



# مطالعه تحلیلی و آزمایشگاهی دیوارهای برشی فولادی تقویت شده قطری

عرفان علوی ، فریبرز ناطقی الهی- سال ۱۳۸۷

E-mail: [E.Alavi@iiees.ac.ir](mailto:E.Alavi@iiees.ac.ir), [Nateghi@iiees.ac.ir](mailto:Nateghi@iiees.ac.ir)

## ۱.مقدمه

بر مبنای تحقیقات انجام شده در دهه های اخیر، دیوار برشی فولادی به عنوان یک سیستم مناسب باربر جانبی و اقتصادی در طراحی لرزه ای سازه ها و مقاوم سازی ساختمانهای موجود شناخته شده است که به صورت تقویت شده یا نشده و یا سوراخ دار بکار می رود. از طرفی، پیچیدگی رفتار غیر خطی این سیستم بدلالی از قبیل لاغری نسبتاً زیاد ورق نازک فولادی و اثرات مودهای کماتشی ورق ، عملکرد میدان کششی ورق پس از کماتش، مراحل تسلیم دیوار ، تنوع مودهای گسیختگی ترد و شکل پذیر، حلقه های هیستریزس دیوار، نقش المانهای مرزی و اتصالات آنها ، اثرات سخت کننده ها و بازشوها ؛ همچنین وجود برخی مشکلات اجرایی و نبود ضوابط کافی و جامع برای طراحی این سیستم در آیین نامه های ساختمانی نیاز به تحقیق بر روی آن را کماکان ضروری ساخته است. از طرفی مطالعات آزمایشگاهی و تحلیلی معدودی که تاکنون بر روی دیوارهای برشی فولادی تقویت شده صورت گرفته نشان می دهند که تقویت یک دیوار برشی فولادی بوسیله سخت کننده های متداول افقی و قائم مناسب، بهبود رفتار غیر خطی آن را سبب می گردد. در حالیکه ، استفاده از این سخت کننده ها که عمدتاً" برای جلوگیری از کماتش برشی الاستیک ورق پر کننده یکبارمی روند هزینه بر و وقت گیر می باشد. از اینرو، در این تحقیق مطالعه تحلیلی و آزمایشگاهی دیوارهای برشی فولادی و تقویت آنها با سخت کننده های قطری مد نظر قرار گرفته تا علاوه بر صرفه جویی در مراحل اجرا ، بتوان از مزایای سیستم تقویت شده به صورت بهینه ای بهره برد. بدین منظور انجام مطالعات تحلیلی، آزمایشگاهی و نظری بر روی این سیستم جدید برنامه ریزی گردید. از روش اجزاء محدود و آنالیز غیرخطی با لحاظ اثرات تغییر شکلهای هندسی غیرخطی، کماتشی و پس کماتشی ورقهای نازک فولادی جهت مدل سازی و بررسی رفتار غیر خطی دیوارهای برشی فولادی در انجام تحلیلهای عددی بهره گرفته شده است. میزان دقت نتایج تحلیلی با نتایج آزمایشگاهی معتبر موجود در ادبیات علمی سنجیده شده و از آن ، اطمینان حاصل شده است. مطالعات آزمایشگاهی بر روی ۶ نمونه دیوار برشی فولادی با مقیاس ۱:۲ شامل ۲ دیوار تقویت نشده و ۴ دیوار تقویت شده قطری در آزمایشگاه سازه پژوهشگاه به انجام رسیده که در یکی از نمونه ها از قاب پیرامونی با اتصالات مفصل فیزیکی متداول استفاده شده و در نمونه ای دیگر از ترکیب یک بازشوی استراژژیک با سخت کننده های قطری بر اساس نتایج حاصل شده طی تحقیق، استفاده گردیده و رفتار های غیرخطی هیستریتیک آنها مورد بررسی قرار گرفته اند.

