناودانی	ترکیب دیوار برشی فولادی و قاب خمشي	دیوار برشی فولادی	بارهای ثقلی به دیوارهای برشی منتقل نمی‌شوند و سخت‌کننده‌ها از کماتش جلوگیری می‌کنند.
ساختمان ۵۲ طبقه بلندمرتبه	توکيو - ژاپن	۱۹۷۸	با سخت‌کننده‌های قائم در یک سمت و افقی در سمت دیگر دیوار	قاب خمشی پیرامونی و دیوار برشی فولادی	قاب خمشی پیرامونی و دیوار برشی فولادی	طبق بررسی‌ها، نسبت به قاب مهاربندی شده اقتصادی‌تر بوده است. باتوجه به روانداری ساخت اتصال جوشی دیوار به قاب‌های اطراف ترجیح داده شده است
ساختمان هتل ۳۰ طبقه	دالاس - تگزاس	۱۹۸۸	سخت نشده	قاب مهاربندی شده	دیوار برشی فولادی	برای بار باد طراحی شده است. دیوارها، بار ثقلی را به‌صورت مؤثری تحمل می‌کنند.
بیمارستان شش طبقه سیلمار (Sylmar)	لوس‌آنجلس - کالیفرنیا	بعد از زلزله ۱۹۷۱	با سخت‌کننده‌های ناودانی شکل	دیوار برشی بتنی در ۲ طبقه پایین و دیوار برشی فولادی در چهار طبقه بالا	دیوار برشی بتنی در ۲ طبقه پایین و دیوار برشی فولادی در چهار طبقه بالا	طی زلزله نورتریج، به‌علت سختی زیاد سازه و پیروید پایین آن، به اجزای غیرسازه‌ای و تأسیسات خسارت زیادی وارد شده است. تیرها به دیوار جوش شده‌اند و نقش سخت‌کننده دارند. کماتش‌های موضعی توسط سخت‌کننده‌ها کنترل می‌شوند. عمل حوزه کشش در نظر گرفته نشده بود.
ساختمان ۳۵ طبقه اداری	کوبه - ژاپن	۱۹۸۸	در سه طبقه زیرزمین بتن مسلح طبقه اول و دوم دیوار برشی مرکب و در بقیه طبقات دیوار برشی فولادی	در سه طبقه زیرزمین بتن مسلح طبقه اول و دوم دیوار برشی مرکب و در بقیه طبقات دیوار برشی فولادی	در سه طبقه زیرزمین بتن مسلح طبقه اول و دوم دیوار برشی مرکب و در بقیه طبقات دیوار برشی فولادی	تحت زلزله کوبه قرار گرفته و آسیب‌ها جزئی بوده‌اند. در طبقه ۲۶ به‌علت کماتش موضعی دیوار ۲۲۵ میلی در جهت شمالی و ۳۵ میلی‌متر در جهت غربی جایجایی دائمی ایجاد شد. تحلیل‌های غیرخطی بین طبقات ۲۴ تا ۲۸ طبقه نرم نشان می‌دهند.
ساختمان ۳۱ طبقه با دیوار برشی ساخته شده از LYS (Low Yield Steel)	ژاپن	۱۹۹۸	سخت‌شده با سخت‌کننده‌های افقی یا عمودی	دیوار برشی فولادی در اطراف هسته آسانسور و پله‌ها	دیوار برشی فولادی در اطراف هسته آسانسور و پله‌ها	از فولاد با تنش حد تسلیم پایین (LYS) که تنش حد جاری شدن آن نصف فولاد A۳۶ و حداقل تغییرشکل آن ۲ برابر فولاد A۳۶ است، استفاده شده است. وضعیت استهلاک انرژی بهبود یافته است. پانل‌ها با پیچ به تیرها و ستون‌های اطراف متصل شده‌اند.
ساختمان ۵۲ طبقه مسکونی	سانفرانسیسکو - کالیفرنیا	۲۰۰۱	سخت‌نشده هم‌بند	چهار ستون بزرگ پر شده با بتن که با تیرهای هم‌بند و دیوارهای برشی فولادی به یکدیگر متصل شده‌اند.	چهار ستون بزرگ پر شده با بتن که با تیرهای هم‌بند و دیوارهای برشی فولادی به یکدیگر متصل شده‌اند.	بار ثقلی از طریق ۴ ستون با مقطع دایره‌ای پر شده از بتن در وسط سازه و ۱۶ ستون مشابه کوچکتر در محیط ساختمان، تحمل می‌گردد و ستون‌های I - شکل در لبه دیوار برشی فولادی در باربری ثقلی مشارکت نمی‌نمایند.
ساختمان ۲۲ طبقه اداری	سیاتل - واشنگتون	۲۰۰۱	سخت‌نشده هم‌بند	ستونهای بزرگ پر شده با بتن که با تیرهای هم‌بند و دیوارهای برشی فولادی به یکدیگر متصل شده‌اند.	قاب فولادی مهاربندی شده	از فناوری و ترکیب مشابه ساختمان ۵۲ طبقه در آن استفاده شده‌است و مانند این ساختمان، دیواربرشی فولادی در کارخانه ساخته شده و در محل پیچ می‌شود تنها تیر هم‌بند و دیوار برشی به ستون‌های مرکب ثقلی جوش کارگاهی می‌شوند.

۴-۱- مطالعات آزمایشگاهی و تحلیلی و نتایج حاصل از آنها

تحقیقات آزمایشگاهی و تحلیلی متعددی در ایالات متحده، ژاپن، کانادا و انگلستان بر روی دیوارهای برشی فولادی انجام شده است. هدف از این تحقیقات، مطالعه رفتار واقعی دیوارهای برشی، تعیین حالات زوال و شناخت نقاط ضعف پیش‌بینی نشده و بدست آوردن پارامترهای طراحی لرزه‌ای مانند: ضرایب شکل‌پذیری و اضافه مقاومت می‌باشد.

در این مطالعات عمدتاً از بارگذاری شبیه دینامیکی چرخه‌ای بهره گرفته شده و نمودار رفتار چرخه‌ای دیوار که به‌طور کارآمدی بیانگر رفتار لرزه‌ای دیوارهای برشی است، رسم گردیده است. برای بیان نوع آزمایشات و مسائل بررسی شده، در جدول (۱-۲) به‌صورت خلاصه پارامترهای اساسی این مطالعات بررسی شده‌اند.

۵-۱- نحوه انتخاب میان دیوارهای برشی فولادی سخت‌شده یا سخت‌نشده

دیوارهای برشی فولادی را می‌توان به عنوان تنها سیستم باربر جانبی سازه و یا به همراه قاب خمشی به‌صورت دوگانه بکار برد. در حالت دوگانه، قاب خمشی هم می‌تواند در صفحه دیوار برشی قرار گیرد و هم می‌تواند در صفحه‌ای موازی آن در نظر گرفته شود. قاب خمشی به عنوان پشتیبان سیستم اصلی باربر جانبی سازه یعنی دیوار برشی فولادی عمل خواهد کرد. همانطوری که در بخش ۱-۲-۱ ذکر شد، دیوارهای برشی فولادی می‌توانند از دو نوع سخت‌شده و سخت‌نشده باشند. کلیه دیوارهای برشی فولادی ساخته شده در ژاپن، از نوع سخت‌شده می‌باشند. در ایالات متحده نیز در استفاده‌های ابتدایی که به منظور مقاوم‌سازی صورت گرفت، از انواع سخت‌شده استفاده شد. با این حال، در دهه‌های اخیر در آمریکا و کانادا، دیوارهای برشی به‌صورت سخت‌نشده طراحی شده‌اند. در انتخاب میان نوع سخت‌شده و سخت‌نشده عواملی مانند: کارایی لرزه‌ای، مسائل و خواست‌های معماری و کاربری، اقتصاد طرح، سهولت ساخت، حمل و نصب باید در نظر گرفته شود. به منظور مقایسه این دو نوع دیوار برشی فولادی سخت‌شده و سخت‌نشده، در جدول (۱-۳)، خصوصیت‌های کلیدی هر دو با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

جدول (۲-۱): مطالعات آزمایشگاهی و تحلیلی و نتایج حاصل از آنها [۲][۳][۴].

ردیف	مکان آزمایش	محقق یا محققین	سال انجام	نوع تحقیق	عنوان تحقیق یا مشخصات نمونه آزمایشگاهی	نوع آزمایش یا تحلیل	نتایج و سایر ملاحظات
۱	دانشگاه آلبرتا - کانادا	تیملر و کولاک (Timler & Kulak)	۱۹۸۳	آزمایشگاهی	نمونه با ابعاد کلی ۳۷۵×۵۰ متر، نمونه دو طبقه بار در طبقه میانی و تکیه‌گاه‌ها در پایین و بالای نمونه	یکنواخت استاتیکی	نمودار بار جلبجایی رسم شد. این نمودار رفتار شکل‌پذیر (شکل‌پذیری بیش از چهار) مناسب و اضافه مقاومت قابل ملاحظه‌ای را نشان می‌داد.
۲	دانشگاه آلبرتا - کانادا	تیملر و کولاک (Timler & Kulak)	۱۹۸۳	آزمایشگاهی	نمونه با ابعاد کلی ۲۷۵×۴۴ متر، نمونه دو طبقه بار در طبقه میانی و تکیه‌گاه‌ها در پایین و بالای نمونه	شبه استاتیکی چرخش‌های	نمودار بار جلبجایی چرخش‌های مربوط به پاسخ چرخش‌های رسم شد. نتایج آزمایش ضریب اضافه مقاومت بیش از دو و ضریب شکل‌پذیری بیش از ۳/۵ را نشان می‌داد.
۳	دانشگاه آلبرتا - کانادا	توربرن و همکاران (Thorburn et al.)	۱۹۸۳	تحلیلی	بدست آوردن فرمول برای زلویه ناحیه حوزة کشش	—	با نتایج آزمایش انطباق خوبی داشت.
۴	دانشگاه آلبرتا - کانادا	دراپور، کولاک و همکاران (Driver et al.)	۱۹۹۶	آزمایشگاهی	نمونه چهار طبقه دیوار برشی با ابعاد کلی ۳۰۵×۷/۵۵ متر، نمایانگر یک سیستم دو گانه قاب خمشی ویژه و دیوار برشی فولادی با مقیاس یک به دو.	شبه استاتیکی چرخش‌های	زوال نمونه در ستون سمت چپ در ناحیه اتصال پای ستون و به دلیل تنش‌های حرارتی جوش و کماتش موضعی ستون در بارگذاری چرخش‌های اتفاق افتاد. نتایج با نتایج بدست آمده از تحلیل اجزای محدود مقایسه شدند. حتی با وجود زوال زودرس نمونه، ضریب شکل‌پذیری برابر شش و ضریب اضافه مقاومت ۱/۳ بدست آمد.
۵	دانشگاه آلبرتا - کانادا	دراپور، کولاک و همکاران	۱۹۹۸	تحلیل عددی	مدل‌سازی با المان پوسته و ارئه مدل ساده تحلیلی	تحلیل اجزاء محدود	مقایسه نتایج با نتایج آزمایشگاهی وارائه مدل میله‌های فقط کششی ۴۵ درجه برای مدل‌سازی سریع و آسان دیوارهای برشی سخت‌نشده
۶	دانشگاه بریتیش کلمبیا - کانادا	لوبل (Lubell) رضایی (Rezai)	۱۹۹۷ ۱۹۹۹	آزمایشگاهی	دو نمونه یک طبقه که در تیرهای بالا و پایین قاب خمشی خود با یکدیگر اختلاف داشتند	شبه استاتیکی چرخش‌های	ضریب شکل‌پذیری برابر ۶ و ضریب اضافه مقاومت برابر ۱/۵ بدست آمد در هر دو نمونه، ورق فولادی دیوار برشی به قاب خمشی فولادی، فرصت بسیج شدن مقاومت را ندهد و نیز چرخشی گره کلهش یافته بود.
۷	دانشگاه بریتیش کلمبیا - کانادا	لوبل (Lubell) رضایی (Rezai)	۱۹۹۷ ۱۹۹۹	آزمایشگاهی	سازه چهار طبقه با ابعاد کلی ۰/۹×۱۲/۰ متر به عنوان مدل با مقیاس ۳۰ درصد از هسته باربر یک ساختمان مسکونی. ابعاد هر طبقه با ابعاد نمونه‌های یک طبقه مساوی بودند. قاب‌ها خمشی و اعضاء قاب، نورد شده انتخاب شده بودند.	میز لرزان	در هر یک از چهار طبقه ضریب شکل‌پذیری برابر ۱/۵ حاصل گردید و ضریب اضافه مقاومت کل برابر ۱/۳ بدست آمد. زوال کل نمونه در اثر گسترش خمیری شدن دیوار به ستون‌های پیرامونی، ایجاد گردید.
۸	ژاپن	تاکاناشی و همکاران (Takanashi et al.)	۱۹۷۳	آزمایشگاهی	۱۲ نمونه یک طبقه با ابعاد کلی ۰/۹×۲/۱ متر و دو نمونه دو طبقه. ضخامت فولاد دیوارها بین ۲۳ تا ۴/۵ میلی‌متر بودند. مقیاس در حدود یک به چهار بود. نمونه‌های دو طبقه تمام مقیاس و یکی از نمونه‌ها با باز شو در نظر گرفته شده بود.	استاتیکی - یکنواخت	مقاومت جاری شدن با معیار فون میزز انطباق داشته و مدل‌سازی براساس تئوری تیر، برای محاسبه سختی و مقاومت دیوار برشی سخت شده، کافی تلقی شد.

ادامه جدول (۱-۲): مطالعات آزمایشگاهی و تحلیلی و نتایج حاصل از آنها

ردیف	مکان آزمایش	محقق یا محققین	سال انجام	نوع تحقیق	عنوان تحقیق یا مشخصات نمونه آزمایشگاهی	نوع آزمایش یا تحلیل	نتایج و سایر ملاحظات
۹	ژاپن	یامادا (Yamada)	۱۹۹۲	آزمایشگاهی	دو نمونه دیوار برشی فولادی سخت شده با ابعاد کلی ۰/۶×۱/۲ متر و با ضخامت‌های ۱/۲ و ۲/۳ میلی‌متر. قاب پیرامونی قاب خمشی فولادی مدفون در مقطع بتنی مستطیلی بود و بارگذاری در راستای قطر نمونه انجام گرفت.	استاتیکی یکنواخت	رفتار نمونه کاملاً شکل‌پذیر بوده و ناحیه حوزة کششی، در راستای قطر نمونه تشکیل شده و زوال، به دلیل شکست پی قاب پیرامونی صورت گرفت.
۱۰	ژاپن	سوگی و یامادا (Sugii & Yamada)	۱۹۹۶	آزمایشگاهی	۱۴ نمونه آزمایشی دوطبقه با مقیاس یک به ده، مورد بررسی قرار گرفتند. قاب پیرامونی قاب صلب فولادی مدفون در بتن بوده است.	شبه استاتیکی چرخه‌ای و استاتیک یکنواخت	نتایج آزمایشات شبه‌استاتیکی چرخه‌ای رفتار شکل‌پذیر مناسبی را نشان داده و در تمام نمونه‌ها، به‌علت کماتش ناحیه فشاری در نمودار چرخه‌ای جمع‌شدگی (pinching) وجود دارد.
۱۱	ژاپن	توری و همکاران (Torii et. al.)	۱۹۹۶	تحلیلی	استفاده از فولاد با حد جاری شدن پایین در دیوارهای برشی فولادی ساختمانهای بلندمرتبه	ایده‌پردازی	تحقیقات زیادی در ژاپن در این رابطه صورت گرفته و تلاش می‌شود که با این کار پاسخ لرزه‌ای بهبود داده شود و این ایده در ساخت ساختمان‌های بلندمرتبه بکار برده شده است.
۱۲	ژاپن	ناکاشیما و همکاران (Nakashima et. al.)	۱۹۹۴ تا ۱۹۹۵	آزمایشگاهی	پانل‌های فولادی ساخته شده از فولاد با حد جاری شدن پایین (حد جاری شدن نصف فولاد نوع A۳۶ و کرنش نهایی دوبرابر فولاد نوع A۳۶). این پانل‌های یک طبقه در انواع سخت‌شده و سخت نشده بوده و ابعاد کلی آنها ۱/۲×۱/۲ متر با ضخامت ۶ میلی‌متر در نظر گرفته شده بود.	شبه‌استاتیکی چرخه‌ای	این فولاد در برابر بارهای چرخه‌ای رفت و برگشتی، حلقه‌های رفتار چرخه‌ای مناسبی داشته و توانایی اتلاف انرژی بالایی از خود نشان داده است. با توجه به نتایج حاصل، طراحان ژاپنی این پانل‌ها را در طراحی ساختمان‌ها بکار گرفتند.
۱۳	انگلستان	صبوری قمی (Sabouri-Ghomi) روبرت (Roberts)	۱۹۹۲ ۱۹۹۵	آزمایشگاهی	بر روی ۱۶ نمونه آزمایش صورت گرفت. قاب‌های نمونه، به‌صورت قطری بارگذاری می‌شدند. بعضی از نمونه‌ها برای بررسی اثر سوراخ، با سوراخ میانی ساخته شدند. ابعاد کلی ۰/۳×۰/۳ متر و ۰/۳×۰/۴۵ متر بودند. ضخامت ورق‌ها ۰/۸ میلی‌متر و ۱/۲ میلی‌متر بودند.	شبه‌استاتیکی چرخه‌ای	نمونه‌ها ضریب شکل‌پذیری برابر هفت را بدون کاهش مقاومت نشان دادند. بررسی اثر سوراخ نشان داد که مقاومت با نسبت خطی بعد سوراخ به بعد نمونه کاهش می‌یابد. مدل الاستوپلاستیک رفتار دیوارهای نازک ارائه گردید و با مدل ارائه شده، تحلیل دینامیکی غیرخطی انجام شد و اثرات میرایی چرخه‌ای بعد از خمیری شدن سازه مشاهده و مورد بررسی قرار گرفت.

ادامه جدول (۱-۲): مطالعات آزمایشگاهی و تحلیلی و نتایج حاصل از آنها

ردیف	مکان آزمایش	محقق یا محققین	سال انجام	نوع تحقیق	عنوان تحقیق یا مشخصات نمونه آزمایشگاهی	نوع آزمایش یا تحلیل	نتایج و سایر ملاحظات
۱۴	ایالات متحده	الگلی، کاسیس و همکاران (Elgaali & Caccese)	۱۹۹۳	آزمایشگاهی	شش نمونه سه طبقه یک دهانه با ابعاد کلی ۱/۲۵×۲/۵ متر. مقیاس مدل یک به چهار و دیوارها از نوع سخت نشده بودند.	شبه‌استاتیکی چرخه‌ای	این نتیجه حاصل شد که در دیوارهای برشی سخت‌نشده، رفتار خمیری با جاری شدن دیوار آغاز می‌گردد ولی بار نهایی با تشکیل مفصل پلاستیک در ستون‌ها در ارتباط است و در صورت افزایش ضخامت ورق شکل خرابی توسط ستون‌ها تعیین شده و افزایش ضخامت تأثیر قابل ملاحظه‌ای ندارد.
				تئوری	بدست آوردن مدل تحلیلی رفتار چرخه‌ای دیوار برشی فولادی	روشهای تحلیلی	ورق با عناصر خرابی معادل جایگزین شد و برای عناصر خرابی، رفتار الاستوپلاستیک چندخطی با لحاظ کماتش، در نظر گرفته شد مقایسه‌ای نیز بین اتصالات جوشی و پیچی صورت گرفت.
۱۵	دانشگاه برکلی کالیفرنیا - ایالات متحده	آستانه اصل زائو (Astaneh-Asl & Zhao)	۲۰۰۰ تا ۲۰۰۱	آزمایشگاهی	دو نمونه یکی با نسبت ارتفاع به عرض یک و نیم و دیگری با نسبت ارتفاع به عرض یک. نمونه‌ها با مقیاس یک به دو، و از یک سیستم دیوار برشی همبند به همراه قاب خمشی، که در ساختمانهای بلند کاربرد دارد، تهیه شده بودند	شبه‌استاتیکی چرخه‌ای	نمونه‌ها مشابه قسمتی از ساختمان ۵۲ طبقه معرفی شده در قسمت قبل می‌باشند نمونه اول تا جابجایی نسبی طبقه ۰/۶ درصد، الاستیک باقی مانده و در جابجایی نسبی طبقه ۲/۲ درصد، قطر فشاری کماتش نموده و قطر کششی جاری شد و ستون I- شکل غیرباربر تقوی، دچار کماتش موضعی گشت. نمونه ۷۹ چرخه بارگذاری را که ۳۹ چرخه آن در محدوده خمیری بودند را تحمل کرد و در نهایت در جابجایی نسبی طبقه ۳/۳ درصد تیر همبند از ستون جدا شد و مقاومت ۴۰ درصد افت نمود. نمونه دوم نیز مانند نمونه اول رفتار بسیار شکل پذیر و مورد اطمینانی داشت. این نمونه دو طبقه بوده و در حداکثر جابجایی نسبی طبقه ۲/۲ درصد و در چرخه ۲۹ که ۱۵ چرخه آن در محدوده خمیری بود، با زوال تیر همبند طبقه بالا، مقاومت ۲۵ درصد افت نمود و آزمایش خاتمه یافت.
۱۶	دانشگاه برکلی کالیفرنیا - ایالات متحده	آستانه اصل زائو (Astaneh-Asl & Zhao)	۱۹۹۸ تا ۲۰۰۰	آزمایشگاهی	دو نمونه دیوار برشی مرکب با مقیاس یک به دو، سه طبقه و یک دهانه بودند بتن استفاده شده از نوع پیش ساخته بود و با پیچ‌های ۸۳۲۵ به قطر نیم اینچ، به ورق فولادی متصل شده بود. در یکی از نمونه‌ها، بین لبه بتن تا قاب دور، ۳/۲ سانتی‌متر فاصله گذاشته شده بود.	شبه‌استاتیکی چرخه‌ای	هر دو نمونه به عنوان سیستم باربر جانبی ارزیابی مناسب هستند هر دو نمونه تا جابجایی نسبی طبقه چهار درصد بدون کاهش مقاومت و تا جابجایی نسبی طبقه پنج درصد، به ۸۰ درصد مقاومت رسیدند در نمونه دارای بتن جدا شده، تا جابجایی نسبی طبقه سه درصد، بتن به‌صورت آسیب‌پذیر باقی ماند.

ادامهٔ جدول (۱-۲): مطالعات آزمایشگاهی و تحلیلی و نتایج حاصل از آنها

ردیف	مکان آزمایش	محقق یا محققین	سال انجام	نوع تحقیق	عنوان تحقیق یا مشخصات نمونه آزمایشگاهی	نوع آزمایش یا تحلیل	نتایج و سایر ملاحظات
۱۷ [۵]	دانشگاه بوفالو ایالات متحده	جفری برمن و مایکل برنو (Berman & Bruneau)	۲۰۰۵	آزمایشگاهی	سه نمونه دیوار برشی فولادی ساخته شد. که دو نمونه از آن با ورق صاف و یک نمونه با ورق موج‌دار بود.	شبه‌استاتیکی چرخه‌ای	این نمونه‌ها به منظور بهسازی لرزه‌ای یک بیمارستان طراحی شده بودند.
۱۸ [۶]	ایالات متحده	لین و همکاران (Lin et.al.)	۲۰۱۰	آزمایشگاهی	دو نمونه دو طبقه با ارتفاع ۸ متر و عرض ۴ متر	شبه دینامیکی	نتایج نشان داد که استفاده از نگهدارنده‌های افقی به منظور جلوگیری از کمانش خارج از صفحه ورق، در بهبود خواص بهرمرداری از دیوار موثر است.
۱۹ [۷]	دانشگاه واشنگتن ایالات متحده	جفری برمن (Jeffrey W. Berman)	۲۰۱۱	آزمایشگاهی و تحلیلی	نمونه‌های ۳،۹،۱۴،۲۰ طبقه	شبه‌استاتیکی چرخه‌ای	ارزیابی رفتار آیین نامه طراحی دیواربرشی فولادی
۲۰ [۸]	چین	لان‌هویی گوو و همکاران (Lanhui Guo et. al.)	۲۰۱۲	تئوری	بیان یک مدل نواری اصلاح شده براساس نتایج تحلیلی	شبه‌استاتیکی چرخه‌ای	ظرفیت تحمل بار و ظرفیت جذب انرژی نمونه‌ها با هم مقایسه شد.

جدول (۱-۳): مقایسه دیوارهای برشی فولادی سخت شده و سخت نشده

عامل مورد بررسی	دیوارهای برشی فولادی سخت شده	دیوارهای برشی فولادی سخت نشده
کارایی لرزه‌ای	<ul style="list-style-type: none"> در صورت انجام طراحی صحیح، بسیار مطلوب می‌باشد. ولی کمی از حالت سخت نشده، بهتر است. 	<ul style="list-style-type: none"> در صورت انجام طراحی صحیح، بسیار مطلوب می‌باشد
عملکرد جذب نیروهای برشی زلزله	<ul style="list-style-type: none"> از ایجاد کمانش در آنها جلوگیری می‌شود و هدف اصلی در آنها رسیدن به حد جاری شدن برشی قبل از هر گونه کاهش مقاومت در اثر کمانش می‌باشد. 	<ul style="list-style-type: none"> با اعمال بارهای اندک، در حوزه ارتجاعی کمانش می‌کنند و سختی آنها کاهش می‌یابد. سپس رفتار پس‌کمانشی باعث ایجاد حوزه کششی در ورق شده و برش از طریق تنش کششی در این حوزه، جذب می‌گردد.
از دیدگاه آیین‌نامه‌های لرزه‌ای	<ul style="list-style-type: none"> در حالت مشابه نسبت به موارد سخت‌نشده دارای ضریب رفتار (R) بیشتری هستند. در دو حالت Ω_e و C_d مشابه پیشنهاد شده است. 	<ul style="list-style-type: none"> در دو حالت Ω_e و C_d مشابه پیشنهاد شده است.
مسائل و خواسته‌های معماری	<ul style="list-style-type: none"> در دیوارهای دارای بازشو رفتار مناسب‌تری داشته و اقتصادی‌تر هستند به سبب ضخامت اندک، مطلوبیت معماری دارد 	<ul style="list-style-type: none"> در دیوارهای دارای بازشو خیلی مناسب نمی‌باشند. کمانش خارج از صفحه ممکن است سبب ایجاد مشکلاتی در بهره‌برداری از سازه گردد. به سبب ضخامت اندک، مطلوبیت معماری دارد.
اقتصاد طرح و سهولت حمل و نصب	<ul style="list-style-type: none"> جوش کردن سخت‌کننده‌ها به دیوار کاری پرهزینه و وقت‌گیر می‌باشد و خصوصیات مکانیکی ورق نیز در اثر حرارت ناشی از جوشکاری، تغییر می‌کند. سهمی از لنگر واژگونی توسط خود دیوار تحمل می‌شود، بنابراین سهم لنگر ستون‌های اطراف و در نتیجه اندازه مقطع آنها کاهش می‌یابد. باتوجه به مقایسه‌های صورت گرفته، در حالت دیوارهای دارای بازشو، اقتصادی‌تر هستند. 	<ul style="list-style-type: none"> دارای جزئیات کمی است، ولی به سبب نازک بودن ورق، حمل و نقل و نصب، کمی مشکل می‌باشد. به علت عدم مشارکت دیوار در تحمل لنگر واژگونی مقطع ستون‌های اطراف افزایش می‌یابد. به طور کلی، در حالت عادی اقتصادی‌تر هستند.

ادامه جدول (۱-۳): مقایسه دیوارهای برشی فولادی سخت شده و سخت نشده

دیوارهای برشی فولادی سخت نشده	دیوارهای برشی فولادی سخت شده	عامل مورد بررسی
<ul style="list-style-type: none"> • باتوجه به کمانش ورق در مراحل ابتدایی بارگذاری در حوزه ارتجاعی، رفتار کمانشی باید در مدل در نظر گرفته شود. • می توان از المان پوسته با قابلیت کمانش استفاده کرد. • می توان از المان پوسته با مصالح غیرایزوتروپیک استفاده کرد، به صورتیکه قطر فشاری دارای سختی کمتری باشد و برش با قطر کششی به تعادل برسد. • می توان از یکسری عضو خریایی، که با ترکیبات مختلف (مثلاً ۴۵ درجه و با سطح مقطع مشخص معرفی شده اند) برای مدل کردن ورق استفاده کرد. 	<ul style="list-style-type: none"> • با بکارگیری المان پوسته و مصالح ایزوتروپیک مدل می گردد. • می توان از تیر معادل، بجای دیوار برشی استفاده کرد 	<p>از دیدگاه تحلیل سازه شامل دیوار برشی فولادی</p>
<ul style="list-style-type: none"> • به علت کمانش فشاری ورق، سختی آن به شدت کاهش می یابد. بنابراین دیوار در تحمل لنگرهای واژگونی مشارکت نکرده و عمده لنگر توسط ستون های اطراف تحمل می شود. • در باربری ثقلی مشارکت نمی نمایند و عمده بارهای ثقلی توسط ستون های اطراف تحمل می شود. • اندرکنش قابل ملاحظه ای میان برش و تنش های محوری ایجاد نمی گردد و نیازی به لحاظ آن نمی باشد. 	<ul style="list-style-type: none"> • لنگر واژگونی میان دیوار و ستون های اطراف توزیع می گردد. بنابراین دیوار تحت تنش های فشاری و کششی قرار می گیرد. • به لحاظ داشتن سختی محوری، در باربری ثقلی سازه، مشارکت می کنند. • در طراحی اندرکنش لنگر، نیروی محوری و برش باید در نظر گرفته شود. 	<p>توزیع نیروهای داخلی</p>
<ul style="list-style-type: none"> • تعداد بیشتری دیوار برشی سخت نشده باید برای تأمین مقاومت در سازه بکار گرفته شود. 	<ul style="list-style-type: none"> • مقاومت دیوارهای برشی سخت شده در ضخامت یکسان، از دیوارهای برشی سخت نشده بیشتر است. 	<p>مقاومت</p>

۱-۶- رفتار لرزه‌ای دیوارهای برشی فولادی و روابط طراحی آنها

برای اطمینان از عملکرد مطمئن لرزه‌ای دیوارهای برشی فولادی، باید روشی برای طراحی در نظر گرفته شود که کلیه نیازهای طراحی لرزه‌ای، اعم از: سختی، مقاومت و شکل‌پذیری را به صورت بهینه برآورده سازد.

۱-۶-۱- ارزیابی سختی

سازه دارای دیوار برشی فولادی باید با توجه به نوع دیوار مدل‌سازی گردد. بعد از انجام تحلیل سازه، جابجایی‌های بدست آمده با در نظر گرفتن سطح عملکرد موردانتظار، با جابجایی‌های مجاز مقایسه می‌گردد. آنگاه سختی سیستم مورد ارزیابی قرار گرفته و مورد تأیید یا رد قرار می‌گیرد. در صورتی که سختی بیشتری مورد نیاز باشد، راه‌حلهایی مانند: افزایش سطح مقطع ستون‌های پیرامونی، افزایش عرض دهانه دارای دیوار برشی فولادی، افزایش تعداد دهانه‌های دارای دیوار برشی، افزایش ضخامت دیوار برشی و یا استفاده از سیستم دوگانه، پیشنهاد می‌شود.

۱-۶-۲- ارزیابی مقاومت

باتوجه به شباهت‌های میان تیرورق‌ها و دیوارهای برشی فولادی از تقسیم‌بندی‌ها و فرمول‌های ضوابط^۱ AISC [۱۰] برای طراحی دیوارهای برشی استفاده می‌گردد. براساس لاغری دیوارهای برشی، می‌توان آنها را به سه دسته فشرده، غیرفشرده و لاغر تقسیم‌بندی نمود:

۱- **حالت فشرده**، وقتی لاغری دیوار $\lambda = h/t_w$ ، کوچکتر و مساوی $\lambda_p = 1/\sqrt{K_v E/F_{yw}}$

باشد، دیوار برشی فشرده محسوب می‌گردد و انتظار می‌رود که تحت اثر بارهای اعمال‌شده، جاری شدن، مقدم بر کمانش باشد. مقاومت برشی موجود ورق در این حالت از رابطه (۱-۱) [۲] بدست می‌آید.

^۱ American Institute of Steel Construction

$$V_n = 0.6 A_w F_{yw} \quad (1-1)$$

تأمین شرط فشردگی با افزایش ضخامت ورق، از نظر اقتصادی توجیه‌ناپذیر است و معمولاً برای تأمین شرایط فشردگی، از سخت‌کننده استفاده می‌شود.

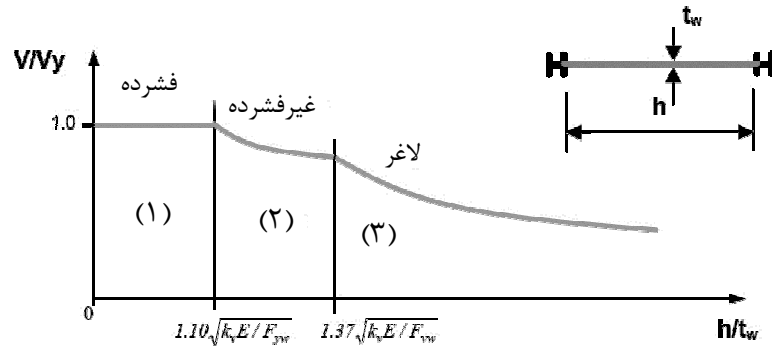
۲- **حالت غیرفشرده**، در صورتی که ضریب لاغری λ از λ_p بزرگتر بوده و کوچکتر از

می‌افتد و برش طبقه، با مجموع مؤلفه افقی حاصل از مقاومت کششی و فشاری قطری

ورق، به تعادل می‌رسد.

