

## Investigating the Effect of Construction Defects on the Performance of Steel Plate Shear Wall Under the Effect of Cyclic Loading

Mohammad Memar Eftekhari

Ph.D. student in Civil Engineering, Technical and Engineering Faculty, Kermanshah Branch, Islamic Azad University, Kermanshah, Iran.

Abbas Akbarpour Nikgalb Rashti\*

Assistant Professor of Civil Engineering Department, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

Mehrzad TahamouliRoudsari

Associate Professor of Civil Engineering Department, Kermanshah Branch, Islamic Azad University, Kermanshah, Iran.

A\_akbarpour@azad.ac.ir

### Keywords:

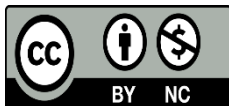
steel shear wall,  
manufacturing  
error,  
in-plane buckling,  
finite element,  
cyclic loading.

### Abstract

Steel shear wall is a new method to deal with lateral loads, which has been extensively researched, and its advantages include high energy absorption, reduction of architectural limitations, and ease of implementation compared to concrete shear wall. In this laboratory research, a sample of one opening and one floor was designed and built and subjected to cyclic loading in the laboratory. This test uses two LPs on both sides of the sample to determine displacement and a Load Cell number on the jack to show the applied force. In this test, due to the limitation in the jack's power, a ۱ mm sheet was used; for this reason, due to the welding of the sheet, there was minor buckling inside the sheet. During the test, one of the important weaknesses was the place where the fish plates are connected to each other in the corners, which in the early cycles had a weld fracture and finally a tear in this part and finally a tear in the sheet, which was done by using the ۷۰۱۸ electrodes or using Hardener can solve this problem. All the effects of the load were borne by the sheet, and there was no damage to the columns and the upper beam. Only the column was bent at the connection to the beam, and none of the welds were destroyed.

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial ۴.۰ International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

(این نشریه تحت قانون بین المللی کپی رایت Creative Commons: BY-NC می باشد).



# بررسی اثر نواقص ساخت بر روی عملکرد دیوار برشی فولادی تحت اثر بارگذاری چرخه‌ای

محمد معمار افتخاری

دانشجوی دکتری عمران سازه، گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران.

عباس اکبرپور نیک قلب رشتی\*

استادیار، گروه عمران، دانشکده فنی، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

مهرزاد تحملی رودسری

دانشیار، گروه عمران، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران.

A\_akbarpour@azad.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۲۰ اسفند ۱۴۰۲

تاریخ دریافت: ۲۹ آبان ۱۴۰۳

چکیده

دیوار برشی فولادی یک روش نوین برای مقابله با بارهای جانبی است که مورد تحقیقات فراوانی قرار گرفته است. از مزایای آن قابلیت جذب انرژی بالا، کاهش محدودیت‌های معماری و سهولت در اجرا نسبت به دیوار برشی بتنی می‌باشد. در این تحقیق آزمایشگاهی، نمونه یک دهنه و یک طبقه طراحی و ساخته شده و در آزمایشگاه تحت بارگذاری چرخه‌ای قرار گرفته است. در این تست از دو داده بردار در دو طرف نمونه برای مشخص نمودن جابه جایی و یک عدد بارسنج روی جک برای نشان دادن نیروی وارده استفاده شده است. در این تست بدلیل محدودیت در توان جک از ورق ۱ میلی‌متر استفاده شده است و به همین دلیل بر اثر جوشکاری ورق دچار کماتش‌های جزئی داخل صفحه شده بود. در هنگام تست یکی از ضعف‌های مهم محل اتصال فیش پلیت‌ها به هم در گوشه‌ها بود که در سیکل‌های اولیه دچار شکستگی جوش و در نهایت نیز پارگی در این‌بخش و نهایتاً پارگی ورق شده است. با استفاده از الکتروود ۷۰۱۸ و یا استفاده از سخت کننده می‌توان این مشکل را رفع نمود. تمامی اثرات اعمال بار توسط ورق تحمل شده و به ستون‌ها و تیر بالایی خسارتی وارد نشده و تنها ستون در محل اتصال به تیر دچار کماتش شده و هیچکدام از جوش‌ها نیز تخریب نشدند.

کلید واژگان: دیوار برشی فولادی، خطای ساخت، کماتش داخل صفحه، المان محدود، بارگذاری چرخه‌ای

## ۱- مقدمه

یکی از نیروهای مهم که بصورت جانبی به سازه وارد شده و آثار مخربی را بر جای گذاشته است، نیروی زلزله می‌باشد. برای مقابله با این نیرو در سازه‌های فولادی از قاب خمشی و مهاربند بصورت متداول استفاده می‌شود. یکی دیگر از روش‌های ایجاد مقاومت جانبی استفاده از دیوار برشی فولادی است که به اندازه دو راه حل ذکر شده متداول نبوده و در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است. ضمن اینکه یکی از کاربردهای دیگر دیوار برشی فولادی استفاده برای مقاوم‌سازی و بهسازی لرزه‌ای سازه‌های موجود است. این سیستم دارای سختی مناسب برای کنترل تغییر شکل سازه و همچنین دارای شکل‌پذیری و جذب انرژی بالایی می‌باشد. همچنین از نظر اجرایی بسیار ساده و دارای پیچیدگی خاصی در ساخت و نصب قطعات نبوده، سرعت اجرای سیستم بالا و هزینه کمی دارد.

