

اثر سخت‌کننده‌ها بر مشارکت قاب پیرامونی و رفتار لرزه‌ای دیوار برشی فولادی سخت‌شده

پرویز عبادی^{۱*}، مسعود پیش‌بین^۲

۱- گروه عمران، واحد شهرقدس، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

۲- کارشناس ارشد زلزله

چکیده

استفاده از سخت‌کننده در دیوارهای برشی فولادی باعث بهبود رفتار لرزه‌ای سیستم می‌گردد. میزان نیروی انتقالی از ورق فولادی به قاب پیرامونی، از موضوعات مورد بحث طراحان ساختمان در طراحی بهینه دیوارهای برشی فولادی می‌باشد. بخصوص با تعبیه سخت‌کننده‌ها، مقدار نیروی انتقالی به ستونها به میزان چشم‌گیری توسط روابط طراحی آیین‌نامه‌ها کاهش داده می‌شود که موضوع بحث در این مقاله می‌باشد. در این مقاله رفتار لرزه‌ای یک ساختمان ۱۰ طبقه با سیستم دیوار برشی فولادی با سخت‌کننده در سه حالت متفاوت طراحی بررسی گردیده است. در حالت اول، طراحی با رعایت الزامات آیین‌نامه طراحی لرزه‌ای ساختمان‌های فولادی آمریکا و رعایت حداکثر فاصله‌ی مجاز بین سخت‌کننده‌ها انجام گردیده است. در حالت دوم، از اثرات کاهش‌ی مد نظر آیین‌نامه بر قاب پیرامونی صرف نظر شده و در عوض، حداقل سختی مشابه دیوارهای بدون سخت‌کننده تامین شده است. در حالت سوم، حداکثر فاصله‌ی مجاز بین سخت‌کننده‌ها بیشتر از معیارهای ارایه شده توسط آیین‌نامه در نظر گرفته شده و طراحی بهینه ارائه گردیده است. بدین ترتیب طراح می‌تواند زمان بین تسلیم ورق فولادی و کمانش آن را مدیریت کند. در این حالت، ظرفیت طبقه ترکیبی از ظرفیت کمانش برشی و تسلیم برشی خواهد بود. با استفاده از روابط تئوری اندرکنش ورق و قاب (PFI) و مدل‌های المان محدود، مشخص گردید که میزان مشارکت قاب پیرامونی و نیروهای انتقالی به آن با توجه به فاصله سخت‌کننده‌ها تغییر می‌نماید.

کلمات کلیدی: دیوار برشی فولادی، سخت‌کننده، شکل‌پذیری، جذب انرژی، مشارکت ورق و قاب.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:			
10.22065/JSCE.2019.118861.1461	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
doi: 10.22065/JSCE.2019.118861.1461	۱۳۹۹/۰۷/۰۱	۱۳۹۹/۰۷/۰۱	۱۳۹۷/۱۰/۱۶	۱۳۹۷/۰۹/۱۱	۱۳۹۷/۱۱/۲۱
پرویز عبادی			*نویسنده مسئول:		
Parviz.Ebadi@Gmail.com			پست الکترونیکی:		

Effect of Stiffeners on Contribution of Peripheral Frame and Seismic Behavior of Stiffened Steel Plate Shear Wall

Parviz Ebadi*¹, Masoud Pishbin²

¹ Department of civil engineering, Faculty of Engineering, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran.
² MSc in geotechnical engineering, Department of Civil engineering, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran

ABSTRACT

Using Stiffener in steel plate shear wall (SPSW) improves seismic behavior of the system. The transferred force from the steel plate to the peripheral frame is one of challenging topics that discussed by the designers in optimal design of SPSW. Particularly, with the insertion of stiffeners, the amount of transferred force to the columns significantly reduced by the building codes. In this paper, the seismic behavior of a 10-story building with stiffened SPSW investigated in three different design phases. In the first phase, seismic design requirements of American Institute of Steel Construction (AISC) considered with the maximum permissible spacing between the stiffeners. In the second phase, the reductive effects of the building code on transferred forces to the peripheral frame ignored and instead, the minimum required stiffness of peripheral frame considered similar to SPSW without stiffeners. In the third phase, the distance between the stiffeners increased and the optimal design philosophy discussed. In this way, the designer can manage the yielding or buckling of the steel plate. Therefore, the capacity of the floor will be a combination of shear buckling and yield capacity of plate. Plate-Frame Interaction (PFI) theory and finite element tools approved that the peripheral frame design forces and its contribution in seismic behavior of system can vary according to distance of stiffeners.

ARTICLE INFO

Receive Date: 10 February 2018

Revise Date: 02 December 2018

Accept Date: 06 January 2019

Keywords:

Steel Plate Shear Wall, Stiffener, Ductility, Energy Absorption, Peripheral Frame and Wall Contribution

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

10.22065/JSCE.2019.118861.1461

*Corresponding author: Parviz Ebadi
Email address: Parviz.Ebadi@Gmail.com

۱- مقدمه

دیوارهای برشی فولادی از جمله سیستم‌های مقاوم در برابر بارهای جانبی هستند که از یک ورق فولادی همراه با قاب پیرامونی تشکیل شده است. این سیستم به دو صورت سخت شده و سخت نشده مورد استفاده قرار می‌گیرد. استفاده از سخت کننده در این سیستم، علاوه بر بهبود رفتار لرزه‌ای، صرفه‌ی اقتصادی نیز به همراه دارد. بین سال‌های ۱۹۷۳ تا ۲۰۰۷ میلادی مطالعات بسیاری بر روی دیوارهای برشی فولادی با سخت کننده انجام شد که بیانگر افزایش جذب انرژی و ظرفیت باربری سیستم در استفاده از سخت کننده‌ها است [۱-۵].

بین سال‌های ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۵ میلادی، صبوری و همکاران مطالعه‌های آزمایشگاهی متعددی را بر روی نمونه‌های مختلف دیوار برشی فولادی (بدون سخت کننده، با سخت کننده و دارای بازشو) انجام دادند. نتایج نشان داد که سختی و مقاومت برشی پانل‌ها عمدتاً وابسته به عرض مؤثر آن‌ها می‌باشد. همچنین با افزایش عرض بازشوها، سختی و مقاومت نمونه‌های دارای بازشو کاهش یافته و تقویت ورق می‌تواند تا حد زیادی اثر کاهش سختی و مقاومت را در نمونه‌های تقویت شده جبران نماید. و تغییر در فاصله بین لبه‌ی بازشو تا ستون، هیچ تأثیری بر مقاومت برشی ستون ندارد [۶-۹].