۳- **حالت لاغر**، در این حالت λ از λ_r بزرگتر بوده و دیوار در حالیکه هنوز در محدوده

ارتجاعی است، کمانش می‌کند.



شکل (۵-۱): نمودار محدوده‌های رفتاری دیوار فولادی موج دار بر اساس میزان لاغری (h/t_w) . [۲]

در حالات ۲ و ۳ مقاومت برشی موجود دیوار برشی فولادی از روابط (۲-۱) تا (۵-۱) [۹] تعیین

می‌گردد.

$$V_n = 0.6 A_w F_{yw} \left(C_v + \frac{1 - C_v}{1.15 \sqrt{1 + (a/h)^2}} \right) \quad (2-1)$$

$$k_v = 5 + \frac{5}{(a/h)^2} \quad (3-1)$$

در صورتیکه نسبت a/h از سه یا $\left[\frac{260}{h/t_w}\right]^2$ بزرگتر شود، مقدار k_v ، برابر ۵ اختیار می‌شود.

مقدار C_v نیز، به طریق زیر تعیین می‌شود [۱۰].

الف) برای دیوارهای غیرفشرده،

$$C_v = \frac{1/\sqrt{k_v E/F_{yw}}}{h/t_w} \quad (۴-۱)$$

ب) برای دیوارهای لاغر،

$$C_v = \frac{1/51 k_v E}{(h/t_w)^2 F_{yw}} \quad (۵-۱)$$

$$V \leq \phi V_n \quad (۶-۱)$$

در روش طراحی رایج، تحلیل سیستم سازه با در نظر گرفتن ضریب کاهش نیروهای زلزله R (یا ضریب رفتار) انجام می‌گیرد و براساس نتایج تحلیل، مقاومت موردنیاز V ، تعیین می‌شود. مقاومت موجود دیوار نیز با بکارگیری روابط ارائه شده، قابل محاسبه می‌باشد. حال باید رابطه (۶-۱) برای اطمینان از کفایت مقاومت ارزیابی گردد. در این رابطه V نیروی برشی مورد نیاز، حاصل از ترکیبات بار طراحی و V_n مقاومت برشی اسمی می‌باشند. ϕ ضریب اطمینان برشی بوده و برابر ۰/۸۵ منظور می‌گردد [۲].

۱-۶-۳- فراهم آوردن شرایط شکل‌پذیری

وقتی در طراحی دیوارهای برشی ضرایب R ، Ω_o و c_d را بکار می‌بریم، بدین معنی است که، سیستم از شکل‌پذیری کافی و اضافه مقاومت مناسبی برخوردار بوده است. برای تأمین شکل‌پذیری و اضافه مقاومت موردانتظار باید روندی را در طراحی در پیش گیریم که مطمئن شویم، زوال‌های شکل‌پذیر، قبل از زوال‌های ترد اتفاق می‌افتند.

۱-۳-۶-۱- زوال‌های شکل‌پذیر و ترد

در حالت کلی زوال‌های از نوع جاری شدن به عنوان زوال‌های شکل‌پذیر، شناخته می‌شوند. مگر آنکه در مواردی خاص، قیدهایی بر روی جریان پلاستیک وجود داشته و جاری شدن آنطوری که انتظار می‌رود شکل‌پذیر نباشد.

زوال‌های از نوع شکست، به‌طورکلی ترد محسوب می‌شوند. زوال‌های ناشی از کماتش براساس اینکه در محدوده خمیری یا ارتجاعی باشند، می‌توانند به ترتیب شکل‌پذیر یا ترد باشند. همچنین لغزش پیچ‌ها شکل‌پذیر محسوب می‌گردد. بر اساس موارد ذکر شده، زوال‌های یک قاب دارای دیوار برشی فولادی در جدول (۴-۱) دسته‌بندی شده است.

جدول (۴-۱): دسته‌بندی زوال‌های یک قاب دارای دیوار برشی فولادی

عضو مورد بررسی	زوال شکل‌پذیر	زوال ترد
دیوار فولادی	<ul style="list-style-type: none"> لغزش پیچ‌ها کمانش ورق فولادی جاری شدن ورق فولادی 	<ul style="list-style-type: none"> شکست ورق دیوار شکست اتصالات دیوار فولادی به تیرها و ستون‌های پیرامونی
تیرهای تحتانی و فوقانی	<ul style="list-style-type: none"> جاری شدن برشی تیرها تشکیل مفصل پلاستیک کمانش موضعی در بال یا جان‌های فشرده 	<ul style="list-style-type: none"> شکست اتصال خمشی تیرها و یا تیرهای هم‌بند کمانش پیچشی جانبی تیرها شکست اتصالات برشی
ستون‌های پیرامونی	<ul style="list-style-type: none"> تشکیل مفصل پلاستیک در بالا و پایین کمانش موضعی در حالت فشرده کمانش کلی در حالت کمانش غیر الاستیک جاری شدن کف ستون در کشش 	<ul style="list-style-type: none"> شکست کششی ستون‌ها و یا وصله‌های آنها شکست میل مهارهای کف‌ستون در کشش شکست کف ستون در خمش یا کشش شکست پی دیوار

۱-۳-۲- ترتیب یا اهمیت زوال‌ها

زوال‌ها باید به گونه‌ای ترتیب یابند که، اولاً در اعضایی که می‌توانند رفتار خمیری را تجربه کنند، زوال‌های شکل‌پذیر، پیش از زوال‌های ترد اتفاق بیفتند. ثانیاً اعضایی که بار ثقلی تحمل

نمی‌نمایند (مانند ورق فولادی دیوار)، قبل از اعضای که بار ثقلی تحمل می‌کنند (مانند ستون‌ها) به حد نهایی خود برسند.

ترتیب زوال‌های باید طوری هدایت شود که زوال‌های شکل‌پذیر ابتدا در دیوار برشی، سپس تیرهای تحتانی و فوقانی و بعد از آن در ستون‌ها ایجاد گردد. همچنین زوال‌های ترد مربوط به دیوار، نسبت به زوال‌های ترد در تیرها و سپس ستون‌ها، تعیین‌کننده‌تر باشند.

در دیوارهای برشی فولادی جاری شدن برشی دیوار و یا تشکیل حوزه کششی شکل‌پذیرترین فرایند محسوب می‌گردد. بنابراین طراحی دیگر اعضاء باید به طریقی انجام گردد که، زوال‌های دیگر حاکم نگردد.

از طرف دیگر شکست کششی و یا فشاری ستون‌های پیرامونی در مرحله اول، و شکست برشی اتصالات تیر به ستون و نیز اتصال کششی صفحه ستون‌ها در مرحله بعد، از خطرناک‌ترین و تردترین شکست‌ها محسوب می‌گردند، زیرا که موجب ناپایداری‌های سازه‌ای جدی‌ای ایجاد کرده و هزینه بسیار زیادی را برای تعمیرات پس از زلزله تحمیل می‌نمایند. بر اساس مطالب ذکر شده، مراحل مطلوب زوال سازه بر اساس ترتیب مناسب زوال‌های شکل‌پذیر تا ترد، در جدول (۵-۱) آورده شده است.

جدول (۵-۱): ترتیب یا اهمیت زوال‌ها

مراحل	علمکرد اجزاء مختلف سازه	توضیحات	
شکل‌پذیر	۱	لغزش پیچ‌ها (در صورت وجود) قاعدتاً بعد از عبور سطح بار از سطح سرویس اتفاق می‌افتد.	
	۲	بسیج شدن مقاومت برشی دیوار با جاری شدن برشی در حالت سخت‌شده و یا تشکیل حوزه کششی شامل کمانش دیوار در فشار و جاری شدن در قطر کششی.	عامل اصلی شکل‌پذیری است.
	۳	درگیر شدن تیرها : جاری شدن در برش و تشکیل مفصل خمیری در تیر	در اثر گسترش حوزه پلاستیک دیوار اتفاق می‌افتد
	۴	استفاده از حداکثر ظرفیت شکل‌پذیر اعضاء : کمانش موضعی پلاستیک تیرها، تشکیل مفصل خمیری در ستون	انتهای حد زوال‌های شکل‌پذیر

تردشکن	۵	شروع زوال‌های ترد : شکست دیوار در کشش، کمانش موضعی ستون‌ها، شکست اتصالات دیوار به قاب پیرامونی
	۶	کاهش مقاومت سیستم : شکست خمش تیرها، کمانش کلی تیرها، جاری شدن کف ستون
	۷	زوال‌های خطرناک و پرهزینه : شکست ستون در کشش، کمانش ستون تحت بارهای ثقلی، شکست اتصال برشی تیر به ستون، زوال میل‌مهری‌ها در کشش

۱-۶-۳-۳- طراحی اعضاء و اجزای سیستم دارای دیوار برشی فولادی

همانطوری که در قسمت قبل ذکر شد، اعضاء و اجزای سیستم دارای دیوار برشی فولادی باید

به طریقی طراحی شوند که، شرایط را برای ایجاد تغییر شکل‌های خمیری در دیوار مهیا نمایند.

بنابراین، بعد از طراحی دیوار برشی، برای تعیین نیروهای موردنیاز اعضاء دیگر، مقاومت حداکثر

موردانتظار دیوار برشی را به عنوان مبنا در نظر می‌گیریم.

بدین منظور در تعیین حداکثر مقاومت برشی موردانتظار دیوار برشی فولادی V_{ne} ، سطح واقعی

ورق و تنش حد جاری شدن موردانتظار فولاد را در نظر می‌گیریم. سطح واقعی ورق A_w ، عبارت است

از، سطح مقطع فولاد ورق بعلاوه سطح مقطع سخت‌کننده‌های آن. تنش حد جاری شدن مورد انتظار

فولاد F_{ye} ، نیز عبارت است از، تنش حد جاری شدن اسمی فولاد، که اثرات مربوط به سخت‌شدگی

ورق و نیز اختلاف میان حد جاری شدن واقعی ورق و مقدار اسمی آن لحاظ شده باشد.

$$F_{ye} = C_{pr} R_y F_y \quad (۷-۲)$$

$$V_{ne} = 0.6 A_w F_{ye} \quad (۸-۲)$$

$$A_w = A_p + A_s \quad (۹-۲)$$

F_y : تنش حد جاری شدن اسمی ورق

C_{pr} : ضریب افزایش تنش حد جاری شدن به‌علت پدیده سخت‌شدگی کرنش‌ها بوده و

$$\text{برابر است با } 1 + \frac{F_u}{2F_y} [۱۰] \text{ و یا } 1/1 [۱۱].$$

R_y : ضریب افزایش حد جاری شدن اسمی فولاد، به‌علت اختلاف عدد اسمی ارائه شده

توسط سازندگان فولاد و مقدار واقعی و برای ورق‌ها برابر است با $1/1 [۱۱]$.

A_p : سطح مقطع خود ورق دیوار

A_s : سطح مقطع سخت کننده‌ها

V_{ne} : مقاومت برشی مورد انتظار

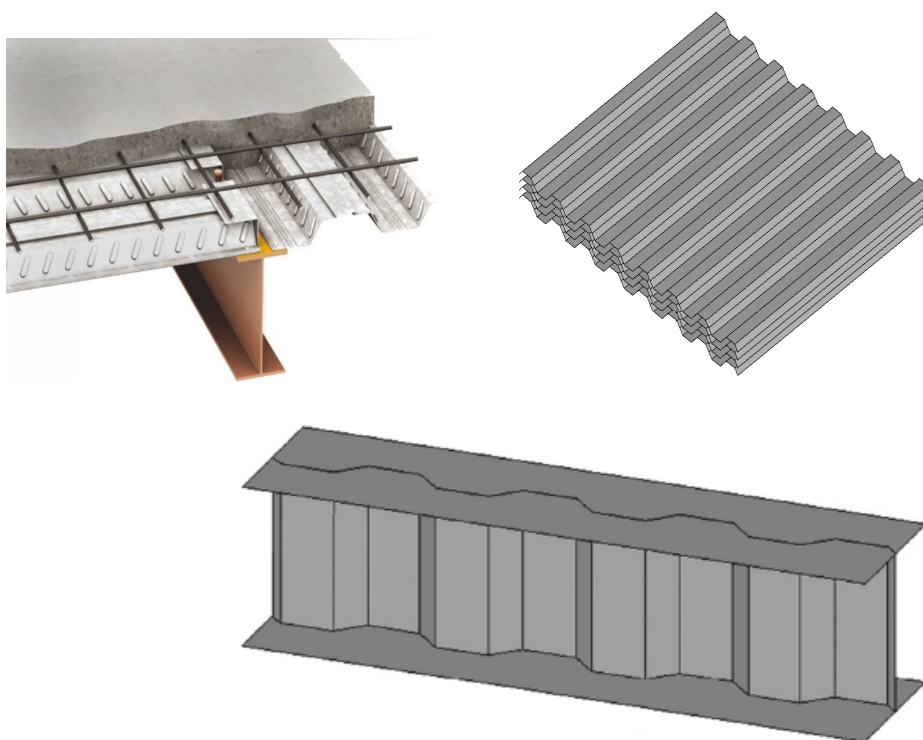
همچنین با توجه به رابطه (۶-۱) داریم :

$$1/18V \leq V_n \quad (10-1)$$

رابطه (۱۰-۱) نشان می‌دهد، V_n که منشأ نیروهای موردانتظار است، در حدود $1/2$ برابر بزرگتر از مقاومت موردنیاز اختیار شده است. این کار به معنی بکارگیری ضریب اطمینان $1/2$ در طراحی اجزای غیرشکل‌پذیر نسبت به ظرفیت اجزای شکل‌پذیر خواهد بود. این ضریب به همراه بکارگیری ضرایب R_y و C_{pr} موجب اطمینان طراح از تقدم زوال‌های شکل‌پذیر نسبت به زوال‌هایی غیرشکل‌پذیر می‌گردد.

همانطوری که ذکر شد، برای تعیین نیروهای موردنیاز اعضاء دیگر، مانند ستون‌ها، پی‌ها، اتصالات و غیره، حداکثر مقاومت برشی موردانتظار دیوار برشی فولادی V_{ne} ، به عنوان مبنا در نظر گرفته می‌شود، و با بکارگیری تعادل، این نیروها را بدست آمده و در صورت لزوم، ضمن ترکیب آنها با بارهای ثقلی، در طراحی بکار گرفته می‌شوند.

۲- ورق‌های فولادی موج‌دار^۱



^۱ Corrugated Steel Plates

۲-۱ - مقدمه

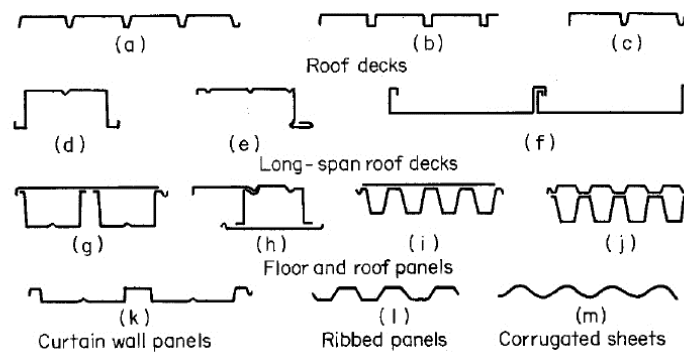
ورق‌های موج‌دار از قدیمی‌ترین انواع فولادهای سرد نورد شده هستند. این ورق‌ها از قرن هیجدهم تا به امروز در مصارف سازه‌ای مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند. در حال حاضر در دنیا انواع مختلفی از ورق‌های موج‌دار با پوشش‌های محافظ گوناگون، تولید می‌شود. شکل ورق‌های موج‌دار نیز تا اندازه‌ای به صورت شکل استاندارد درآمده و برای استفاده‌های مختلف در دسترس قرار دارد. به سبب استفاده از نورد سرد در تولید این ورق‌ها، ساخت آنها روند نسبتاً ساده و کم‌هزینه‌ای دارد. شکل (۲-۲) نمونه‌ای از عملیات نورد سرد با غلطک، برای تولید ورق‌های موج‌دار را نشان می‌دهد.

ایجاد موج با اشکال مختلف در ورق‌های تخت نازک، موجب می‌شود که ورق حول محور ضعیف، از سختی هندسی و مقاومت زیادی نسبت به حالت اولیه خود برخوردار گردد. در واقع خصوصیات هندسی ورق از حالت ایزوتروپیک^۱ به حالت اورتوتروپیک^۲ تغییر می‌نماید. سبکی، مقاومت مناسب و همچنین سهولت کاربرد، از خصوصیات ذاتی این ورق‌ها می‌باشند. بنابراین بکارگیری آنها در هر سازه‌ای می‌تواند به کم کردن وزن سازه، تأمین مقاومت با مصرف مصالح کمتر، تسهیل در ساخت و در نتیجه اقتصادی شدن طرح کمک نماید. نمونه‌هایی از ورق‌های موج‌دار که در مصارف گوناگون بکار گرفته شده‌اند، در شکل (۲-۱) نشان داده شده‌است.

باتوجه به مزایای مختلف ورق‌های موج‌دار، در حال حاضر این ورق‌ها به عنوان یک عنصر سازه‌ای مناسب و کارا موردنظر می‌باشند و استفاده‌های زیادی از آنها به عمل می‌آید.

^۱ Isotropic

^۲ Orthotropic



شکل (۲-۱): استفاده از ورق‌های موج‌دار در عرشه کف‌ها، سقف‌ها، پانل دیوارها و سقف‌ها و پوشش‌های موج‌دار [۱۲]



شکل (۲-۲): عملیات نورد سرد با غلطک، برای تولید ورق‌های موج‌دار

۲-۲- معرفی موارد استفاده از ورق‌های موج‌دار

همان‌طوری که در قسمت قبل ذکر شد، به علت کم‌وزن بودن، سهولت در نصب و مقاومت

مناسب، ورق‌های موج‌دار در موارد مختلفی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

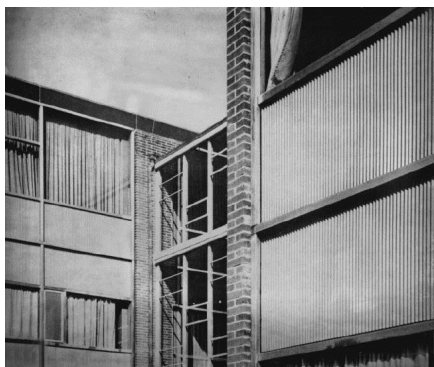
ورق‌های موج‌دار برای ایجاد پوشش سقف‌ها و دیوارهای ساختمان‌ها، بخصوص ساختمان‌های

صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در مواردی از این ورق‌ها به عنوان جایگزین مهاربندی‌های رایج

سقف و یا مهاربندهای طولی ساختمان‌های صنعتی بکار گرفته شده‌اند. تا ضمن ایجاد پوشش، پایداری

کلی سازه و یا پایداری بعضی از اعضای سازه را تأمین نمایند. شکل (۲-۳)، بکارگیری ورق‌های موج‌دار

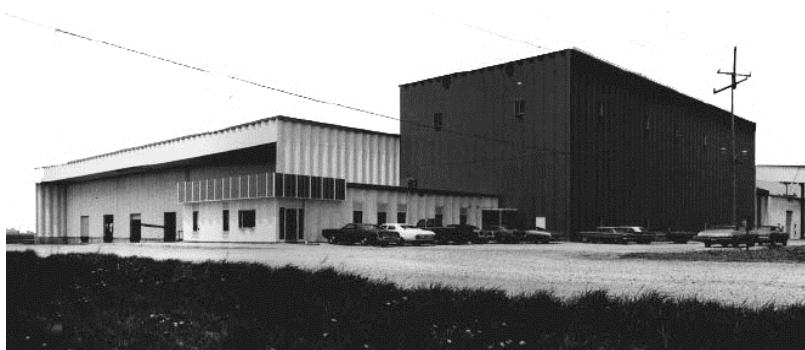
با مقطع استاندارد، به‌عنوان دیوارهای اطراف ساختمان را نشان می‌دهد.



شکل (۲-۳): بکارگیری ورق‌های موج‌دار با مقطع استاندارد، به عنوان دیوارهای اطراف ساختمان [۱۲]

شکل (۲-۴) نیز سازه‌ای را نشان می‌دهد که در آن قاب‌های سازه‌ای حذف شده‌اند و تماماً از

ورق‌های موج‌دار بزرگ (غیراستاندارد) به عنوان اجزای سازه‌ای استفاده شده است.



شکل (۲-۴): بکارگیری ورق‌های موج‌دار بزرگ (غیراستاندارد) به عنوان اجزای سازه‌ای [۱۲]

استفاده از کف‌های ساخته شده از ورق‌های موج‌دار تنها و یا به همراه پوشش‌های مختلف و

همچنین ساخت کف‌های مرکب با بکارگیری ورق‌های موج‌دار بسیار مرسوم است. عدم نیاز به

قالب‌بندی، و شمع‌بندی، نصب آسان، سبکی و مشارکت ورق موج‌دار به عنوان عنصر سازه‌ای در

باربری از ویژگی‌های کف‌های ساخته شده با این ورق‌ها می‌باشد. شکل (۲-۵) نمونه‌ای از کف‌های

مرکب را نشان می‌دهد.

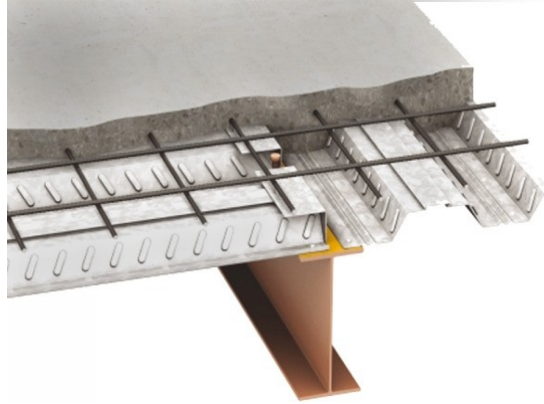
نحوه محاسبه ظرفیت خمشی این نوع سقف‌ها در برابر بارهای برون‌صفحه‌ای در بسیاری از

آیین‌نامه‌های معتبر مانند یوروکد [۱۳] مورد بحث قرار گرفته است. همچنین باتوجه به اینکه کف‌های

سازه‌ای، معمولاً نقش دیافراگم را نیز ایفا می‌نمایند و جزئی از سیستم باربر جانبی لرزه‌ای هستند،

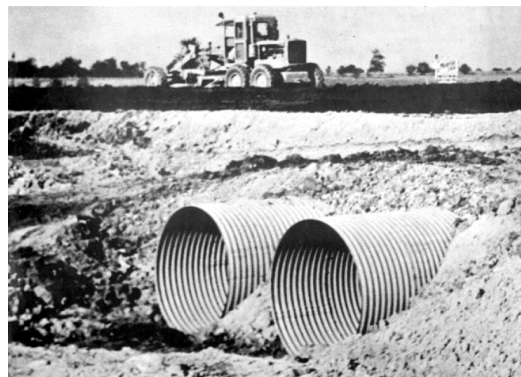
سختی و مقاومت برشی درون‌صفحه‌ای آنها نیز از پارامترهای طراحی محسوب می‌شود. روش‌های

طراحی این دیافراگم‌ها در مجموعه‌هایی مانند دستورالعمل طراحی دیافراگم [۱۴] آورده شده و یا توسط سازندگان آنها ارائه می‌گردد.



شکل (۲-۵): استفاده از ورق‌های موج‌دار در کف‌های مرکب.

از دیگر موارد استفاده از ورق‌های موج‌دار، ساخت لوله‌های فولادی موج‌دار گالوانیزه می‌باشد. این لوله‌ها، سالهاست که در سیستم زهکشی مدفون بکار برده می‌شوند. شکل (۲-۶) یک نمونه از این لوله‌ها را نشان می‌دهد.



شکل (۲-۶): استفاده از ورق‌های موج‌دار در ساخت لوله‌های فولادی موج‌دار گالوانیزه. [۱۲]

ورق‌های موج‌دار در کاربری‌های دیگری مانند: دیوارهای حائل (Sheet piles)، پوشش اطاقک-های حمل بار، پوشش ساختمان‌های صنعتی به صورت پانل ساندویچی، مجاری هوایی، دیوارهای جداکننده در کشتی‌ها و ... مورد استفاده قرار می‌گیرند.

در سال‌های اخیر ورق‌های موج‌دار، مورد استفاده‌های جدیدتری نیز قرار گرفته‌اند. از این جمله می‌توان به ساخت تیروورق‌های با جان موج‌دار اشاره نمود. ورق‌های موج‌دار را می‌توان به علت داشتن سختی ذاتی، جایگزین جان‌های صاف دارای سخت‌کننده‌های متعدد کرد.

۲-۳- تیر ورق با جان موج‌دار

تیروورق‌ها به جهت سادگی سیستم سازه‌ای، سهولت ساخت و امکان طرح اقتصادی، به‌طور گسترده‌ای در ساخت سازه‌ها، بخصوص سازه‌های دارای دهانه‌های بزرگ استفاده قرار گرفته‌اند. در مقایسه با سیستم‌های خرپایی که در آنها از تعداد زیادی عضو و اتصال استفاده می‌شود، تیروورق‌ها بسیار ساده‌تر بوده و ضمن دارا بودن اتصالات کمتر و ساده‌تر، از نظر استاتیکی نیز از درجه نامعینی بالاتری برخوردار هستند. با توجه به خواص ذاتی تیروورق‌ها، همواره تلاش‌هایی در جهت بهینه کردن آنها و بهبود رفتار سازه‌ای آنها صورت گرفته و می‌گیرد. یکی از طرح‌های مناسب و پیشرفت‌های مهمی که در این زمینه انجام شده است، استفاده از ورق‌های موج‌دار به عنوان جان تیروورق‌ها می‌باشد. استفاده از ورق‌های موج‌دار، در جهت افزایش سختی خارج از صفحه‌ای ورق و بالا بردن مقاومت کمانشی، بدون بکارگیری سخت‌کننده‌های قائم، باعث گردیده که وزن تیروورق‌ها و نیز هزینه‌های ساخت آنها کاهش یابد. نتایج تحقیقات انجام گرفته بر روی این نوع از تیرها نشان می‌دهد که، مقاومت خستگی در تیرهای دارای جان موج‌دار نسبت به تیرهای دارای جان صاف می‌تواند تا ۵۰ درصد بیشتر باشد. در اثر بهبود رفتار تیر در بارهای خستگی، وزن تیرهای دارای جان موج‌دار ۳۰ تا ۶۰ درصد از وزن تیرهای دارای جان صاف (در ظرفیت مساوی) کمتر بدست می‌آید. در اثر کاهش وزن، می‌توان دهانه‌های بزرگتری را با این تیرها پوشش داد. [۱۵]

طی تحقیقات مشخص شده است که، استفاده از ورق‌های موج‌دار باعث بهبود ناپایداری تیر در اثر کمانش پیچشی - جانبی نیز می‌گردد و در آزمایشات مشاهده شده است که مهار جانبی تیر در مقایسه با تیرهای معمول از حساسیت بالایی برخوردار نمی‌باشند [۱۶]. همچنین استفاده از ورق‌های

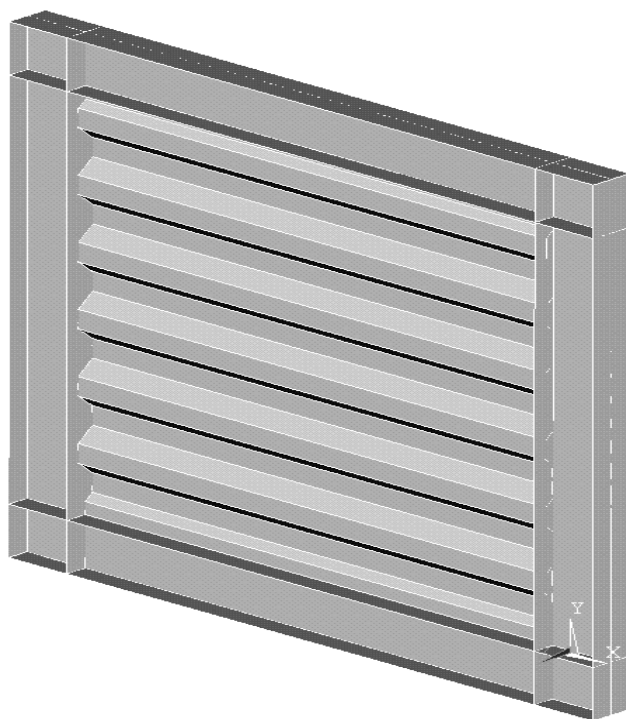
موج‌دار به عنوان یک عنصر در معرض دید در سازه‌هایی مانند پل‌ها، از نظر زیبایی مورد توجه قرار گرفته است. شکل (۷-۲) نمونه‌ای از این پل‌ها را نشان می‌دهد.



شکل (۷-۲): نمایی از پل در حال ساخت دارای مقطع صندوقه‌ای مرکب با جان فولادی موج‌دار

جان‌های موج‌دار در پل‌سازی به روش‌ها و اشکال مختلفی مورد استفاده قرار گرفته و از خواص ورق‌های موج‌دار در جهت بهبود عملکرد سازه‌ای، سهولت ساخت و کاهش هزینه‌ها بهره گرفته شده است. در این خصوص ورق‌های موج‌دار بجای ورق‌های فولادی سخت شده در شاستیرها و مقاطع صندوقه‌ای پل‌ها قرار داده شده‌اند.

۳- دیوارهای برشی فولادی با ورق موج‌دار



۳-۱- مقدمه

در فصل اول، دیوار برشی فولادی به عنوان یک سیستم باربر جانبی لرزه‌ای مطرح گردید و بیان شد که، در این سیستم باربر جانبی لرزه‌ای، معمولاً تغییر شکل‌های خمیری برشی، عامل استهلاک انرژی لرزه‌ای می‌باشند. در واقع در یک دیوار برشی فولادی، اجزای دیوار شامل جان دیوار و اتصالات آن به اجزای مرزی و همچنین خود اجزای مرزی، بگونه‌ای طراحی می‌شوند که، شرایط شکل‌پذیر در دیوار فراهم گردد. این شرایط در بخش ۱-۶-۳ مورد بررسی قرار گرفتند و ترتیب زوال‌ها در جدول (۱-۴) معرفی شده و در جدول (۱-۵) بگونه‌ای ترتیب یافته‌اند که، زوال‌های شکل‌پذیر ابتدا در دیوار برشی، سپس در تیرهای تحتانی و فوقانی و بعد از آن در ستون‌ها ایجاد گردند و همچنین زوال‌های ترد مربوط به دیوار، نسبت به زوال‌های ترد تیرها و سپس ستون‌ها تعیین‌کننده‌تر باشند. بر این اساس، کماتش قطری ورق به تنهایی و یا در هر یک از چشمه‌های دیوارهای برشی دارای سخت‌کننده، زوال شکل‌پذیر در دیوارهای برشی سخت نشده می‌باشند. همچنین جاری شدن ورق فولادی، زوال شکل‌پذیر دیوارهای برشی سخت شده، خواهد بود. بنابراین ضمن اطمینان از مقاومت دیوار برشی فولادی، تامین شرایط شکل‌پذیری برشی در دیوار برشی از پارامترهای اساسی طرح محسوب می‌گردد.

۳-۲- معرفی دیوارهای برشی موج‌دار

در جدول (۱-۳)، مقایسه‌ای بین دیوارهای برشی فولادی سخت شده و سخت نشده صورت گرفته است. بدیهی است که هر یک از آنها از مزایا و معایبی برخوردار می‌باشند. برای مثال، دیوارهای برشی سخت نشده در حین باربری دچار کماتش برون‌صفحه‌ای می‌شوند که می‌تواند منجر به بروز اشکالاتی در بهره‌برداری از سازه گردد. همچنین عملیات نصب و حمل آنها به علت سختی برون‌صفحه‌ای اندک ورق، با مشکل همراه است. در دیوارهای برشی سخت نشده به سبب کماتش ورق در محدوده ارتجاعی و سپس استفاده از ظرفیت پس‌کمانشی ورق، تنش برشی حد نهایی کاهش

می‌یابد و برای جبران این مورد برای یک نیروی برشی مساوی، دیوار برشی سخت نشده از ضخامت زیادتری نسبت به دیوار برشی سخت شده برخوردار است.

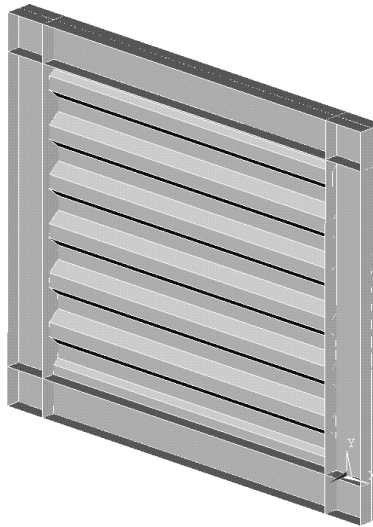
در مقابل، رفتار لرزه‌ای دیوارهای برشی سخت‌شده اندکی از دیوارهای برشی سخت‌نشده بهتر است. به سبب آنکه تا قبل از جاری شدن ورق در آنها کمانشی رخ نمی‌دهد، از نظر بهره‌برداری مناسب‌تر می‌باشند. اما برای ساخت دیوارهای برشی سخت‌شده، بخاطر وجود سخت‌کننده‌های متعدد و جزئیات اجرایی بیشتر، باید وقت و هزینه بیشتری صرف گردد. همچنین در پی وجود جوشکاری‌ها و برشکاری‌های زیادتر، عملیات بازرسی و نظارت بیشتری نیز برای ساخت آنها موردنیاز می‌باشد. بنابراین در صورتی که بتوان دیوار برشی سخت شده‌ای ایجاد نمود که هزینه‌های ساخت کمتری داشته باشد، تا اندازه‌ای معایب مربوط به دو نوع دیوار برشی ذکر شده بر طرف می‌گردد. در ادامه با بررسی مطالب ارائه شده در فصول قبل، سعی شده که پیشنهادی برای این نوع دیوار برشی مطرح گردد.