در برخی موارد، نیازهای معماری و زیباسازی را می‌توان یکی از عوامل ایجاد بازشو در دیوارهای برشی فولادی به حساب آورد. ایجاد بازشو در دیوار برشی فولادی، براساس تحقیقات صورت گرفته، باعث ایجاد اثر کاهش در تمامی مشخصات لرزه‌ای آن می‌گردد و با توجه به موقعیت قرارگیری بازشو و همچنین شکل و اندازه آن در قاب، میزان این اثر کاهش متفاوت خواهد بود.

از سال ۱۹۷۰ میلادی دیوار برشی فلزی به عنوان اولین گزینه در میان سیستم‌های پایداری در برابر بارهای جانبی در چندین ساختمان مهم و مدرن مورد استفاده قرار گرفته است. در طول دهه ۷۰ میلادی دیوارهای برشی فلزی در ژاپن در ساختمان‌های جدید و در آمریکا برای بهبود لرزه‌ای ساختمان‌های موجود استفاده شده‌اند [۱].

ایده اولیه دیوارهای برشی فولادی از صنایع کشتی‌سازی گرفته شده است. و شاید برای استفاده از سیستم ورق‌های فولادی تلاش‌های زیادی در سال‌های دور انجام شده ولی مطرح شدن جدی دیوار برشی فولادی به عنوان سیستم باربر جانبی در دو یا سه دهه اخیر می‌باشد که پیشرفت نسبتاً سریعی داشته است. خصوصاً زمانی که ایده مقاومت پس از کماتش دیوارهای برشی فولادی بر اثر به وجود آمدن میدان‌های کششی در سال ۱۹۸۳ توسط توربرن مطرح و در همان سال توسط تیملر و کولاک تأیید شد. تحقیقات وسیعی بر روی دیوارهای برشی سخت نشده و پارامترهایی نظیر مقاومت، شکل‌پذیری و رفتار هیستریتیک آن‌ها انجام گرفته است. مفهومی که استفاده از این سیستم را بیشتر مورد توجه قرار داد، تئوری میدان کششی قطری است و بیان می‌نماید که: «وقتی یک پانل فولادی تحت اثر نیرو قرار می‌گیرد، تنش‌های برشی بعد از کماتش، ورق چروکیده شده و خالص در آن ظاهر می‌شود، تا زمانی که ورق کماتش نماید.» [۲].

ورق فولادی در جهت تنش فشاری افزایش تنش تحمل نمی‌کند ولی در جهت دیگر که تحت اثر تنش کششی قرار دارد، می‌تواند تا جاری شدن فولاد تحمل کشش نماید (پس کماتش). البته برای جلوگیری از کماتش می‌توان از سخت‌کننده استفاده نمود. سخت‌کننده‌ها می‌توانند یک‌طرفه یا دوطرفه مورد استفاده قرار گیرند. در دهه ۷۰ و ۸۰ میلادی در آمریکا و کانادا دیوارهای برشی بدون سخت‌کننده، در برخی از ساختمان‌ها دیوارهای برشی فولادی پوشیده شده از یک لایه بتن، مطابق آنچه که در دیوارهای برشی مرکب می‌باشد، استفاده شده است. پس از موفقیت‌آمیز بودن بکارگیری دیوار برشی فولادی در کشورهای گوناگون، مطالعات ویژه‌ای بر روی این سیستم سازه‌ای جدید آغاز شد. گروه‌های مختلفی در کشورهای پیشرفته و دانشگاه‌های معتبر جهان مطالعات نظری آزمایشگاهی را همزمان پیش بردند. مطالعات نظری بیشتر برای یافتن روش‌های طراحی دقیق‌تر دیوار برشی فولادی پیش بینی رفتار بهتر آن با تحقیقات آزمایشگاهی همراه بوده است. در مطالعات آزمایشگاهی گاهی بار به صورت یکنواخت بر روی نمونه قرار گرفته و گاهی هم بار چرخه‌ای برای شبیه‌سازی بار لرزه‌ای موردنظر بوده است. توربرن و کولاک و همکاران (۱۹۸۳) ایشان برای آنالیز دیوار برشی فولادی تقویت نشده مدل نواری را ارائه نمودند. این مدل که براساس تئوری میدان کششی قطری خالص استوار است، از مقاومت ورق فولادی قبل از کماتش صرفنظر کرده و عامل اصلی در تحمل بار برشی طبقه را میدان کششی قطری می‌داند [۳]. تیملر و کولاک (۱۹۸۳) برای بررسی دقت روش ارائه شده توسط توربرن و همکاران دو نمونه که در آنها تیرها به صورت قائم و ستون‌ها به صورت افقی قرار داشتند آزمایش کردند. ابعاد نمونه‌ها مشابه مقادیر معمول در ساختمان‌ها انتخاب شدند و به این نتیجه رسیدند که سختی پیچشی ستون‌ها بر روی زاویه تأثیر گذار است [۲]. ترومپوش و کولاک (۱۹۸۷) نمونه‌های مشابه را تحت بارگذاری چرخه‌ای آزمایش کردند و نشان دادند که دیوار برشی از مقاومت بسیار خوبی برخوردار بوده، شکل‌پذیری بالایی دارد و همچنین دقت بالای رابطه ارائه شده توسط توربرن و همکاران تأیید شد [۴]. روبرتز و صبوری قمی (۱۹۹۲) شانزده نمونه دیوار برشی را مورد آزمایش قرار دادند و دریافتند که نمونه‌ها با شکل‌پذیری مناسب، چهار دوره بارگذاری را تحمل کردند. حلقه‌های هیستریزس ضریب شکل‌پذیری ۷ را برای همه نمونه‌ها نشان می‌داد. بدون اینکه کوچکترین کاهش در مقاومت آنها به وجود آمده باشد [۵]. آستانه اصل (۲۰۰۰) تحقیقات متعددی را بر روی دیوار برشی فولادی انجام داد. سختی و شکل‌پذیری تحت بارهای چرخه‌ای مهم‌ترین پارامترهای مورد مطالعه بودند، همچنین اتصال میان طبقه‌ای نیز در این تحقیق مورد توجه قرار گرفت [۶]. در تحقیقی دیگر یک دیوار