## ۲.نمونه های آزمایشگاهی

در انتخاب و طراحی نمونه های آزمایشگاهی و انجام آزمایشات روال ذیل بکار گرفته شده است:

- ۱- اعضای مرزی دیوار، از پروفیل استاندارد IPB 160 بر مبنای DIN آلمان انتخاب شدند تا از نقش جوشکارها در ساخت تیر ورق و اثرات تنشهای پس ماند ناشی از آنها در رفتار دیوار کاسته شود، بعلاوه از نظر کارهای آکادمیک و بین المللی قابلیت انطباق بهتری با روشهای متداول داشته باشند. همچنین ، در طراحی این اعضا علاوه بر رعایت ضوابط حاکم موجود در طراحی دیوارهای برشی فولادی، روابط بدست آمد در این تحقیق نیز در طرح آنها اعمال گردیده است، به این امید که بدین وسیله بتوان رفتار چرخه ای مناسبی از سیستم تقویت نشده نیز بدست آورد و از وقوع شکستهای ترد و تسلیم زود هنگام در این اعضا و از عدم تطابق سختی نسبی مناسب بین آنها و ورق دیوار جلوگیری نمود.
- ۲- ابعاد نمونه ها ، با توجه به شرایط آزمایشگاه و محدودیتهای موجود از قبیل فضا و توان بارگذاری جکها مقیاس ۱:۲ برای نمونه های آزمایشی انتخاب شدند. از اینرو ، نمونه ها با طول حدود ۲ متر و ارتفاع ۵/۱ متر انتخاب شدند تا علاوه بر داشتن نسبت شکل مناسب، دارای ابعادی با کاربرد فراوان (۲m×۴m) در ساختمانها باشند. با توجه به نتایج تحلیلهای عددی اولیه و ظرفیتهای مورد انتظار ، ضخامت ورقهای دیوارها ۸/۰ و ۵/۱ میلیمتر انتخاب شدند.
- ۳- انجام طراحی اولیه، پیش از اقدام به خرید مقاطع فولادی، در ابتدا مدلهای تحلیلی اولیه ای از نمونه های آزمایشگاهی محتمل ایجاد میگردد و ابعاد اولیه مقاطع و حدود ظرفیت برشی دیوارها با فرض استفاده از فولاد های نرمه ساختمانی از نوع St-37 تخمین زده می شدند. برای اطمینان از جلوگیری از هدر رفتن مصالح، تهیه و ساخت نمونه ها و انجام آزمایشات به صورت مرحله ای برنامه ریزی گردیدند. تست اول از حیث محک زدن set-up آزمایشگاهی در تحمل نیروهای وارده تحت بارهای همزمان ثقلی و جانبی و کنترل رواداریها بویژه در مقابل جابه جایی های خارج از صفحه نمونه و احیاناً" رفع برخی نکات ضعف اولیه در طراحی و اجرای مدلهای آزمایشگاهی میتوانست مهم باشد.
- ۴- تهیه نقشه های کارگاهی ساخت، برای چیدمان آزمایشگاهی و هر۶ نمونه ، نقشه های ساخت تهیه گردیدند تا دقت ساخت و نصب نمونه ها در حدود استاندارد و قابل قبولی قرارگیرند. توجه به تعداد زیاد سوراخها و پیچها و اهمیت تطابق محل آنها بر روی نمونه ها و Set-up ، تهیه نقشه هایی اجرایی از نقشه های مهندسی نمونه ها را ضرورت می بخشید.
- ۵-انجام آزمایش مصالح، برای شناخت مقاومتهای حدود تسلیم و نهایی و همچنین رفتار غیر خطی واقعی فولادهای مصرفی خریداری شده و بکار رفته در ساخت نمونه ها آزمایش کشش بر روی نمونه های برگرفته از پروفیل های فولادی و ورق های مصرفی بر طبق استاندارد ASTM صورت گرفت و نتایج مدلهای تحلیلی اولیه با استفاده از نتایج این آزمایشات بازبینی گردیدند تا امکان کالیبراسیون نتایج تحلیلی به کمک نتایج آزمایشگاهی میسرگردد و ظرفیت نمونه های آزمایشگاهی با دقت بیشتری پیش بینی شوند.
- ۶-نصب تجهیزات ابزار دقیق، پس از آماده سازی یک نمونه آزمایشگاهی و نصب آن و انجام تستهای لازم بر روی جوشها و اطمینان از سفتی پیچها و غیره، تجهیزات ابزار دقیق مطابق نقشه هایی که از قبل بدین منظور تهیه شده بود و در اختیار متخصصین مربوطه در آزمایشگاه قرار میگرفت بروی نمونه نصب می شدند. این تجهیزات که عمدتاً" شامل کرنش سنج های غیر خطی و جابه جایی سنج ها بودند در محل های لازم بر مبنای نتایج تحلیلی تعبیه می شدند تا پاسخهای غیر خطی سیستم بدست آیند و همچنین مواردی شامل صلبیت نسبی کف و جابه جایی های خارج از صفحه نمونه ها کنترل گردند تا از دقت نتایج آزمایشگاهی اطمینان لازم حاصل گردد.