همانطوری که در بخش ۱-۲ بیان شد، تیورورق‌ها و دیوارهای برشی فولادی دارای مشابهت‌هایی از نظر رفتار سازه‌ای می‌باشند. اما این نکته مهم باید مورد نظر قرار گیرد که، این دو از نظر مکانیزم جذب تلاش‌های برشی با یکدیگر تفاوت اساسی دارند. از دیدگاه آیین‌نامه‌های عملکردی، برش در دیوارهای برشی کنترل‌شونده توسط تغییرمکان ولی در یک تیر ورق فولادی، برش جان کنترل‌شونده توسط نیرو می‌باشد. این تفاوت به علت وجود نیاز شکل‌پذیری در دیوارهای برشی، بوجود آمده است.

همان‌طوری که به تفصیل در بخش ۱-۲ بیان گردید، تفاوت‌های رفتاری تیورورق‌ها و دیوارهای برشی سخت شده و سخت نشده به طریقی است که استفاده از روابط مربوط به محاسبه ظرفیت برشی تیورورق‌های فولادی برای دیوارهای برشی فولادی در جهت اطمینان می‌باشد.

در فصل دوم در مورد استفاده از ورق‌های موج‌دار در طراحی تیورورق‌های فولادی بحث شد و بیان گردید که ورق‌های فولادی موج‌دار را می‌توان با کارایی سازه‌ای مناسبی در طراحی تیورورق‌ها مورد استفاده قرار داد. حال با توجه به استفاده موفقیت‌آمیز از ورق‌های موج‌دار در طراحی تیورورق‌های

فولادی و نیز وجود شباهت‌های زیاد میان تیورق‌های فولادی و دیوارهای برشی، ورق‌های موج‌دار را نیز می‌توان با قراردادن در قاب‌های سازه به عنوان "دیوار برشی فولادی موج‌دار" مورد استفاده قرار داد. دیوار برشی فولادی را می‌توان با ترکیبی که در شکل (۱-۳) نشان داده شده‌است، در نظر گرفت.



شکل (۱-۳): نمایی از یک دیوار برشی فولادی موج‌دار به همراه قاب پیرامونی

فقط ذکر این نکته ضروری است که یک سیستم باربری جانبی باید علاوه بر تأمین مقاومت موردنیاز، جوابگوی شکل‌پذیری موردنیاز نیز باشد. برای اطمینان حاصل کردن از شکل‌پذیری عضو طراحی شده، باید قابلیت تغییرشکل‌های غیرارتجاعی بدون کاهش قابل ملاحظه در مقاومت را در عضو موردنظر بررسی کرد.

با توجه به انواع مختلف ورق‌های موج‌دار که در فصل دو به آنها اشاره شد، در این پایان‌نامه مطابق شکل (۱-۳) ورق‌های موج‌دار دوزنقه‌ای که نوع رایجی از این ورق‌ها می‌باشند، مورد بررسی قرار می‌گیرند. این انتخاب لطمه‌ای به کلیت مساله نخواهد زد و هر نوع دیگر از این ورق‌ها را نیز می‌توان با روش مشابه مورد مطالعه قرار داد.

۳-۳- خصوصیات مورد انتظار از دیوار برشی فولادی موج‌دار

ورق‌های موج‌دار به‌علت شکل هندسی خود، از سختی هندسی برون‌صفحه‌ای قابل‌توجهی نسبت به ورق‌های صاف برخوردار هستند. همچنین به‌علت وجود خم‌های متعدد در ورق و تبدیل نیروی درون‌صفحه‌ای به نیروهای برون‌صفحه‌ای و برعکس در این مکان‌ها، ورق‌های صاف تشکیل‌دهنده ورق موج‌دار، یکدیگر را مقید نموده و در واقع به نوعی، نقش سخت‌کننده را ایفا می‌نمایند. بنابراین دیوار برشی فولادی موج‌دار را از نظر عملکرد سازه‌ای می‌توان جزء دیوارهای برشی سخت‌شده محسوب نمود. دیوارهای برشی فولادی موج‌دار، می‌توانند مزایای هر دو نوع دیوار برشی سخت‌شده و سخت‌نشده را دارا باشند. به این معنی که بدلیل وجود سختی هندسی ذاتی ورق موج‌دار مشکلات مربوط به کماتش برون‌صفحه‌ای و یا سختی عملیات نصب و حمل برطرف می‌گردد و این در حالی است که به‌علت عدم احتیاج به سخت‌کننده‌ها و کاهش زمان ساخت و عملیات‌های مرتبط، هزینه‌ها نیز کاهش می‌یابند. در واقع دیوار برشی موج‌دار یک دیوار برشی فولادی سخت‌شده می‌باشد که مهمترین اشکال دیوارهای برشی سخت‌شده یعنی بالا بودن هزینه ساخت در آنها حذف شده است. در صورتی که سیستم باربر لرزه‌ای شامل دیوار برشی فولادی موج‌دار را مشابه یک تیروورق با جان موج‌دار که به‌صورت قائم و طره‌ای قرار گرفته است در نظر بگیریم، جهت موج‌های ورق دیوار به‌صورت افقی باید در نظر گرفته شود. در این صورت می‌توانیم از فرضیات مربوط به طراحی تیروورق‌های با جان موج‌دار برای دیوارهای برشی موج‌دار نیز استفاده کنیم. آزمایشات و تحلیل‌های مختلف صورت گرفته بر روی تیرهای با جان موج‌دار، اطلاعات و روش‌های طراحی ارزشمندی برای دیوارهای فولادی موج‌دار محسوب می‌گردند. فقط در بکارگیری آنها باید همان‌طوری که در قسمت قبل اشاره شد، به تفاوت‌های میان تیروورق‌ها و دیوارهای برشی و همچنین به احتیاجات طرح توجه ویژه نمود.

رفتار خمشی اعضای که جان موج‌دار داشته باشند، از خصوصیت خاصی برخوردار است. به این معنی که جان موج‌دار در تحمل لنگر خمشی مشارکت نمی‌نماید و این بال‌ها هستند که با عملکرد کششی و فشاری خود لنگر خمشی را تحمل می‌نمایند. بنابراین جان فقط تحت اثر تنش برشی قرار

می‌گیرد و میان تنش‌های برشی و محوری تقریباً هیچ‌گونه اندرکنشی اتفاق نمی‌افتد. در دیوارهای برشی موج‌دار نیز لنگر واژگونی طبقه عمدتاً توسط عملکرد کششی و فشاری ستون‌های اطراف دیوار تحمل می‌شود. سختی محوری ورق موج‌دار در جهت عمود بر راستای موج‌ها بسیار اندک بوده و این موضوع باعث می‌گردد که بارهای محوری عمدتاً از طریق ستون‌ها منتقل شده و سهم دیوار در این میان اندک باشد. برش طبقه نیز تماماً توسط دیوار موج‌دار جذب می‌گردد. عدم وجود اندرکنش میان تنش‌های محوری و برشی در دیوار موج‌دار موجب می‌شود که دیوار به عنوان عامل اصلی ایجاد شکل‌پذیری در این سیستم، از نظر تنش در وضعیت یکنواختی قرار گرفته و رفتار یکنواخت‌تری از خود نشان دهد. بنابراین انتظار می‌رود که دیوار نسبت به حالت وجود نیروهای محوری، از شکل‌پذیری و قابلیت تغییر شکل‌پذیری غیرارتجاعی بیشتری برخوردار شود.

وجود سختی برون‌صفحه‌ای قابل ملاحظه در ورق‌های موج‌دار این امکان را فراهم می‌آورد که این المان سازه‌ای به‌صورت نمایان و به‌صورت یک دیوار جداکننده در سازه بکار برده شود. این در حالی است که دیوارهای فولادی سخت‌نشده به‌علت سختی برون‌صفحه‌ای اندک باید مورد محافظت قرار گیرند و نیز در ضخامت‌های اندک به علت نوسان خارج از صفحه، به عنوان دیوار جداکننده در ساختمان قابل استفاده نمی‌باشند.

۳-۴- مطالعات انجام شده بر روی دیوار برشی فولادی با ورق موج‌دار

* در سال ۱۹۶۹ برای اولین بار ایسلی و مک فارلند رفتار کمانشی این ورق‌ها را مطالعه و با فرض ورق موج‌دار به عنوان ورق تخت اورتوتروپیک رابطه‌ای جهت محاسبه بار کمانشی کلی ورق موج‌دار ارائه نمودند [۱۷]

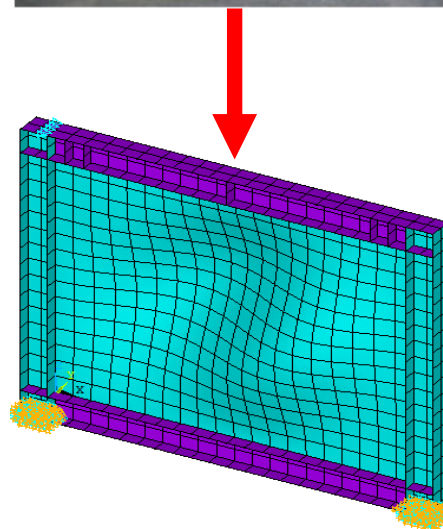
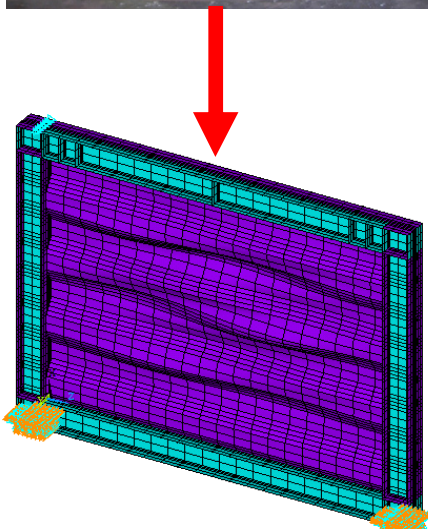
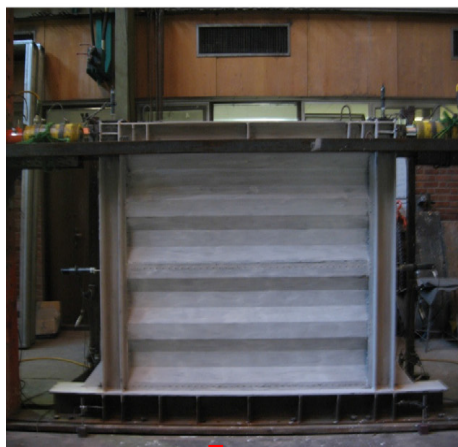
در جدول (۳-۱) برخی از مطالعات و آزمایشات انجام شده بر روی دیوار برشی فولادی ساخته شده با ورق موج‌دار گردآوری شده است.

جدول (۳-۱): مطالعات آزمایشگاهی و تحلیلی دیوار برشی فولادی با ورق موج‌دار و نتایج حاصل از آنها

ردیف	مکان آزمایش	محقق یا محققین	سال انجام	نوع تحقیق	عنوان تحقیق یا مشخصات نمونه آزمایشگاهی	نوع آزمایش یا تحلیل	نتایج و سایر ملاحظات
۱ [۱۸]	دانشگاه هاستون	مو و پرنگ (Mo & Perng)	۲۰۰۰	آزمایشگاهی	استفاده از پانل‌های برشی فولادی موج‌دار در ساخت قاب بتن مسلح	شبه استاتیکی چرخه‌ای	نشان دادند که پانل‌های برشی فولادی موج‌دار موجب کاهش کماتش برشی می‌شوند. اگرچه نتایج آزمایشات آن‌ها عملکرد ارزهای پایینی نشان می‌داد و آن به دلیل ناکافی بودن صلبیت اتصالات بین پانل و محیط قاب بود.
۲ [۱۹]	کره	فولپ و دوبینا (Fulop & Dubina)	۲۰۰۲	آزمایشگاهی	آن‌ها در مجموع ۱۶ تست (۷ تست تحت بار یکنواخت و ۸ تست تحت بار سیکلی) انجام دادند	شبه استاتیکی چرخه‌ای و استاتیکی یکنواخت	آزمایشات به منظور پی بردن ویژگی‌های سازه‌ای انواع مختلف دیوار-های برشی با ضخامت کم انجام شده بود.
۳ [۵]	دانشگاه بوفالو ایالات متحده	برمن و برونو (Berman & Bruneau)	۲۰۰۵	آزمایشگاهی	سه نمونه دیوار برشی فولادی ساخته شد. که دو نمونه از آن با ورق صاف و یک نمونه با ورق موج‌دار بود.	شبه استاتیکی چرخه‌ای	این نمونه‌ها به منظور بهسازی لرزه‌ای یک بیمارستان طراحی شده بودند.
۴ [۲۰]	دانشگاه برکلی کالیفرنیا - ایالات متحده	استجادینویک و استیون تیبینگ (Stojadinovic & Steven Tipping)	۲۰۰۹	آزمایشگاهی	۴۴ تست تحت بار سیکلی به منظور پی بردن به رابطه بین پارامترهای دیوار برشی فولادی با ورق موج‌دار انجام شد.	شبه استاتیکی چرخه‌ای	نتایج مطلوبی مبنی بر استفاده از ورق موج‌دار به جای ورق صاف بدست آمد در نهایت یک جدول شامل مقاومت برشی اسمی دیوار برشی فولادی با ورق موج‌دار تهیه شد.
۵ [۲۱]	دانشگاه صنعتی شریف ایران	امامی وهمکاران (Fereshteh Emami et. al.)	۲۰۱۳	آزمایشگاهی	سه نمونه دیوار برشی فولادی که یک نمونه با ورق صاف بدون سخت‌کننده و دو نمونه دیگر با ورق موج‌دار ساخته شده بودند.	شبه استاتیکی چرخه‌ای	این آزمایشات به منظور مقایسه دیوار برشی فولادی با ورق صاف و موج‌دار انجام شد.

۴- نحوه مدل سازی دیوار برشی فولادی در نرم افزار ANSYS و

اعتبار سنجی (Validation) مدل ها



۴-۱ - مقدمه

در این پایان‌نامه، برای تعیین قابلیت تغییرشکل‌های غیرارتجاعی دیوارهای برشی فولادی موج‌دار، از روش تحلیل اجزای محدود بهره گرفته شده است.

این روش یکی از قوی‌ترین و انعطاف‌پذیرترین روش‌های عددی محسوب می‌گردد و می‌تواند انواع رفتارهای غیرخطی شامل رفتارهای غیرخطی موادی، هندسی و رفتارهای غیرخطی حاصل از تغییر شرایط مرزی را فرمول‌بندی و حل نماید.

برای تحلیل دیوارهای برشی فولادی از نرم‌افزار تحلیل غیرخطی (ANSYS (Version 12)، که از جمله پیشرفته‌ترین و قوی‌ترین برنامه‌های تحلیل مسائل غیرخطی می‌باشد، استفاده شده است. در این فصل ابتدا به صورت خلاصه به خصوصیات، روش‌های تحلیل و فرضیات انجام شده برای تحلیل اشاره می‌گردد، سپس به بحث مدل‌سازی و تحلیل پرداخته خواهد شد.

۴-۲ - معرفی خصوصیات و قابلیت‌های نرم‌افزار ANSYS [۲۲]

نرم افزار ANSYS، یک برنامه چند منظوره بر اساس روش اجزای محدود است که مسائل مختلف مهندسی از قبیل مسائل مربوط به مکانیک جامدات و سازه، مکانیک سیالات، انتقال حرارت، میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی و محیط‌های چند فازی حاصل از آنها در آن قابل بررسی است. در این نرم‌افزار وجود المان‌های متنوع با قابلیت‌های متفاوت، انعطاف‌پذیری و قدرت ابتکار زیادی به کاربر می‌دهد. همچنین وجود زبان پر قدرت برنامه نویسی APDL، امکان انجام سریع و دقیق مدل‌سازی، تحلیل و تفسیر نتایج را ایجاد نموده است.

ذکر این نکته ضروری است که شرط گرفتن جواب‌های صحیح و قابل قبول، آشنایی با نحوه کارکردن با برنامه و نیز آگاهی از فیزیک مسأله و داشتن قضاوت مهندسی می‌باشد.

در این پایان‌نامه از تحلیل‌های مربوط به شاخه مکانیک جامدات و سازه استفاده شده است. در این حالت، برنامه از قابلیت‌های زیادی در حل مسائل مرتبط برخوردار است و می‌تواند به حل مسائل

استاتیکی، مودال، هارمونیکی، دینامیکی گذرا، دینامیکی طیفی، دینامیکی صریح، کمانش و غیرخطی هندسی پردازد. همچنین قابلیت بررسی مسائلی از قبیل مکانیک شکست، خستگی و رفتار غیرخطی مواد نیز در این نرم افزار وجود دارد.

در ادامه تعدادی از خصوصیات تحلیلی برنامه که از آنها استفاده شده است، به طور خلاصه تشریح می گردند.

۴-۲-۱- تحلیل کمانشی

در حالت کلی تحلیل کمانش به دو صورت می تواند انجام گردد که عبارتند از : تحلیل کمانشی غیرخطی و تحلیل کمانشی مقادیر ویژه.

تحلیل کمانشی غیرخطی در نرم افزار گزینه خاصی ندارد، در واقع این تحلیل یک تحلیل تغییر شکل های بزرگ می باشد که اثر خمیری شدن نیز می تواند در آن لحاظ گردد. بدیهی است که برای انجام آن از بارگذاری نموی استفاده می شود. برای شروع این نوع کمانش در اعضایی که عمده نیروها به صورت درون صفحه ای می باشد، مانند ستون ها و ورق ها، باید نیرویی تحریک کننده اعمال گردد و یا سازه با نقص اولیه، آنالیز گردد.

تحلیل کمانشی مقادیر ویژه، تحلیلی با الگوریتم تکراری است که مقدار بار تئوری کمانشی نقطه دوشاخگی را در یک سازه الاستیک بدست می آورد. برای انجام این تحلیل، انجام یک تحلیل الاستیک به منظور ایجاد تنش های اولیه در سازه، الزامی می باشد. در این تحلیل شکل مودهای کمانشی و نیز ضریب بار در هر مود کمانشی بدست خواهند آمد. با توجه به ماهیت این آنالیز، نتایج آن بدلیل در نظر نگرفتن اثرات تغییر شکل های اولیه، خمیری شدن، تنش های پسماند برای طراحی قابل استفاده نمی باشد.

۴-۲-۲- تحلیل غیر خطی هندسی

در روش تحلیل تغییر شکل‌های کوچک^۱ و کرنش‌های کوچک^۲، فرض می‌گردد که جابجایی‌ها به اندازه‌ای کوچکند که تغییر ایجاد شده در سختی سیستم قابل صرف‌نظر است. در مقابل در روش تحلیل تغییر شکل‌های بزرگ، تغییر سختی حاصل از تغییر شکل و جهت‌المان‌ها در نظر گرفته می‌شود. در واقع در این حالت ماتریس سختی سازه $[K]$ ، تابع بردار جابجایی $\{u\}$ ، خواهد بود. ANSYS می‌تواند چهار نوع رفتار غیر خطی هندسی را در نظر بگیرد که عبارتند از:

الف) کرنش‌های بزرگ^۳ : در این حالت فرض معمول کرنش‌های کوچک در نظر گرفته نمی‌شود و تغییر در سطح و ضخامت در محاسبات لحاظ می‌گردد. در این حالت تغییر شکل‌ها و دوران‌ها می‌توانند کوچک و یا بزرگ باشند.

ب) دوران‌های بزرگ^۴ : در این حالت فرض می‌شود که دوران‌ها بزرگ هستند ولی برای محاسبه کرنش‌های مکانیکی که تنش‌ها از آنها محاسبه می‌شوند، از توابع دارای عبارات خطی استفاده می‌گردد. تغییر شکل‌های سازه در این حالت فقط از حرکت جسم صلب ناشی می‌گردد.

پ) سخت‌شدگی در اثر تنش^۵ : این حالت که سخت‌شدگی هندسی نیز نامیده می‌شود، سخت شدن یا نرم شدن سازه در اثر وضعیت تنش‌های داخلی را در نظر می‌گیرد. این اثر باید به‌طور معمول، برای اعضای خمشی و یا خارج صفحه‌ای اندکی نسبت به سختی محوری و یا درون صفحه‌ای خود دارند، مانند ستون‌های لاغر، کابل‌ها و پوسته‌های نازک در نظر گرفته شود.

¹ Small deflection

² Small Strain

³ Large Strain

⁴ Large Rotation

⁵ Stress Stiffening

ت) نرم‌شدگی حاصل از دوران^۱: در این حالت کرنش‌ها و دوران‌ها کوچک هستند و اثر

سرعت زاویه‌ای بر جرم سازه‌ای دارای حرکت دورانی را در محاسبات لحاظ می‌نماید.

در تحلیل غیرخطی هندسی با المان‌های دارای قابلیت در نظر گرفتن کرنش‌های بزرگ، با توجه به فرمول‌بندی بکار گرفته شده در این المان‌ها، تنش‌ها و کرنش‌ها در اطلاعات ورودی و همچنین در نتایج آنالیز، از نوع لگاریتمی (واقعی)^۲ می‌باشند. بنابراین برای تبدیل کرنش‌های کوچک یا مهندسی به کرنش‌های لگاریتمی (واقعی یا هنکی^۳) از رابطه^۴ (۱-۴) استفاده می‌شود. همچنین در صورتی که ماده دارای رفتار خمیری تراکم ناپذیر باشد، می‌توان برای تبدیل تنش‌های مهندسی به تنش‌های واقعی (کوشی^۴) از رابطه^۴ (۲-۴) استفاده کرد.

$$\varepsilon_{ln} = \ln(1 + \varepsilon_{Eng}) \quad (1-4)$$

$$\sigma_{True} = \sigma_{Eng} (1 + \varepsilon_{Eng}) \quad (2-4)$$

۳-۲-۴- تحلیل غیر خطی مادی

در تحلیل غیر خطی مادی، اثرات مربوط به تغییرات سختی سازه در اثر خواص و رفتار مصالح در تحلیل در نظر گرفته می‌شود. ANSYS می‌تواند انواع مختلفی از خواص غیرخطی مادی را در دماهای مختلف در نظر بگیرد. این خواص در محدوده تحلیل‌های مکانیک جامدات و سازه شامل موارد زیر می‌گردد:

الف) خمیری شدن غیر وابسته به زمان: که در آن تغییر شکل‌های خمیری به سرعت بارگذاری بستگی ندارند. در این مواد با رسیدن تنش به حد مشخصی، تغییر شکل‌های برگشت ناپذیری در ماده اتفاق می‌افتد. مانند مدل‌های رفتاری:

¹ Spin Softening

² logarithmic

³ Hencky strain

⁴ Cauchy Stress

- مواد دارای رفتار خمیری مانند فولاد یا بسیاری از فلزات که می‌توانند از قوانین سخت‌شدگی مختلفی پیروی نمایند.
 - مواد ارتجاعی غیرخطی که در آنها کرنش‌ها برگشت‌پذیر هستند.
 - مواد دارای خواص هایپرالاستیک^۱ مانند مواد لاستیکی و الاستومری.
 - مواد دارای حافظه تغییر شکلی^۲ مانند رفتار فوق الاستیک آلیاژ نیتینول^۳
- (ب) خمیری شدن وابسته به زمان: که در آن ایجاد تغییر شکل‌های خمیری به سرعت بارگذاری بستگی دارد. مانند مدل‌های رفتاری :
- مواد ویسکوالاستیک^۴ مانند شیشه.
 - مواد ویسکوپلاستیک^۵ مانند رفتار فلزات طی فرایند شکل‌دهی.
 - خزش شامل تغییر شکل تحت یک بار ثابت و یا کاهش عکس‌العمل تحت یک جابجایی ثابت در دماهای بالا و یا در بتن پیش‌تنیده.

(پ) تورم

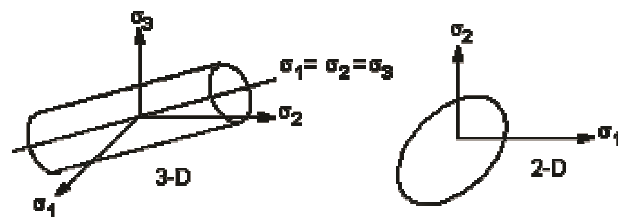
با توجه به اینکه مصالحی مانند فولاد از نوع مواد دارای رفتار خمیری غیر وابسته به زمان هستند، بنابراین قوانین حاکم بر رفتار این دسته از مواد را مورد بررسی قرار می‌دهیم.

۴-۲-۳-۱- رفتار خمیری غیر وابسته به زمان

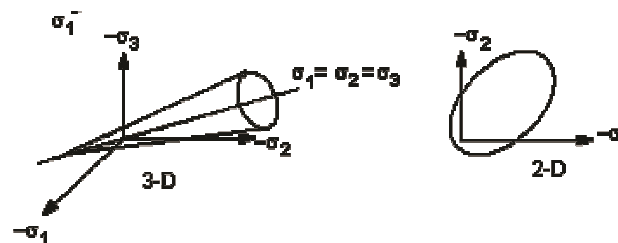
رفتار خمیری غیر وابسته به زمان تابع سه عامل معیار تسلیم^۶، قانون جریان^۷ و قواعد سخت‌شدگی کرنش^۸ می‌باشد.

¹ Hyperelastic
² Shape Memory Alloy
³ Nitinol
⁴ Viscoelastic
⁵ Viscoplastic
⁶ Yield Criterion
⁷ Flow Rule
⁸ Hardening Rule

الف) معیار تسلیم، مشخص کننده تنش است که در آن ماده وارد محدوده خمیری می گردد. در صورت وجود تنش چند مؤلفه ای این تنش به صورت یک تنش معادل در نظر گرفته می شود. معیارهای تسلیم فون میسز و ترسکا^۱، دو سطح تسلیم مستقل از فشار هیدرواستاتیک و معیارهای تسلیم موهر-کلمب^۲ و دراگر-پراگر^۳، دو سطح تسلیم وابسته به فشار هیدرواستاتیک می باشند. با توجه به اشکال (۱-۴) و (۲-۴)، در صورتیکه حالت تنش در ماده در داخل سطح تسلیم قرار گیرد، کرنش ها در وضعیت ارتجاعی خواهند بود. در غیر این صورت کرنش های خمیری برگشت ناپذیری در ماده ایجاد می گردد.



شکل (۱-۴): معیار تسلیم فون میسز در حالت دو بعدی و سه بعدی.



شکل (۲-۴): معیار تسلیم دراگر-پراگر در حالت دو بعدی و سه بعدی.

ب) قانون جریان، جهت کرنش های پلاستیک را مشخص می نماید.

ج) قواعد سخت شدگی کرنش، نحوه تغییر سطح تسلیم را بعد از تسلیم اولیه توصیف و

سطح تسلیم ثانویه را مشخص می نماید. در تئوری خمیری، در حالت کلی سخت شدگی کرنش با سه

نوع رفتار مدل می شود که عبارتند از:

¹ Tresca

² Mohr-Columb

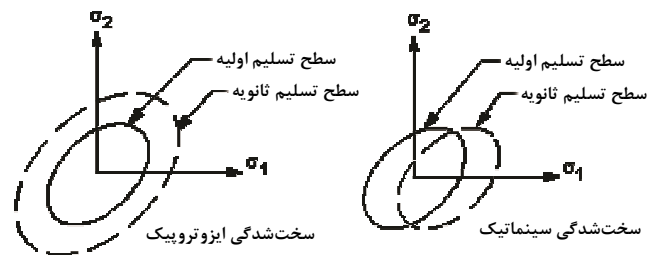
³ Drucker-Prager

(۱) سخت‌شدگی ایزوتروپیک^۱

(۲) سخت‌شدگی سینماتیکی^۲

(۳) سخت‌شدگی مستقل

در این مدل‌ها نحوه ارتباط سطح تسلیم کشش و فشار پس از تسلیم اولیه با یکدیگر متفاوت است. در سخت‌شدگی ایزوتروپیک بعد از رسیدن به تسلیم اولیه، اندازه سطح تسلیم در تمام جهات به‌طور یکسان بزرگ می‌شود. این در حالی است که در سخت‌شدگی سینماتیکی اندازه سطح تسلیم همیشه ثابت بوده و فقط بعد از رسیدن به تسلیم اولیه، انتقال می‌یابد. در این تئوری اثر پوشینگر^۳ در نظر گرفته شده است. شکل (۳-۴) نیز نحوه تغییرات سطوح تسلیم را در قواعد سخت‌شدگی مختلف به‌صورت شماتیک نشان می‌دهد. شکل (۴-۴) معادلات رفتاری را در دو محیط دارای سخت‌شدگی سینماتیکی و ایزوتروپیک را با یکدیگر مقایسه می‌نماید.

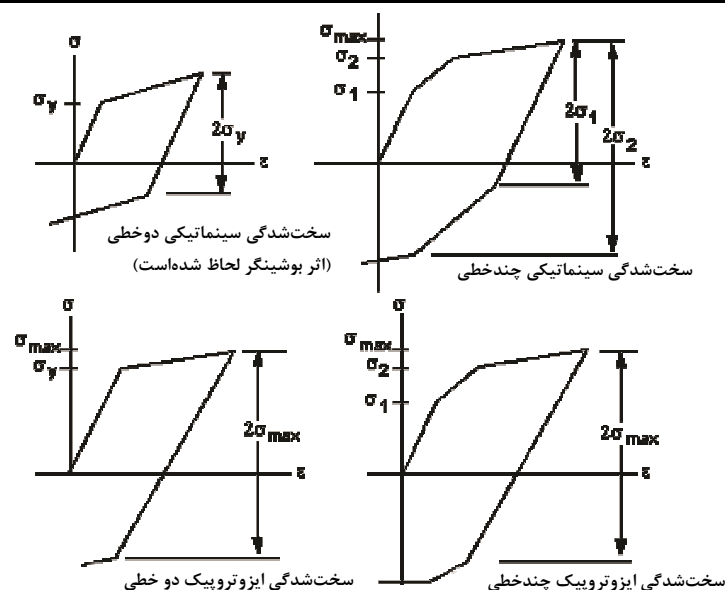


شکل (۳-۴): مقایسه نحوه تغییرات سطوح تسلیم در قواعد سخت‌شدگی سینماتیکی و ایزوتروپیک.

¹ Isotropic Hardening

² Kinematic Hardening

³ Bauschinger



شکل (۴-۴): مقایسه معادلات رفتاری محیط‌های دارای سخت‌شدگی سینماتیکی و ایزوتروپیک در حالات دو خطی و چند خطی.

در سخت‌شدگی مستقل سطح تسلیم در کشش مستقل از سطح تسلیم در فشار می‌باشد.

مدل سخت‌شدگی ایزوتروپیک برای مصالحی که از معیار تسلیم فون میسز تبعیت می‌کنند (مانند اکثر فلزات) توصیه شده و برای تحلیل‌های کرنش بزرگ مناسب می‌باشد. این مدل برای تحلیل‌های چرخه‌ای و تحلیل‌های کرنش کوچکی که در آن‌ها بارگذاری خیلی نامتناسب باشد، توصیه نمی‌گردد.

مدل سخت‌شدگی سینماتیکی نیز برای مصالحی که از معیار تسلیم فون میسز تبعیت می‌کنند (مانند اکثر فلزات) توصیه شده و از این مدل می‌توان برای تحلیل‌های چرخه‌ای استفاده نمود.

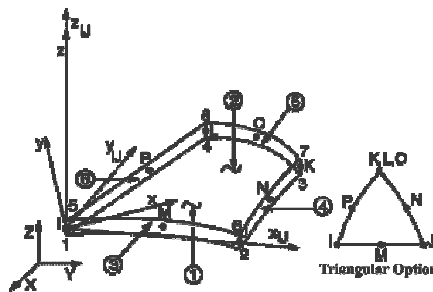
۴-۲-۴- معرفی المان‌های متناسب با فیزیک مسأله

با توجه به اینکه ورق‌های فولادی صاف و موج‌دار از جمله پوسته‌های با ضخامت نازک تلقی

می‌گردند، بنابراین المان پوسته بهترین گزینه برای مدل‌سازی آنها به نظر می‌رسد.

: SHELL93

المان پوسته ۹۳ همانطوری که در شکل (۴-۵) نشان داده شده است، هشت گرهی بوده و در هر گره آن سه درجه آزادی انتقالی و سه درجه آزادی چرخشی وجود دارد. این المان برای مدل سازی پوسته های دارای انحنا مناسب می باشد. توابع شکلی آن در هر دو جهت درون صفحه از مرتبه دوم می باشند. استفاده از آن در المان بندی کاملاً مثلثی مقدور است. این المان برای تحلیل های خطی و همچنین تحلیل های غیرخطی تغییر شکل های بزرگ و کرنش های بزرگ مناسب می باشد. امکان حل مسائل تحلیل خمیری، سخت شدگی هندسی، تورم در این المان در نظر گرفته شده است.