مینگ^۱ و همکاران در سال ۲۰۱۵ میلادی مطالعاتی بر روی رفتار لرزه‌ای دیوارهای برشی فولادی با سخت کننده‌های افقی، عمودی و قطری با استفاده از فولاد معمولی و فولاد مقاوم پایین انجام دادند. آن‌ها نشان دادند که استفاده از فولاد با مقاومت پایین همراه با یک سخت کننده افقی و یک سخت کننده عمودی، شکل پذیری و جذب انرژی را افزایش داده و اثر میدان کششی بر روی ستون‌ها را نیز کاهش می‌دهد. همچنین، ظرفیت برشی سیستم افزایش و تغییر شکل خارج از صفحه ورق کاهش می‌یابد [۱۰].

هونگ‌گو^۲ و همکاران در سال ۲۰۱۵ میلادی اثر اتصالات تیر به ستون با شرایط مفصلی، صلب و نیمه صلب را بر روی رفتار دیوارهای برشی فولادی- با و بدون سخت کننده- بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که استفاده از سخت کننده‌ها منجر به کاهش قابل توجه در تغییر شکل برون صفحه‌ای ورق فولادی می‌گردد. همچنین، ظرفیت تسلیم حدود ۲۰٪ کاهش یافت. در حالی که باربری نهایی سیستم با سخت کننده قطری حدود ۵٪ بیشتر از نمونه با سخت کننده عرضی بود. آن‌ها در نهایت پیشنهاد نمودند که از تلفیق قاب نیمه صلب و دیوار برشی در قاب‌های سازه‌ها استفاده شود [۱۱].

روش محافظه کارانه برای طراحی دیوارهای فولادی، اختصاص کل برش طبقه به دیوارها و صرف نظر از نقش ستونها در باربری جانبی سیستم می‌باشد. تحقیقات اخیر عبادی و همکاران بر روی میزان مشارکت قاب پیرامونی در طراحی بهینه دیوارهای برشی فولادی با و بدون سخت کننده نشان داد که می‌توان دیوارهای فولادی را برای مقادیری به مراتب کمتر طراحی نمود و شکل پذیری و جذب انرژی قابل قبولی را بدست آورد [۱۲-۱۴].

از نظر آیین‌نامه‌ای، طراحی دیوارهای فولادی با سخت کننده هنوز بصورت مدون در آیین‌نامه‌های طراحی رایج نظیر آیین‌نامه طراحی لرزه‌ای ساختمان‌های فولادی آمریکا [۱۵]، راهنمای شماره ۲۰ از آیین‌نامه طراحی ساختمان‌های فولادی آمریکا [۱۶] و آیین‌نامه‌ی طراحی فولادی کانادا [۱۷] وارد نشده است و طراحان با ابهامات زیادی مواجه هستند. در حقیقت تحقیقات در این زمینه همچنان در حال انجام است و محققین در حال بررسی این موضوع هستند. به منظور بررسی اثر سخت کننده‌ها بر رفتار لرزه‌ای و میزان مشارکت قاب پیرامونی و دیوار برشی در طراحی لرزه‌ای سیستم، در این تحقیق، یک نمونه ساختمان ۱۰ طبقه فولادی دارای دیوار برشی فولادی با سخت کننده، تحت سه حالت مختلف طراحی شده است و رفتار لرزه‌ای نمونه‌ها با استفاده از روابط اندرکنش قاب و دیوار (PFI^۳) و تحلیل‌های استاتیکی غیرخطی بررسی گردیده‌اند. حالات مختلف طراحی بصورت خلاصه به شرح زیر می‌باشند:

۱- با رعایت ضوابط آیین‌نامه طراحی لرزه‌ای ساختمان‌های فولادی آمریکا با رعایت محدودیت‌های مربوط به حداکثر فاصله‌ی مجاز بین سخت کننده‌ها.

¹ Meng

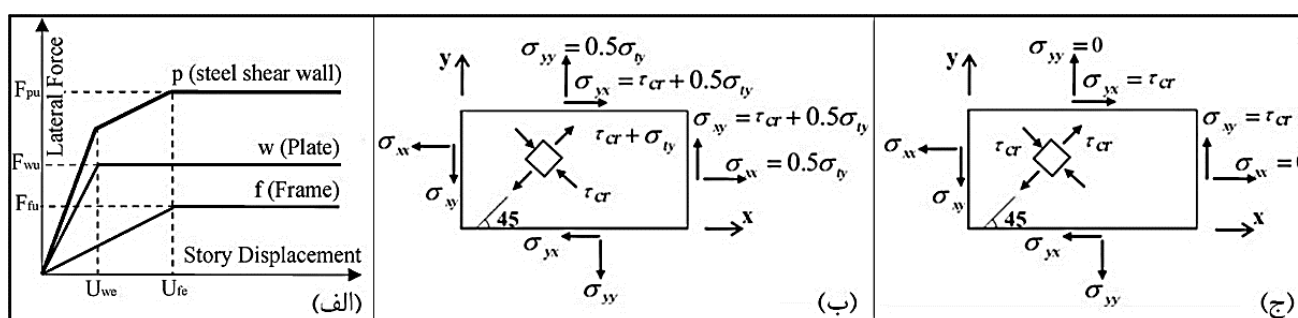
² Hong Guo

³ Plate-Frame Interaction Theory

- ۲- ضوابط کلی طراحی، مشابه حالت اول بوده، از اثرات ضرایب کاهش نیروهای دیوار فولادی بر قاب پیرامونی صرف نظر گردیده و سختی حداقل ستون‌ها و تیرها مشابه دیوارهای بدون سخت‌کننده در نظر گرفته شده‌اند.
- ۳- حداکثر فاصله‌ی مجاز بین سخت‌کننده‌ها بیشتر از معیارهای ارایه شده توسط آیین‌نامه در نظر گرفته شده است و همچنین طراحی قاب پیرامونی با توجه به مقادیر کاهش یافته نیروهای انتقالی از دیوار انجام گردیده‌اند.

۲- تئوری اندرکنش ورق و قاب برای دیوارهای برشی فولادی با سخت‌کننده

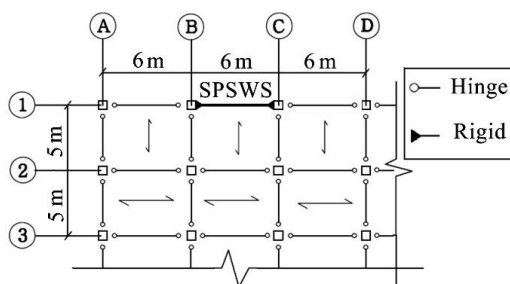
تئوری اندرکنش ورق و قاب (PFI) از رایج‌ترین روش‌ها برای تحلیل و طراحی دیوارهای برشی فولادی می‌باشد. در این روش، رفتار ورق فولادی و قاب پیرامونی به صورت مجزا بررسی شده و با جمع آثار آن‌ها نمودار نیرو-تغییرمکان برشی کل پانل محاسبه می‌شود. در شکل ۱ نمودار نیرو-تغییرمکان برشی و وضعیت تنش‌ها در ورق فولادی در دو حالت قبل و بعد از کمانش نشان داده شده‌اند.



