پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله

مطالعه تحلیلی و آزمایشگاهی دیوارهای برشی فولادی تقویت شده قطری

عرفان علوی ، فریبرز ناطقی الهی

E-mail: E.Alavi@iiees.ac.ir , Nateghi@iiees.ac.ir

۱.مقدمه

برمبنای 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 بدلایلی از قبیل لاغری نسبتا" زیاد ورق نازک فولادی و اثرات مودهای کمانشی ورق ، عملکرد میدان کششی ورق پس از کمانش، مراحل تسلیم دیوار ، تنوع مودهای گسیختگی ترد و شکل پذیر، حلقه های هیسترزیس دیوار، نقش المانهای مرزی و اتصالات آنها ، اثرات سخت کننده ها و بازشوها ؛ همچنین وجود برخی مشکلات اجرائی 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 عمدتا" برای جلوگیری از کمانش برشی الاستیک ورق پر کننده بکارمی 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 جوئی 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، کمانشی و پس کمانشی 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 مقیاس۱:۲ 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 استراتژیک با سخت کننده های قطری بر اساس نتایج حاصل شده طی تحقیق، استفاده گردیده و رفتار های غیرخطی هیسترتیک 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 جوشکاریها در ساخت تیر ورق و اثرات تنشهای پس مانده 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 اعضاء علاوه بر رعایت ضوابط حاکم موجود در طراحی دیوارهای برشی فولادی، روابط بدست آمده 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 اعضاء 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 (۴m×۲m) در ساختمانها باشند. با توجه به نتایج تحلیلهای عددی اولیه و ظرفیتهای مورد انتظار ، ضخامت ورقهای دیوارها ۸/۰و ۱و 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 میگردید 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 زدنset-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 احیانا" رفع برخی نکات ضعف اولیه در طراحی و اجرای مدلهای آزمایشگاهی میتوانست مهم باشد.

۴-تهیه نقشه های کارگاهی ساخت، برای چیدمان آزمایشگاهی و ۶هر 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 ASTMصورت 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 برروی نمونه نصب می شدند. این تجهیزات که عمدتا" 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 ۱و ۶ نمونه های آزمایشگاهی تقویت نشده و تقویت شده قطری بکار رفته در این آزمایشات را پیش از انجام بارگذاری نشان می دهند.

شکل۱. نمونه SPSW1 با ضخامت ورق ۵/۱ میلیمتر

شکل۲. نمونه SPSW2 با ضخامت ورق ۸/۰ میلیمتر

شکل۳. نمونه SPSW(s1) با ضخامت ورق ۸/۰ میلیمتر و سخت کننده های قطری و گوشه ۲PL۴۰×۴mm ×۲

شکل۴. نمونه SPSW(s2) با ضخامت ورق ۸/۰ میلیمتر و سخت کننده های قطری ۲PL۴۰×۴ ×۲

شکل۵. نمونه SPSW(s3) با ضخامت ورق ۱ میلیمتر و سخت کننده های قطری ۲PL۶۰×۱۰ ، با اتصالات مفصل تیر به ستون

شکل۶. نمونه SPSW(s4) با ضخامت ورق ۱ میلیمتر و سخت کننده های قطری و گوشه ۲PL۴۰×۵mm ×۲ و بازشو سخت شده به قطر ۴۰۰mm

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 kNو جک استاتیکی ثقلی با ظرفیت ۲۵۰ kN بتواند تحمل نماید. بارثقلی که توسط جک قائم به نمونه ها وارد میشد ۱۸۰kN بود و به طور ثابت در طول مدت انجام آزمایش به دیوار اعمال می گردید. برای یافتن رفتار هیسترتیک نمونه ها در محدوده های الاستیک و بویژه غیر الاستیک که معمولا" در اثر اعمال جابه جایی نسبی زیاد در طبقات یک سازه در اثر بارهای رفت و برگشتی زلزله های شدید اتفاق می ا فتد، 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 میرود 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 ۱۲شرایط 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 ۵۴۰kN می باشد.

همچنین ، در شکلهای ۱۳تا ۱۸منحنی های هیسترزیس 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 شکلتر 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 استراتژیک میباشد دارای رفتار هیسترتیک مناسبی می باشد.