برشی فولادی چهار طبقه تحت بارگذاری چرخه‌ی توسط بهیمنی فرد (۲۰۰۳) آزمایش شد. با کماتش موضعی بال ستون در قسمت تحتانی آن، گسیختگی اتفاق افتاد. در این آزمایش بیشترین خرابی‌ها مربوط به طبقه اول بود. در حالی که در طبقه سوم با وجود تغییر شکل‌های پلاستیک خرابی‌های قابل توجهی مشاهده نشد. به همین دلیل در آزمایش مجدد طبقه اول حذف شد و آزمایش با نمونه سه طبقه تکرار شد [۷]. ویان و همکاران (۲۰۰۳) برای بررسی مقدار شکل‌پذیری دیوار برشی فولادی نمونه یک طبقه را مورد آزمایش قرار دادند. در این تحقیق مشخص گردید که حلقه‌های هیستریزس کاملاً پایدار بوده و افزایش جذب انرژی مشهود است [۸]. صبوری قمی و همکاران (۲۰۰۵) برای یافتن ضریب شکل‌پذیری دیوار برشی فولادی دو نمونه دیوار برشی با مقیاس یک سوم اندازه واقعی تحت بارگذاری چرخه‌ای طراحی و آزمایش شد [۹]. در تحقیق علوی و ناطقی (۲۰۱۳)، یک ترکیب خاص از عناصر سخت‌کننده مورب با یک سوراخ مرکزی، بررسی شده است. رفتار لرزه‌ای سیستم جدید بصورت تجربی در مقایسه با مدل‌های بدون بازشو بررسی شده و تست تجربی است. مدل بصورت ۵۰ درصد کوچکتر ساخته شده و یک طبقه، تحت بارگذاری چرخه‌ای قرار گرفته است. یکی از نمونه‌ها بدون بازشو و دو نمونه دیگر با بازشو و سخت‌کننده است. نتایج آزمون نشان می‌دهد که نسبت شکل‌پذیری نمونه خاص سوراخ شده حدود ۱۴ درصد بیشتر از نمونه‌های بدون بازشو است [۱۰]. آنجان و همکاران (۲۰۱۴) در تحقیقی رفتار دیوارهای برشی فولادی تقویت نشده، به وسیله سوراخ‌های دایره‌ای در صفحه‌های یکپارچه آزمایش شده است. یک مدل مقاومت برشی از صفحه‌ی یکپارچه به وسیله چند بازشو دایره‌ای شکل به وسیله مدل نواری پیشنهاد شده است [۱۱]. صبوری قمی و مامازیزی (۲۰۱۵) در تحقیقی تاثیر دو نوع بازشو بر رفتار سازه‌ای دیواربرشی فولادی تقویت شده بصورت آزمایشگاهی را بررسی نموده و دریافته‌اند که مقاومت برشی نهایی و جذب انرژی برای هر سه نمونه، مشابه بوده و فاصله بین بازشو تأثیری بر این پارامترها ندارد. علاوه بر این وجود بازشو باعث کاهش در مقادیر پارامترهای سازه‌ای می‌شود [۱۲]. شکسته بند و شوکتی (۲۰۱۷) در تحقیق آزمایشی و عددی در زمینه دیوارهای برشی فولادی با ورق‌های فقط متصل به تیر را معرفی نمودند. این سیستم راه نایبه‌ای برای نوع سنتی دیوارهای برشی فولادی از طریق جداسازی سیستم مقاوم به بار جانبی از ستون‌های اولیه فراهم می‌سازد [۱۳]. قلهکی و همکاران (۲۰۲۰) در پژوهشی ۱۲ قاب فولادی با ۷، ۱۵ و ۳۰ طبقه و همچنین ۵ و ۷ دهانه مجهز به دیوار برشی صفحه فولادی به عنوان سیستم مقاوم در برابر بار جانبی به صورت عددی مدل‌سازی و طیف ظرفیت جابجایی بر اساس استخراج شد. نتایج نشان داد که طیف