شکلهای ۱ و ۶ نمونه های آزمایشگاهی تقویت نشده و تقویت شده قطری بکار رفته در این آزمایشات را پیش از انجام بارگذاری نشان می دهند.



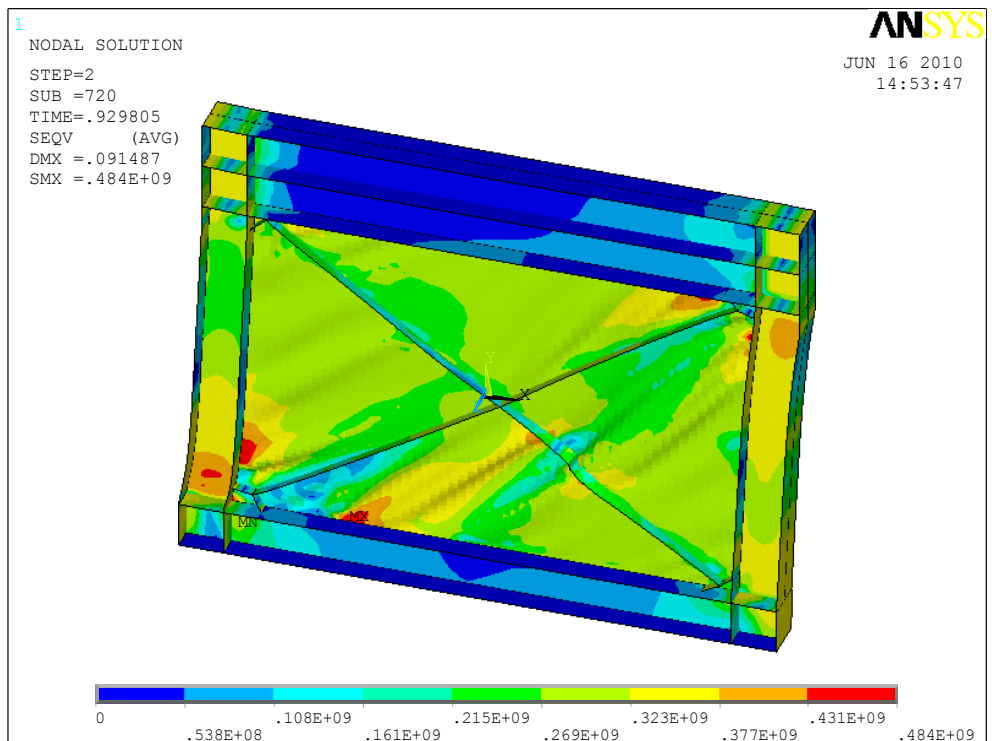
شکل ۳. نمونه SPSW(s1) با ضخامت ورق ۸/۰ میلیمتر و سخت کننده های قطری و گوشه ۲×۲PL۴×۴mm