شکل ۱: نمودار نیرو-تغییرمکان برشی پانل، تنش‌ها در ورق فولادی: (ب) قبل از کمانش، (ج) پس از کمانش [۱۸].

۳- پلان و بارگذاری

در شکل ۲ قسمتی از پلان سازه مورد بررسی نشان داده شده است. دیوارهای برشی فولادی با سخت‌کننده در دو انتهای شمالی و جنوبی پلان در نظر گرفته شده‌اند که فقط قسمتی از پلان متناظر با مساحت سهمیه دیوار شمالی نشان داده شده است. سازه‌ی مورد نظر در منطقه زلزله خیز شدید، نوع خاک ۳ و با کاربری مسکونی می‌باشد. این سازه دارای ۱۰ طبقه با ارتفاع ۳ متر می‌باشد. بار مرده طبقات و بام برابر با ۵ کیلونیوتن بر مترمربع و بار زنده طبقات و بام به ترتیب برابر با ۲ و ۱/۵ کیلونیوتن بر مترمربع در نظر گرفته شده‌اند. تمام اتصالات بصورت مفصلی است و فقط تیرهایی که جزیی از سیستم دیوار برشی فولادی هستند دارای اتصالات گیردار هستند. مصالح فولادی ورق از نوع S235J با مقاومت تسلیم ۲۳۵ مگاپاسکال و تیرها و ستون‌ها از فولاد نوع S350J با مقاومت تسلیم ۳۵۰ مگاپاسکال می‌باشند. طراحی دیوار برشی فولادی با سخت‌کننده در سه حالت و با توجه به الزامات آیین‌نامه طراحی لرزه‌ای ساختمان‌های فولادی آمریکا، راهنمای ۲۰ از آیین‌نامه‌ی طراحی ساختمان‌های فولادی آمریکا و به روش بار و مقاومت نهایی صورت پذیرفته است.



شکل ۲: پلان سازه مورد بررسی

نیروهای زلزله از روش استاتیکی معادل محاسبه شده‌اند. ضریب رفتار ساختمان (R) برای قاب ساختمانی با دیوارهای برشی فولادی ویژه با توجه به آیین‌نامه‌ی بارگذاری آمریکا [۱۹] برابر با ۷ در نظر گرفته شده و ضریب برش پایه برابر با ۰/۱۳۸ بدست آمده است. همچنین از اثرات پیچش در سازه صرف نظر شده و مدل‌ها بصورت دو بعدی بر روی قاب محور ۱ بین محوره‌های B و C مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

در این مقاله به منظور بررسی حالت حدی ظرفیت قاب‌های مورد مطالعه در طراحی سیستم‌ها، از مقادیر محاسباتی استفاده شده است. ضخامت سخت‌کننده‌ها برابر با ضخامت ورق فولادی و در یک طرف آن و با ابعاد مربعی در نظر گرفته شده‌اند. در طراحی، مقاطع ستون‌ها و تیرها به ترتیب از نوع قوطی و تیورق در نظر گرفته شده‌اند. در تمامی نمونه‌ها برای اطمینان از تشکیل مفاصل پلاستیک در تیرها و همچنین رعایت اصل ستون قوی-تیر ضعیف، اتصالات تیر به ستون از نوع مقاطع کاهش یافته^۴ (RBS) در نظر گرفته شده‌اند. در تمامی حالت‌های طراحی، برای طراحی ابعاد سخت‌کننده‌ها از روابط بخش G آیین‌نامه‌ی طراحی ساختمان‌های فولادی آمریکا [۲۰] استفاده گردیده است.

۴- طراحی نمونه‌ها

۴-۱- حالت اول: طراحی بر اساس الزامات آیین‌نامه

در حالت اول، طراحی با رعایت الزامات آیین‌نامه طراحی لرزه‌ای ساختمان‌های فولادی آمریکا و رعایت حداکثر فاصله‌ی مجاز بین سخت‌کننده‌ها با توجه به راهنمای شماره ۲۰ از آیین‌نامه طراحی ساختمان‌های فولادی آمریکا صورت گرفته است. در این حالت، انتظار می‌رود که تنش برشی بحرانی بیشتر از تنش تسلیم برشی بدست آید و همچنین از حداکثر ظرفیت ورق فولادی استفاده شده است. طبق راهنمای ۲۰ از آیین‌نامه طراحی ساختمان‌های فولادی آمریکا، نیروهای وارده به تیرها و ستون‌ها باید با ضریب (1-C_v) کاهش یابند. همچنین در این حالت با توجه به کاهش اثرات میدان کششی بر قاب پیرامونی و کاهش قابل توجه ابعاد قاب پیرامونی، محدودیت حداقل سختی مورد نیاز تیرها و ستون‌ها رعایت نشده است. در این حالت، به منظور ارزیابی میزان مشارکت دیوار فولادی و قاب پیرامونی در رفتار سیستم، دیوار فولادی برای دو درصد مختلف ۱۰۰ و ۵۰ طراحی شده و به ترتیب با SPSWS100_1 و SPSWS50_1 نامگذاری شده‌اند. عدد ۱ در انتهای این نام‌ها بیانگر حالت اول طراحی است. حالت اول طراحی و نتایج طراحی این نمونه‌ها به ترتیب در شکل ۳الف و جدول ۱ آورده شده‌اند.

۴-۲- حالت دوم: طراحی قاب مشابه دیوار بدون سخت‌کننده

در حالت دوم، ضوابط کلی طراحی مشابه حالت اول است. با این تفاوت که از اثر ضریب کاهش C_v صرف نظر شده و سختی جانبی حداقل مورد نیاز ستون‌ها و تیرها تامین شده است. به عبارت دیگر، طراحی قاب پیرامونی با توجه به حداکثر میدان کششی انتقالی از ورق فولادی با سخت‌کننده و در نظر گرفتن حداقل سختی ستون‌ها و تیرها (مشابه حالت بدون سخت‌کننده) انجام شده است. ظرفیت برشی مورد نیاز طبق حالت اول و نیروهای وارده به تیرها و ستون‌ها بدون اثر ضریب (1-C_v) محاسبه می‌شوند. حالت دوم طراحی نیز در شکل ۳ب نشان داده شده است. در حالت دوم نیز، به منظور ارزیابی میزان مشارکت دیوار فولادی و قاب پیرامونی در رفتار کلی سیستم، دیوار فولادی برای دو درصد مختلف ۱۰۰ و ۵۰ طراحی شده و به ترتیب با SPSWS100_2 و SPSWS50_2 نامگذاری شده‌اند. عدد ۲ در انتهای این نام‌ها بیانگر حالت دوم طراحی است. در جدول ۱ نتایج مربوط به طراحی نمونه‌های حالت دوم نیز آورده شده است.