ظرفیت جابجایی به دست آمده با استفاده از روش‌های انرژی، سازگاری خوبی با یکدیگر دارند [۱۴]. دوو و همکاران (۲۰۲۲) برای بررسی روش تعمیر دیوار برشی ورق فولادی آسیب دیده در اسکلت فولادی، یک نمونه مقیاس شده طراحی و تحت بارگذاری شبه استاتیکی دو فازی قرار دادند. صفحات فولادی پر شده آسیب دیده با صفحات فولادی جدید بین دو فاز بارگیری جایگزین شدند. نتایج آزمایش نشان داد که پس از تعویض صفحات پر شده آسیب دیده، سختی نمونه افزایش یافته است. نتایج، عملکرد لرزه‌ای نمونه تعمیر شده را مطلوب ارزیابی می‌نمایند [۱۵]. اسحاقی اسکویی و همکاران (۲۰۲۳) برای بررسی عملکرد چرخه‌ای سیستم مجهز به سخت‌کننده‌های هدایت‌شونده، یک نمونه مقیاس شده از دیوار برشی ساخته شد و تحت بارگذاری چرخه‌ای قرار گرفت. مدل المان محدود دیوار با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی مربوطه شبیه‌سازی و اعتبارسنجی شد. سپس مقایسه‌ای بین دیوار برشی پیشنهادی و دیوار برشی ورق فولادی سخت نشده مربوطه انجام شد. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که سخت‌کننده‌ها، هدایت‌کننده میدان کشش مورب، می‌توانند ظرفیت نیروی جانبی، شکل‌پذیری جذب انرژی و سختی سیستم را به طور همزمان افزایش دهند [۱۶]. تحقیقات انجام شده در خصوص روش‌های طراحی و سیستم عملکرد دیوار برشی به بحث و بررسی پرداخته‌اند. اما در این منابع مشکلات حین ساخت و آزمایش نمونه‌ها اشاره نشده است که این تحقیق به مشکلات و ارائه راهکار با استفاده از نتایج آزمایشگاهی برای ساخت و اجرای دیوار برشی فولادی پرداخته است.

## ۲- مشخصات دیوار برشی فولادی

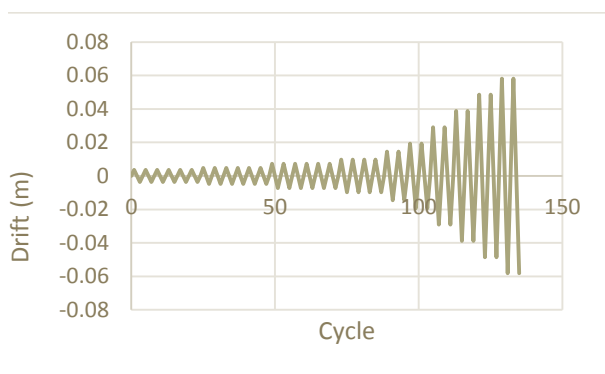
در این تحقیق ابتدا یک دیوار برشی فولادی یک طبقه و یک دهانه براساس راهنمای شماره ۲۰ آئین نامه AISC طراحی شده است [۱۷]. در این مدل از سخت‌کننده در محل اتصال تیر به ستون به منظور جلوگیری از لهیدگی بال ستون‌ها در اثر اعمال بار استفاده شده است. برای جلوگیری از کماتش موضعی بال‌های تیر اصلی از دو سخت‌کننده استفاده شده است. تیرها و ستون‌ها بصورت تیر ورق ساخته شده و ضخامت ورق مورد استفاده در تیر و در جان ستون و همچنین سخت‌کننده‌ها ۲۰ میلی‌متر می‌باشد. برای بال تیرها نیز از ورق ۱۵ میلی‌متر و برای اتصال ورق فولادی به قاب از نبشی L۶۰×۶۰×۶ استفاده شده است. ورق فولادی به ضخامت ۱ میلی‌متر مورد استفاده قرار گرفته است. در زیر نمونه برای اتصال قاب و ورق به شاسی موجود در آزمایشگاه از یک ورق ۳۰ میلی‌متر استفاده شده که بر روی آن چهار ردیف سوراخ تعبیه شده و توسط پیچ پرمقاومت ۹.۱۰ به شاسی موجود





شکل ۳- دیوار برشی فولادی پس از جوشکاری نهایی

فولاد مصرفی از نوع  $St37$  که  $F_y=2400$  و  $F_u=3700$   $kg/cm^2$  بوده است. همچنین برای اعمال بار بر روی نمونه از بارگذاری چرخه‌ای و براساس پروتکل بارگذاری ASCE [۱۸] و بر مبنای ارتفاع مرکز تیر بالایی تا صفحه متصل به دیوار برشی بصورت شکل ۴ ارائه شده که در دستگاه نمایشگر داده‌ها بصورت سیکل‌هایی از جابجایی به نمونه اعمال شده است و همانطور که در تصویر نیز مشخص می‌باشد تا ۶ درصد ارتفاع، این جابه‌جایی ادامه یافته است.