شکل (۴-۵) : المان SHELL93

۴-۲-۵- روشهای حل

ANSYS، برای حل مسائل غیرخطی به طور معمول از روش نیوتن-رافسون استفاده می نماید. در این روش، بار به نمونه های کوچکی تقسیم شده و به صورت مرحله ای اعمال می گردد. در شروع حل، برنامه نیروی نامتعادل حاصل از اختلاف بار اعمال شده و نیروهای حاصل از تنش در المان ها را محاسبه و نیروی نامتعادل را با بکارگیری یک تحلیل خطی اعمال می نماید. در صورتی که همگرایی حاصل نشود، نیروی نامتعادل دوباره محاسبه شده و حل تا رسیدن به همگرایی ادامه می یابد.

در صورتیکه امکان همگرایی با روش نیوتن-رافسون، به دلیل تکین شدن^۱ ماتریس سختی مماسی فراهم نباشد، مانند مسائلی که در آنها از نظر سازه‌ای ناپایداری فرو جهشی اتفاق می‌افتد، روش دیگری به نام قوس-کمان^۲ برای حل می‌تواند بکار برده شود. در این روش، به علت انجام عملیات تکراری همگرایی در طول قوس، امکان همگرا نمودن مسائلی که در آنها شیب رابطه بار-جابجایی در مناطقی صفر یا منفی می‌گردد، وجود دارد.

۴-۳- مدل‌سازی دیوار برشی فولادی

۴-۳-۱- فرضیات بکارگرفته شده در مدل‌سازی

در این قسمت کلیه فرضیات مادی، تحلیلی و هندسی بکارگرفته شده برای تحلیل غیرخطی دیواربرشی فولادی صاف و موج‌دار ارائه گردیده و نحوه ساخت مدل و چگونگی استخراج نتایج آورده شده است.

۴-۳-۱-۱- نوع تحلیل

برای آگاهی از رفتار ورق‌های فولادی صاف و موج‌دار و نحوه باربری برشی آنها در محدوده‌های غیر ارتجاعی، چاره‌ای جز استفاده از تحلیل خمیری به همراه در نظر گرفتن ناپایداری‌های هندسی نیست.

برای تحلیل دیوار برشی فولادی صاف و موج‌دار ابتدا از تحلیل کمانشی مقادیر ویژه استفاده شده است. این تحلیل با خصوصیات ارتجاعی انجام می‌گیرد و هدف از آن رفتارشناسی اولیه و بدست آوردن الگویی برای تغییر شکل اولیه است.

در ادامه برای انجام تحلیل‌های غیرخطی ورق صاف و موج‌دار، به سبب وجود تنش‌های درون صفحه‌ای زیاد در اجزای این ورق‌ها و همچنین احتمال وقوع کمانش در حالت کلی و موضعی، در

^۱ Singular

^۲ Arc-Length

تحلیل‌های مورد نظر، کرنش‌ها و تغییر شکل‌های بزرگ و همچنین سخت‌شدگی تنشی در نظر گرفته شده‌است.

۴-۳-۱-۲- مصالح بکار برده شده در شبیه سازی فولاد

در این تحقیق، به منظور شبیه‌سازی رفتار فولاد از ۲ مصالح با مدل رفتاری استفاده شده است.

۱- ایزوتروپیک خطی (Linear Isotropic): این مدل رفتاری دارای دو پارامتر مدول الاستیسیته و ضریب پواسون است که برای شبیه‌سازی رفتار فولاد در ابتدای بارگذاری به کار می‌رود. در این مدل رفتاری باید، مدول الاستیسیته مماسی اولیه و ضریب پواسون فولاد وارد شود.

۲- ایزوتروپیک چندخطی (Multilinear Isotropic Hardening plasticity): این مدل با تعیین منحنی تنش کرنش فولاد، به منظور شبیه‌سازی رفتار فولاد در طول بارگذاری به (MISO) کار می‌رود. از نکات حائز اهمیت این مدل عدم سازگاری آن با مدل کردن نرم‌شدگی مصالح است. در مواردی که بارگذاری به صورت سیکلیک اعمال می‌شود به جای مدل رفتاری ایزوتروپیک چندخطی (MISO) می‌بایست از مدل رفتاری سینماتیک چند خطی (MKIN) استفاده کرد.

در این مدل‌های رفتاری می‌بایست، منحنی تنش کرنش فولاد وارد شود. با توجه به دقت مورد نظر می‌توان تعداد نقاط ورودی را کم و یا زیاد کرد. منحنی تنش کرنش فولاد را می‌توان از آزمایشات انجام شده و یا مدل‌های ریاضی پیشنهادی توسط محققین به دست آورد.

در نرم‌افزار کرنش‌های بزرگ و تغییر شکل‌های بزرگ، هر دو با یک گزینه فعال می‌شوند، بنابراین، خصوصیات المان مورد استفاده است که نوع تحلیل غیر خطی را به‌طور دقیق مشخص می‌نماید.

در انجام تحلیل غیر خطی از امکاناتی از قبیل: کنترل جواب‌ها، تحلیل به روش نیوتن-رافسون کامل با در نظر گرفتن سختی و تقسیم بندی خودکار نمونه‌های بارگذاری، استفاده شده است.

۴-۳-۱-۳- نحوه‌ی مدل‌سازی یک عضو فولادی در ANSYS

مدل‌سازی یک عضو یعنی تعیین و تطبیق مشخصات عضو، اعم از رفتار مادی، مشخصات هندسی، شرایط مرزی و نحوه‌ی بارگذاری، به گونه‌ای که عکس‌العمل رفتاری و خروجی‌هایی متناسب و نزدیک به نتایج واقعی از آن حاصل شود. اطمینان از نزدیک شدن نتایج خروجی با نتایج آزمایشگاهی که با تعدیل پارامترهای قابل تنظیم در نرم‌افزار صورت می‌گیرد، تعیین صحت عمل‌کرد یا همان کالیبراسیون نامیده می‌شود.

به طور کلی برای مدل‌سازی هر عضوی در نرم‌افزار ANSYS، مراحل زیر باید مد نظر قرار گرفته و به طور مشخص تعریف گردد:

۱- ترسیم شکل هندسی عضو با توجه به ابعاد نمونه و در نظرگیری سیستم واحدی یکسان و استفاده از دستگاه مختصات محلی و کلی مناسب با توجه به هندسه‌ی عضو.

در نرم‌افزار ANSYS برای تعیین دستگاه مختصات محلی، از دستگاه مختصات کلی (اصلی) که دارای مبدأ به طور کلی این نرم‌افزار شامل سه نوع دستگاه مختصات کلی دکارتی، استوانه‌ای و کروی می‌باشد.

۲- در نظرگیری المان‌های متناسب با رفتار عضو سازه‌ای مورد نظر و تنظیم مشخصات اصلی، در گزینه‌ی OPTION مربوط به آن المان.

۳- بیان خصوصیات و رفتار مکانیکی مواد و مصالح استفاده شده در عضو در گزینه‌ی MATERIAL PROPERTIES، که این قسمت متشکل از دو بخش می‌باشد.

الف - تعریف خصوصیات خطی المان‌ها که بر دو نوع مواد همسان‌گرد و غیرهمسان‌گرد می‌باشد. در این بخش سختی و ضرایب پواسون اولیه‌ی مواد مورد استفاده با در نظرگیری شماره‌ای منحصر به فرد برای هر ماده تعریف می‌شود. چنانچه رفتار یک ماده در تمام جهات یکسان باشد، آن ماده همسان‌گرد و چنانچه در هر جهتی دارای رفتار مادی متفاوتی باشد آن ماده غیرهمسان‌گرد

نامیده می‌شود. باید دقت نمود که لغت همسان‌گرد با لغت همگن که به معنی یکسان بودن خصوصیات مادی در تمام نقاط یک ماده می‌باشد، اشتباه نشود.

ب - با در نظرگیری شماره‌ای که خصوصیات خطی آن ماده در قسمت قبل، تعیین شده است، خصوصیات رفتار غیرخطی مادی در قسمت ELEMENT TABLE تعیین می‌گردد.

۴- با توجه به نوع المان و رفتار مادی تعریف شده‌ی قبلی، خصوصیات ویژه، برای المان‌های گوناگون، قابل تعریف می‌باشد؛ که تحت عنوان ثابت‌های حقیقی در قسمت REAL CONSTANTS مربوط به آن المان تعریف می‌گردد.

۵- تخصیص مشخصات تعریف شده‌ی قبلی، اعم از نوع المان، خصوصیات ویژه برای هر المان، نوع ماده‌ی مورد استفاده و دستگاه مختصات محلی که خصوصیات آن المان با توجه به آن در نظر گرفته شده، برای هر قسمت حجمی، سطحی یا خطی از عضو ترسیم شده. این مرحله با استفاده از قسمت DEFINE ATTRIBUTE انجام می‌گیرد.

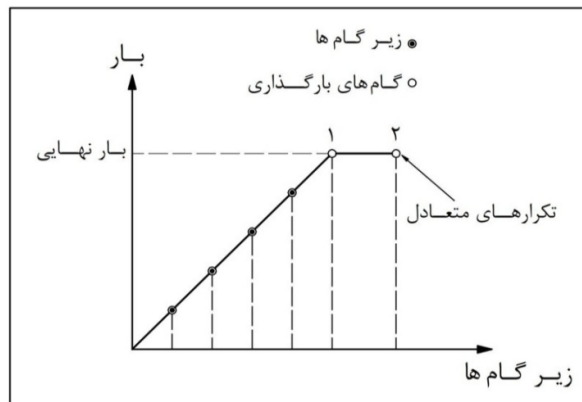
۶- المان‌بندی اشکال ترسیم شده.

۷- اعمال بارگذاری مورد نظر بر روی عضو؛ این بارگذاری شامل تخصیص شرایط مرزی، اعم از قيود گیرداری گره‌ها، شرایط تقارن و پادتقارن و یا اعمال نیروهای متمرکز گره‌ای، سطحی و یا حجمی و یا تغییر مکان‌های مربوط به هر گره، می‌باشد.

۸- تعیین پارامترهای مربوط به معیار همگرایی تحلیل غیرخطی، که پیش‌تر با استفاده از معیارهای کنترل نیرو، جابجایی، لنگر و دوران، و با توجه به نوع بارگذاری، اعمال می‌گردند. پس از آن حداکثر تعداد تکرار تا دستیابی به معیار همگرایی تعیین شده، مشخص می‌گردد.

۹- در حلّ یک مسأله غیرخطی عوامل بسیار مهمی دخالت دارند به طوری که عدم دقت در وارد کردن و معرفی آنها باعث می‌شود که نتایج کاملاً غلطی ارائه شود. از جمله این عوامل می‌توان به بارگذاری اشاره کرد؛ به طوری که تغییر در نحوه‌ی اعمال بار منجر به تغییر در روند حل و نتایج خواهد شد. در یک تحلیل غیرخطی بار باید به صورت تدریجی به سازه اعمال گردد. این کار در نرم‌افزار

ANSYS طی دو روند کاملاً متمایز صورت می پذیرد. اول آن که بار در مراحل مختلف تحت عنوان گام بارگذاری به سازه اعمال شود. در هرگام بارگذاری، زمان، یک پارامتر نمادین برای نشان دادن زمان انتهای بارگذاری است. روند دومی که در اعمال بار طی می کنیم، قطعه قطعه کردن هر گام بارگذاری است؛ که به هر یک از این قطعه های اعمال بار، زیرگام می گوئیم. به مجموعه ای این بارگذاری های قطعه قطعه و متوالی تاریخچه ی بارگذاری گفته می شود. مفهوم گام بارگذاری و زیرگام در شکل (۴-۶) نشان داده شده است. در هر گام بارگذاری تعداد زیرگام می تواند بر حسب ضرورت زیاد یا کم گردد. این بدان معنا است که در مراحل اولیه ی بارگذاری می توان هر گام را با تعداد کمتری زیر گام حل کرد ولی، در بارهایی نزدیک به بار شکست، هم گام ها و هم چنین زیرگام های آنها را می بایست ریزتر در نظر گرفت. باید به این نکته توجه کرد که میزان یا نحوه ی اعمال برخی از پارامترها برای هر مسئله متفاوت است.



شکل (۴-۶): مفهوم گام بارگذاری و زیرگام در تحلیل غیرخطی

به منظور در نظر گرفتن بارگذاری تدریجی یا نموی، تعداد گام های اعمال بار برای رسیدن به بار حداکثر اعمال شده بر عضو، تعریف می گردد. به طور کلی در تحلیل غیرخطی اجزای محدود یک مدل، قابلیت در نظرگیری روند تدریجی بارگذاری وجود دارد و در هر مرحله، روند محاسبات به صورت

محدود (یکی از دلایل این محدودیت، تعیین حداکثر تعداد تکرار در مرحله قبلی می‌باشد) تا آن جایی که معیار همگرایی تعریف شده برای نرم‌افزار تأمین گردد، تکرار می‌شود.

برای این منظور در نرم‌افزار ANSYS گزینه‌ای تحت عنوان LOAD STEP به مفهوم گام بارگذاری وجود دارد که با توجه به آن می‌توان مراحل متفاوتی از روند تدریجی بارگذاری و یا باربرداری را بر یک سازه اعمال نمود. از آن جا که حل مسائل پلاستیسیته و غیرخطی تابعی از مسیر و تاریخچه بارگذاری می‌باشد، لذا قابلیت تنظیم روند تدریجی بارگذاری به مقدار مورد نیاز با توجه به زیرگام‌های هر مرحله بارگذاری تحت عنوان SUB STEP در نرم‌افزار وجود دارد.

۱۰- تخصیص نوع تحلیل مورد نیاز که شامل استاتیکی، دینامیکی، گذرا و ... بوده و تنظیم پارامترهای قابل تعریف برای تحلیل اجزای محدود و اجرای تحلیل.

۱۱- کنترل نتایج خروجی حاصل از تحلیل در پردازشگرهای POST1 و POST26 و کالیبره

نمودن نرم‌افزار با توجه به نتایج آزمایشگاهی موجود. [۲۳]

۴-۳-۱-۴- زبان پارامتری ANSYS و ساخت مَکرو

زبان طراحی پارامتری نرم‌افزار یا همان APDL^۱ به خصوص در ساخت مَکرو^۲ در حل مسائلی نظیر مسائل بهینه‌سازی طراحی، بهینه‌سازی مش، بهینه‌سازی توپولوژی و کارکرد با پارامترها در طول یک مسئله کاربرد دارد. این قابلیت با کاربرد آن در ساخت مَکرو به نوعی محیط نیمه فعالی از یک محیط برنامه‌نویسی را می‌تواند ایجاد کند.

از جمله قابلیت‌های این زبان می‌توان به محاسبات ریاضی به کمک دستورات موجود، تولید دستورات شرطی و حلقه‌های تکرار اشاره کرد.

استفاده از رابط گرافیکی کاربر یا GUI^۳ اگر چه در مدل‌سازی راحت‌تر از برنامه‌نویسی به زبان

APDL به نظر می‌رسد، اما با توجه به موارد زیر، استفاده از آن گریز ناپذیر به نظر می‌رسد.

^۱ ANSYS Parametric Design Language

^۲ Macro

^۳ Graphical User Interface

۱- در بسیاری موارد کاربر نیاز به ایجاد مدل های متعددی از یک نمونه را دارد. به عنوان مثال در تحقیق حاضر مدل های شبیه سازی شده در ضخامت صفحات جان، تعداد زیر صفحه، و زاویه ی اتصال زیر صفحه ها به یکدیگر و ... متفاوت بوده؛ در این حالت با استفاده از زبان برنامه نویسی به راحتی می توان با تغییر چند عدد تغییرات لازم را در مدل ایجاد کرد. حتی می توان برنامه ی نوشته شده را پارامتری نموده، تا در هنگام اجرای برنامه مقدار هر متغیر را وارد نمود. با پارامتری نمودن برنامه و استفاده از متغیرهای ماتریسی می توان گام های بارگذاری را وارد کرده و به اجرای تحلیل هر گام بارگذاری به طور خودکار اقدام کرد.

۲- روند ایجاد، خواص و شرایط مدل، در مدل های حاصل از رابط گرافیکی مشکل بوده و حتی پیگیری بعضی از مراحل ایجاد مدل غیرممکن است؛ در حالی که تمامی مراحل ایجاد مدل در زبان برنامه نویسی خط به خط قابل پیگیری است.

۳- با استفاده از زبان برنامه نویسی ANSYS یا همان APDL، به راحتی می توان تغییرات دلخواه را در مدل ایجاد کرد؛ در حالی که در مدل های ایجاد شده توسط رابط گرافیکی این کار مشکل و حتی ممکن است با خطا ممکن باشد.

۴- حجم فایل های ایجاد شده توسط برنامه نویسی بسیار کم تر از رابط گرافیکی است؛ از این رو انتقال فایل های آن به راحتی امکان پذیر است.

۴-۴- جایگاه و اهمیت اعتبارسنجی (Validation) نمونه ها

زمانی که نمونه هایی را در آزمایشگاه می سازیم و آن ها را مورد آزمایش قرار می دهیم، دسته ای از نتایج در اختیار قرار می گیرد. گرچه ممکن است بعضی از آن نتایج همراه با خطا باشد؛ لیکن کلیت این نتایج به عنوان مبنایی برای استخراج های بعدی مورد توجه و استفاده قرار می گیرد. در مقابل، در یک تحلیل کامپیوتری اولین سؤال اساسی در مواجهه با هر نتیجه ای آن است که چگونه و تا چه حد

به صحت این نتیجه اطمینان داریم. در هر تحقیق برای آن که بتوانیم نتایج تحلیل‌های رایانه‌ای خود را مبنایی برای نتیجه‌گیری‌ها و مقایسه‌های بعدی قرار دهیم، لازم است ابتدا توانمندی خود را برای مدل‌سازی به اثبات برسانیم. بهترین روند برای نیل به این هدف آن است که نمونه‌هایی از تحقیقات آزمایشگاهی (یا احیاناً تحلیلی) انجام شده توسط سایر محققین را انتخاب کنیم و با روش یا نرم‌افزار مورد استفاد خود سعی در به دست آوردن نتایج تقریباً مشابه داشته باشیم [۲۳].

پس از بیان مختصری از مراحل مدل‌سازی اجزای محدود یک عضو فولادی به منظور آشنایی بهتر با این مراحل، مدل‌سازی و اعتبارسنجی سه دیوار برشی فولادی، دو دیوار با ورق صاف و دیوار دیگر با ورق موج‌دار بیان می‌گردد.

۴-۵- مدل‌سازی و کالیبراسیون دیوار برشی فولادی با ورق صاف

در این قسمت می‌خواهیم به مدل‌سازی دو دیوار برشی فولادی با ورق صاف با رفتار برشی آزمایش شده یکی توسط جفری برمن و مایکل برونو [۵] و همچنین نمونه دیگر آزمایش شده توسط فرشته امامی و همکاران [۲۱] اقدام کرده و اعتبار نتایج حاصل از اجزای محدود را از طریق مقایسه با نتایج آزمایشگاهی بررسی کنیم.

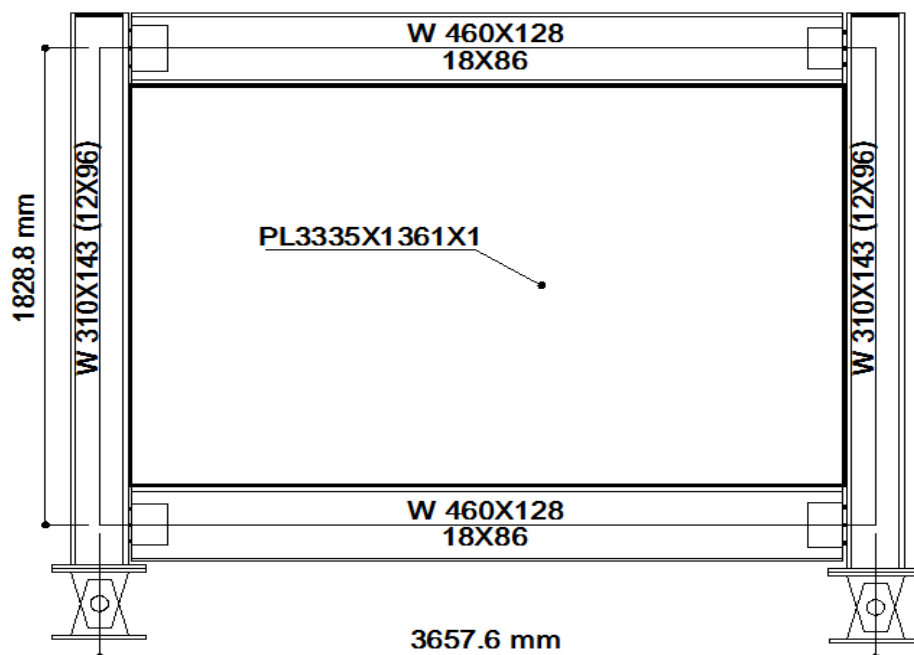
۴-۵-۱- مدل آزمایشگاهی جفری برمن و مایکل برونو با ورق صاف

در این قسمت مدل آزمایشگاهی جفری برمن و مایکل برونو را بررسی می‌کنیم. فولاد مصرفی تیر و ستون دارای تنش تسلیم ۳۴۵ مگاپاسکال با کرنش تسلیم ۰/۰۰۱۸۱۵ و فولاد مصرفی ورق دیوار برشی دارای تنش تسلیم ۲۱۴ مگاپاسکال و کرنش تسلیم ۰/۰۰۱۰۷ می‌باشند. ضخامت ورق نیز یک میلی‌متر می‌باشد.

در این آزمایش نحوه اتصال تیر به ستون در قاب به صورت مفصل بوده و ورق نیز توسط جوش به قاب متصل شده است (مدل Specimen F2 در آزمایش جفری برمن که به اختصار F-1 می‌نامیم) . بارگذاری نیز از نوع کنترل تغییر مکان بوده و در بالای قاب اعمال شده است. شکل (۴-۷) جزئیات

نمونه آزمایشگاهی [۵] را نشان می دهد. (نحوه نامگذاری مدل های ورق صاف به این صورت است که

بعد از F عدد قرار گرفته شده بیان گر ضخامت ورق دیوار می باشد)



شکل (۷-۴): جزئیات نمونه آزمایشگاهی جفری برمن و مایکل پرونو (Specimen F2)

۴-۵-۱-۱- اعمال نقص اولیه ساخت

برای تعیین میزان تغییرشکل اولیه و یا نقص اولیه ی مورد نیاز برای تحلیل غیرخطی، از پیشنهادات آیین نامه ی اروپا^۱ استفاده شده است.

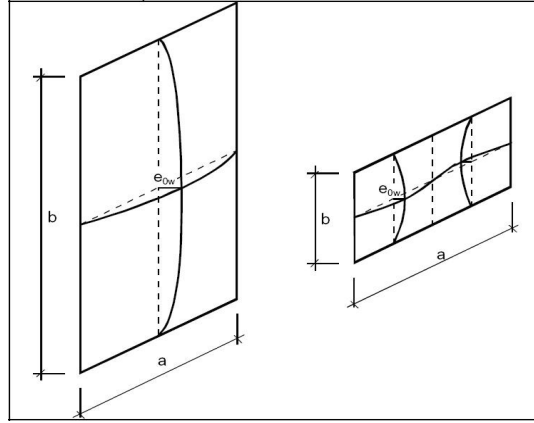
آیین نامه ی اروپا در مورد اعمال نقص اولیه عضو به منظور تحلیل اجزای محدود، پیشنهادات زیر را ارائه داده است [۲۴]:

۱- میزان نقص اولیه عضو برابر با ۰.۸٪ رواداری^۲ خطای ساخت در نظر گرفته شود.

۲- بر طبق شکل (۸-۴)، مقدار نقص اولیه $\frac{1}{200}$ عرض زیر صفحه در نظر گرفته شود.

در این پایان نامه روش دوم مورد استفاده قرار گرفته است.

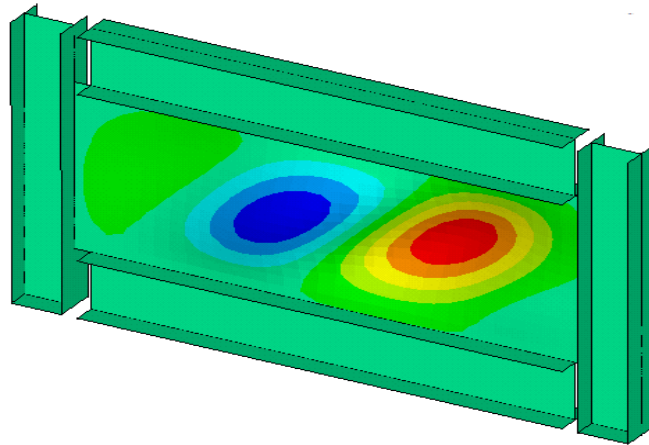
^۱ Euro Code
^۲ Tolerance



شکل (۴-۸): میزان نقص اولیه مورد نیاز برای تحلیل غیر خطی بر اساس آیین نامه اروپا [۲۴]

نقص اولیه به صورت ضریب مقیاسی از تغییر شکل مد اول کمانش، در نظر گرفته می شود. این ضریب مقیاس به منظور یکسان سازی حداکثر تغییر مکان گره های حاصل از مود اول کمانش با میزان نقص اولیه پیشنهادی آیین نامه اروپا استفاده می شود. در شکل (۴-۹) شکل مود اول کمانشی مدل اجزای محدود نشان داده شده است در این مدل ضریب مقیاس برابر است با:

$$e_{ow} = \min(a/200, b/200) \quad \text{و} \quad SF = \frac{e_{ow}}{D}$$

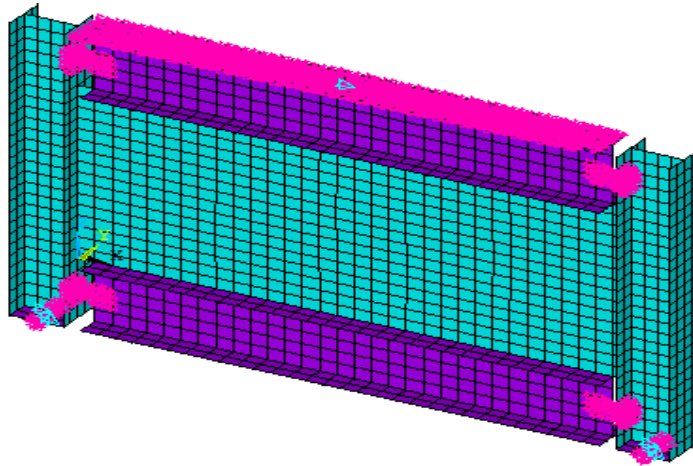


شکل (۴-۹): مد اول کمانش دیوار برشی فولادی F-1

که در این رابطه b ارتفاع ورق دیوار و a طول ورق و D ، حداکثر تغییر مکان خارج از صفحه ورق دیوار حاصل از تحلیل کمانشی مقدار ویژه می باشد.

۴-۵-۱-۲- انتخاب المان و نحوه مش بندی دیوار برشی فولادی F-1

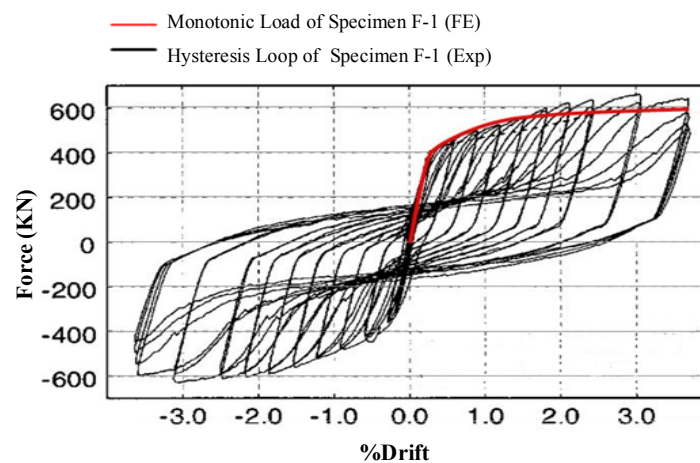
المان مورد استفاده از نوع SHELL 93 انتخاب شده است. شکل (۴-۱۰) نحوه مش بندی این دیوار را نشان می دهد.



شکل (۴-۱۰): نحوه مش بندی دیوار برشی فولادی F-1

۴-۵-۱-۳- مقایسه نتایج تحلیل اجزای محدود با نتایج آزمایشگاهی

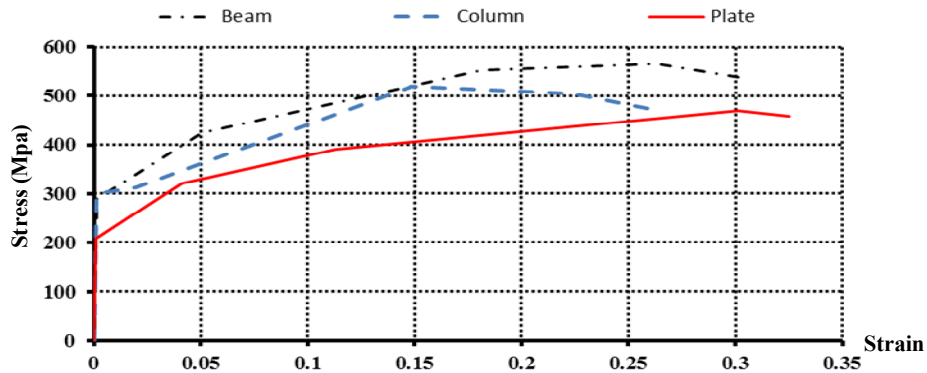
در شکل (۴-۱۱) نمودار مقایسه ای بار تغییر مکان مدل آزمایشگاهی و مدل اجزای محدود Specimen F2 (F-1) تحت بار یک طرفه نشان داده شده است. [۵]



شکل (۴-۱۱): نمودار مقایسه ای بار درصد تغییر مکان نسبی مدل آزمایشگاهی و مدل اجزای محدود F-1

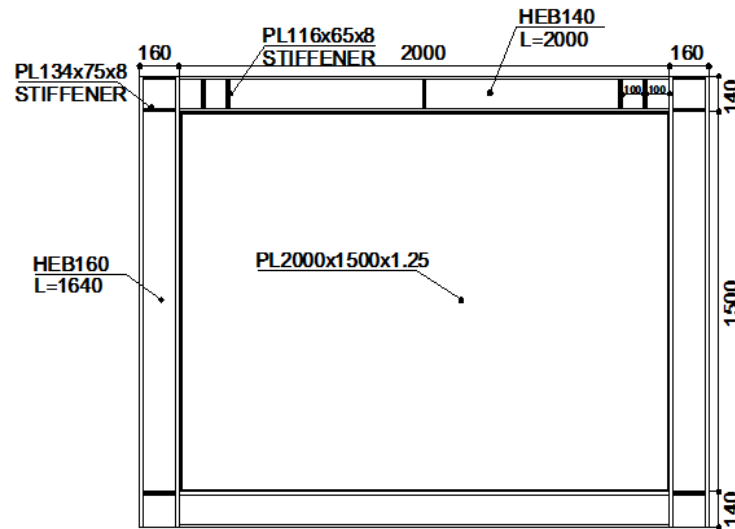
۴-۵-۲- مدل آزمایشگاهی فرشته امامی و همکارانش با ورق صاف

در این قسمت به مدل‌سازی و کالیبراسیون مدل آزمایشگاهی انجام شده توسط فرشته امامی و همکارانش با ورق صاف (Specimen no.1 که به اختصار با F-1.25 نشان می‌دهیم) می‌پردازیم. فولاد مصرفی تیر و سخت‌کننده‌ها، دارای تنش تسلیم ۲۸۸ مگاپاسکال و کرنش تسلیم ۰/۰۰۱۳۷۱۴ و فولاد ستون دارای تنش تسلیم ۳۰۰ مگاپاسکال با کرنش تسلیم ۰/۰۰۱۴۲۸ و فولاد مصرفی ورق دیوار برشی دارای تنش تسلیم ۲۰۷ مگاپاسکال و کرنش تسلیم ۰/۰۰۰۹۸۵ می‌باشند. نمودار تنش_کرنش فولاد در شکل (۴-۱۲) نشان داده شده است.



شکل (۴-۱۲): منحنی تنش - کرنش فولاد تیر و ستون و ورق دیوار برشی فولادی (F-1.25)

همان‌طور که در آزمایش انجام شده توسط فرشته امامی و همکارانش بیان شده است، نحوه اتصال تیر به ستون در قاب به صورت گیردار بوده و ورق نیز توسط جوش به قاب متصل شده است. بارگذاری نیز از نوع کنترل تغییر مکان بوده و در بالای قاب اعمال شده است. شکل (۴-۱۳) جزئیات نمونه آزمایشگاهی [۲۱] را نشان می‌دهد.



شکل (۴-۱۳): جزییات دیوار برشی F-1.25 با ابعاد کامل

۴-۵-۲-۱- اعمال نقص اولیه ساخت

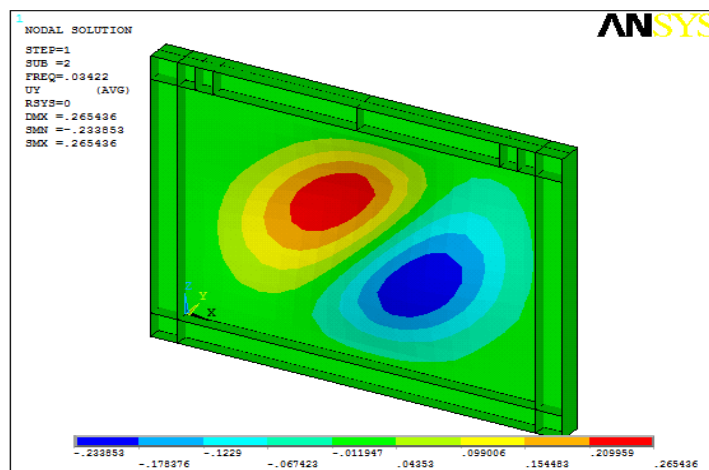
در این مدل نیز برای بدست آوردن مقدار نقص اولیه از پیشنهاد آیین نامه اروپا [۲۴] که در

بخش ۴-۵-۱-۱ بیان شد، استفاده شده است.