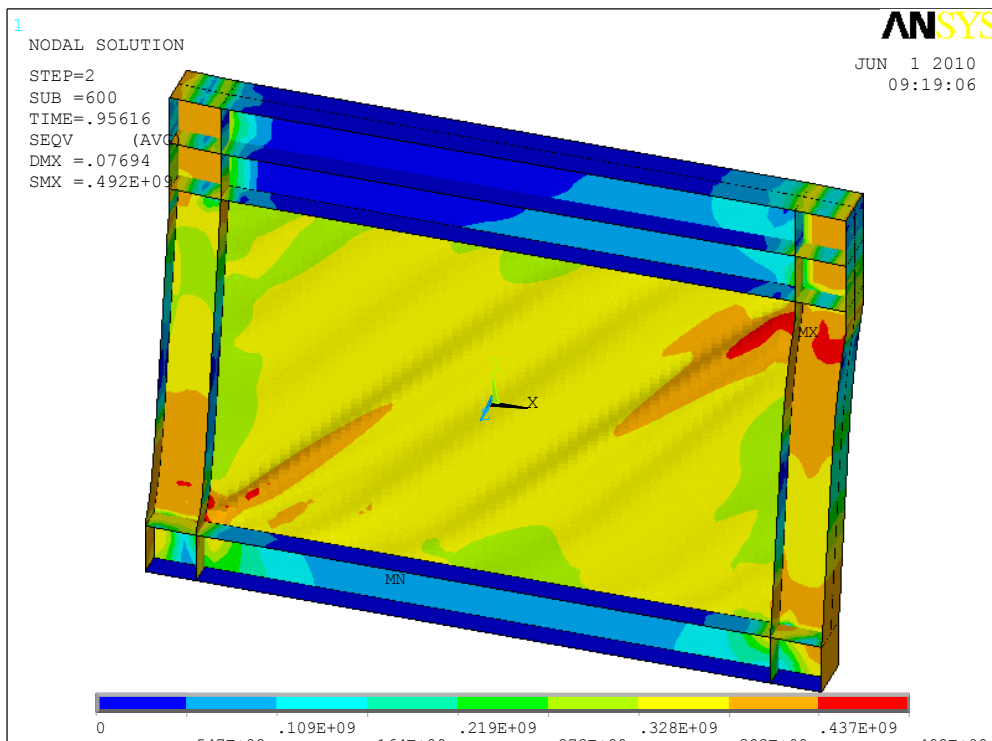
شکل ۲. نمونه SPSW2 با ضخامت ورق ۸/۰ میلیمتر



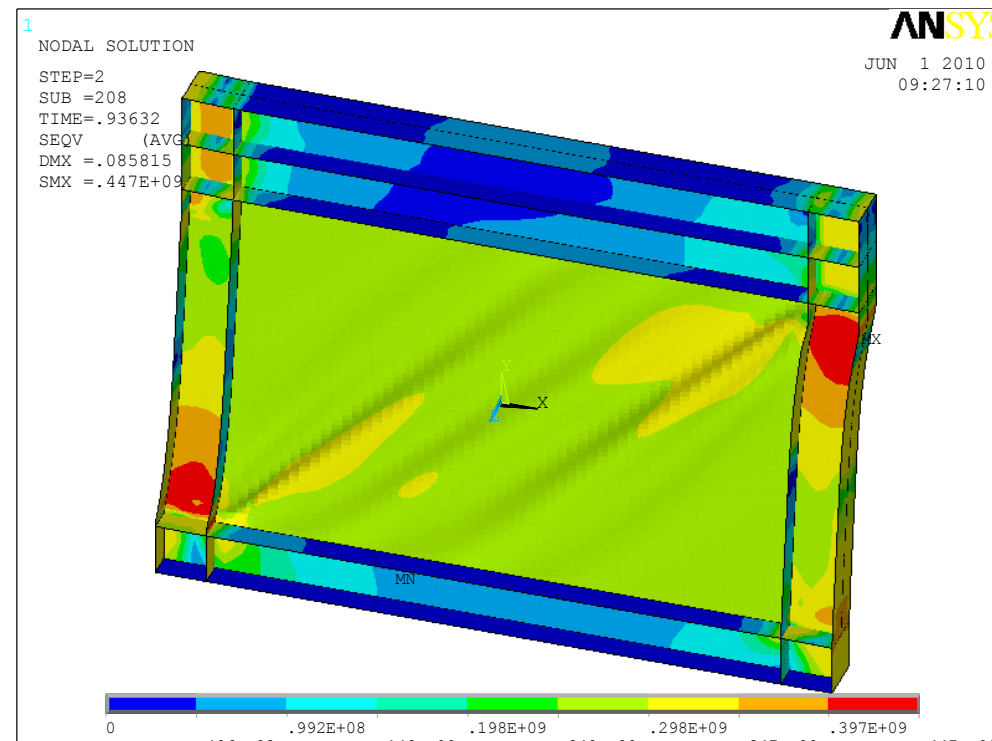
شکل ۱. نمونه SPSW1 با ضخامت ورق ۵/۱ میلیمتر