در حالت اول طراحی، ضریب کاهش C_v باعث کاهش نیروهای وارد بر تیرها و ستون‌ها شده و در نتیجه ابعاد مقاطع تیر و ستون کاهش یافته است. ضریب کاهش C_v تاثیر اندکی نیز بر روی ضخامت ورق فولادی داشته است. زیرا کاهش ابعاد ستون‌ها باعث افزایش عرض ورق فولادی می‌شود و با توجه به وجود رابطه‌ی معکوس بین ضخامت ورق فولادی و عرض آن، در نتیجه ضخامت ورق فولادی به میزان کمی کاهش می‌یابد.

^۴ Reduced Beam Section

۴-۳- حالت سوم: طراحی بهینه

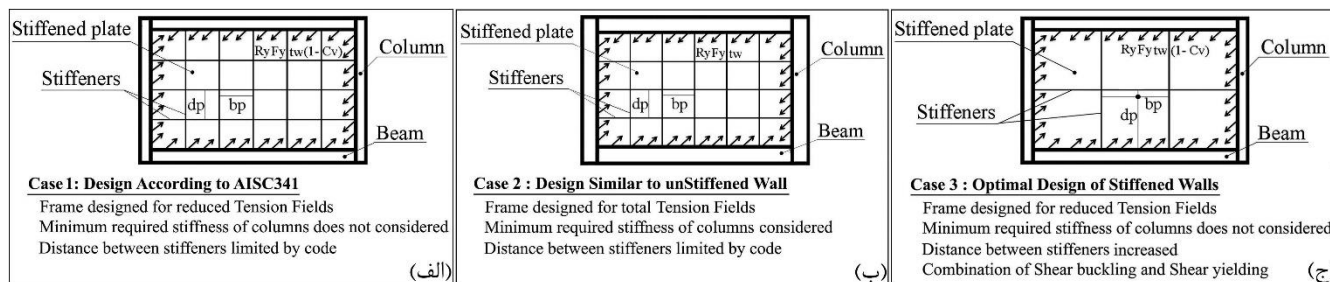
در حالت سوم، حداکثر فاصله‌ی مجاز بین سخت‌کننده‌ها بیشتر از معیارهای ارایه شده توسط آیین‌نامه در نظر گرفته شده است. به عبارت دیگر، برای رسیدن به طرح مناسب و بهینه، فاصله‌ی بین سخت‌کننده‌ها افزایش داده شده است. در این حالت با تغییر فاصله‌ی بین سخت‌کننده‌ها، نسبت تنش برشی بحرانی به تنش حد تسلیم ورق و همچنین ضریب C_v تغییر می‌کند. در این حالت، تاثیر تغییرات نسبت تنش برشی بحرانی ورق فولادی (τ_{cr}) به تنش حد تسلیم آن (σ_{ty}) بر روی طراحی سیستم دیوار برشی فولادی با سخت‌کننده بررسی شده است. در این حالت، ظرفیت طبقه ترکیبی از ظرفیت کمانش برشی و تسلیم برشی است و با توجه به رابطه‌ی (۲-۳) از آیین‌نامه‌ی طراحی ساختمان‌های فولادی آمریکا بدست می‌آید. حالت سوم طراحی در شکل ۳.ج نشان داده شده است. مقدار C_v (نسبت تنش کمانشی برشی (τ_{cr}) به تنش حد تسلیم در میدان پس‌کمانش ورق فولادی (σ_{ty})) در هر حالت تغییر می‌کند.

جدول ۱: طراحی قاب‌های حالت اول و دوم و سوم

پرتال	ضخامت ورق فولادی و سخت‌کننده	ابعاد زبر صفحه	ابعاد ستون BOX	ابعاد بال تیر		ابعاد جان تیر		ضخامت ورق فولادی و سخت‌کننده	ابعاد زبر صفحه	ابعاد ستون BOX	ابعاد بال تیر		ابعاد جان تیر*		
				b_f	t_f	h_w	t_w				b_f	t_f	h_w	t_w	
SPSWS100_1 (طراحی تحت ۱۰۰ درصد برش هر طبقه)						SPSWS100_2 (طراحی تحت ۱۰۰ درصد برش هر طبقه)									
10	0.69	77	130×15	125	12	300	6	0.71	80	280×25	280	28	500	12	
9	1.32	148	140×15	125	12	300	6	1.36	152	300×25	255	28	500	12	
8	1.88	210	150×15	125	12	300	6	1.94	217	330×25	255	25	500	12	
7	2.36	264	160×15	125	12	300	6	2.44	272	350×25	210	25	500	12	
6	2.77	309	170×15	115	12	300	6	2.86	319	350×30	210	20	500	12	
5	3.12	348	180×15	115	12	300	6	3.23	361	380×30	180	20	500	10	
4	3.39	378	190×15	115	12	300	6	3.52	393	410×30	180	15	500	10	
3	3.59	401	200×15	105	12	300	6	3.73	416	410×35	180	15	450	10	
2	3.72	415	200×15	105	12	300	6	3.87	432	430×35	140	15	450	10	
1	3.78	422	210×15	105	12	300	6	3.95	441	460×35	140	15	450	10	
SPSWS50_1 (طراحی تحت ۵۰ درصد برش هر طبقه)						SPSWS50_2 (طراحی تحت ۵۰ درصد برش هر طبقه)									
10	0.34	38	120×15	120	10	300	6	0.35	39	220×20	205	22	450	10	
9	0.66	74	130×15	120	10	300	6	0.67	75	240×20	205	22	450	10	
8	0.93	104	130×15	120	10	300	6	0.96	107	260×20	165	22	450	10	
7	1.18	132	140×15	120	10	300	6	1.21	135	280×20	165	22	450	10	
6	1.38	154	150×15	110	10	300	6	1.42	159	280×25	165	15	450	10	
5	1.55	173	150×15	110	10	300	6	1.59	177	280×25	165	15	400	10	
4	1.68	188	160×15	110	10	300	6	1.73	193	300×25	165	15	400	8	
3	1.78	199	170×15	110	10	300	6	1.83	204	320×25	120	15	400	8	
2	1.85	207	180×15	105	10	300	6	1.91	213	350×25	120	15	400	8	
1	1.88	210	190×15	105	10	300	6	1.94	217	358×25	120	10	400	8	
SPSWS100(0.577)_3 (طراحی تحت ۱۰۰ درصد برش هر طبقه)						SPSWS100(1)_3 (طراحی تحت ۱۰۰ درصد برش هر طبقه)									
10	0.87	134	220×20	200	20	400	10	0.81	112	190×20	160	20	400	10	
9	1.66	257	250×20	200	20	400	10	1.56	215	210×20	160	20	400	10	
8	2.38	368	280×20	200	20	400	10	2.22	306	230×20	160	20	400	10	
7	2.98	461	280×25	150	20	400	10	2.80	386	250×20	160	12	400	10	
6	3.50	542	280×25	150	20	400	10	3.29	453	270×20	160	12	400	10	
5	3.95	611	310×25	150	15	400	10	3.70	510	270×25	160	12	400	10	
4	4.31	667	350×25	150	15	400	10	4.00	551	270×25	105	12	400	10	
3	4.56	706	350×30	120	15	400	10	4.25	585	290×25	105	12	400	10	
2	4.72	731	350×30	120	12	400	10	4.41	607	300×25	105	8	400	10	
1	4.82	747	380×30	120	12	400	10	4.50	620	330×25	105	8	400	10	

* تمامی ابعاد بر حسب میلی‌متر هستند.