شکل۷. نمونه SPSW1 ۶/۴ درصد جابه جایی نسبی طبقه و ظرفیت بار جانبی ۸۷۴ kN

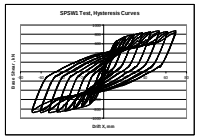
شکل۸. نمونه SPSW2 ۵۶/۴ درصد جابه جایی نسبی طبقه و ظرفیت بار جانبی ۷۶۵ kN

شکل۹. نمونه SPSW(s1) ۷/۴ درصد جابه جایی نسبی طبقه و ظرفیت بار جانبی ۷۱۲ kN

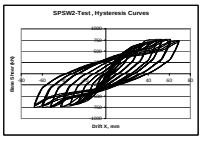
شکل۱۰. نمونه SPSW(s2) در محدوده رفتار غیرخطی، ۶/۳ درصد جابه جایی نسبی طبقه و بار جانبی ۷۹۶kN

شکل۱۱. نمونه SPSW(s3) در سیکل ۲۶ ام، ۶/۳ درصد جابه جایی نسبی طبقه و بار جانبی ۷۶۹ kN

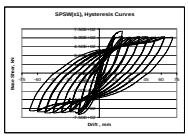
شکل۱۲. نمونه SPSW(s4) در جابه جایی جانبی نسبی نهایی ۶/۴ درصد ، ظرفیت جانبی ۷۴۰ kN



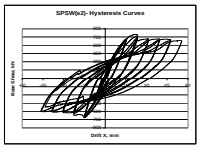
شکل۱۳. منحنی های هیسترزیس نمونه SPSW1



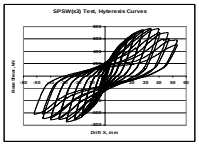
شکل۱۴. منحنی های هیسترزیس نمونه SPSW2



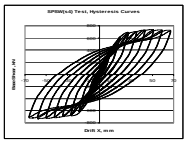
شکل۱۵. منحنی های هیسترزیس نمونه SPSW(s1)



شکل۱۶. منحنی های هیسترزیس نمونه SPSW(s2)



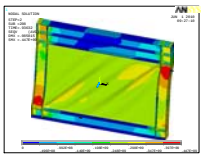
شکل۱۷. منحنی های هیسترزیس نمونه SPSW(s3)



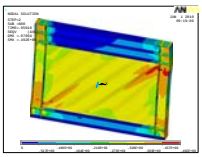
شکل۱۸. منحنی های هیسترزیس نمونه SPSW(s4)

۴. مطالعه تحلیلی نمونه های آزمایشگاهی

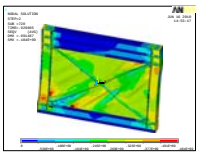
تحلیل عددی نمونه های آزمایشگاهی با استفاده از نرم افزار ANSYS صورت پذیرفته است. با توجه به احتمال وقوع کمانش در ورق های نازک و یا المانهای مرزی، علاوه برمدل سازی رفتار غیر خطی مصالح اثرات ثانویه ناشی از تغییر شکل های اجزاء که ناشی از رفتار غیر خطی هندسی و تغییر شکلهای بزرگ است نیز در تحلیلها لحاظ شده اند. تحلیلهای عددی بر روی مدلهای اجزاء محدود نمونه ها هم قبل از ساخت و انجام آزمایش بر روی نمونه ها و هم پس از آن با توجه به شرایط واقعی و اولیه نمونه ها صورت می گرفت و نتایج تحلیلی با آزمایشگاهی مقایسه می گردید. از اینرو، کنتورهای تنش بدست آمده بر مبنای معیار تسلیم ون- میسز برای نمونه ها در شرایط نهایی، در شکلهای ۱۹ تا ۲۴ نشان داده شده اند. همچنین مقایسه ظرفیتهای بار جانبی بدست آمده برای نمونه ها از عددی با نتایج آزمایشگاهی نشان می دهد که ظرفیتهای نهایی دو روش به یکدیگر نزدیک میباشند، به طوریکه اختلاف آنها به کوچکتر یا مساوی ۸٪ می رسد.



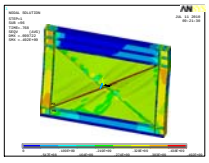
شکل ۱۹. تنشهای ون- میسز SPSW1.(N/m^2)



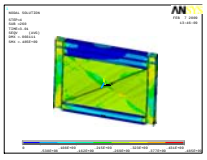
شکل ۲۰. تنشهای ون- میسز SPSW2.(N/m^2)



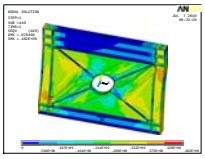
شکل ۲۱. تنشهای ون- میسز SPSW(s1).(N/m^2)



شکل۲۲. تنشهای ون- میسز SPSW(s2).(N/m^2)



شکل۲۳. تنشهای ون- میسز SPSW(s3).(N/m^2)



شکل۲۴. تنشهای ون- میسز SPSW(s4).(N/m^2)

۵. نتیجه گیری

خلاصه و اهم نتایج را میتوان به شکل ذیل بیان نمود:

- 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 هیسترزیس دیوارهای سخت شده قطری بویژه با سخت کننده های گوشه، spsw(s1)، نسبت به دیوارهای سخت نشده مشابه با آن spsw2 ، دوکی شکلتر 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 استراتژیک می باشد .
- نتایج آزمایش بر روی نمونه دیوار برشی فولادی تقویت شده قطری با بازشوی استراتژیک نشان میدهد که این سیستم علی رغم وجود بازشو دارای منحنی های هیسترزیس 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.