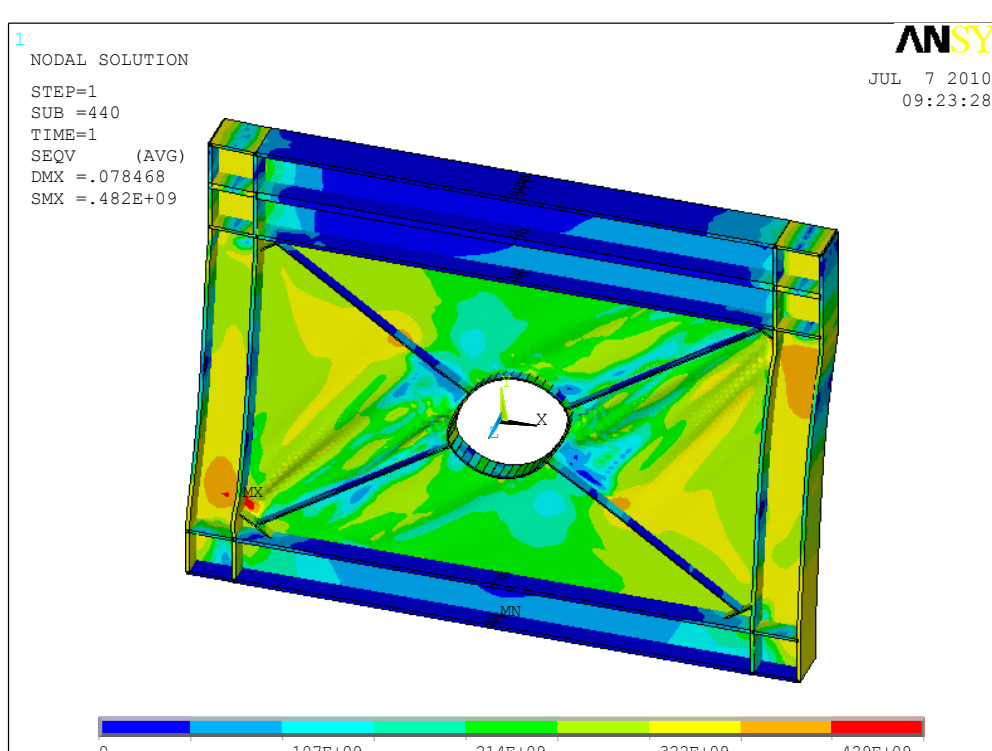
شکل ۲۱. تنشهای ون- میسز (N/m^2) SPSW(s1)