در این حالت، دو نمونه متفاوت تحت ۱۰۰ درصد برش طراحی شده است. نتایج طراحی نمونه‌های مورد مطالعه در حالت سوم در جدول ۲ نشان داده شده‌اند. در نامگذاری نمونه‌ها، نسبت $(\tau_{cr} / \sigma_{ty})$ در داخل پرانتز ارائه شده است. در نمونه‌ی 3-SPSWS100(1) نسبت تنش‌ها برابر با ۱ و در نمونه‌ی 3-SPSWS100(0.577) برابر با ۰/۵۷۷ می‌باشد. با توجه به جدول ۲ مشاهده می‌شود که هر چقدر ضریب نسبت تنش کمانشی برشی (τ_{cr}) به تنش حد تسلیم در میدان پس‌کمانش ورق فولادی (σ_{ty}) افزایش یابد، ضخامت ورق فولادی، ابعاد سخت‌کننده‌ها و ابعاد مقاطع تیر و ستون کاهش می‌یابند.



شکل ۳: حالات مختلف طراحی نمونه‌ها

۵- نمودارهای اندرکنش ورق و قاب

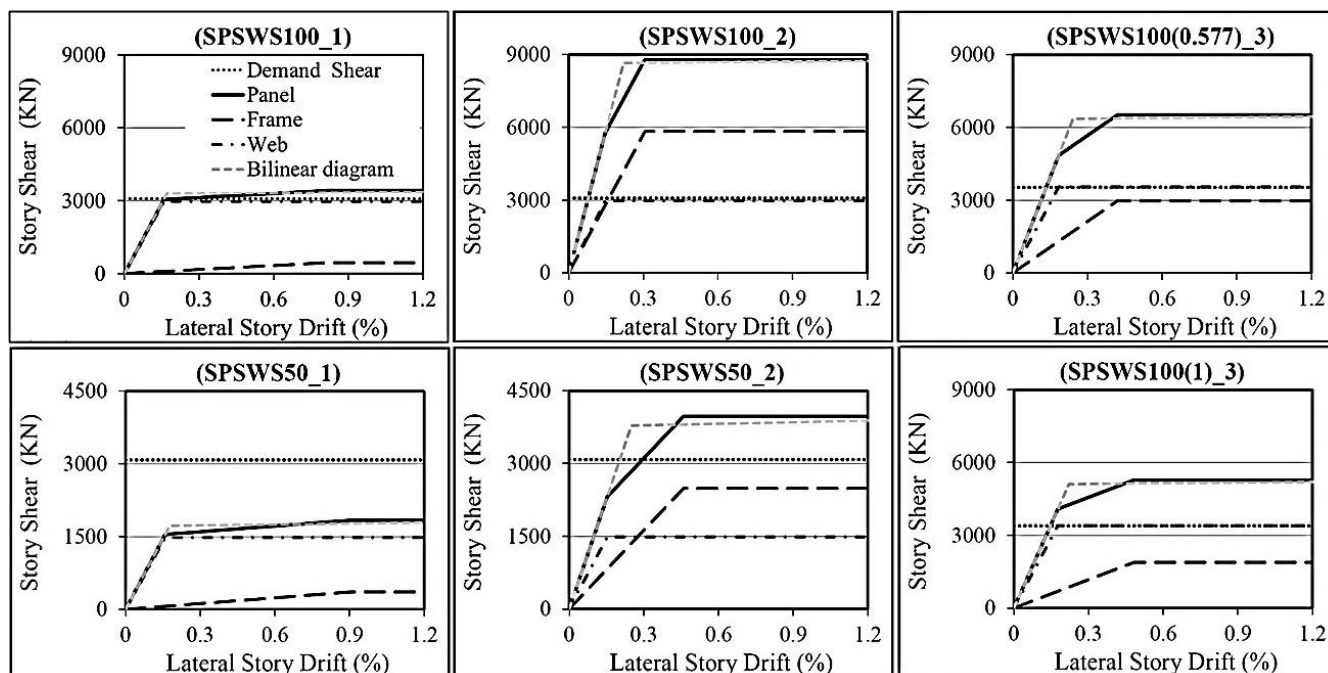
به منظور ارزیابی پارامترهای طراحی نمونه‌ها، نمودارهای نیرو-تغییر مکان طبقات مختلف با استفاده از روابط اندرکنش ورق و قاب ترسیم شده‌اند. به دلیل اختصار و به عنوان نمونه، نمودارهای طبقات اول برای حالات طراحی اول، دوم و سوم در شکل ۵ نشان داده شده‌اند. در این نمودارها، با استفاده از ضوابط FEMA356 [۲۱]، نمودار دوخطی معادل با مساوی قرارداد سطح زیر نمودار اندرکنش ورق و قاب با سطح زیر نمودار منحنی دوخطی و با فرض سختی اولیه یکسان در دو منحنی تا دریافت ۱/۲ درصد ترسیم شده است. تغییر مکان حد نهایی مطابق ویرایش چهارم آیین‌نامه ۲۸۰۰ ایران برابر با تغییر مکان غیرارتجاعی حداکثر طبقات $(0.02h)$ در نظر گرفته شده است. این نمودار دوخطی برای محاسبه پارامترهای لرزه‌ای سیستم مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین در نمودارهای ارائه شده، برش طراحی طبقه نیز بصورت نقطه‌چین مشخص شده است.