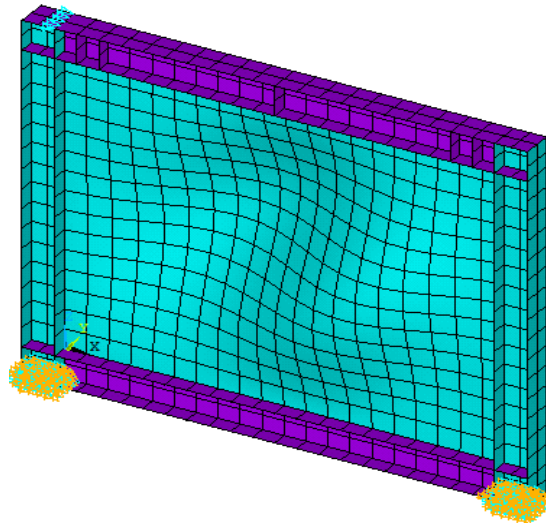
در شکل (۴-۱۴) شکل مود اول کمانشی و در شکل (۴-۱۵)، مدل اجزای محدود با نقص اولیه

نشان داده شده است (البته به منظور مشاهده واضح نقص اولیه، میزان آن ۲۰ برابر بزرگ‌نمایی شده

است).



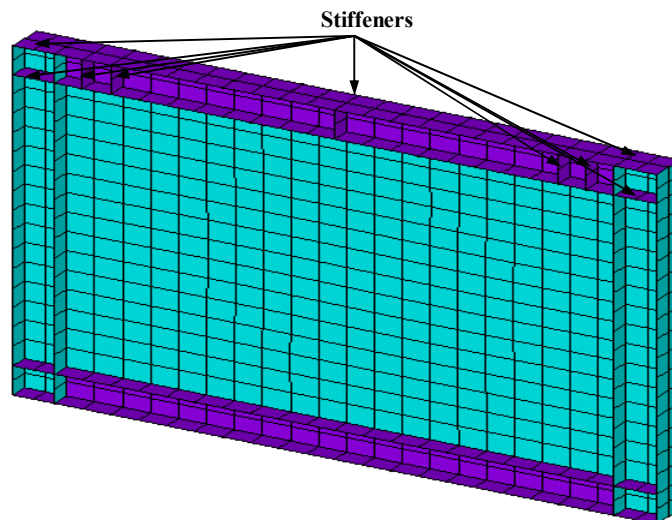
شکل (۴-۱۴): مدل اول کمانش دیوار برشی فولادی F-1.25



شکل (۴-۱۵): اعمال نقص اولیه در دیواربرشی F-1.25 با استفاده از تحلیل کمانش خطی (۲۰ برابر بزرگنمایی)

۴-۵-۲-۲- انتخاب المان و نحوه مش بندی دیواربرشی فولادی F-1.25

المان مورد استفاده از نوع SHELL 93 انتخاب شده است. شکل (۴-۱۶) نحوه مش بندی این دیوار را نشان می دهد.

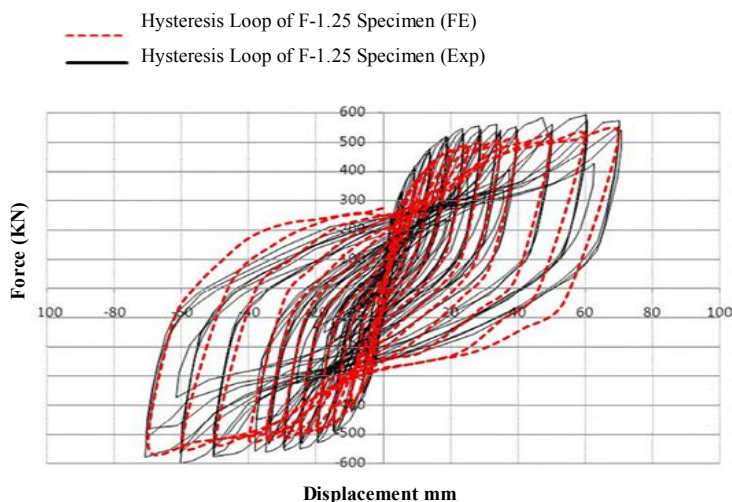


شکل (۴-۱۶): نحوه مش بندی دیواربرشی فولادی F-1.25

۴-۲-۳- مقایسه نتایج تحلیل اجزای محدود با نتایج آزمایشگاهی

در شکل (۴-۱۷) نمودار مقایسه ای بار تغییر مکان مدل آزمایشگاهی و مدل اجزای محدود F-1.25

تحت بار رفت و برگشتی (سیکلینگ) نشان داده شده است. [۲۱]



شکل (۴-۱۷): نمودار مقایسه ای بار تغییر مکان مدل آزمایشگاهی و مدل اجزای محدود F-1.25

۴-۶- مدل سازی و کالیبراسیون دیوار برشی فولادی با ورق موج دار

در این قسمت می خواهیم به مدل سازی یک دیوار برشی فولادی با ورق موج دار با رفتار برشی

آزمایش شده توسط فرشته امامی و همکاران اقدام کرده و اعتبار نتایج حاصل از اجزای محدود را از

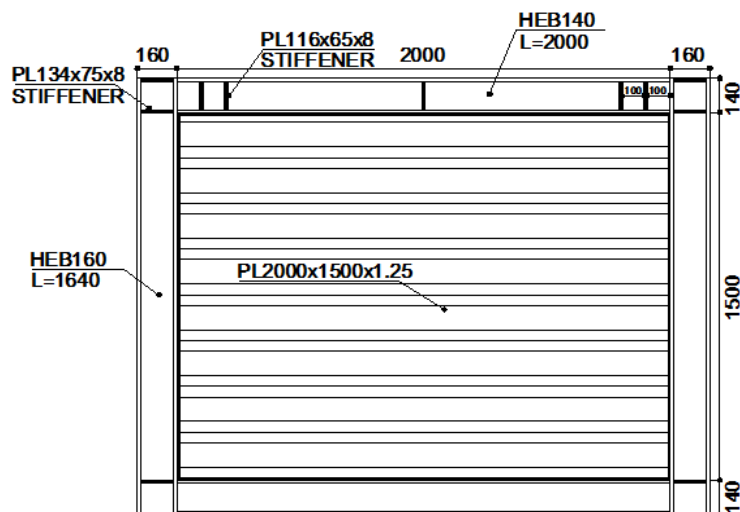
طریق مقایسه با نتایج آزمایشگاهی [۲۱] بررسی کنیم. ابعاد و مشخصات نمونه ی آزمایشگاهی در

شکل (۴-۱۸) آورده شده است. فولاد مصرفی دیوار برشی با ورق موج دار همانند دیوار برشی فولادی با

ورق صاف که در قسمت ۴-۵-۲ بیان شد، می باشد.

نحوه نام گذاری دیوار برشی فولادی موج دار به این صورت است که (T-θ-N-t) بعد از حرف T،

زاویه ورق θ و بعد از زاویه، تعداد نیم موج ورق N و پس از آن ضخامت ورق t دیوار نوشته می شود.



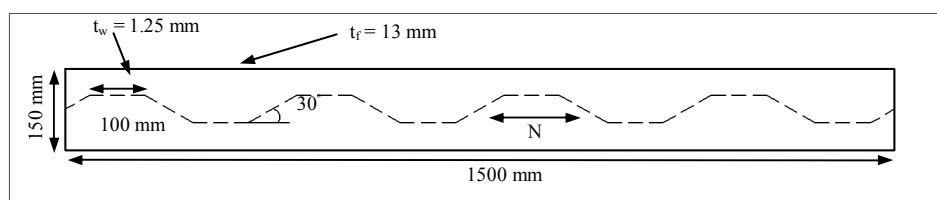
شکل (۴-۱۸): جزئیات دیوار برشی T-30-8-1.25 با ابعاد کامل

۴-۶-۱- انتخاب المان و نحوه مش بندی دیوار برشی فولادی T-30-8-1.25

المان مورد استفاده همانند سایر مدل‌ها از نوع SHELL 93 انتخاب شده است. در شکل (۴-۱۹)

نحوه اتصال ورق موج‌دار به بال ستون و در شکل (۴-۲۰) نحوه مش بندی بال ستون و شکل (۴-۲۱)

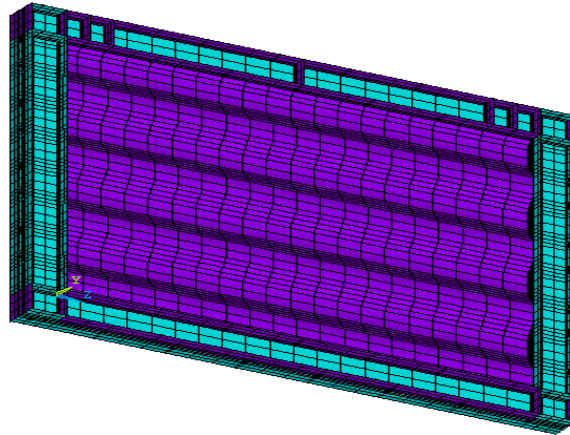
نحوه مش بندی کل دیوار برشی فولادی T-30-8-1.25 نشان داده شده است.



شکل (۴-۱۹): نحوه اتصال ورق به بال ستون دیوار برشی فولادی با ورق موج‌دار دوزنقه‌ای (نمونه T-30-8-1.25)



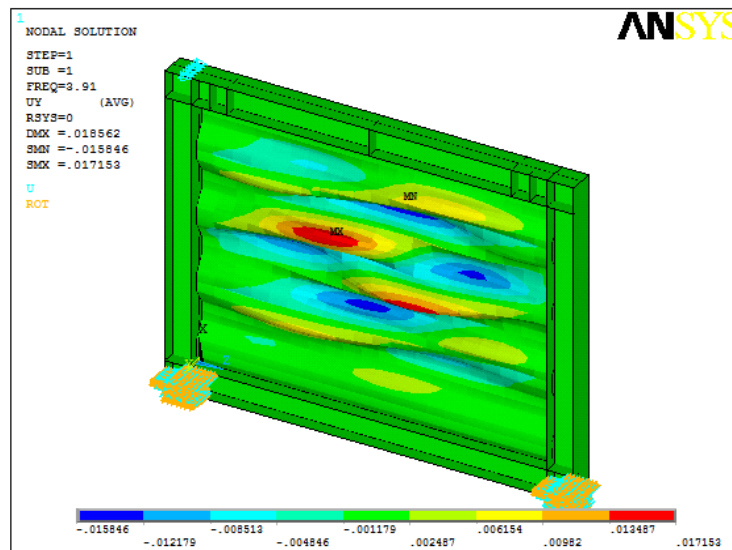
شکل (۴-۲۰): نحوه مش بندی بال ستون دیوار برشی فولادی با ورق موج‌دار دوزنقه‌ای (نمونه T-30-8-1.25)



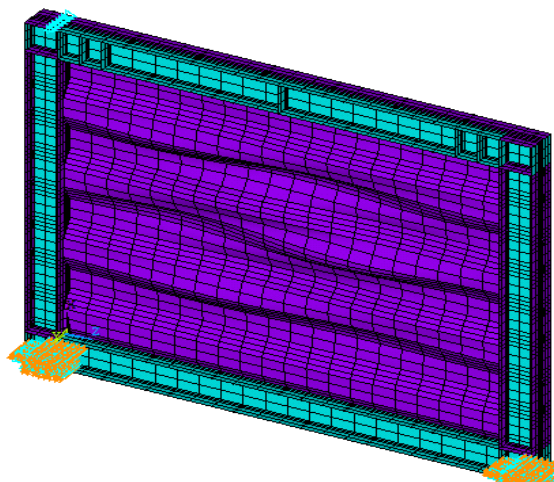
شکل (۴-۲۱): نحوه مش بندی دیوار برشی فولادی T-30-8-1.25

۴-۶-۲- اعمال نقص اولیه ساخت

همانطور که در بخش ۴-۵-۱-۱ نحوه بدست آوردن مقدار نقص اولیه در ورق های صاف بیان شد، برای بدست آوردن مقدار نقص اولیه در ورق های موج دار مشابه ورق های صاف عمل شده است. در شکل (۴-۲۲) مود اول کمانشی دیوار برشی فولادی موج دار و در شکل (۴-۲۳) مدل اجزای محدود با اعمال نقص اولیه نشان داده شده است (البته به منظور مشاهده واضح نقص اولیه، میزان آن $\times 10$ برابر بزرگ نمایی شده است).



شکل (۴-۲۲): مود اول کمانشی دیوار برشی فولادی T-30-8-1.25

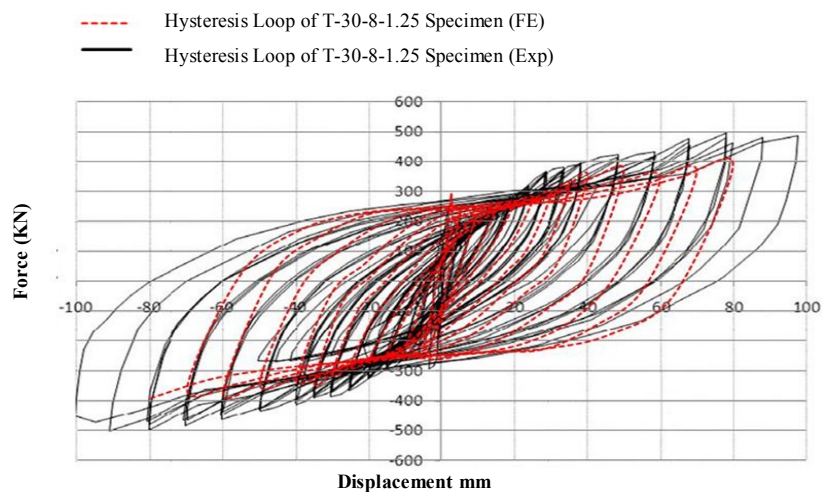


شکل (۴-۲۳): اعمال نقص اولیه در دیواربرشی فولادی (T-30-8-1.25) با استفاده از تحلیل کمانش خطی (۸۰ برابر بزرگنمایی)

۴-۶-۳- مقایسه نتایج تحلیل اجزای محدود با نتایج آزمایشگاهی

در شکل (۴-۲۴) نمودار مقایسه ای بار تغییر مکان مدل آزمایشگاهی و مدل اجزای محدود

دیوار T-30-8-1.25 تحت بار رفت و برگشتی (سیکلینگ) نشان داده شده است [۲۱].



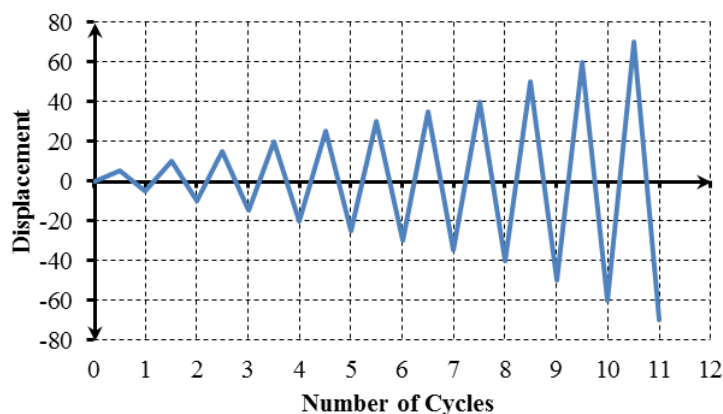
شکل (۴-۲۴): نمودار مقایسه ای بار تغییر مکان مدل آزمایشگاهی و مدل اجزای محدود T-30-8-1.25

ذکر موارد زیر در مورد مدل سازی، تحلیل و استخراج خروجی این مدل ها حائز اهمیت است.

۱- بارگذاری مدل ها از نوع بار تغییرمکان بوده است. (Displacement Control)

۲- پروتکل بارگذاری در مدل های تحت بارگذاری چرخه ای در آزمایش فرشته امامی در شکل

(۲۳-۴) نشان داده شده است.



شکل (۲۳-۴): پروتکل بارگذاری چرخه ای

۳- در مدل آزمایشگاهی فرشته امامی، ورق توسط فیش پلیت به قاب متصل شده بود ولی در

مدل اجزای محدود فیش پلیت ها مدل نشده بود و ورق مستقیماً به قاب متصل شده است.

در جدول (۱-۴) مقایسه نتایج آزمایشگاهی و اجزای محدود آورده شده است.

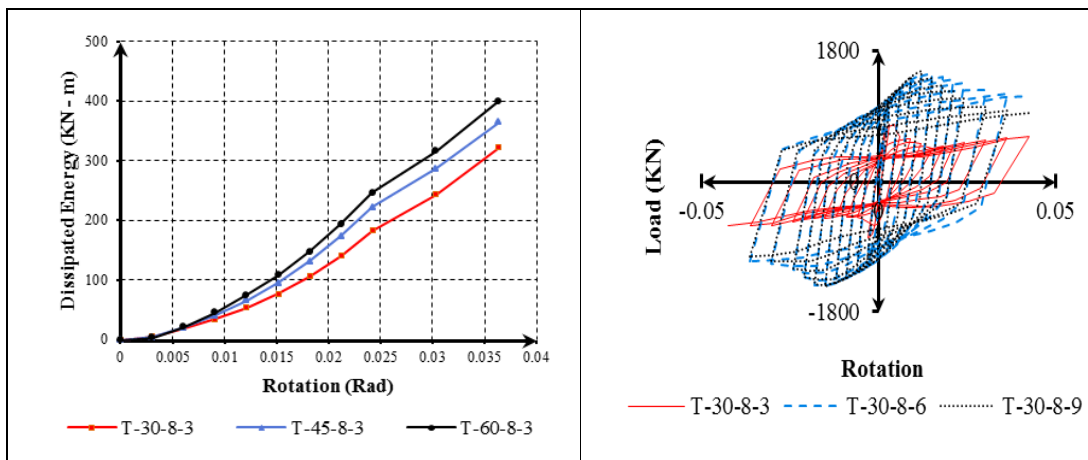
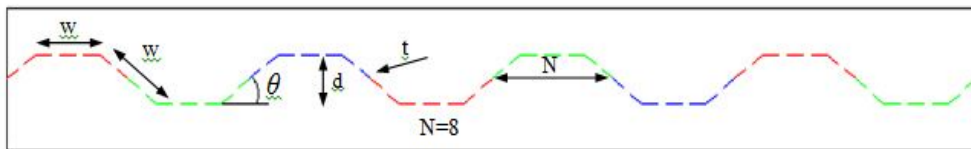
جدول (۱-۴): مقایسه ی نتایج آزمایشگاهی و اجزای محدود

اختلاف	نتایج اجزای محدود	نتایج آزمایشگاهی	اعتبارسنجی مدل F-1.25 (فرشته امامی)
۶/۵ %	۵۴۴/۲KN	۵۸۰KN	بار ماکزیمم
۱/۴۲%	۶۹mm	۷۰mm	تغییرمکان متناظر با بار ماکزیمم
			اعتبارسنجی مدل T-30-8-1.25
۱۳/۶۶ %	۴۱۳/۵KN	۴۷۰KN	بار ماکزیمم
۲.۵۶%	۷۸mm	۸۰mm	تغییرمکان متناظر با بار ماکزیمم
			اعتبارسنجی مدل F-1 (جفری برمن)
۱۱/۸ %	۵۸۷/۳KN	۶۵۶/۶KN	بار ماکزیمم
۱/۷%	٪۳/۱۲	٪۳/۰۷	درصد دریفت متناظر با بار ماکزیمم

همان‌طور که از مقایسه نتایج اجزای محدود با نتایج آزمایشگاهی دیده می‌شود، مدل‌های اجزای محدود از دقت نسبتاً خوبی برخوردار بوده به همین دلیل مدل‌های اجزای محدود دارای اعتبار است و می‌توان از این مدل‌ها در یک مطالعه پارامتریک^۱ استفاده نمود.

^۱ Parametric Study

۵- مطالعه پارامتریک دیوار برشی فولادی با ورق موج‌دار با استفاده از روش اجزای محدود



۵-۱- مقدمه:

در این فصل از طریق انجام تحلیل کمانش خطی و غیر خطی به بررسی اثر پارامترهای مختلف ورق موج‌دار پرداخته می‌شود. این پارامترها شامل تعداد نیم‌موج در طول تیر، زاویه موج با امتداد طولی ستون و ضخامت ورق موج‌دار می‌باشد. ورق موج‌دار دوزنقه‌ای در ده ضخامت و سه زاویه و با نیم‌موج‌های متفاوت در نظر گرفته شده است. همچنین ورق صاف با ده ضخامت مدل شده است. همچنین تعدادی دیوار برشی با ورق صاف با شش مدل سخت‌کننده در شش ضخامت، با استفاده از مدل ساخته شده بر طبق مدل جفری برمن و مایکل برونو با همان ابعاد ولی جهت تطبیق با آیین‌نامه ایران با فولاد St37 ساخته شده است. در مجموع ۳۰ مدل تحت بارگذاری رفت و برگشتی و ۴۲ مدل تحت بارگذاری یک‌طرفه مورد تحلیل قرار گرفته است.

۵-۲- نحوه نام‌گذاری نمونه‌ها

در این قسمت نحوه نام‌گذاری مدل‌های اجزای محدود مورد بررسی، شرح داده می‌شود. در این تحقیق دیوار برشی فولادی با دو نوع ورق مورد بررسی قرار گرفته است که عبارتند از:

۱- دیوار با ورق صاف^۱

۲- دیوار با ورق صاف و سخت‌کننده

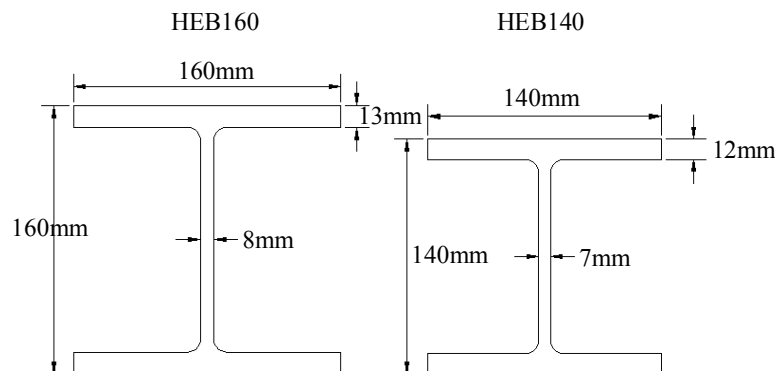
۳- دیوار با ورق موج‌دار دوزنقه‌ای شکل^۲

طول و ارتفاع تمامی دیوارهای تحت بررسی بارگذاری سیکلیک براساس مدل امامی و همکارانش به ترتیب برابر با ۲۳۲۰ میلی‌متر و ۱۶۵۰ میلی‌متر است. همچنین طول و عرض ورق داخل قاب دیوار برشی فولادی به ترتیب برابر با ۲۰۰۰ میلی‌متر و ۱۵۰۰ میلی‌متر است. ستون‌ها از

^۱ Flat Plate

^۲ Trapezoidal Corrugated Plate

نوع HEB160 و تیر از نوع HEB140 می‌باشد. شکل (۵-۱) مشخصات تیر و ستون قاب دیوار برشی را نشان می‌دهد.



شکل (۵-۱): مشخصات مقاطع تیر و ستون دیوار برشی فولادی فرشته‌امامی و همکارانش

بعد از شناسه‌ی اول اسامی دیوار برشی با ورق موج‌دار (حروف لاتین)، زاویه زیرصفحه‌های مایل با امتداد طولی بال ستون و بعد از آن تعداد پانل‌ها (نیم موج‌ها) بیان می‌شود. در انتها هم ضخامت ورق بیان می‌شود. مابین این مقادیر از خط فاصله استفاده شده است. فرمت کلی نام‌گذاری دیوار برشی فولادی با ورق موج‌دار در زیر آمده است.

$$T - \theta - N - t$$

که در آن حرف T، به معنای ورق دوزنقه‌ای، θ ، زاویه‌ی زیر_صفحه‌های مایل با امتداد طولی

بال ستون، N، تعداد نیم‌موج‌ها در ارتفاع دیوار و t، ضخامت ورق می‌باشد.

در دیوار برشی با ورق صاف با توجه به این‌که تعداد و زاویه‌ی زیر_صفحه‌ها مطرح نیست، نام‌گذاری آن‌ها فقط با ضخامت ورق انجام می‌گیرد. الگوی کلی نام‌گذاری ورق‌های صاف در زیر آمده است.

$$F - t$$

در دیوار برشی با ورق صاف دارای سخت‌کننده نام‌گذاری آن‌ها فقط با ضخامت ورق و نحوه قرارگیری و تعداد سخت‌کننده‌ها انجام می‌گیرد. الگوی کلی نام‌گذاری ورق‌های صاف با سخت‌کننده در زیر آمده است.

$$F - t - nHorV$$

مدل‌های F-1 و F-1.25 و T-30-8-1.25 در واقع همان مدل‌های اجزای محدود نمونه

آزمایشگاهی هستند.

در جدول (۱-۵)، دسته بندی مدل‌ها و تعداد در هر یک از دسته‌ها قابل مشاهده است.

مسائلی که جهت انتخاب محدوده ضخامت (t)، تعداد نیم‌موج (N) و زاویه (θ) برای انجام

مطالعه پارامتریک در نظر گرفته شده عبارتند از:

- نمونه‌های دارای سخت‌کننده در شش ضخامت ۱، ۲، ۴، ۶، ۸، ۱۰ میلی‌متر ساخته

شده‌اند.

- نمونه‌های بدون سخت‌کننده در ۱۰ ضخامت ۱/۲۵، ۲، ۳، ۴، ۵، ۶، ۷، ۸، ۹، ۱۰

میلی‌متر ساخته شده‌اند.

- سه زاویه ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه جهت بررسی اثر زاویه انتخاب گردیده‌است.

- با توجه به ثابت بودن ارتفاع ورق برای تغییر زاویه از ۳۰ به ۴۵ و ۶۰ باید مقدار عرض

زیر_صفحه‌ها (w) را افزایش داد. همچنین با تغییر نیم‌موج‌ها در طول ثابت نیز

باید مقدار عرض زیرصفحه‌ها (w) افزایش داده شود. جزئیات این تغییرات در

جدول (۲-۵) آورده شده است.

جدول (۵-۱): مشخصات نمونه‌ها

نوع ورق	زاویه (θ) به درجه	محدوده تعداد نیم‌موج (N)	به میلی‌متر (t) محدوده ضخامت	تعداد نمونه‌ها
صاف+سخت کننده	-	-	۱، ۲، ۴، ۶، ۸، ۱۰	۴۲
صاف	-	-	۱/۲۵، ۲، ۳، ۴، ۵، ۶، ۷، ۸، ۹، ۱۰	۱۰
ذوزنقه‌ای (T)	۳۰	۸	۱/۲۵، ۲، ۳، ۴، ۵، ۶، ۷، ۸، ۹، ۱۰	۱۰
	۴۵	۸	۳، ۶، ۹	۳
		۶، ۱۰	۳، ۶	۴
	۶۰	۸	۳، ۶، ۹	۳
جمع:				۷۲

جدول (۵-۲): اندازه عرض زیرصفحه‌ها در زاویه‌ها و نیم‌موج‌های متفاوت

نوع ورق	زاویه (θ) به درجه	محدوده تعداد نیم‌موج (N)	محدوده عرض زیرصفحه (W) به میلی‌متر
ذوزنقه‌ای (T)	۳۰	۸	۱۰۰
	۴۵	۶، ۸، ۱۰	۱۴۶/۵، ۱۱۰، ۸۷/۸۷
		۸	۱۲۵

۵-۳- نتایج تحلیل اجزای محدود

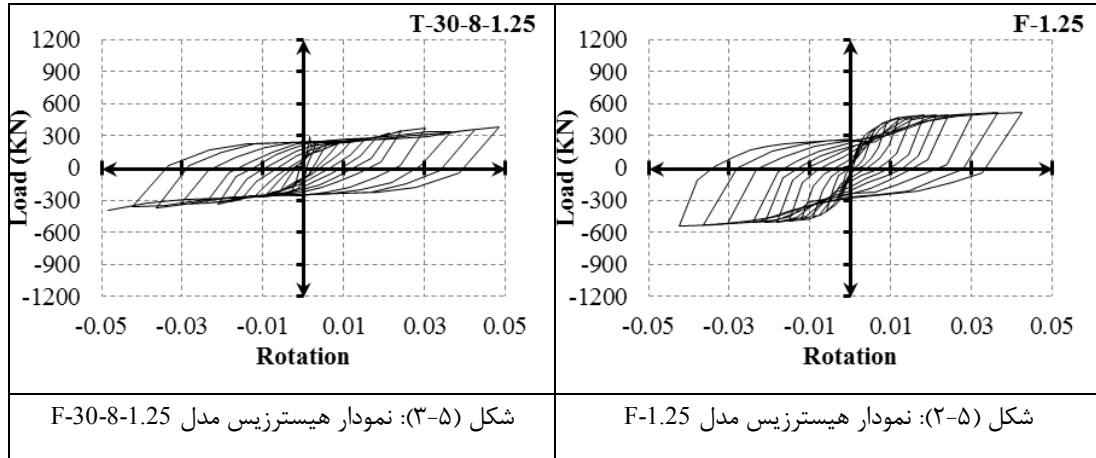
نتایج ارائه شده در این بخش شامل موارد زیر می‌باشند:

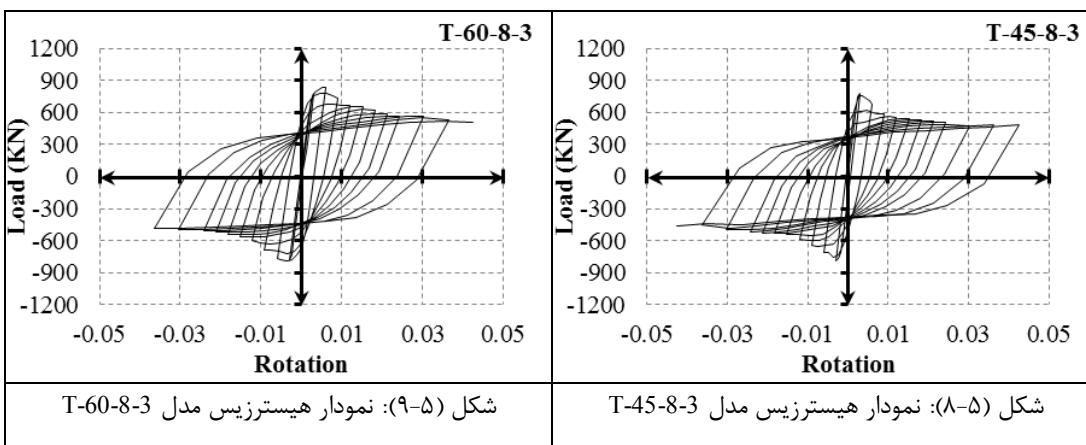
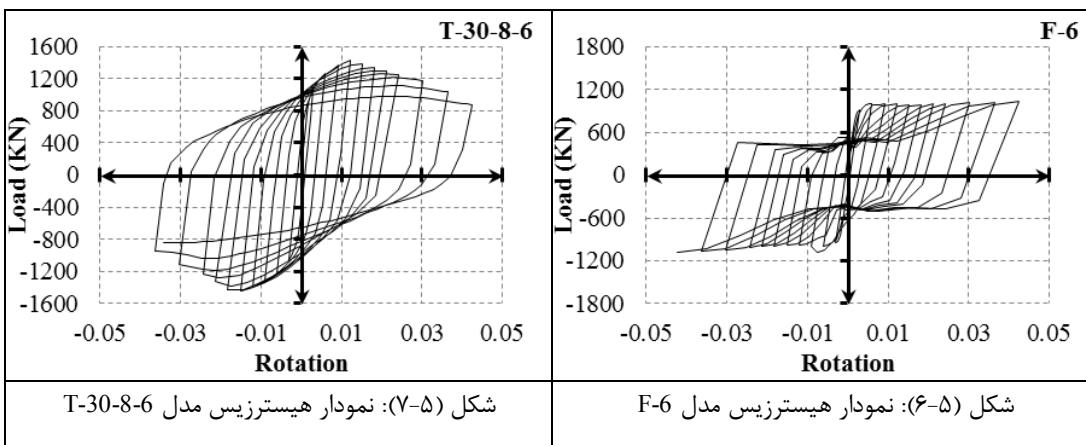
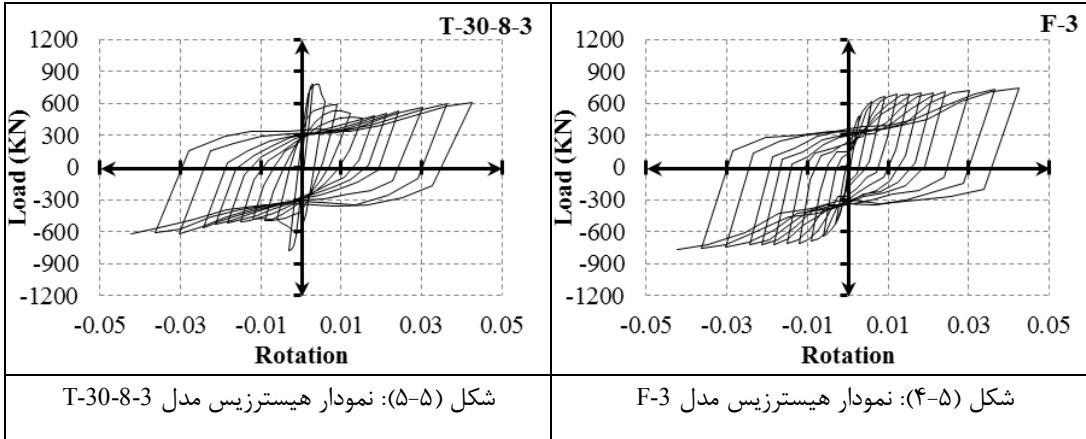
- ۱- نمودارهای هیستریزیس بار - دوران در نمونه‌های با ورق صاف و موج‌دار
- ۲- بررسی اثر ضخامت ورق‌های صاف و موج‌دار در جذب انرژی دیوار برشی فولادی
- ۳- بررسی اثر زاویه ورق‌های موج‌دار در جذب انرژی دیوار برشی فولادی
- ۴- بررسی اثر تعداد نیم‌موج ورق‌های موج‌دار در جذب انرژی دیوار برشی فولادی
- ۵- ارائه کانتورهای تنش، کرنش و تغییر مکان خارج از صفحه ورق دیوار
- ۶- نمودارهای بارگذاری یک‌طرفه بار- درصد تغییر مکان نسبی ورق‌های صاف سخت‌شده

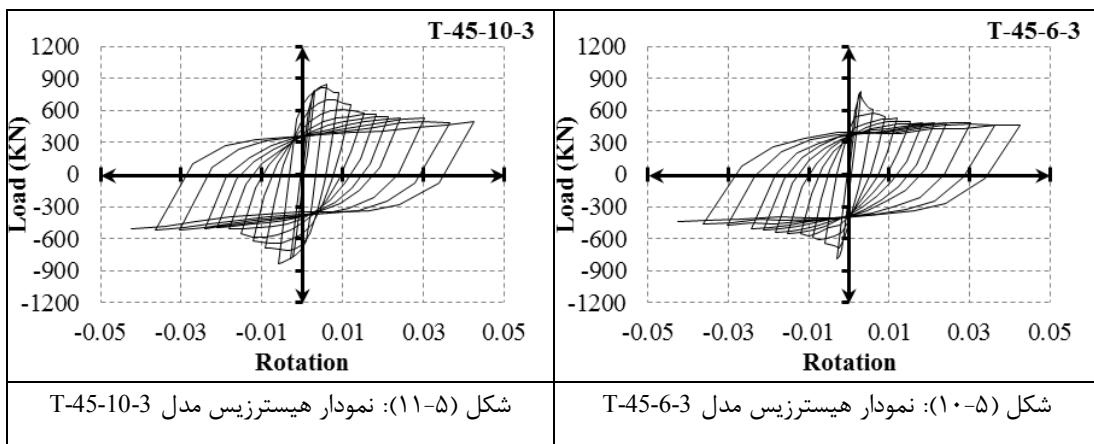
۱-۳-۵- نمودارهای هیستریزیس بار- دوران در نمونه‌های با ورق صاف

برای مقایسه رفتار هیستریزیس بار- دوران مدل‌های با ورق صاف و موج‌دار، ۱۰ نمونه از ورق صاف و ۲۰ نمونه با ورق موج‌دار انتخاب شده‌اند. نمونه‌های ورق صاف دارای ضخامت متفاوت از ۱/۲۵ تا ۱۰ میلی‌متر می‌باشد.