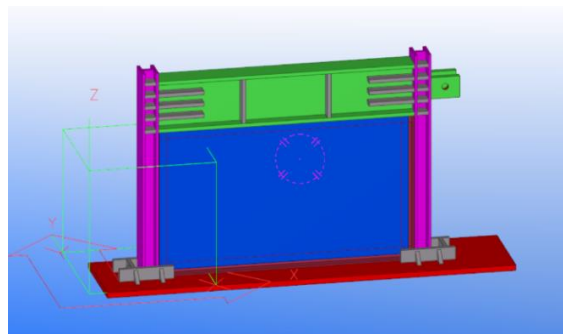


شکل ۴- بارگذاری چرخه‌ای با توجه به پروتکل ASCE 7

### ۳- مدل اجزا محدود

برای بررسی اولیه در خصوص دو موضوع، باری که دیوار برشی فولادی می‌تواند تحمل کند و تطبیق با توان چک آزمایشگاهی و همچنین بررسی وضعیت ورق متصل به نمونه و شاسی ثابت در آزمایشگاه از نرم‌افزار المان محدود آباکوس استفاده شده است. در شکل ۵ نمونه در نرم‌افزار آباکوس و خروجی آن در شکل ۶ نمایش داده شده است. همچنین میزان باربری نمونه نیز در شکل ۷ ارائه شده است.

در آزمایشگاه متصل شده است. برای اتصال نمونه به چک آزمایشگاهی از دو ورق فولادی با ضخامت ۳۰ میلیمتر که با جوش نفوذی به بال ستون متصل شده استفاده شده و این اتصال توسط پیچ پرمقاومت ویژه با تحمل ۱۵۰ تن بار انجام گرفته است. نمونه نهایی در شکل ۱ نمایش داده شده است.

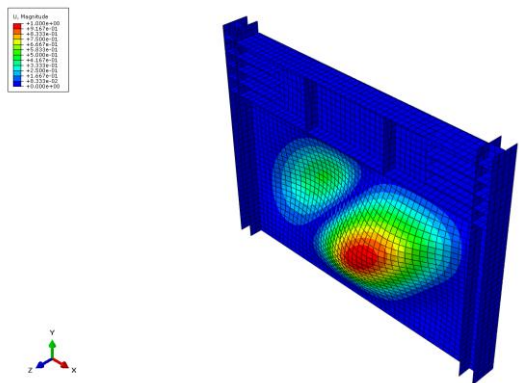


شکل ۱- مدل اولیه دیوار برش فولادی

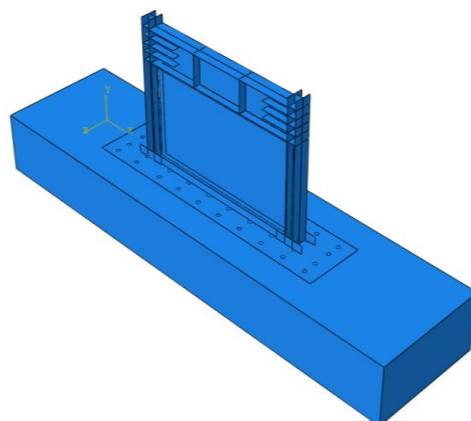
مونتاز اولیه مدل در شکل ۲ نشان داده شده و سپس با توجه به جوشکاری مدنظر در تیر ورق‌ها از جوش گوشه و در جاهای مورد نیاز از جوش نفوذی استفاده شده که در شکل ۳ نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۳ نیز مشخص می‌باشد بعلت نازک بودن ورق در هنگام جوشکاری صفحه دچار کماتش شده است که یکی از مشکلات و ایرادات ساخت در دیوار برشی می‌باشد.



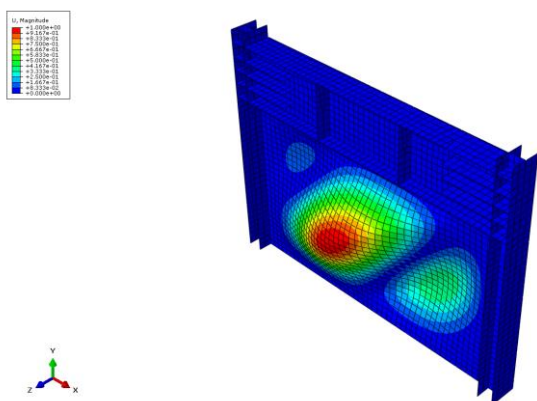
شکل ۲- نمونه‌های مونتازی اولیه



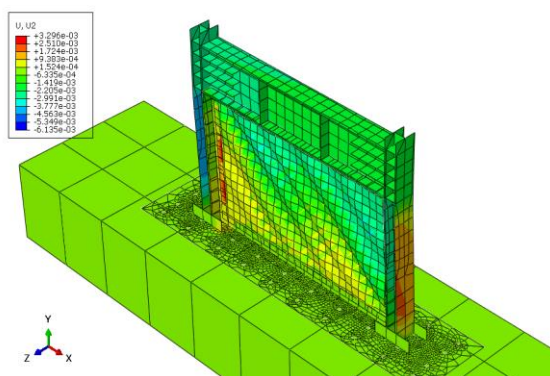
شکل ۸ - مود اول کمناش



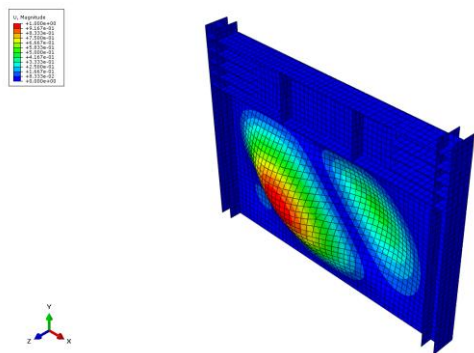
شکل ۵ - مدل المان محدود دیوار برشی فولادی در نرم افزار آباکوس