۶- مقاومت برشی در حالات مختلف طراحی

همان‌طور که در نمودارهای شکل ۴ نشان داده شده است، در دو حالت اول و دوم طراحی، مقاومت نهایی ورق تقریباً برابر بوده و لحاظ نمودن اثر ضریب C_v تاثیر چندانی بر روی مقاومت ورق ندارد که با توجه به اینکه ابتدا ورق طراحی می‌گردد و سپس این ضریب با توجه به مشخصات ورق طراحی می‌گردد، امری طبیعی است. اما مقاومت نهایی قاب به شدت تحت تاثیر قرار می‌گیرد. بعنوان نمونه مقاومت برشی قاب طبقه اول در نمونه‌ی 2-SPSWS100 حدود ۱۳ برابر بیشتر از مقاومت برشی قاب طبقه اول در نمونه‌ی 1-SPSWS100 است. همچنین ظرفیت برشی طبقه اول در نمونه‌ی 2-SPSWS100 حدود ۲/۵ برابر بیشتر از مقاومت برشی طبقه اول در نمونه‌ی 1-SPSWS100 است. مقاومت کلی طبقه اول در نمونه‌ی 1-SPSWS100 برابر بیشتر از نمونه‌ی 1-SPSWS50 می‌باشد. همچنین مقاومت کلی طبقه اول در نمونه‌ی 2-SPSWS100 برابر بیشتر از نمونه‌ی 2-SPSWS50 می‌باشد.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش نسبت تنش کمانشی برشی به تنش حد تسلیم ورق فولادی، به‌طور کلی مقاومت برشی طبقه کاهش می‌یابد. این کاهش مقاومت ناشی از کاهش توام در مقاومت قاب و ورق فولادی می‌باشد. همان‌گونه که قبلاً بیان شد، با افزایش نسبت تنش کمانشی برشی به تنش حد تسلیم ورق فولادی، ضریب کاهش C_v افزایش یافته و منجر به کاهش ابعاد مقاطع تیر و ستون می‌شود. بنابراین، مقاومت قاب کاهش می‌یابد. لازم به ذکر است که با کاهش بعد ستون، عرض ورق فولادی افزایش یافته و به این

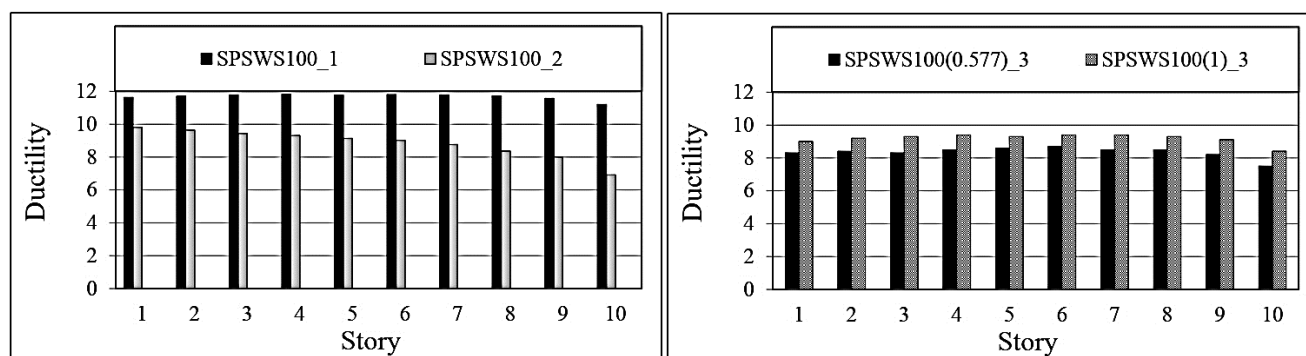
ترتیب ضخامت ورق فولادی کاهش می‌یابد و منجر به کاهش ناچیز در مقاومت ورق می‌شود. همچنین، بدیهی است که با کاهش ابعاد قاب فولادی، تغییرمکان تسلیم آن افزایش یابد.



شکل ۴: نمودارهای نیرو-تغییرمکان طبقه اول در نمونه‌های مختلف طراحی

۷- شکل پذیری و جذب انرژی

طبق تعریف ATC 40، شکل پذیری عبارت است از توانایی یک المان و یا یک سیستم سازه‌ای در تحمل نمودن تغییرشکل‌های بزرگ و دوره‌ای فراتر از حد الاستیک، به طوری که سیستم ضمن حفظ مقاومت خود، افت قابل توجه و یا شکست ناگهانی نداشته باشد [۲۲]. در ارزیابی شکل‌پذیری نمونه‌های مورد مطالعه، تغییرمکان حد نهایی مطابق ویرایش چهارم آیین‌نامه ۲۸۰۰ ایران برابر با تغییرمکان غیرارتجاعی حداکثر طبقات (۰/۰۲h) و تغییرمکان تسلیم با استفاده از معادل‌سازی نمودار سه‌خطی PFI به نمودار دوخطی با توجه به ضوابط ATC 24 محاسبه شده است [۲۳]. در شکل ۵ شکل‌پذیری طبقات در حالت‌های مختلف طراحی با یکدیگر مقایسه شده‌اند.



شکل ۵: شکل‌پذیری طبقات در نمونه‌های مختلف طراحی

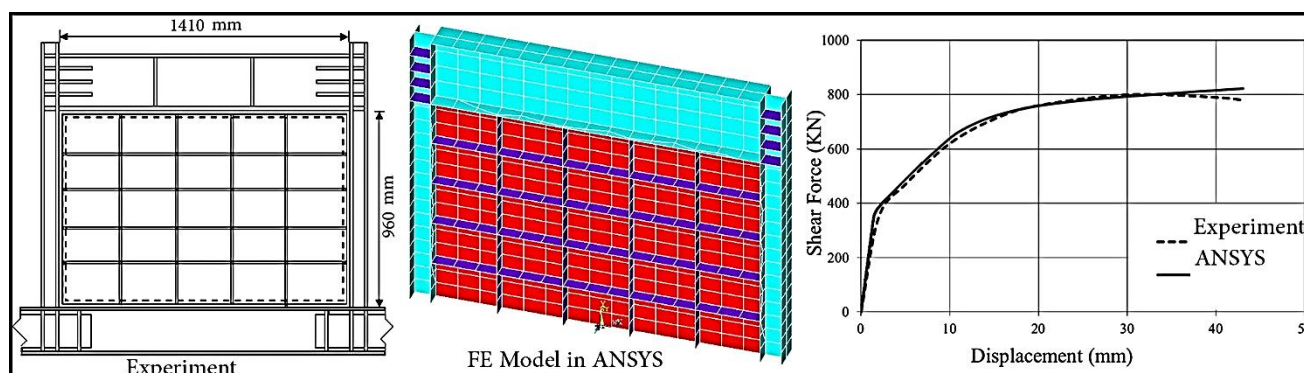
همان گونه که در شکل ۵ مشاهده می شود، در حالت اول طراحی و با اعمال ضریب کاهش C_v ، از میزان نیروهای وارد بر قاب پیرامونی کاسته شده و سیستم شکل پذیری به مراتب بالاتری را از خود نشان می دهد. به گونه ای که شکل پذیری در طبقات نمونه SPSWS100_1 به طور متوسط حدود ۳۵ درصد بیشتر از شکل پذیری طبقات در نمونه SPSWS100_2 است. با افزایش نسبت تنش کمناشی برشی به تنش حد تسلیم ورق فولادی در حالت سوم طراحی، شکل پذیری طبقات افزایش می یابد.