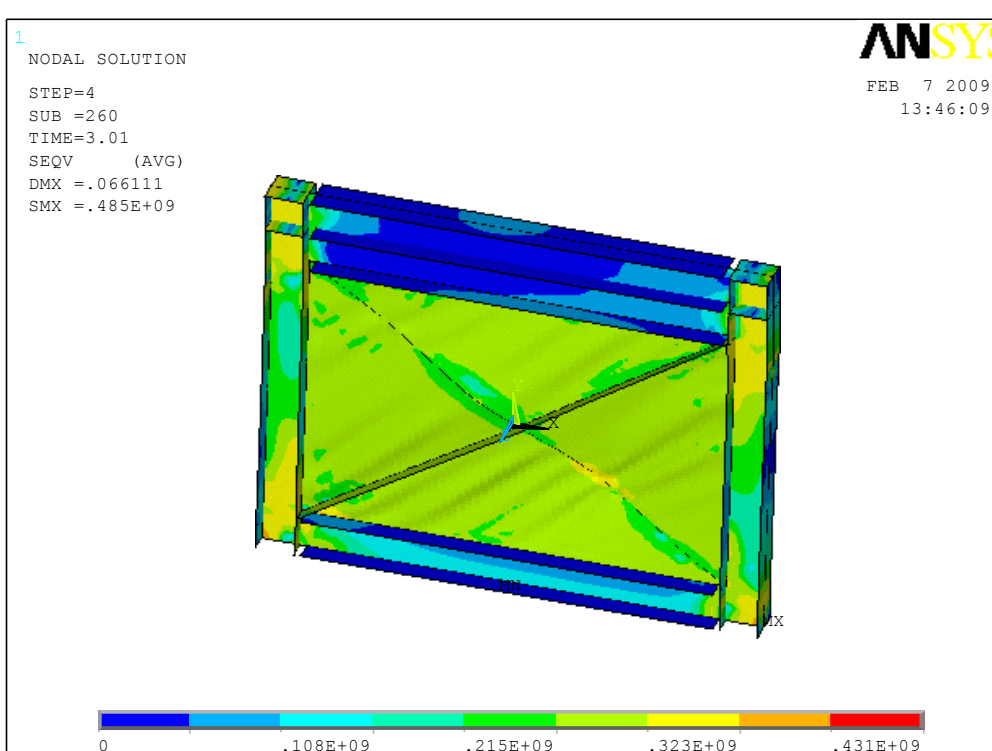
شکل ۲۰. تنشهای ون- میسز (N/m^2) SPSW2



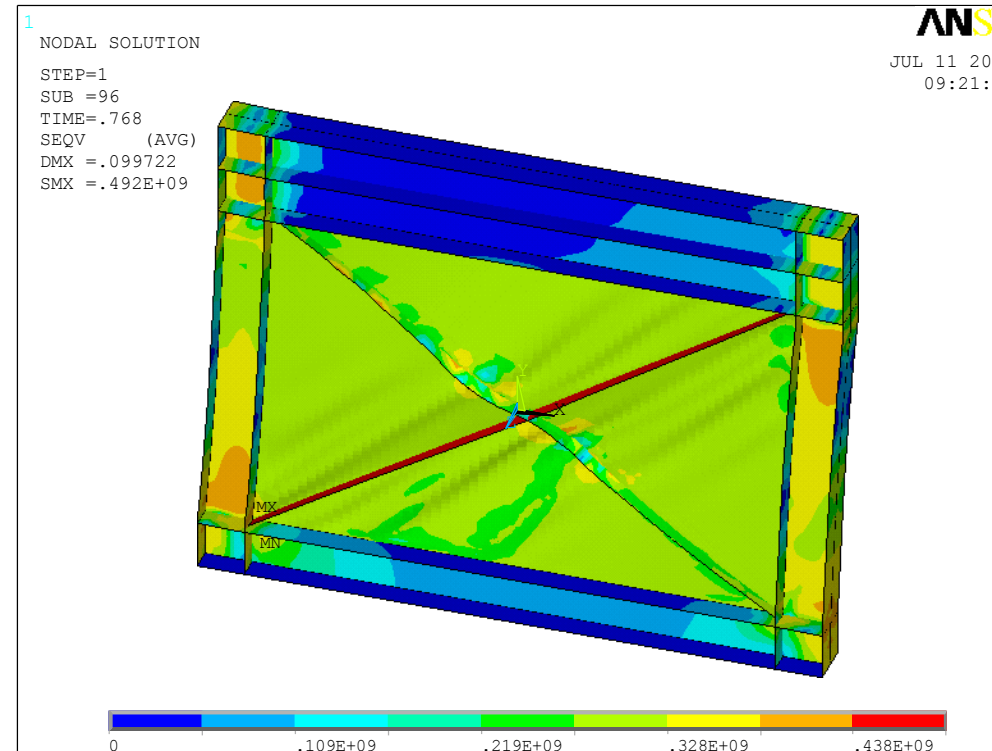
شکل ۱۹. تنشهای ون- میسز (N/m^2) SPSW1



شکل ۲۴. تنشهای ون- میسز (N/m^2) SPSW(s4)