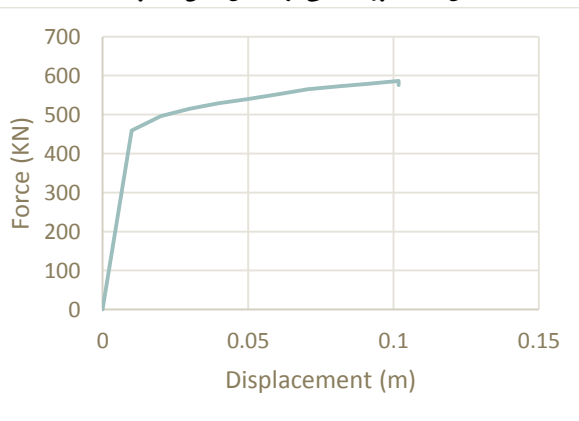
شکل ۹ - مود دوم کمناش



شکل ۶ - کانتور جابجائی برای مدل المان محدود



شکل ۱۰ - مود سوم کمناش



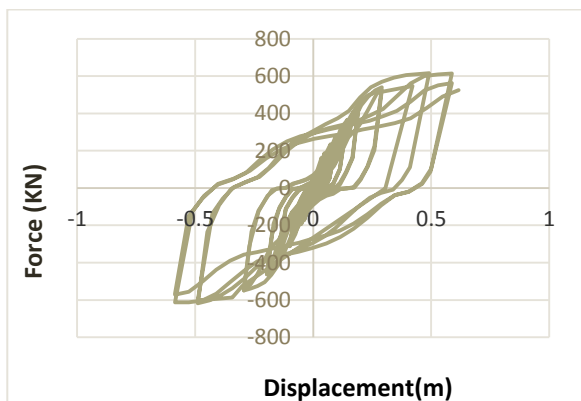
شکل ۷ - منحنی ظرفیت دیوار برشی فولادی

همانطور که در تصاویر مودهای کمناشی مشخص می‌باشد تغییرات ایجاد شده روی ورق هم راستا با نیروی کشش قطری می‌باشد که انتظار می‌رود در تست آزمایشگاهی آن را مشاهده نمود.

#### ۴- مشخصات ابزار آزمایشگاهی

برای این تست از یک جک با قدرت اسمی ۱۵۰ تن استفاده شده که یک بارستنج بالای جک در نظر گرفته شده است. نمونه با ۳۶ پیچ پرمقاومت ۱۰.۹ به شاسی زیر متصل شده که قطر پیچها ۲۸ میلیمتر است. نمونه به جک با یک پیچ پرمقاومت ویژه با توان تحمل ۱۵۰ تن با قطر ۳۶ میلیمتر متصل گردید. برای تعیین جابه‌جایی در بالای تیر و

علاوه بر بررسی نحوه قرارگیری مدل بر روی شاسی در آزمایشگاه به کمک مدل المان محدود، مودهای کمناشی نیز برای این مدل در نظر گرفته شد که شکل ۸ تا ۱۰ سه مود اول کمناش را نمایش می‌دهند.

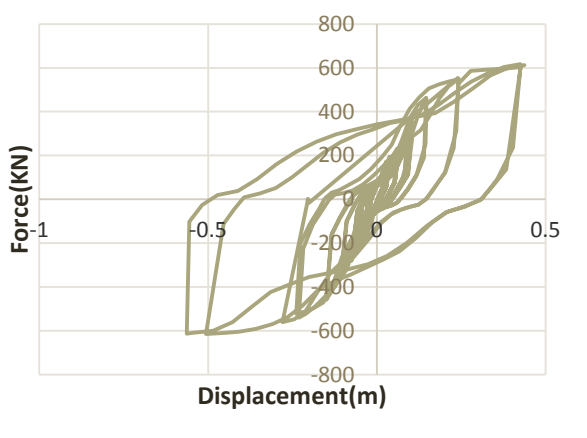


شکل ۱۳- چرخه هیستریزس مرتبط با داده بردار شماره ۱

در سمت چک و در انتهای تیر از دو داده بردار استفاده شده است. در این تست از دو کرنش سنج با مقاومت ۱۲۰ اهم استفاده شده است (شکل ۱۱). ضمناً همانند شکل ۱۲ از چهار خرابی فلزی برای جلوگیری از حرکت آزاد خارج از صفحه استفاده شده است.