۱۰ نمونه از ۲۰ نمونه ورق موج‌دار مربوط به زاویه ۳۰ درجه در ضخامت‌های ۱/۲۵ تا ۱۰ میلی‌متر، دو نمونه مربوط به ضخامت ۳ میلی‌متر با زاویه ۴۵ درجه و با نیم‌موج‌های ۱۰، ۶ و دو نمونه دیگر مربوط به همین تعداد نیم‌موج با زاویه ۴۵ درجه و ضخامت ۶ میلی‌متر است. شش نمونه باقیمانده مربوط به زاویه ۴۵ و ۶۰ درجه در ضخامت‌های ۳، ۶ و ۹ میلی‌متر می‌باشد. تعداد ۱۰ نمودار هیستریزیس از ۳۰ نمودار در شکل‌های (۲-۵) تا (۱۱-۵) در این بخش آورده شده است و باقی نمودارها در پیوست ۱ قرار داده شده است.



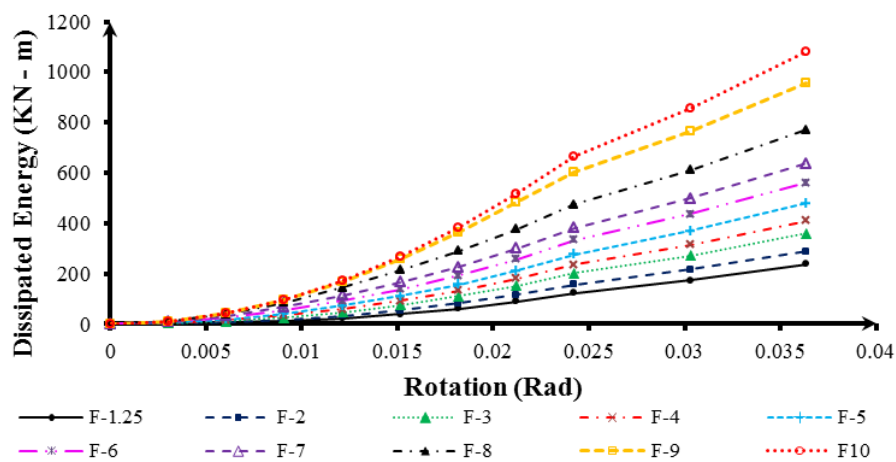




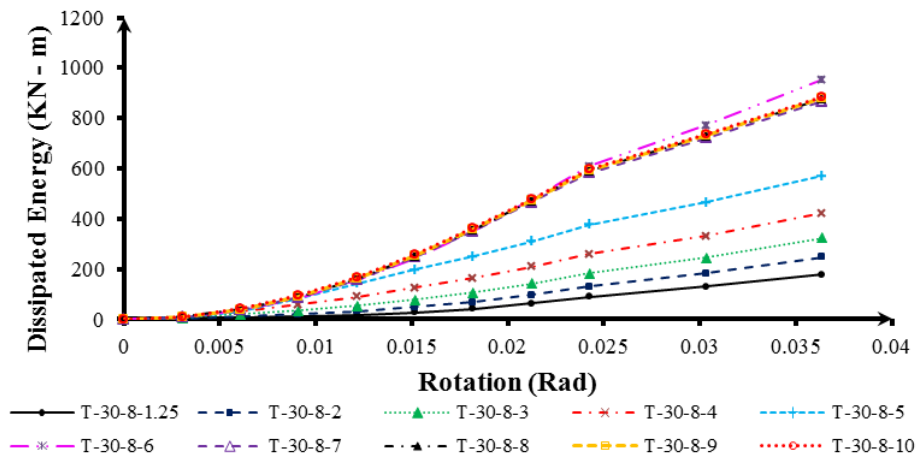
۵-۳-۲- بررسی اثر ضخامت ورق‌های صاف و موج‌دار در جذب انرژی دیوار برشی

در این قسمت با رسم نمودارهای هیستریزیس و جذب انرژی به بررسی اثر ضخامت ورق بر روی سختی و جذب انرژی دیوار می‌پردازیم. ذکر این نکته ضروری است که برای بدست آوردن میزان جذب انرژی از مساحت زیر نمودار هیستریزیس استفاده شده است. همچنین مقدار دوران از تقسیم تغییر مکان قاب بر ارتفاع آن حاصل شده است.

در شکل (۵-۱۲) و (۵-۱۳) نمودارهای جذب انرژی بر حسب دوران به ترتیب برای ورق صاف و موج‌دار رسم شده است. همانطور که انتظار می‌رود با افزایش ضخامت ورق دیوار سختی سازه افزایش یافته و جذب انرژی بیشتری را نیز مشاهده می‌کنیم.

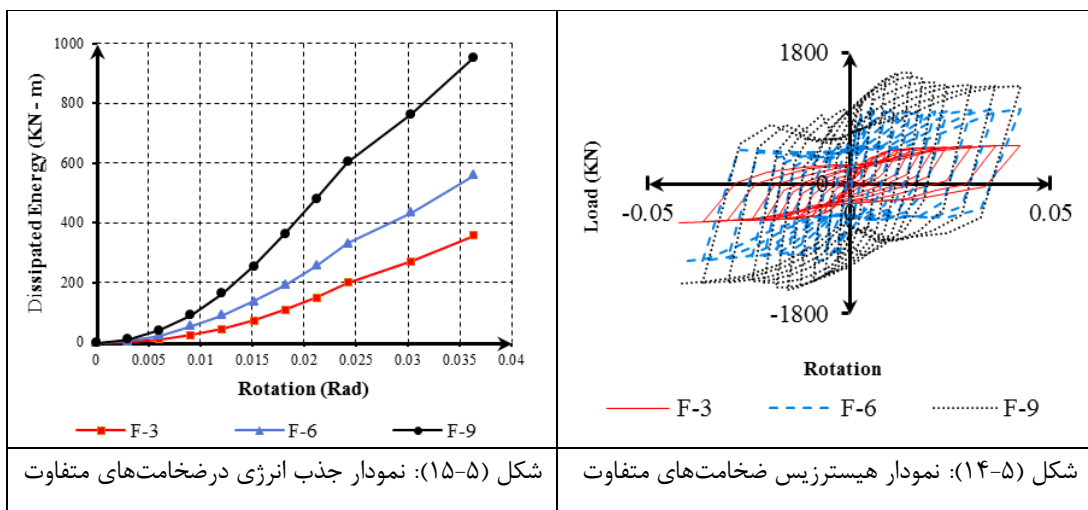


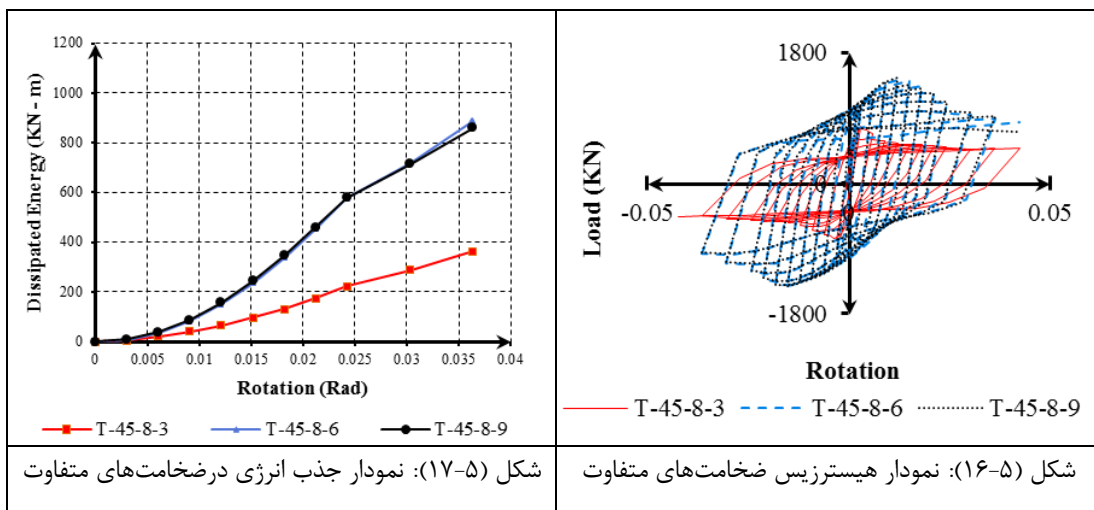
شکل (۵-۱۲): نمودار جذب انرژی نمونه‌های صاف در ضخامت‌های متفاوت



شکل (۵-۱۳): نمودار جذب انرژی نمونه‌های موج‌دار با زاویه ۳۰ درجه در ضخامت‌های متفاوت

در شکل (۵-۱۴) نمودار هیستریزیس ورق صاف و در شکل (۵-۱۶) نمودار هیستریزیس ورق موج‌دار با زاویه ۴۵ درجه، در سه ضخامت ۳، ۶ و ۹ میلی‌متر رسم شده است و این اشکال نشان می‌دهند که با افزایش ضخامت در ورق‌های صاف و موج‌دار نمودار هیستریزیس اصطلاحاً چاق‌تر می‌شود که خود بیانگر افزایش جذب انرژی می‌باشد. شکل (۵-۱۵) و (۵-۱۷) نیز میزان جذب انرژی بدست آمده از روی این نمودارهای هیستریزیس می‌باشد.



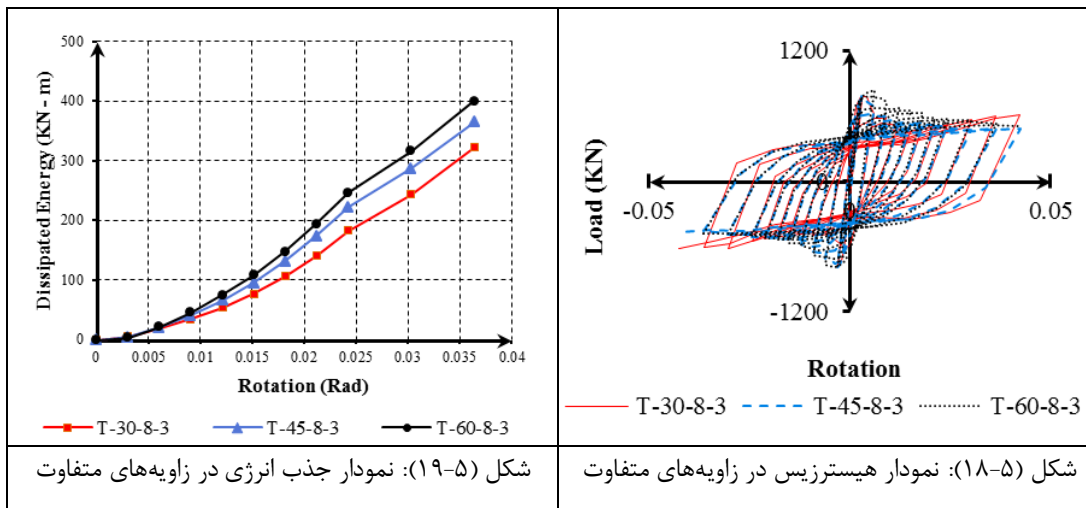


۵-۳-۳- بررسی اثر زاویه ورق‌های موج‌دار در جذب انرژی دیوار برشی

در این بخش اثر زاویه ورق‌های موج‌دار در سه ضخامت ۳، ۶ و ۹ میلی‌متر بررسی شده است و برای هر ضخامت نمودارهای هیستریزس، جذب انرژی و نمودار میله‌ای جذب انرژی برای درک بهتر موضوع رسم گردیده است.

در شکل (۱۸-۵) و (۲۱-۵) و (۲۴-۵) نمودار هیستریزس ورق موج‌دار در تعداد نیم‌موج ثابت ۸ در ضخامت به ترتیب ۳ و ۶ و ۹ میلی‌متر رسم شده است. برای درک بهتر میزان جذب انرژی، نمودار جذب انرژی با استفاده از این منحنی‌های هیستریزس رسم شده است.

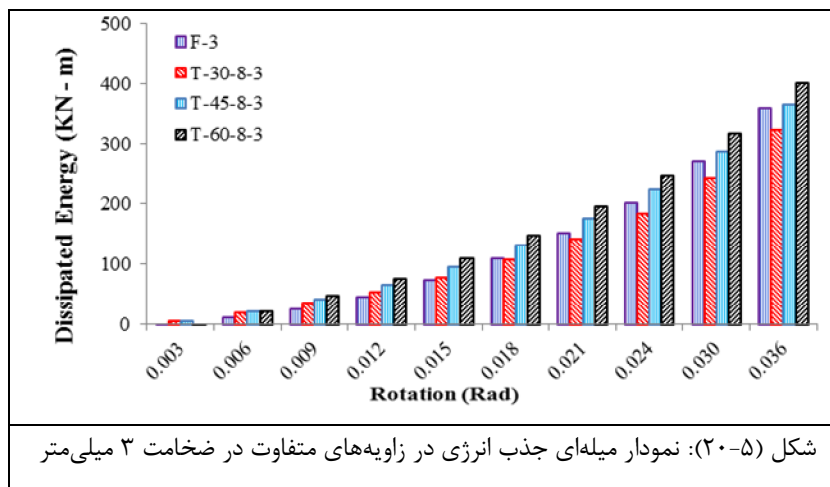
همان‌طور که در شکل (۱۹-۵) دیده می‌شود، با تغییر زاویه از ۳۰ به ۴۵ و از ۴۵ به ۶۰ درجه در ضخامت ۳ میلی‌متر، به ترتیب ۱۳٪ و ۱۰٪ افزایش در میزان جذب انرژی نمونه‌های موج‌دار دیده می‌شود و این به علت نقش موج‌ها به عنوان نوعی سخت‌کننده در محدود کردن تغییر مکان خارج از صفحه ورق و در نهایت افزایش مقاومت دیوار می‌باشد.



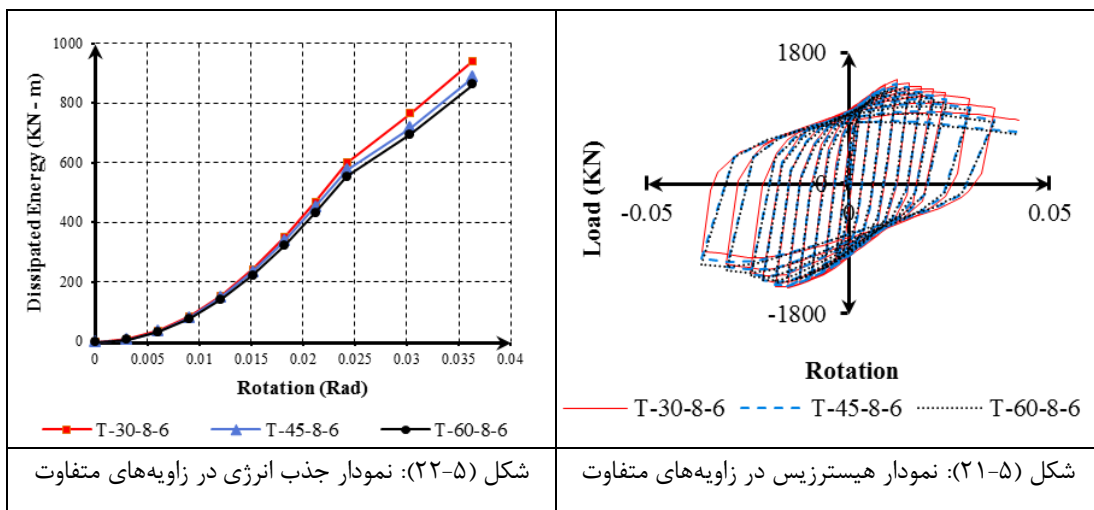
شکل (۵-۱۹): نمودار جذب انرژی در زاویه‌های متفاوت

شکل (۵-۲۰) مقایسه نمودار میله‌ای جذب انرژی ورق موج‌دار در سه زاویه متفاوت با ورق

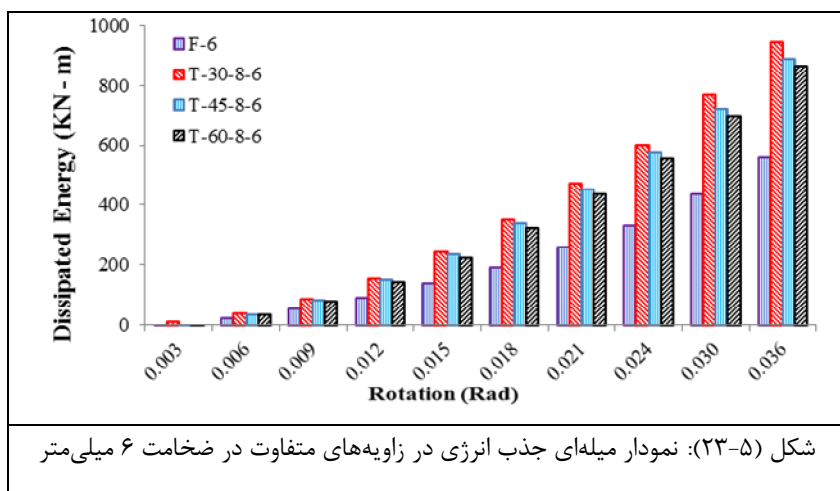
صاف در ضخامت ۳ میلی‌متر را نشان می‌دهد. و دیده می‌شود که در این ضخامت در زوایای ۴۵ و ۶۰ درجه ظرفیت جذب انرژی نمونه‌های موج‌دار از نمونه صاف آن بیشتر می‌باشد.



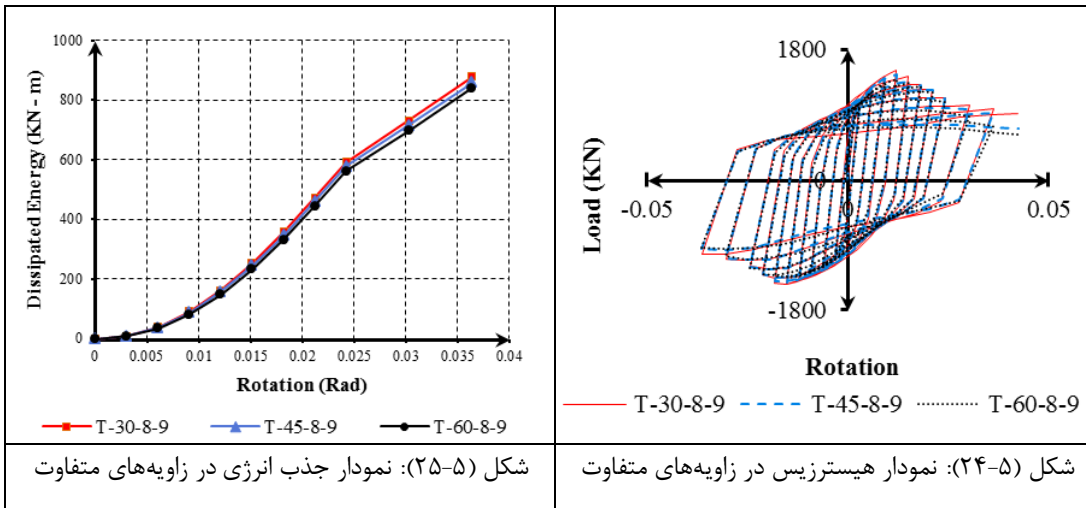
با توجه به شکل (۵-۲۲) دیده می‌شود که در ضخامت ۶ میلی‌متر با افزایش زاویه ورق، میزان جذب انرژی در دیوار کاهش یافته است. و این کاهش به این علت می‌تواند باشد که با افزایش ضخامت ورق، تغییر مکان خارج از صفحه کاهش یافته و موج‌ها به عنوان سخت‌کننده در جهت افزایش مقاومت دیوار عمل نکرده و تاثیری بر افزایش جذب انرژی دیوار نخواهند داشت.



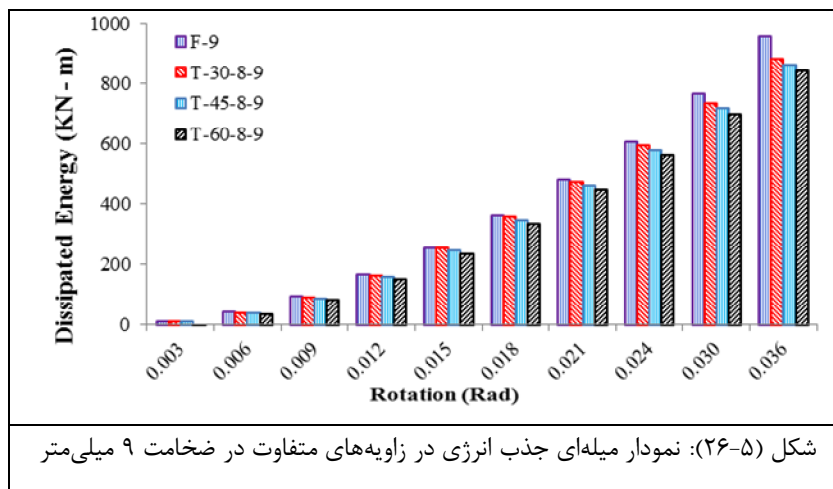
شکل (۲۳-۵) مقایسه نمودار میله‌ای جذب انرژی ورق موج‌دار در سه زاویه متفاوت با ورق صاف در ضخامت ۶ میلی‌متر را نشان می‌دهد. و دیده می‌شود که در این ضخامت در هر سه زاویه ظرفیت جذب انرژی نمونه‌های موج‌دار از نمونه صاف آن بیشتر می‌باشد.



با توجه به شکل (۲۵-۵) دیده می‌شود که در ضخامت ۹ میلی‌متر همانند ضخامت ۶ میلی‌متر، با افزایش زاویه ورق، افزایش جذب انرژی در دیوار مشاهده نمی‌شود. و علت آن می‌تواند این باشد که با افزایش ضخامت ورق، تغییر مکان خارج از صفحه کاهش یافته و موج‌ها به عنوان سخت‌کننده در جهت افزایش مقاومت دیوار عمل نکرده و در نهایت تاثیری بر افزایش جذب انرژی دیوار نخواهند داشت.



شکل (۲۶-۵) مقایسه نمودار میله‌ای جذب انرژی ورق موجدار در سه زاویه متفاوت با ورق صاف در ضخامت ۹ میلی‌متر را نشان می‌دهد. و دیده می‌شود که در این ضخامت در هر سه زاویه ظرفیت جذب انرژی نمونه‌های موجدار از نمونه صاف آن کمتر می‌باشد.

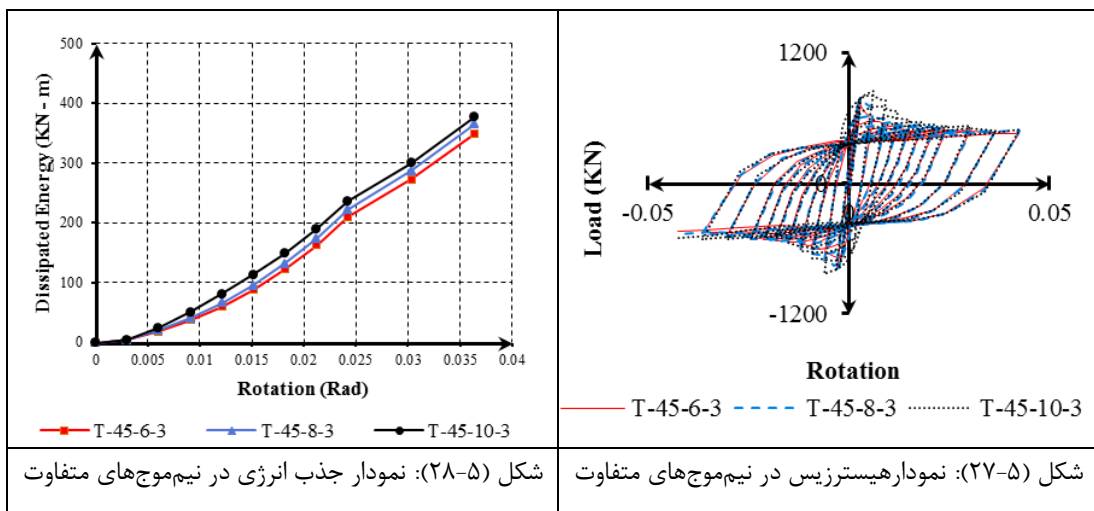


۴-۳-۵- بررسی اثر تعداد نیم‌موج ورق‌های موج‌دار در جذب انرژی دیوار برشی

در این قسمت اثر تعداد نیم‌موج ورق‌های موج‌دار را بر روی میزان جذب انرژی دیوار در دو ضخامت ۳ و ۶ میلی‌متر با تعداد نیم‌موج ۶ و ۸ و ۱۰ بررسی می‌کنیم.

در شکل (۲۷-۵) نمودار هیستریزیس ورق موج‌دار در ضخامت ۳ میلی‌متر با تعداد نیم‌موج ۶، ۸ و ۱۰ رسم شده است. با توجه به این نمودار دیده می‌شود که با افزایش تعداد نیم‌موج در طول و ضخامت ثابت، سختی دیوار افزایش می‌یابد.

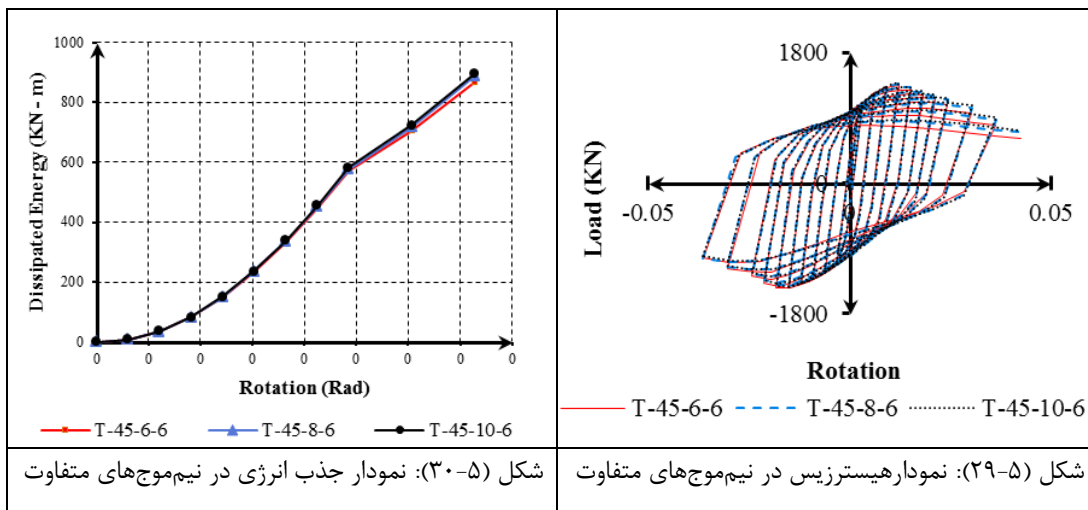
هم‌چنین همان‌طور که از شکل (۲۸-۵) استنباط می‌شود، با تغییر تعداد نیم‌موج‌ها از ۶ به ۸ و از ۸ به ۱۰ در ضخامت ۳ میلی‌متر، به ترتیب $4/5\%$ و $3/5\%$ افزایش در میزان جذب انرژی نمونه‌ها دیده می‌شود که علت آن افزایش تعداد موج‌ها در جهت محدود کردن تغییر مکان خارج از صفحه می‌باشد.



در شکل (۲۹-۵) نمودار هیستریزیس ورق موج‌دار در ضخامت ۶ میلی‌متر با تعداد نیم‌موج ۶، ۸ و ۱۰ رسم شده است. با توجه به این نمودار دیده می‌شود که با افزایش تعداد نیم‌موج در طول و ضخامت ثابت، سختی دیوار افزایش محسوسی نداشته است.

با توجه شکل (۳۰-۵)، با تغییر تعداد نیم‌موج‌ها در ضخامت ۶ میلی‌متر، افزایشی در میزان جذب انرژی نمونه‌ها دیده نمی‌شود و این نیز به این علت می‌تواند باشد که با افزایش تعداد نیم‌موج‌ها

در حقیقت تعداد سخت‌کننده‌ها افزایش می‌یابد و چون با افزایش ضخامت ورق تغییر مکان خارج از صفحه ورق کاهش یافته است پس موج‌های ورق وظیفه خود را به عنوان سخت‌کننده ایفا نکرده و اثری بر افزایش جذب انرژی دیوار نخواهند داشت.



۵-۳-۵- ارائه کانتورهای تنش، کرنش و تغییر مکان خارج از صفحه ورق دیوار

برای مشاهده مقدار و چگونگی توزیع تنش بر روی ورق موج‌دار و مقایسه آن با ورق صاف (مدل‌های ساخته شده براساس آزمایش فرشته امامی)، کانتورهای تنش فون میسز و تغییر مکان خارج از صفحه برای تمامی مدل‌ها در دوران 0.036 رادیان استخراج شده است. با توجه به تعداد بسیار زیاد کانتورها امکان قرار دادن تمامی آنها در این پایان نامه فراهم نبوده و به تعدادی از آنها در دوران 0.036 رادیان (تغییر مکان 60 میلی‌متر) به جهت مقایسه اکتفا شده است.

تغییر مکان خارج از صفحه:

با مشاهده تغییر مکان خارج از صفحه در مدل‌های T-45-8-3 و T-60-8-3 (شکل (۵-۳۳)، (۵-۳۴)) نتیجه می‌شود که هرچه زیر _صفحه‌های مایل به حالت قائم نزدیک‌تر گردند، از مقدار تغییر مکان خارج از صفحه در دیوار کاسته خواهد شد. با مقایسه شکل‌های (۵-۳۳) و (۵-۳۵) و (۵-۳۶) می‌توان استنباط کرد که با افزایش تعداد نیم‌موج‌ها در طول ثابت در ضخامت ۳ میلی‌متر مقدار تغییر مکان خارج از صفحه کاهش می‌یابد و دلیل این امر این است که با افزایش تعداد نیم‌موج‌ها در واقع تعداد سخت‌کننده‌های عمود بر دیوار افزایش یافته که موجب کاهش تغییر مکان خارج از صفحه دیوار می‌شود.