شکل ۲۳. تنشهای ون- میسز (N/m^2) SPSW(s3)



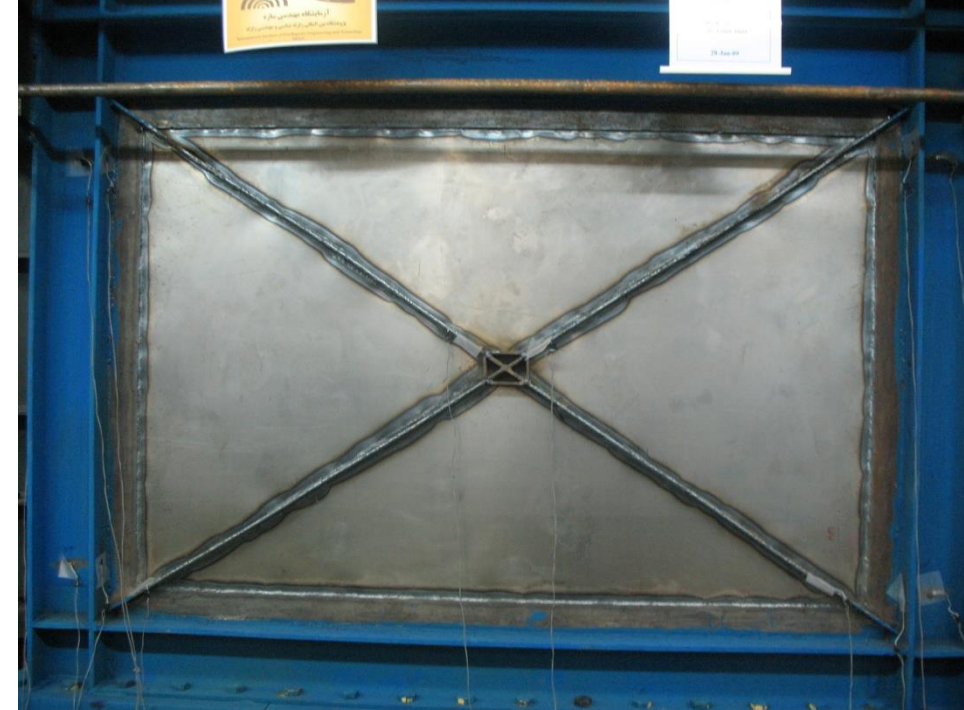
شکل ۲۲. تنشهای ون- میسز (N/m^2) SPSW(s2)



شکل ۶. نمونه SPSW(s4) با ضخامت ورق ۱ میلیمتر و سخت کننده های قطری و گوشه ۲×۲PL۴×۵mm و بازشو سخت شده به قطر ۴۰mm



شکل ۵. نمونه SPSW(s3) با ضخامت ورق ۱ میلیمتر و سخت کننده های قطری ۲PL۶×۱۰ با اتصالات مفصل تیر به ستون



شکل ۴. نمونه SPSW(s2) با ضخامت ورق ۸/۰ میلیمتر و سخت کننده های قطری ۲PL۴×۴

## ۳. آزمایشات و نتایج

برای انجام آزمایشات نیاز بود تا چیدمان (set-up) آزمایشگاهی مناسبی طراحی شود، با این فرض که set-up آزمایشگاهی میبایست حداکثر نیروهای محتمل بر سیستم را ناشی از جکهای هیدرولیکی دینامیکی ۱۰۰۰ kN و چک استاتیکی ثقلی با ظرفیت ۲۵۰ kN بتواند تحمل نماید. بارثقلی که توسط جک قائم به نمونه ها وارد میشد ۱۸۰ kN بود و به طور ثابت در طول مدت انجام آزمایش به دیوار اعمال می گردید. برای یافتن رفتار هیستریتیک نمونه ها در محدوده های الاستیک و بویژه غیر الاستیک که معمولاً" در اثر اعمال جابه جایی نسبی زیاد در طبقات یک سازه در اثر بارهای رفت و برگشتی زلزله های شدید اتفاق می افتد، بارگذاری به روش شبهه استاتیک چرخه ای و بر طبق دستورالعمل ATC-24 در آزمایشات صورت گرفت. این روش برای طراحی اجزاء مقاوم لرزه ای بکار میروند و بویژه برای یافتن نقش خستگی این اجزاء در محدوده های رفتار غیر خطی و تحت سیکلهای کم که در اجزایی چون ورق های لاغر و نازک دیوار که تحت کرنشهای زیادی در رفتار چرخه ای قرار می گیرند و دارای مودهای تغییر شکلی زیاد و پیچیده ای می باشند، مناسب می باشد. البته با توجه به مهم بودن رفتار دیوار در محدوده الاستیک که میتواند در رفتار دینامیکی و در طراحی سازه های بلند و در مقابله با بارهای حرارتی و باد نیز نقش مهمی داشته باشد، تعداد سیکلهای مناسبی در این محدوده نیز تعریف گردیدند، جزئیات بیشتر در ادامه ارائه شده است. تمام مراحل بارگذاری و ثبت اطلاعات به صورت اتوماتیک و با استفاده از رایانه صورت می گرفت.