شکل ۱۱- وصل ابتدایی نمونه به شاسی زیر و چک



شکل ۱۴ - چرخه هیستریزس برای داده بردار شماره ۲



شکل ۱۲- نحوه قرارگیری ابزارهای اندازه گیری بر روی نمونه و همچنین مهار جانبی

## ۶- بررسی خرابی‌های ایجاد شده در دیوار برشی فولادی

اولین خرابی پس از ۴۹ دقیقه از بارگذاری و در سیکل با جابه‌جایی ۱/۴۵۵ سانتیمتر، اتفاق افتاد و ابتدا در اتصال بین دو نبشی نگهدارنده ورق که با الکتروود ۶۰۱۳ به هم جوش شده بود ترک ایجاد گردید. که در شکل ۱۵ قابل مشاهده است.



شکل ۱۵- ایجاد اولین ترک در محل اتصال نبشی‌ها

## ۵- بررسی نتایج آزمایشگاهی

پس از اتمام تست‌ها و با استفاده خروجی دستگاه نمایشگر داده‌ها، برای داده بردار شماره ۱ که در بالای تیر و متصل به چک و در محل اصلی اعمال بار قرار گرفته بود شکل ۱۳ و برای داده بردار شماره ۲ که متصل به ستون دورتر از چک بود شکل ۱۴ ارائه شده است.





شکل ۱۸- ایجاد اعوجاج بر روی ورق فلزی

در ادامه نیز خطوط کشش قطری بیشتر و فواصل آن بهم نزدیکتر شدند. در شکل‌های ۱۹ و ۲۰ دو جهت متفاوت ایجاد کشش قطری یعنی در سیکل رفت و برگشت نشان داده شده است.



شکل ۱۹- نمایی از سیکل رفت دیوار برشی



شکل ۲۰- نمایی از سیکل برگشت دیوار برشی

در ادامه سیکل‌های بارگذاری ترک‌های ایجاد شده در ورق بصورت پارگی و جداسازی از ورق تبدیل شده که در شکل ۲۱ نشان داده شده است.

ترک ایجاد شده در بین دو نبشی در ادامه تست گسترش یافته و در اتصال ورق به نبشی نیز قابل مشاهده گردید که شکل ۱۶ این ترک را نشان می‌دهد.



شکل ۱۶- گسترش ترک در ورق فولادی

ایجاد کشش قطری در ادامه تست روی ورق افزایش یافته و کاملاً قابل مشاهده گردید که این خطوط در شکل ۱۷ مشخص شده است.



شکل ۱۷ - ایجاد خطوط کشش قطری بر روی نمونه

به دلیل وجود کمانش‌های اولیه و خطای ساخت در ورق بعد از چند سیکل، سبب پروکیدیگی و نامنظمی خطوط کشش قطری گردید که در شکل ۱۸ مشخص شده است.





شکل ۲۴ - پارگی و جدشدگی کامل ورق



شکل ۲۱ - پارگی ایجاد شده در ورق



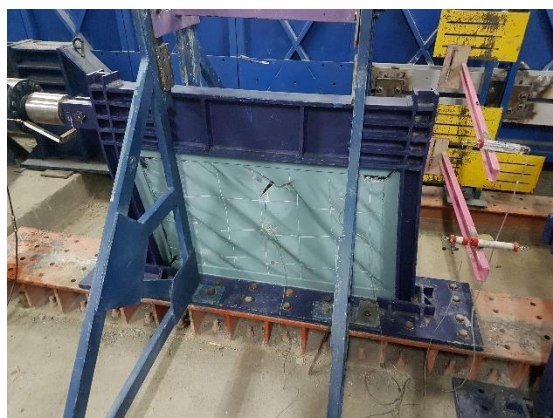
شکل ۲۵ - ایجاد کماتش در محل اتصال تیر به ستون

همانطور که در شکل ۲۲ نیز قابل مشاهده است وجود یک سوراخ کوچک در ورق که در ابتدا نیز پوشیده شده بود سبب ایجاد پارگی داخلی در سیکل‌های بالای بارگذاری شده است.



شکل ۲۲ - ایجاد پارگی داخلی بر روی ورق

در شکل ۲۳ افزایش کشش قطری روی ورق به همراه گسترش خرابی‌ها روی آن نمایش داده شده است.



شکل ۲۳ - افزایش خطوط نشانگر کشش قطری و خرابی‌های روی ورق

#### ۷. نتایج نهایی

پس از انجام تست آزمایشگاهی و بررسی تصاویر سیکل‌های مختلف بارگذاری و همچنین نمودارهای هیستریزس بدست آمده موارد زیر ارائه شده است:

- ماکزیمم نیروی ایجاد شده در هنگام بارگذاری در جابه‌جایی ۴/۲۵ سانتیمتر بوده و برابر ۶۱/۷۱ تن بوده است که نزدیک به برآورد اولیه می‌باشد و اختلاف جزئی با توجه خصوصیات فولاد St۳۷ می‌باشد که در واقعیت دارای تنش تسلیم بالاتر نسبت به تنش تسلیم اسمی است.

- پس از جابه‌جایی ۴/۲۵ نیروی شروع به افت کردن نموده و تا حدود ۲۰ درصد ادامه یافته که در شکل نمودارهای هیستریزس نیز این افت قابل مشاهده است.