جذب انرژی یک سیستم بصورت سطح زیر نمودار نیرو-تغییر مکان تعریف می گردد. سطح زیر نمودار سه خطی اندرکنش ورق و قاب تا تغییر مکان غیرارتجاعی حداکثر طبقات (۰/۰۲h) برای مقایسه جذب انرژی سیستمها در نظر گرفته شده است. در نظر گرفتن ضریب C_v در طراحی، در نهایت منجر به کاهش ابعاد قاب پیرامونی شده و در نتیجه جذب انرژی سیستم را کاهش می دهد. به گونه ای که میزان جذب انرژی طبقات به طور متوسط ۲/۲ برابر کاهش می یابد. همچنین با افزایش نسبت تنش کمناشی برشی به تنش حد تسلیم ورق فولادی، جذب انرژی سیستم در طبقات نمونه های مختلف کاهش می یابد.

۸ - مدلسازی المان محدودی نمونه ها

۸-۱ - صحت سنجی نرم افزار

برای صحت سنجی نتایج مدلسازی، از نمونه ای آزمایشگاهی صوری و سجدی استفاده شده است [۲۴ و ۲۵]. این نمونه به صورت یک طبقه و یک دهانه و دارای دیوار برشی فولادی با سخت کننده است. آرایش سخت کننده های افقی و قائم به صورت یک طرفه به عرض ۶۰ میلی متر و ضخامت ۴ میلی متر می باشند. ابعاد سخت کننده ها به گونه ای طراحی شده اند که از کمناش کلی نمونه جلوگیری شود. بارگذاری جانبی بصورت یک نیروی متمرکز به بالاترین نقطه ای مدل اعمال گردیده است. همان طور که در نمودار شکل ۶ مشاهده می شود، منحنی های به دست آمده از نتایج آزمایشگاهی و مدلسازی دارای انطباق قابل قبولی هستند.

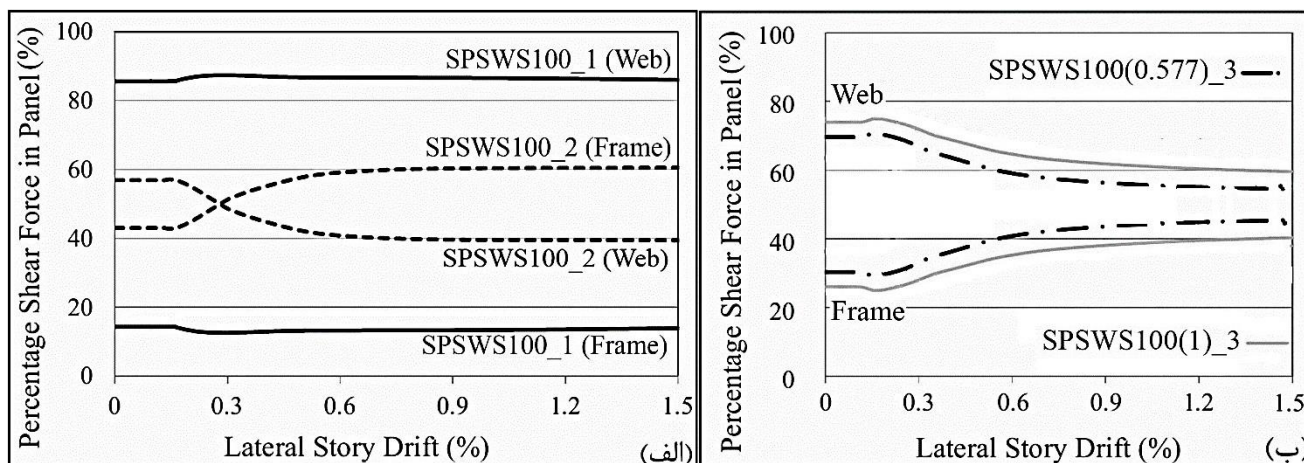


شکل ۶: مقایسه مدل آزمایشگاهی دیوار فولادی با سخت کننده با مدل المان محدود در نرم افزار ANSYS

۸-۲ - میزان مشارکت ورق فولادی و قاب پیرامونی در برش طبقه

در این بخش نتایج تحلیل تعدادی از نمونه های مورد مطالعه آورده شده است. در این تحقیق، سعی گردیده است طبقه اول نمونه ها مورد بررسی قرار گیرند. از طرفی با توجه به تاثیرات میدان کششی ایجاد شده در ورق فولادی طبقه دوم بر روی طبقه اول، دو طبقه اول و دوم نمونه ها مدلسازی و تحلیل شده اند.

برای تعیین میزان برش انتقالی توسط ورق فولادی و قاب پیرامونی، میزان نیروهای انتقالی توسط ورق دارای سخت کننده در محل اتصال گره های ورق فولادی به پی در دریفت های مختلف تعیین گردیده و باقیمانده برش توسط قاب پیرامونی (ستون ها) تحمل می شود. در شکل ۷ میزان مشارکت ورق فولادی و قاب پیرامونی در تحمل برش طبقه اول نمونه ها در دریفت های مختلف نشان داده شده است.



شکل ۷: میزان مشارکت ورق فولادی و قاب پیرامونی در طبقات اول نمونه‌های ۱۰۰ درصدی، الف) حالت اول و دوم، ب) حالت سوم

همان‌گونه که در شکل ۷ الف مشاهده می‌شود، میزان مشارکت ورق و قاب در نمونه SPSWS100_1 در ابتدای بارگذاری به ترتیب برابر با ۸۵/۶ و ۱۴/۴ درصد است. در دریافت ۱/۵ درصد که کل پانل پلاستیک شده است، میزان مشارکت ورق و قاب به ترتیب به ۸۶ و ۱۴ درصد می‌رسد. اما در نمونه SPSWS100_2 میزان مشارکت ورق و قاب در ابتدای بارگذاری به ترتیب برابر با ۵۶/۹ و ۴۳/۱ درصد است و در دریافت ۱/۵ درصد که کل پانل پلاستیک شده است، میزان مشارکت ورق و قاب به ترتیب به ۳۹/۴ و ۶۰/۶ درصد می‌رسد. عبارتی، با افزایش دریافت سازه سهم ورق در تحمل برش به تدریج کاسته می‌شود. در حالیکه سهم قاب به تدریج افزوده می‌گردد. همچنین در شکل ۷ ب ملاحظه می‌گردد که با افزایش ضریب C_v و نسبت تنش‌ها از ۰/۵۷۷ تا ۱ و کاهش فاصله بین سخت‌کننده‌ها، میزان مشارکت ورق فولادی با سخت‌کننده افزایش می‌یابد.