شکلهای ۷ تا ۱۲ شرایط نمونه ها را در محدوده های رفتار غیرخطی نشان میدهد. کلیه نمونه ها توانسته اند بیش از ۲۵ سیکل بار جانبی و بیش از ۵/۳ درصد جابه جایی جانبی را به بدون افت مقاومت قابل ملاحظه و به خوبی تحمل نمایند. لازم به ذکر است که ظرفیت تحمل بار جانبی قاب به تنهایی در تمام نمونه های با اتصالات قاب صلب یعنی spsw(1,2,s1,s2,s4) به استثنای نمونه spsw2، ۴۶۰ kN بوده و در نمونه spsw2 ظرفیت قاب حدود ۵۴۰ kN می باشد.

همچنین ، در شکلهای ۱۳ تا ۱۸ منحنی های هیستریزس بدست آمده برای نمونه ها از آزمایشات ارائه شده اند. مشاهده می شود که منحنی چرخه- ای نمونه با سخت کننده قطری و گوشه SPSW(s3) از سایر نمونه ها دوکی شکلتز میباشد. همچنین، با ملاحظات انجام شده در طراحی نمونه ها پدیده باریک شوندگی در هیچیک از منحنی های چرخه ای دیده نمیشود. بعلاوه، نمونه SPSW(s4) که دارای بازشوی استراژژیک میباشد دارای رفتار هیستریتیک مناسبی می باشد.

- دیوارهای برشی فولادی تقویت نشده که به خوبی طراحی و اجرا شده باشند و دارای اعضای مرزی مناسبی بر مبنای روابط پیشنهادی در این تحقیق باشند، رفتار غیر خطی مناسبی داشته و پدیده باریک شوندگی در این سیستم نیز در صورتی که از اتصالات صلب بین تیر و ستون استفاده شود تا حد مطلوبی کاهش می یابد.
- منحنی های هیستریزس دیوارهای سخت شده قطری بویژه با سخت کننده های گوشه، spsw(s1)، نسبت به دیوارهای سخت نشده مشابه با آن SPSW2، دوکی شکلتز بوده و جذب انرژی بیشتری را داشته است.
- سخت کننده های قطری باعث افزایش ظرفیتهای برشی حد الاستیک و حد نهایی و همچنین شکل پذیری دیوار شده اند.
- جابه جایی های نسبی بالایی که تمام نمونه ها تحمل کرده اند (۶/۳ تا ۷/۴ درصد) نمایانگر ضریب شکل پذیری بالای این سیستمهای باربر جانبی اعم از تقویت نشده و تقویت شده قطری و یا با بازشوی استراژژیک می باشد .
- نتایج آزمایش بر روی نمونه دیوار برشی فولادی تقویت شده قطری با بازشوی استراژژیک نشان میدهد که این سیستم علی رغم وجود بازشو دارای منحنی های هیستریزس پایدار بوده و به صورت یک سیستم جاذب انرژی مناسب عمل نموده است.
- مقایسه نتایج تحلیلهای عددی با نتایج آزمایشگاهی تطابق نزدیک آنها را نشان میدهد.