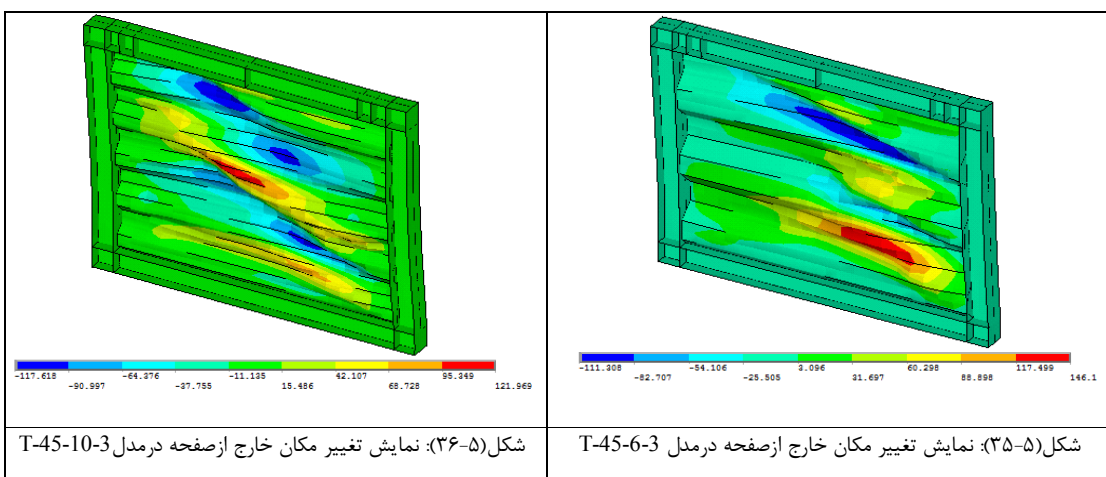
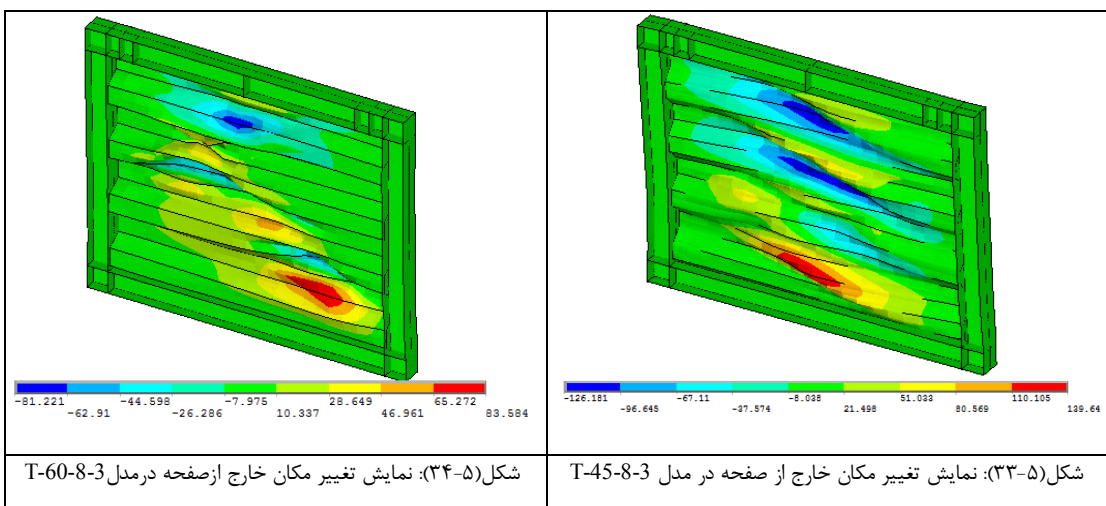
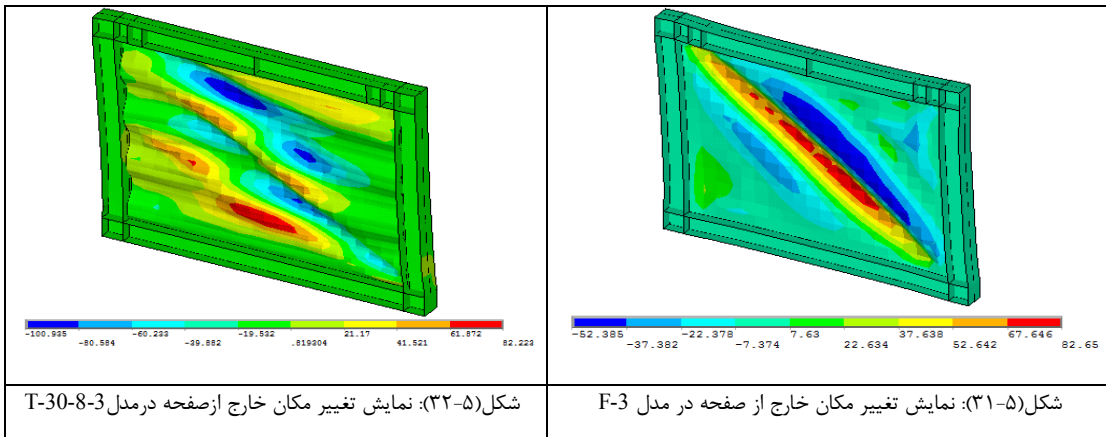
تنش فون میسز:

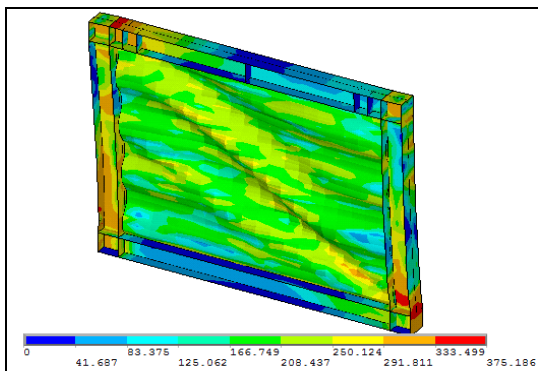
با مشاهده کانتور تنش فون میسز ورق‌های صاف و موج‌دار، دیده می‌شود که تمرکز تنش ایجاد شده در ورق‌های صاف بیشتر از ورق‌های موج‌دار است. همچنین با افزایش زاویه ورق موج‌دار از ۳۰ به ۴۵ درجه مقدار تنش فون میسز افزایش یافته ولی با افزایش زاویه از ۴۵ به ۶۰ درجه تنش کاهش می‌یابد. با مشاهده شکل‌های (۵-۳۹)، (۵-۴۱)، (۵-۴۲) استنباط می‌شود که با افزایش تعداد نیم‌موج‌ها در طول ثابت از مقدار تنش فون میسز کاسته می‌شود.

کرنش فون میسز:

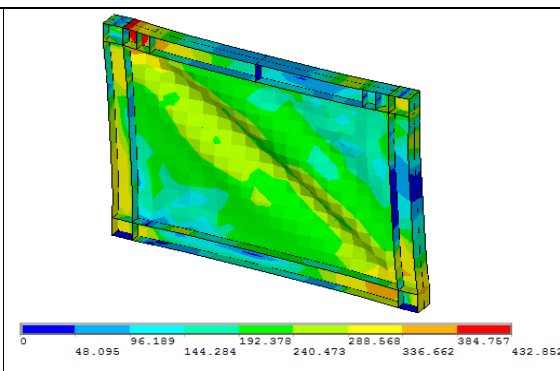
با توجه به شکل (۵-۴۳) و (۵-۴۴) دیده می‌شود که در ورق موج‌دار با زاویه ۳۰ درجه مقدار کرنش فون میسز نسبت به ورق صاف کاهش یافته است که دلیل آن وجود موج‌ها در ورق می‌باشد. با تغییر زاویه از ۳۰ به ۴۵ درجه مقدار کرنش فون میسز افزایش یافته است ولی با افزایش زاویه از ۴۵ به ۶۰ درجه این کرنش کاهش چشم‌گیری داشته است.

با افزایش تعداد نیم‌موج‌های ورق موج‌دار تغییر محسوسی در مقدار کرنش‌ها دیده نمی‌شود.

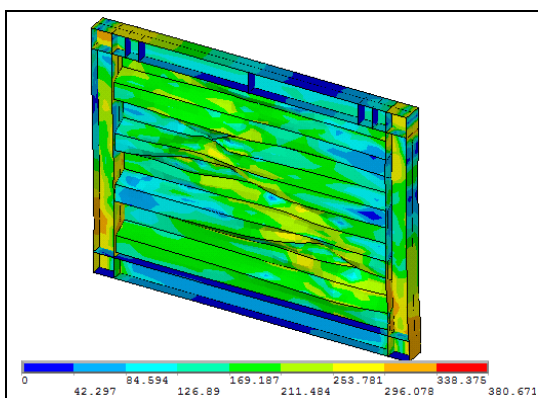




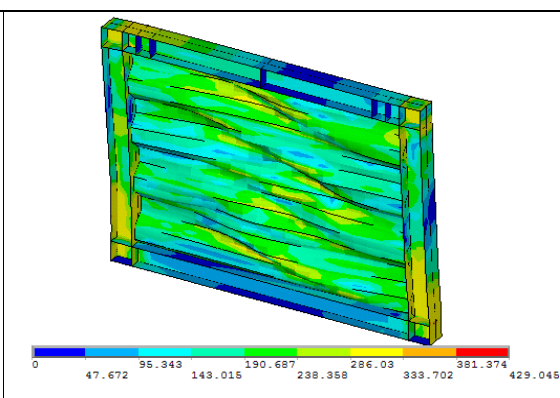
شکل (۳۸-۵): نمایش کانتور تنش فون میسز در مدل T-30-8-3



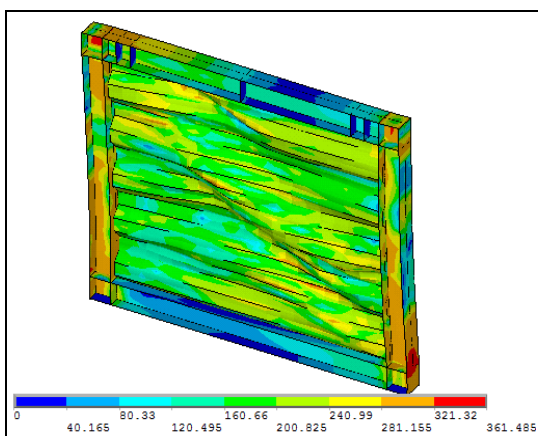
شکل (۳۷-۵): نمایش کانتور تنش فون میسز در مدل F-3



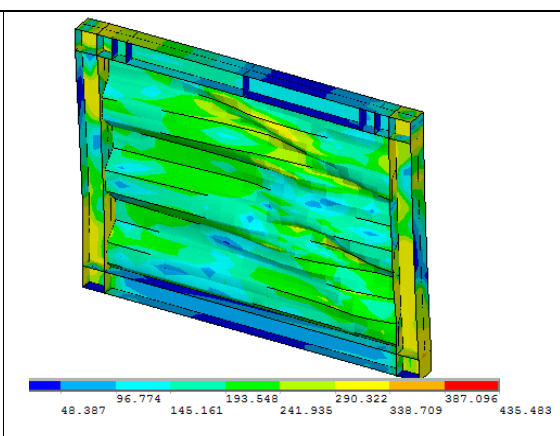
شکل (۴۰-۵): نمایش کانتور تنش فون میسز در مدل T-60-8-3



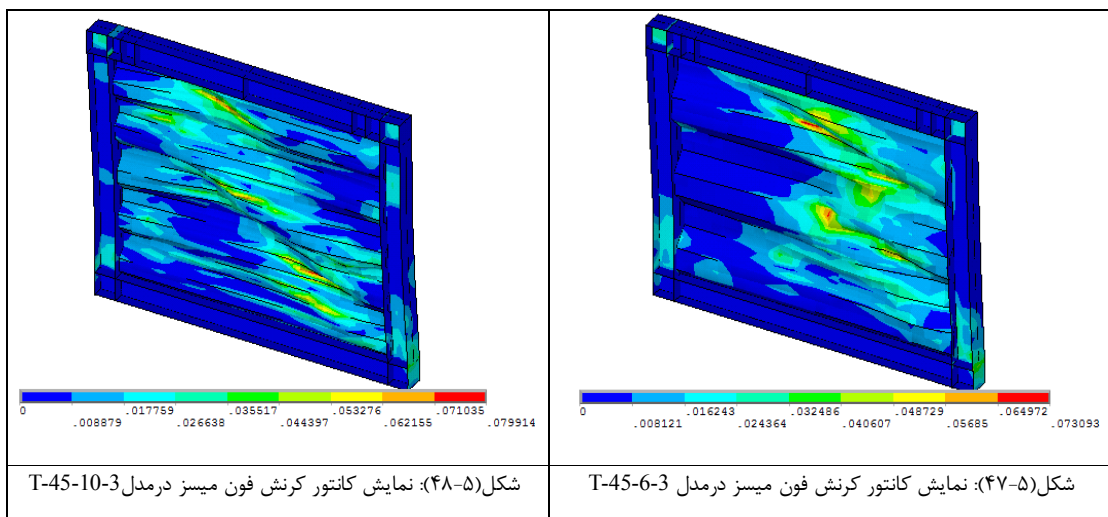
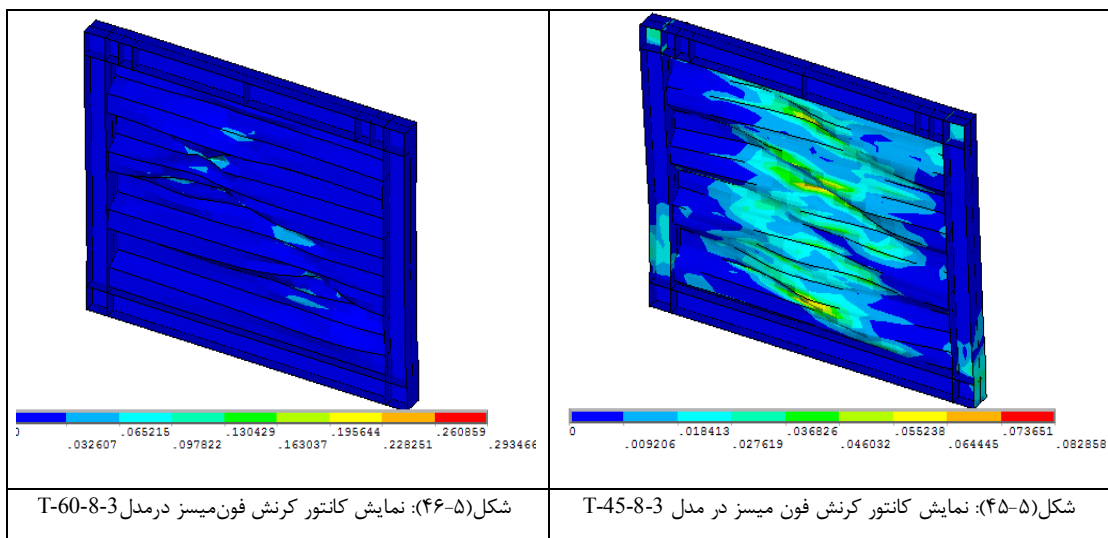
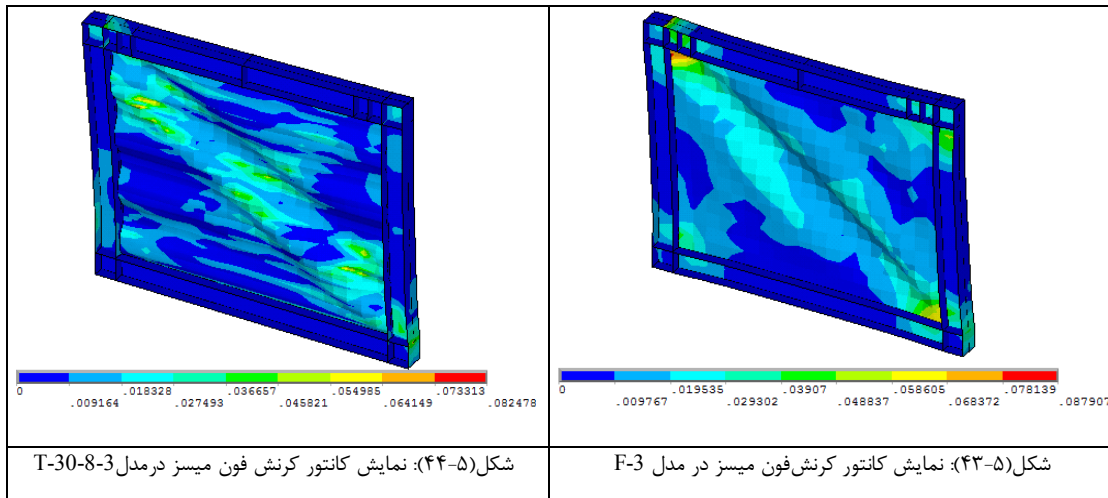
شکل (۳۹-۵): نمایش کانتور تنش فون میسز در مدل T-45-8-3



شکل (۴۲-۵): نمایش کانتور تنش فون میسز در مدل T-45-10-3



شکل (۴۱-۵): نمایش کانتور تنش فون میسز در مدل T-45-6-3

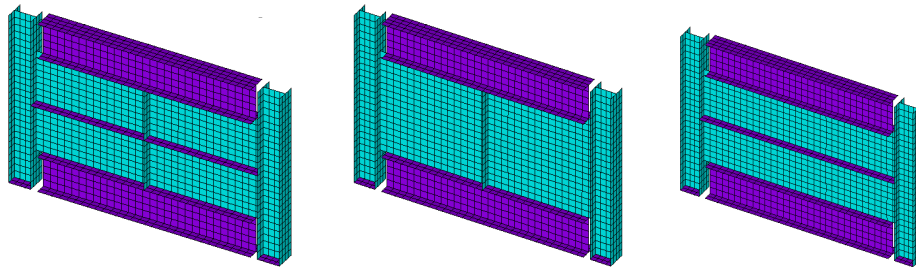


۵-۳-۶- نمودارهای بارگذاری یک طرفه بار- درصد تغییر مکان نسبی ورق‌های

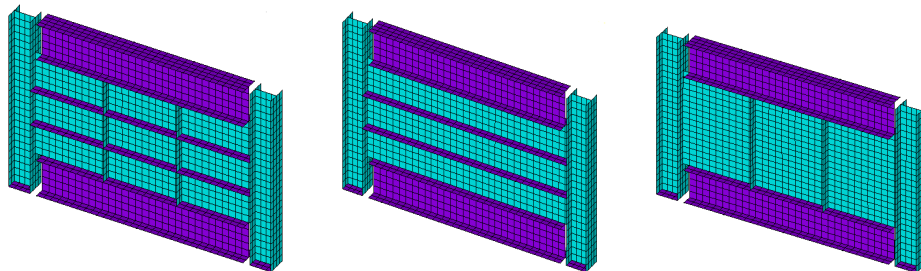
صاف سخت شده

۵-۳-۶-۱- نحوه مدل‌سازی سخت‌کننده‌ها

ضخامت سخت‌کننده‌ها برابر ضخامت ورق دیوار می‌باشد. ابعاد دیوار براساس ابعاد مدل جفری- برمن و مایکل برونو می‌باشد. شکل (۵-۴۹) و (۵-۵۰) نحوه مدل‌سازی و نام‌گذاری دیوار برشی فولادی با انواع سخت‌کننده‌ها را نشان می‌دهند.

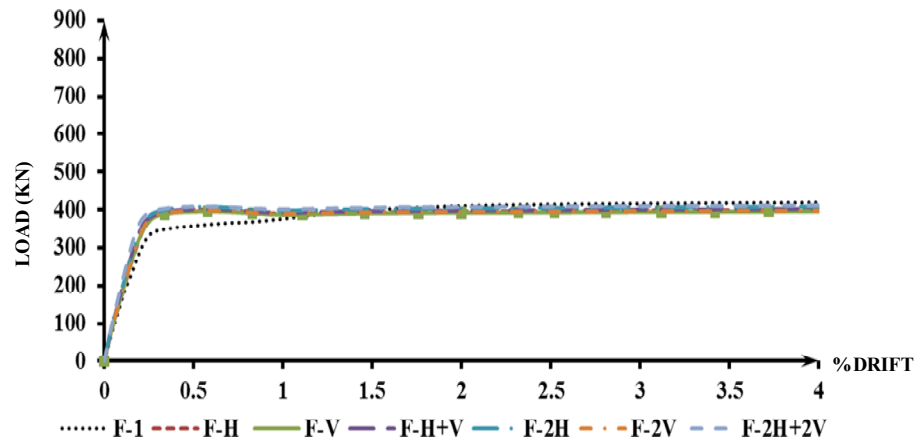


شکل (۵-۴۹): دیوار با یک سخت‌کننده افقی [H] با یک سخت‌کننده قائم [V] با یک سخت‌کننده قائم و افقی [V+H]

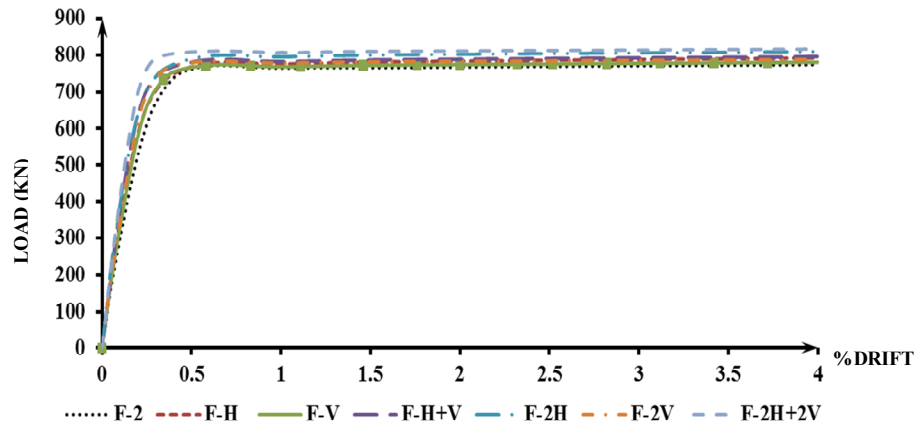


شکل (۵-۵۰): دیوار با دو سخت‌کننده قائم [2V] با دو سخت‌کننده افقی [2H] با دو سخت‌کننده قائم و افقی [2V+2H]

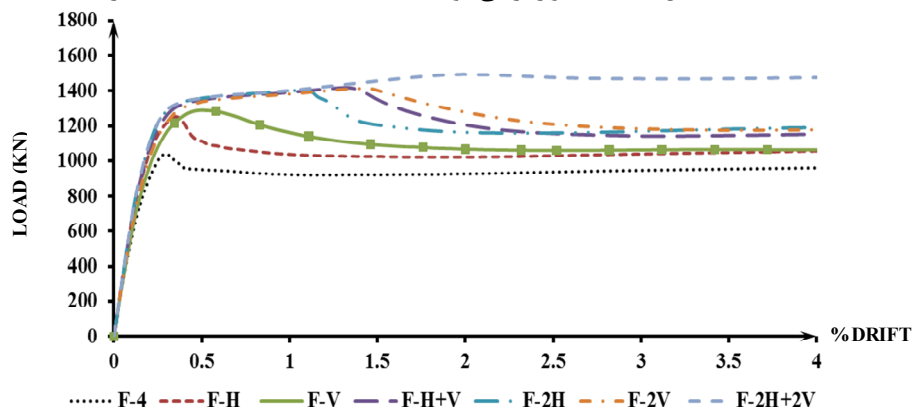
۲-۳-۵- نمودارهای بارگذاری یک طرفه بدون قاب محیطی



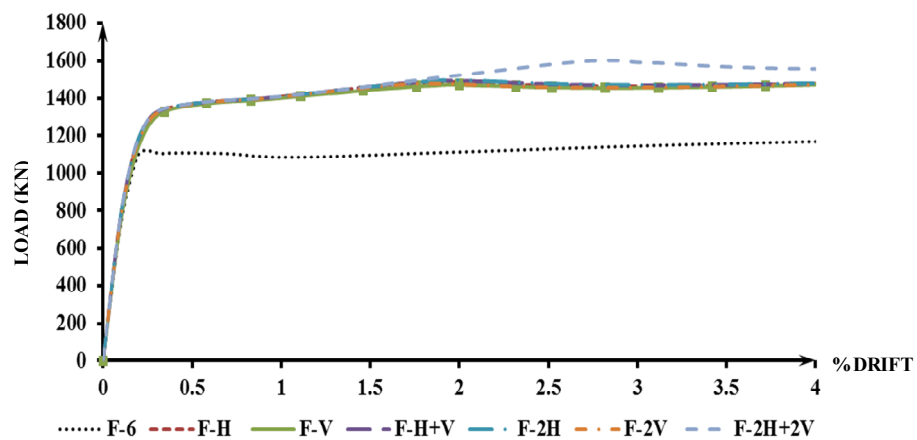
شکل (۵۱-۵): دیوار برشی فولادی سخت‌شده با ضخامت ۱ میلی‌متر



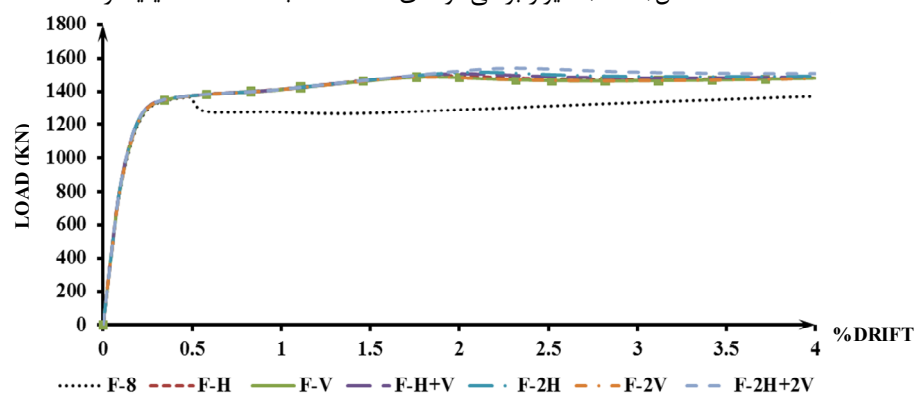
شکل (۵۲-۵): دیوار برشی فولادی سخت‌شده با ضخامت ۲ میلی‌متر



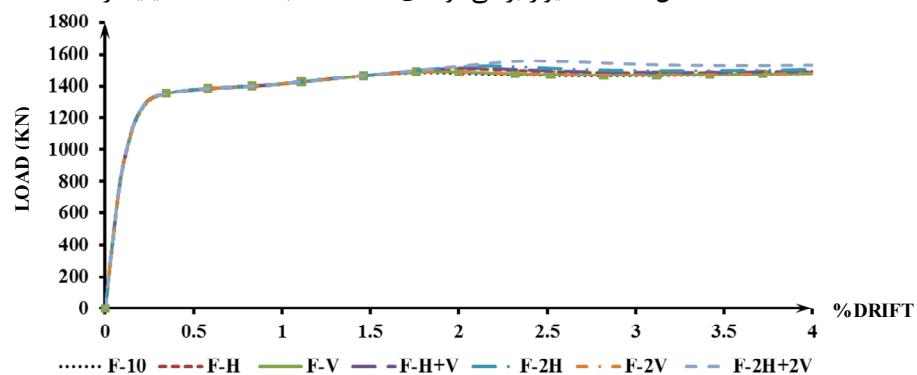
شکل (۵۳-۵): دیوار برشی فولادی سخت‌شده با ضخامت ۴ میلی‌متر



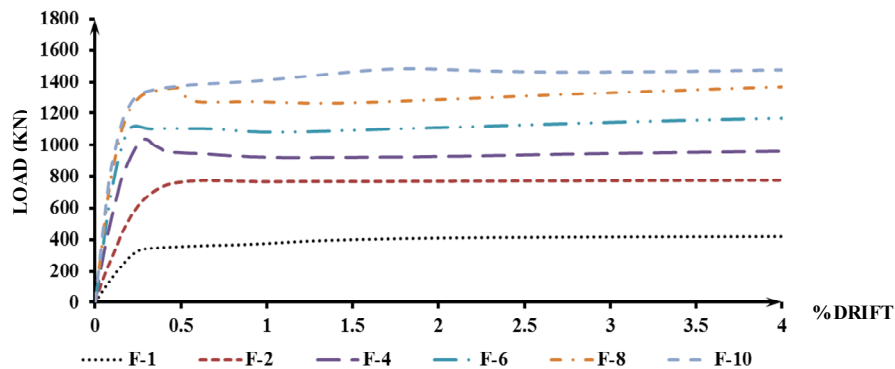
شکل (۵-۴): دیوار برشی فولادی سخت شده با ضخامت ۶ میلیمتر



شکل (۵-۵): دیوار برشی فولادی سخت شده با ضخامت ۸ میلیمتر



شکل (۵-۶): دیوار برشی فولادی سخت شده با ضخامت ۱۰ میلیمتر



شکل (۵-۵۷): منحنی‌های بار درصد تغییر مکان نسبی دیوار برشی فولادی بدون قاب محیطی در ضخامت‌های متفاوت

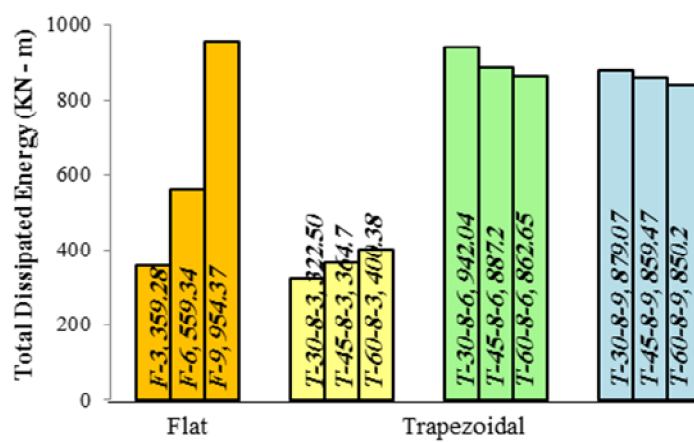
با توجه به شکل (۵-۵۱) و (۵-۵۲) این گونه برداشت می‌شود که استفاده از سخت‌کننده در دیوارهای فولادی با ضخامت کم (ضخامت‌های ۱ و ۲ میلی‌متر) تاثیر چندانی در رفتار دیوارها نداشته است. اما با توجه به شکل (۵-۵۳) استفاده از سخت‌کننده اثر قابل ملاحظه‌ای بر رفتار دیوارها داشته، به ویژه در مورد دیوار با ضخامت ۴ میلی‌متر که با افزایش سخت‌کننده‌های افقی و عمودی رفتار دیوارها بهبود یافته است.

در رابطه با دیوار با ضخامت ۶ میلی‌متر در شکل (۵-۵۴) دیده می‌شود که پیکربندی و تعداد سخت‌کننده‌ها تاثیر قابل توجهی بر رفتار دیوار برشی ندارد.

شکل (۵-۵۵) و (۵-۵۶) نشان می‌دهد که دیوارهای با ضخامت زیاد (ضخامت‌های ۸ و ۱۰ میلی‌متر) به ویژه در ضخامت ۱۰ میلی‌متر، پیکربندی و تعداد سخت‌کننده مانند دیوارهای با ضخامت کم اثر سخت‌کننده قابل صرف نظر کردن است.

در مورد افزایش سختی در ناحیه الاستیک، دیده می‌شود که استفاده از سخت‌کننده در ضخامت‌های ۱ و ۲ و ۴ و ۶ میلیمتر در مدل‌های معرفی شده موجب افزایش سختی در ناحیه الاستیک شده است ولی در ضخامت‌های ۸ و ۱۰ میلیمتر در این ناحیه افزایش چندانی نداشته است.

۶- جمع‌بندی و ارائه پیشنهادات جهت مطالعات آتی



۶-۱ - مقدمه:

در این پایان‌نامه، استفاده از ورق موج‌دار فولادی به جای ورق صاف در دیوار برشی فولادی با هدف بالاتر بردن ظرفیت دورانی و جذب انرژی دیوار برشی فولادی با ورق صاف مورد بررسی قرار گرفت. در این راستا از نرم افزار اجزای محدود ANSYS استفاده گردید.

فصل اول به مروری بر ادبیات فنی دیوار برشی فولادی با ورق صاف اختصاص یافت. در فصل دوم به معرفی ورق موج‌دار و کاربرد آن‌ها و در فصل سوم به معرفی دیوار برشی ساخته شده از ورق موج‌دار به جای ورق صاف پرداختیم.