۹- نتیجه گیری

آیین‌نامه‌های طراحی دیوارهای برشی با سخت‌کننده عموماً فاصله بین سخت‌کننده‌ها را بسیار کم و غیر اجرایی در نظر می‌گیرند. همچنین مقدار نیروی انتقالی از ورق فولادی به قاب پیرامونی را به میزان زیادی کاهش می‌دهند که منجر به کاهش قابل توجه در سازه‌ها و تیرها می‌گردد. به طوریکه، اضافه کردن سخت‌کننده‌ها باعث کاهش سازه قاب پیرامونی در مقایسه با دیوار بدون سخت‌کننده می‌شود. از طرفی طراحی دیوار برای کل برش طبقه عموماً منجر به طراحی دست بالا و غیر اقتصادی سیستم می‌گردد و طراحی دیوار و قاب برای درصد برش انتقالی بهینه از معضلات طراحی این سیستم می‌باشد. بنابراین، سناریوهای مختلفی با هدف آشکار ساختن رفتار سازه تحت هر یک از شرایط فوق تعریف گردید و با استفاده از روابط اندرکنش دیوار و قاب (PFI) و تحلیل‌های استاتیکی غیرخطی، رفتار سازه بررسی گردید.

با مقایسه‌ی نتایج نمونه‌های دیوار فولادی، مشخص گردید که با افزایش ضریب C_v ، میزان مشارکت ورق فولادی با سخت‌کننده در تحمل بارهای وارده افزایش یافته و متناسب با آن، از میزان مشارکت قاب فولادی کاسته می‌شود. همچنین در نمونه‌های حالت سوم، با افزایش نسبت تنش کمانشی برشی به تنش حد تسلیم ورق فولادی، از ظرفیت برشی و سختی ورق فولادی کاسته می‌شود. به عبارت دیگر با کاهش فاصله بین سخت‌کننده‌ها، میزان مشارکت ورق فولادی با سخت‌کننده در تحمل نیروی برشی افزایش و مشارکت قاب پیرامونی کاهش می‌یابد.

۱۰- تشکر و قدردانی

از واحد شهر قدس دانشگاه آزاد اسلامی بعنوان حامی مالی این تحقیق تشکر و قدردانی می‌گردد.

۱۱- مراجع

- [1] Takahashi, Y., Takemoto, Y., Takeda, T., & Takagi, M. (1973). Experimental study on thin steel shear walls and particular bracings under alternative horizontal load. In *Preliminary Report, IABSE, Symp. On Resistance and Ultimate Deformability of Structures Acted on by Well-defined Repeated Loads, Lisbon, Portugal*. 185-191.
- [2] Nakashima, M., Iwai, S., Iwata, M., Takeuchi, T., Konomi, S., Akazawa, T., & Saburi, K. (1994). Energy dissipation behaviour of shear panels made of low yield steel. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 23(12), 1299-1313.
- [3] Alinia, M. M., & Dastfan, M. (2007). Cyclic behaviour, deformability and rigidity of stiffened steel shear panels. *Journal of Constructional Steel Research*, 63(4), 554-563.
- [4] Astaneh-Asl, A. (2001). Seismic behavior and design of steel shear walls.. *Rep. Prepared for Structural Steel Education Council*, Univ. of California at Berkeley, Berkeley, Calif.
- [5] Astaneh-Asl, A., & Zhao, Q. (2002, April). Cyclic behavior of steel shear wall systems. In *Annual Stability Conference* (pp. 18015-3191). Seattle: Structural Stability Research Council.
- [6] Sabouri-Ghomi, S. and Asad Sajjadi, R. (2008). Experimental studies behavior coefficient and energy absorption of steel plate shear walls with and without stiffeners. *Journal of Steel and Structures Research*, The fourth year, Number 3, (in Persian).
- [7] Sabouri-Ghomi, S., & Sajjadi, S. R. A. (2012). Experimental and theoretical studies of steel shear walls with and without stiffeners. *Journal of Constructional Steel Research*, 75, 152-159.
- [8] Sabouri-Ghomi, S., & Mamazizi, S. (2015). Experimental investigation on stiffened steel plate shear walls with two rectangular openings. *Thin-Walled Structures*, 86, 56-66.
- [9] Sabouri-Ghomi, S., Mamazizi, S., & Alavi, M. (2015). An Investigation into Linear and Nonlinear Behavior of Stiffened Steel Plate Shear Panels with Two Openings. *Advances in Structural Engineering*, 18(5), 687-700.
- [10] Wang, M., Yang, W., Shi, Y., & Xu, J. (2015). Seismic behaviors of steel plate shear wall structures with construction details and materials. *Journal of Constructional Steel Research*, 107, 194-210.
- [11] Guo, H. C., Hao, J. P., & Liu, Y. H. (2015). Behavior of stiffened and unstiffened steel plate shear walls considering joint properties. *Thin-Walled Structures*, 97, 53-62.
- [12] Ebadi, P. & Pishbin, M. and Farajloomanesh, S. and Sabouri-Ghomi, S. (2015). The Effect of The Ratio of Shear Buckling Stress to Shear Yield Stress in Seismic Design System of Special Steel Plate Shear Wall with Stiffener, 6th National Conference on Steel and Structure, Olympic Hotel in Tehran-Iran, (in Persian).
- [13] Ebadi, P. and Pishbin, M. and Farajloomanesh, S. (2016). The Effect of Changes in The Distance Between Stiffeners in Seismic Design System of Steel Plate Shear Wall with Stiffener, *2nd National Conference on Structural Engineering of Iran*, Amirkabir University in Tehran-Iran, (in Persian).
- [14] Ebadi, P. and Pishbin, M. (2017). Contribution of Steel Plate and Peripheral Frame in Optimized Design of Steel Plate Shear Wall with Stiffeners, *2nd International Conference on Steel and Structure*, Olympic Hotel in Tehran-Iran, (in Persian).
- [15] AISC, ANSI/AISC 341-10, (2010). Seismic provisions for structural steel Buildings, *American Institute of steel construction Inc*, Chicago, IL.
- [16] AISC DESIGN GUIDE 20, (2010). Steel plate shear wall, *American Institute of steel Construction, Inc.*, Chicago, IL.
- [17] CAN/CSA S16-01, Limit States Design of Steel Structures.
- [18] Sabouri-Ghomi, S. (2001). *Lateral Load Resistin Systems, an Introduction to Steel Shear Walls (SSW)*. Vol. 1. Tehran: Angizeh Publishing, (in Persian).
- [19] ASCE/SEI 7-10. (2010). Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, *American Society of Civil Engineering*.
- [20] AISC, ANSI/AISC 360-10, (2010). Specification for structural steel Buildings, *American Institute of steel construction Inc*, Chicago, IL.
- [21] FEMA356 (2000). NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings, Federal Emergency Management Agency, Washington (DC).
- [22] ATC-40, (1996). Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings, *applied technology council*.
- [23] ATC-24, (1992). Guidelines for seismic testing of components of steel structures, *report-24, applied technology council*.
- [24] Asad Sajjadi, S. (2009). Investigation of the behavior of steel plate shear walls with opening. *PhD Thesis*. Tehran: Khaje-Nasir Toosi University of Technology, (in Persian).
- [25] Sabouri-Ghomi, S. and Asad Sajjadi, R. (2008). Experimental study of seismic behavior factor and energy absorption of ductile steel plate shear walls with and without opening. *J Steel Struct.* (in Persian).