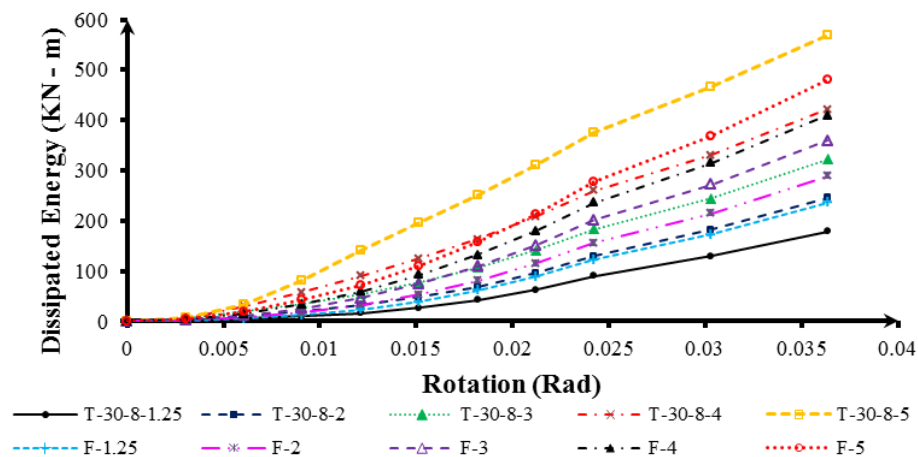
در فصل چهارم نحوه‌ی مدل‌سازی، فرضیات آن، اعتبارسنجی و کالیبراسون مدل، بیان گردید. در نهایت در فصل پنجم به ارائه جزئیات نتایج تحلیل اجزای محدود کمانش خطی و غیرخطی ۷۲ مدل دیوار برشی فولادی با اشکال صاف، صاف دارای سخت‌کننده و موج‌دار پرداخته شد. با توجه به ارائه جزئیات نتایج در فصل پنجم، در این بخش به جمع‌بندی نتایج و سپس به طرح پیشنهادات جهت انجام مطالعات آتی می‌پردازیم.

۶-۲ - جمع‌بندی نتایج

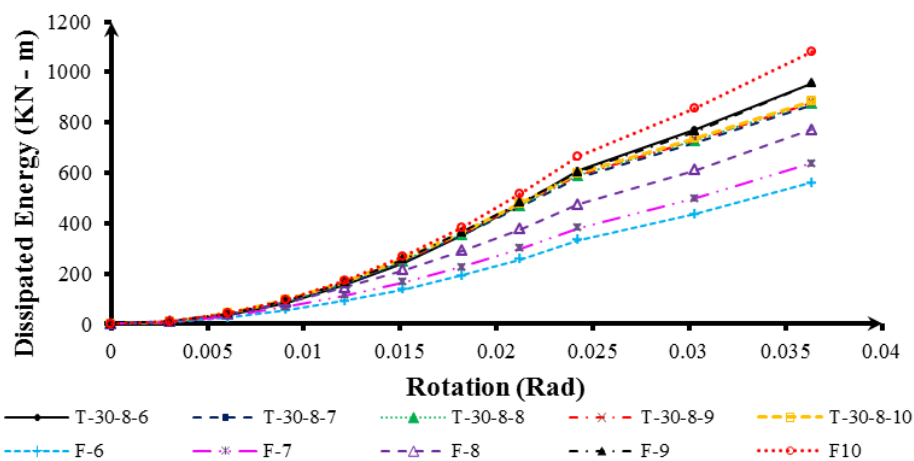
نتایج کلی به دست آمده براساس پارامترهای این پژوهش عبارتند از:

۱- در دیوار برشی فولادی با افزایش ضخامت ورق صاف و موج‌دار میزان جذب انرژی و سختی افزایش می‌یابد.

۲- همانطور که در شکل (۶-۱) و (۶-۲) دیده می‌شود، با موج‌دار کردن ورق صاف با زاویه ۳۰ درجه و تعداد نیم‌موج ۸ میزان جذب انرژی نمونه‌های موج‌دار در ضخامت‌های کمتر از ۴ میلی‌متر، از نمونه‌های صاف کمتر بوده ولی در ضخامت‌های بیش از ۴ میلی‌متر میزان جذب انرژی ورق‌های موج‌دار به مراتب بیشتر می‌باشد.

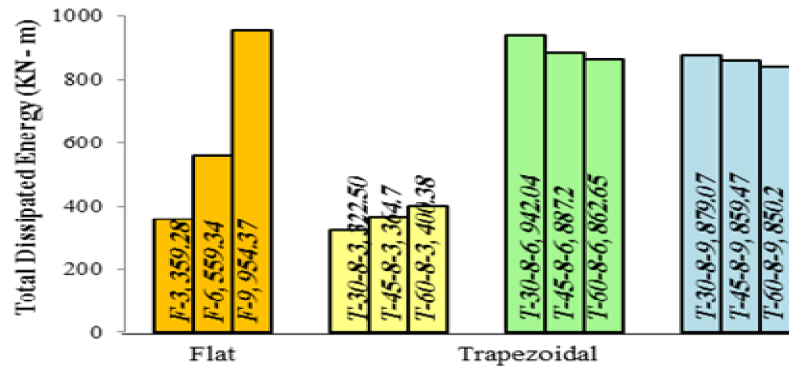


شکل (۱-۶): مقایسه نمودار جذب انرژی ورق موج‌دار و صاف در زاویه ۳۰ درجه در ضخامت‌های متفاوت



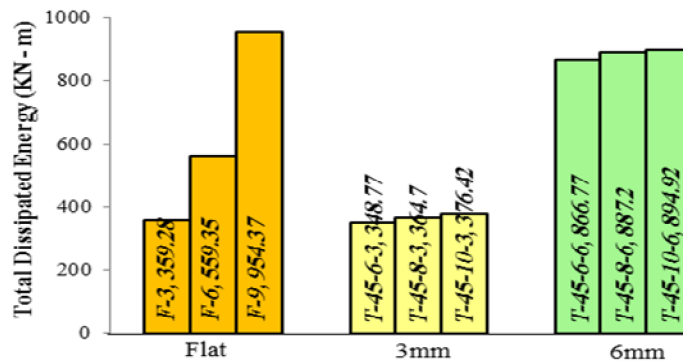
شکل (۲-۶): مقایسه نمودار جذب انرژی ورق موج‌دار و صاف در زاویه ۳۰ درجه در ضخامت‌های متفاوت

۳- با افزایش زاویه ورق موج‌دار از ۳۰ به ۴۵ و از ۴۵ به ۶۰ درجه در ضخامت ۳ میلی‌متر، میزان جذب انرژی نمونه‌ها به ترتیب ۱۳٪ و ۱۰٪ افزایش یافته است. در ضخامت‌های متوسط و زیاد با افزایش زاویه، موجب کاهش جذب انرژی نمونه‌ها می‌شود. این نتایج در شکل (۳-۶) قابل مشاهده است.



شکل (۳-۶): نمایش نمودار میله‌ای ورق موج‌دار در زاویه‌ها و ضخامت‌های متفاوت در دوران ۰/۰۳۶ رادیان

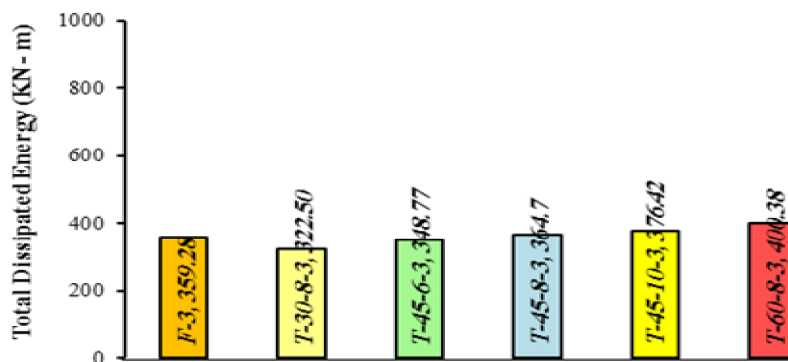
۴- میزان جذب انرژی دیوار برشی فولادی با ورق موج‌دار با افزایش تعداد نیم‌موج در طول ثابت، در یک ضخامت ثابت، افزایش می‌یابد. این افزایش جذب انرژی همان‌طور که در شکل (۳-۶) دیده می‌شود با افزایش تعداد نیم‌موج از ۶ به ۱۰، در ضخامت ۳ میلی‌متر و ۶ میلی‌متر به ترتیب ۸٪ و ۳/۵٪ می‌باشد.



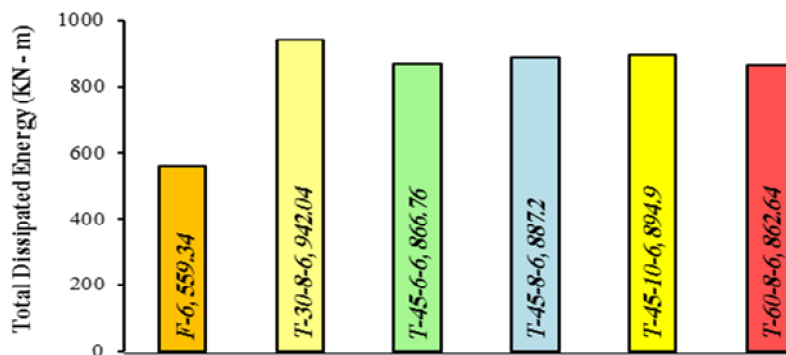
شکل (۴-۶): نمایش نمودار میله‌ای ورق موج‌دار در زاویه ۴۵ درجه و ضخامت‌های ۳ و ۶ میلی‌متر با نیم‌موج‌های متفاوت در دوران ۰/۰۳۶ رادیان

۵- با توجه به نتایج به‌دست آمده از مدل‌های اجزای محدود می‌توان بیان نمود که با قرار دادن ورق‌های دوزنقه‌ای با زاویه موج نزدیک به حالت قائم و تعداد نیم‌موج بیشتر در طول ثابت، در ضخامت‌های کم (۳ میلی‌متر) به جای ورق صاف در دیوار برشی فولادی، در صورت پاره نشدن ورق و جوش آن می‌توان به حداکثر جذب انرژی، ظرفیت دورانی و سختی در ضخامت ثابت دست

یافت شکل (۵-۶). اما در ضخامت متوسط (۶ میلی‌متر) مقدار زاویه و تعداد نیم‌موج‌ها تاثیر چندانی در نتایج یکدیگر نداشته ولی در هر زاویه و هر تعداد نیم‌موجی نتایج بدست آمده از آن از نتایج ورق صاف برتری داشته است شکل (۶-۶).



شکل (۵-۶): نمودار میله‌ای جذب انرژی نمونه صاف و موج‌دار در زوایا و تعداد نیم‌موج‌های متفاوت در ضخامت ۳ میلی‌متر



شکل (۶-۶): نمودار میله‌ای جذب انرژی نمونه صاف و موج‌دار در زوایا و تعداد نیم‌موج‌های متفاوت در ضخامت ۶ میلی‌متر

۶- استفاده از سخت‌کننده در دیوارهای فولادی با ضخامت کم تاثیر چندانی در رفتار دیوارها ندارد، هر چند استفاده از سخت‌کننده در دیوارهایی با ضخامت متوسط اثر قابل ملاحظه‌ای بر رفتار دیوارها داشته، به ویژه در مورد دیوار با ضخامت ۴ میلی‌متر که با افزایش سخت‌کننده‌های افقی و عمودی رفتار آن بهبود یافته است.

۷- یافته‌های این مطالعه نشان می‌دهد که طراحی مناسب و انتخاب موثر ضخامت، تعداد نیم‌موج‌ها و زاویه موج‌ها می‌تواند نتایج مطلوبی بر عملکرد سازه‌ای بالای دیوار برشی فولادی با ورق موج‌دار و مشخصات اتلاف انرژی داشته باشد.

۳-۶- ارائه پیشنهادات برای مطالعات آتی

۱- بررسی انواع دیگری از ورق‌های موج‌دار با شکل منحنی و زیگزاگی

۲- بررسی کارایی دیوارهای فولادی متقاطع (دوبله)

این ورق‌ها را می‌توان به صورت دوبله به کار برد و مشخصات سازه‌ای آن‌ها را مورد بررسی قرار داد.

۳- بررسی کارایی دیوارهای موج‌دار مرکب فولادی-بتنی

برای ایجاد دیوار برشی فولادی موج‌دار با سختی و مقاومت بیشتر امکان اجرای این دیوارها بصورت دیوار برشی موج‌دار مرکب به سادگی میسر می‌شود. خود ورق موج‌دار به علت دارا بودن سختی خارج از صفحه مناسب می‌تواند نقش قالب بتن را ایفا نماید. بنابراین با بکارگیری دو ورق موج‌دار با فاصله و بتن ریزی بین آنها می‌توان یک عنصر مرکب مقاوم ایجاد نمود.

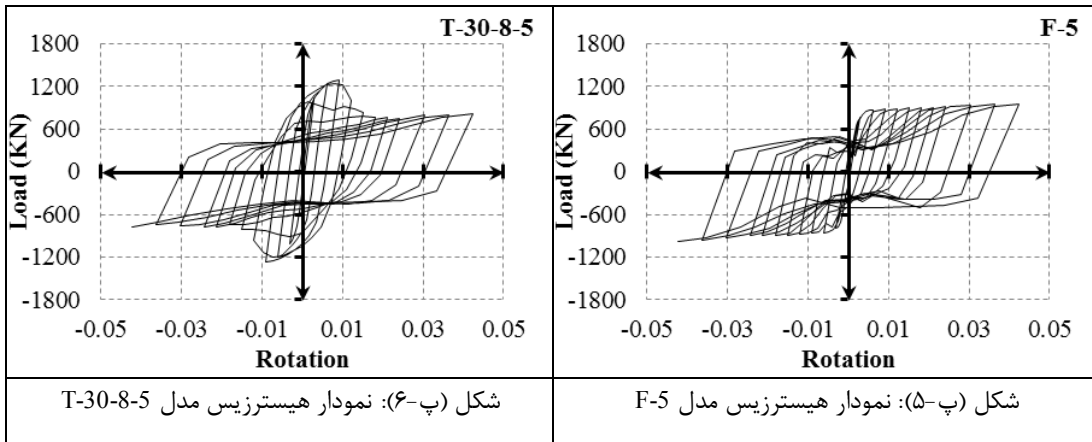
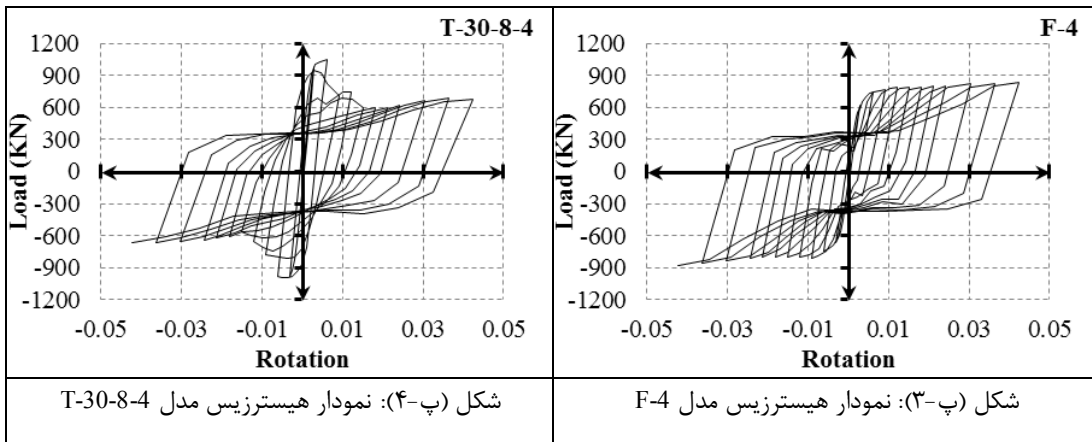
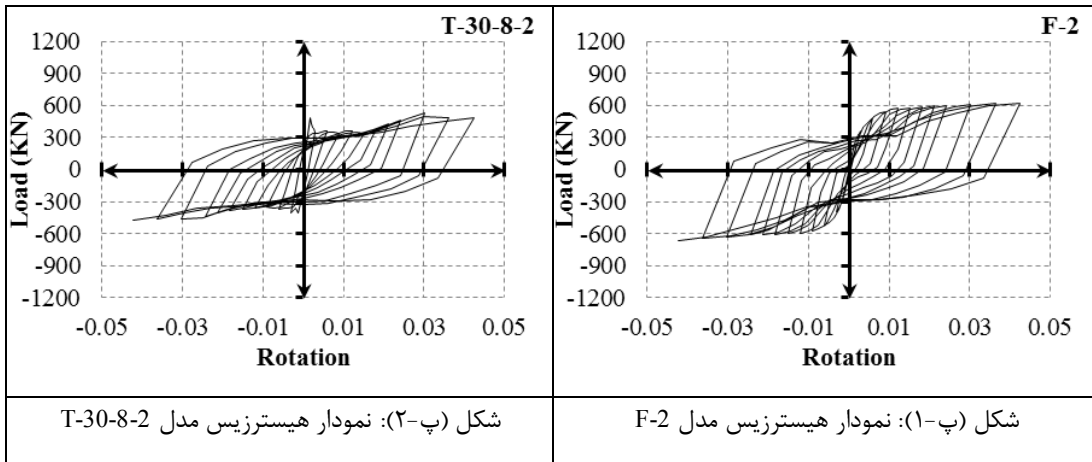
منابع و مأخذ

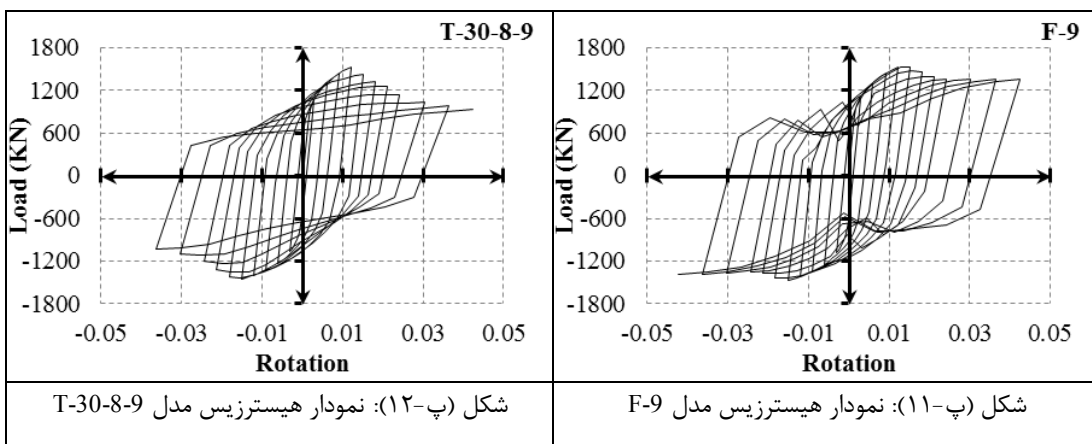
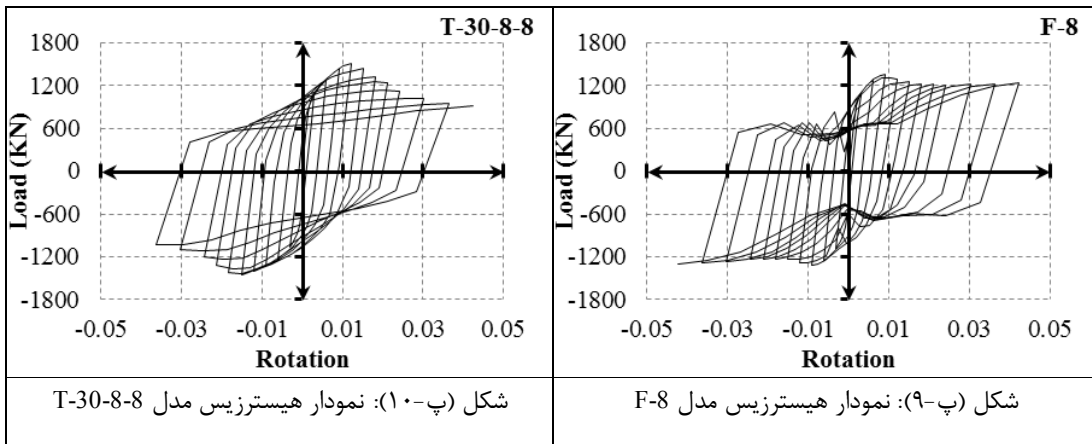
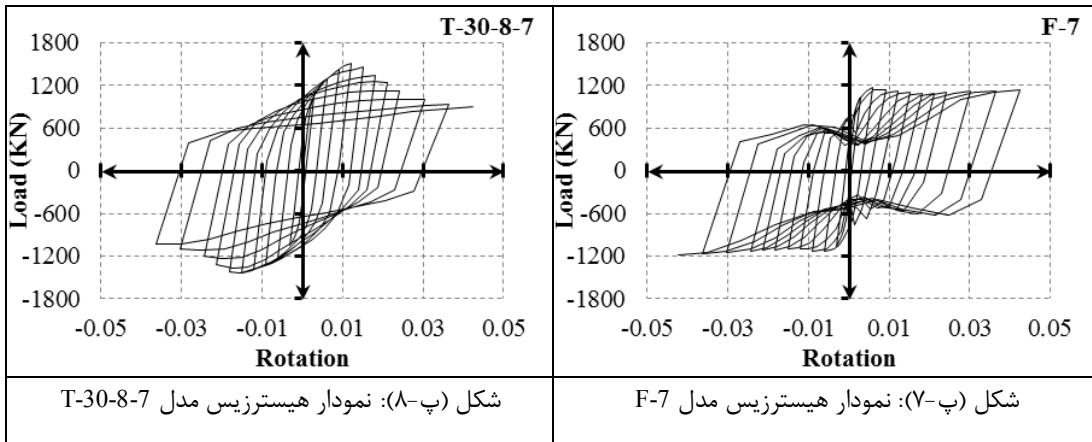
- [1] FEMA 306 (1998), Evaluation of earthquake damaged concrete and masonry wall buildings (ATC-43), prepared by ATC for the Federal Emergency Management Agency, Washington D.C.
- [2] Astanah-Asl A. (2001). "Seismic Behavior and Design of Steel Shear Walls". AISC, Steel Tips
- [3] Astanah-Asl A. and Zhao Q. (2002). "Cyclic Behavior of Steel Shear Wall Systems", Proceedings, Annual Stability Conference, Structural Stability Research Council, April, Seattle.
- [4] Astanah-Asl A. (2002). "Seismic Behavior and Design of Composite Steel plate Shear Walls". AISC, Steel Tips
- [5] Berman, J. W., and Bruneau, M. (2005). "Experimental investigation of light-gauge steel plate shear walls ." J Struct Eng ASCE 2004 [in press, scheduled for vol. 131, No. 2].
- [6] Lin C. H. and Tsai K. C. and Qu B. and Bruneau M. (2010). " Sub-structural pseudo-dynamic performance of two full-scale two-story steel plate shear walls" J. of Constructional Steel Research 66: 1467_1482
- [7] Berman, J. W. (2011). "Seismic behavior of code designed steel plate shear walls. " J. of Engineering Structures 33: 230–244
- [8] Lanhui Guo, Ran Li, Sumei Zhang and Guirong Yan (2012). "Hysteretic Analysis of Steel Plate Shear Walls (SPSWs) and A Modified Strip Model for SPSWs. " Reprinted from Advances in Structural Engineering Volume 15 No. 10
- [9] American Institute of Steel Construction, Inc. (AISC) (1999), Load and Resistance Factor Design Specification For Structural Steel Buildings, AISC, Chicago, IL, December 27.
- [10] FEMA 350 (2000), Recommended Seismic Design Criteria for New Steel Moment-Frame Buildings, prepared by the SAC Joint Venture for the Federal Emergency Management Agency, Washington, DC.
- [11] American Institute of Steel Construction, Inc. (AISC) (2002), Seismic Provisions for Structural Steel Buildings, AISC, Chicago, IL, May 21.

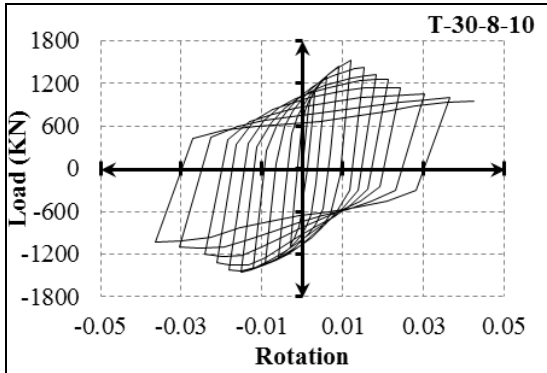
- [12] Wei-Wen (2000), Cold-Formed Steel Design, 3rd edition, John Wiley and Sons.
- [13] Eurocode 4 (2004), Design of Composite steel and concrete structures, European Committee for Standardization.
- [14] SDI Manual, Diaphragm Design Manual for Composite Decks, Form Decks and Roof Decks, First Edition, Steel Deck Institute, Fox River Grove, Illinois.
- [15] Structural Engineering Handbook (1999), W.F. Chen, Editor in chief, CRC PRESS LLC.
- [16] Elgaaly, M., Seshadri, A., and Hamilton, R.W. (1997). "Bending strength of steel beams with corrugated webs." Journal of Structural Engineering, ASCE, 123(6): 772-782.
- [17] Easley J.T, McFarland D.E, "Buckling of Light-Gage Corrugated Metal Shear Diaphragms"; ASCE Journal of the Structural Division ; 95, pp. 1497-516, 1969.
- [18] Y. L. Mo, S. F. Perng, in: Hybrid RC Frame-Steel Wall Systems. Composite and Hybrid Systems, ACI SP-196, 2000, p.189-213 .
- [19] Fülöp, L.A. and Dubina, D (2002). "Are the cold-formed wall stud shear walls dissipative systems in seismic resistant buildings? How much?" STESSA 2003: Proceedings of the Conference on Behavior of Steel Structures in Seismic Areas, 9-12 June 2003, Naples, Italy, pp. 841-846. 2003.
- [20] Stojadinovic and Tipping (2007), "Structural testing of corrugated sheet steel shear walls." Report submitted to Charles Pankow Foundation, Ontario, CA.
- [21] Emami F. and Mofid M. and Vafai A. (2013). "Experimental study on cyclic behavior of trapezoidally corrugated steel shear walls". J. of Engineering Structures 48, 48(2013): 750-762.
- [22] ANSYS 6.0 Documentation.
- [۲۳] حاج‌صادقی، محمد، بهار ۱۳۸۹، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، "بررسی ستون‌های بتن مسلح مستطیلی مقاوم‌شده با FRP"، دانشکده عمران و معماری، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- [24] Eurocode 3 (2003), Design of Steel Structures, Part 1.5: Plated Structural elements, European Committee for Standardization.

پیوست (۱) - نمودارهای هیستریزیس دیواربرشی فولادی با ورق

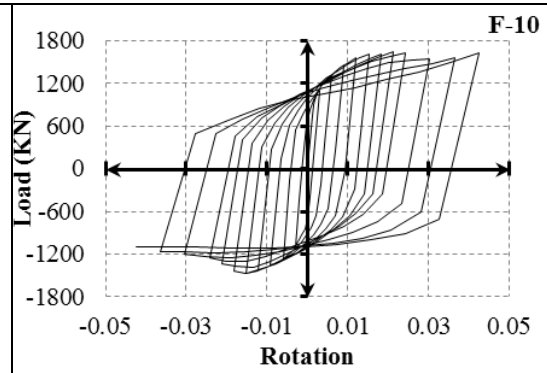
صاف و موج‌دار



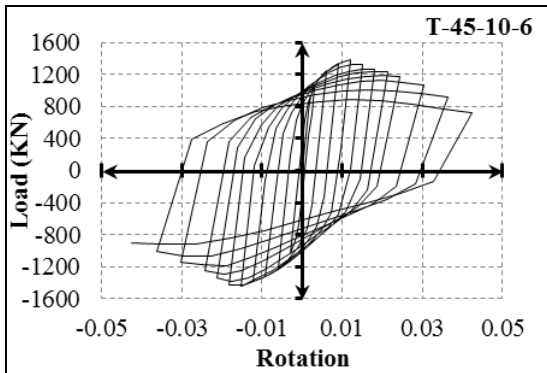




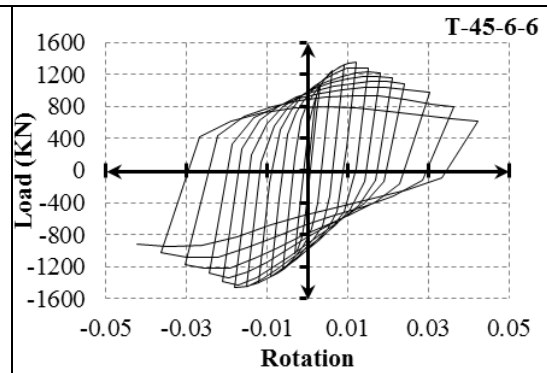
شکل (پ-۱۴): نمودار هیستریزیس مدل T-30-8-10



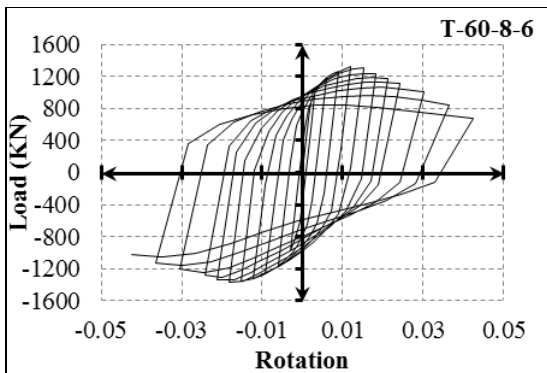
شکل (پ-۱۳): نمودار هیستریزیس مدل F-10



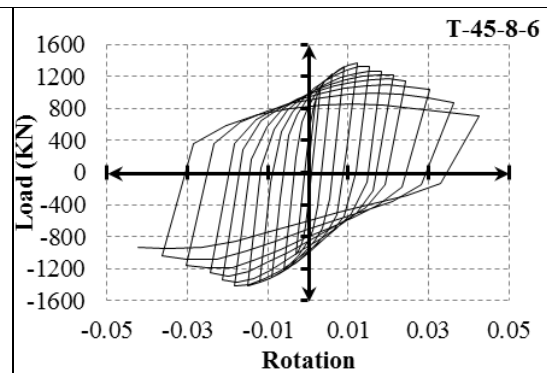
شکل (پ-۱۶): نمودار هیستریزیس مدل T-45-10-6



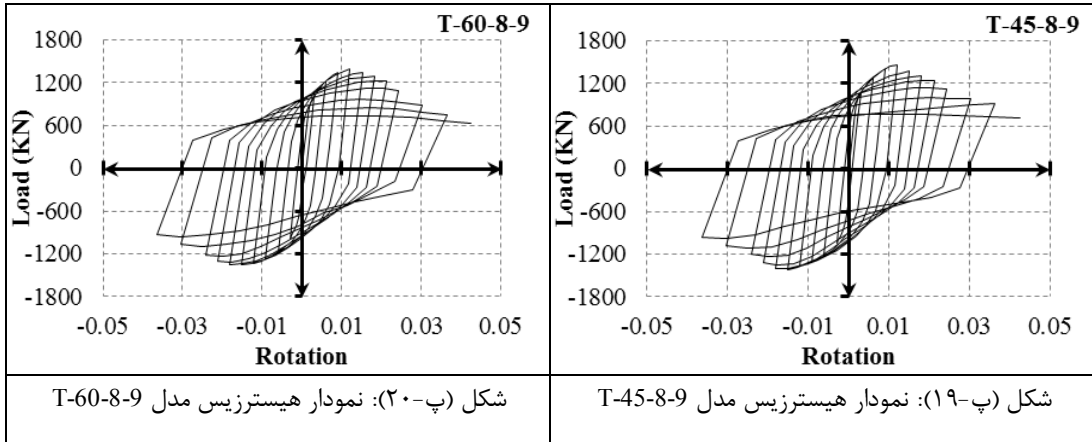
شکل (پ-۱۵): نمودار هیستریزیس مدل T-45-6-6



شکل (پ-۱۸): نمودار هیستریزیس مدل T-60-8-6



شکل (پ-۱۷): نمودار هیستریزیس مدل T-45-8-6



Abstract

In the past three decades, numerous experimental and numerical studies have been conducted which demonstrate that steel plate shear wall systems are effective and economical lateral load resisting systems against both wind and earthquake forces. The properly designed steel plate shear wall has superior ductility, high initial stiffness, stable hysteresis loops, and good energy absorption capacity.

Two types of steel plate shear walls which conveniently used are stiffened and unstiffened types. The first type is very costly while the later type has some serviceability deficiencies after earthquake.

In recent years, the application of corrugated sheets as web girder bridges is being increased. Such plates due to inherent geometric out-of-plane stiffness, have large buckling strength which make them similar to stiffened steel shear walls. Therefore in this thesis, steel shear walls with such corrugated sheets are studied. 30 finite element model of steel shear walls with a flat sheet in different thicknesses and corrugated sheet in different thickness, corrugation angles, and number of corrugation half-waves under cyclic loading condition have been studied. Also 42 models include flat sheets with stiffeners under monotonic loading condition have been studied.

The specimens have been modeled and analyzed using ANSYS (2007) finite element software with consideration of geometrically and materially nonlinearity.

Findings of this study indicate that proper design and efficient selection of plate thickness, number of corrugation half-waves, and corrugation angle can result in high-performing corrugated-plate steel shear walls with superior structural and energy dissipation characteristics.

In addition, the use of stiffeners in flat steel shear walls with low and high thickness, had not considerable effects on behaviour of walls; although at middle thickness its effects is considerable, so that in wall with thickness of 4 mm by increase of horizontal and vertical stiffeners the behaviour of wall has been improved.

Keywords: *corrugated, steel shear wall, energy dissipation, nonlinear, FEM.*



Shahrood University of Technology

Faculty of Civil and Architectural Engineering Department

**Study on Behaviour of
Corrugated Steel Plate Shear Wall**

Hamed Kalali

Supervisor

Dr. Farshid. J. Alaei

Advisor

Mr. M. Hajsadeghi

February 2014