- به علت وجود خطاهای ساخت اولیه و جذب بالای انرژی ورق فولادی نمودار هیستریزس در سیکل‌های اولیه جمع شده است.

- شروع خرابی در محل اتصال نبشی‌های نگهدارنده ورق بوده که می‌توان با تغییر الکتروود و استفاده از نوع قوی‌تر همانند ۷۰۱۸ و یا ایجاد تقویت در این نقطه از آن جلوگیری نمود به این دلیل که پارگی و

در شکل‌های ۲۴ و ۲۵ خرابی‌های ایجاد شده بخصوص پارگی ورق و کماتش جانبی ستون در پایان تست آزمایشگاهی و مهارهای جانبی را نمایش می‌دهند.

Engineering, Kolon Hotel, Gyeongju, Korea, December; ۲۰۰۳.

[۹] Sabouri-Ghomi S, Ventura CE, Kharrazi MH. Shear analysis and design of ductile steel plate walls. *Journal of Structural Engineering*. ۲۰۰۵; ۱۳۱(۶): ۸۷۸-۸۹.

[۱۰] Alavi E, Nateghi F. Experimental study on diagonally stiffened steel plate shear walls with central perforation. *Journal of Constructional Steel Research*. ۲۰۱۳; ۸۹: ۹-۲۰.

[۱۱] Anjan K. Bhowmick, Gilbert Y. Grondin, "Robert G. Driver. Nonlinear seismic analysis of perforated steel plate shear walls", *Journal of Constructional Steel Research* ۹۴; ۲۰۱۴, ۱۰۳-۱۱۳.

[۱۲] Saeid Sabouri-Ghomi, Salaheddin Mamazizi. "Experimental investigation on stiffened steel plate shear walls with two rectangular openings", *Thin-Walled Structures* ۸۶; ۲۰۱۱ mental and numerical study on seismic behavior of LYS and HYS steel plate shear walls connected to frame beams only", archives of civil and mechanical engineering ۱۷; ۲۰۱۷, ۱۵۴-۱۶۸.

[۱۴] Gholhaki M, Pachideh G, Javahertarash A. Capacity spectrum of SPSW using pushover and energy method without need for calculation of target point. *Structures*. ۲۰۲۰; ۲۶: ۵۱۶-۲۳.

[۱۵] Du Y, Shao Y, Cao Y. Performance of repaired steel plate shear wall with earthquake-induced damage. *Journal of Constructional Steel Research*. ۲۰۲۲; ۱۹۰: ۱۰۷۱-۴۹.

[۱۶] Es'haghioskui F, Hoseinzadeh Asl M, Hosseinzadeh Y, Gallego E. Experimental and numerical investigation of a new type of steel plate shear wall with diagonal tension field guiding stiffeners. *Journal of Building Engineering*. ۲۰۲۳; ۷۶: ۱۰۷۱۸۱.

[۱۷] Rafael Sabelli MB. (۲۰۰۷). *AISC Steel Design Guide ۲۰ - Steel Plate Shear Walls*. American Institute Of Steel Construction.

[۱۸] Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures: *ASCE/SEI ۷-۱۶*.

۵, ۵۶-۶۶.

[۱۳] Behzad Shekastehband, Aliakbar Azaraxsh, Hossein Showkati. "Experi

جداشدگی و در نهایت کاهش توان ورق فلزی عملاً به دلیل ایجاد ترک در این نقطه بوده است.

- در این تست مشخص گردید وجود هرگونه سوراخ حتی بسیار ریز و عدم توجه به آن می‌تواند سبب ایجاد پارگی داخلی در ورق گردد.

- تا انتهای تست هیچکدام از جوش‌های اتصال دهنده اعضا دچار ترک و یا آسیب نشد که این امر نشان از طراحی صحیح و همچنین جذب کامل انرژی توسط ورق شده که عملاً نیاز به تحمل بار توسط قاب وجود نداشته است.

- در نهایت تنها محل اتصال تیر به ستون دچار کماتش موضعی شده که این محل را نیز می‌توان با تقویت اصلاح نمود.

- یکی از مشکلات مهم در دیوارهای برشی فولادی بحث تمرکز موضعی سختی است که پیشنهاد برای رفع این موضوع استفاده از سخت کننده می‌باشد.

#### ۸- مراجع

[۱] Astaneh- Asl, A. seismic Behavior and Design of Composite Steel Plate Shear Walls. s. 1: *Structural Steel Educational Council, Steel TIPS Report*, May ۲۰۰۲.

[۲] Timler PA, Kulak GL. Experimental study of steel plate shear walls. ۱۹۸۳.

[۳] Thorburn LJ, Montgomery C, Kulak GL. Analysis of steel plate shear walls. ۱۹۸۳.

[۴] Tromposch, E. W and Kulak, G. I. Cyclic and Static Behavior of Thin Panel Steel Plate Shear Walls. Department of Civil Engineering, The University of Alberta. Edmonton, Alberta: *Structural Engineering Report No. ۱۴۵*, May ۱۹۸۷.

[۵] Roberts TM, Sabouri-Ghomi S. Hysteretic characteristics of unstiffened perforated steel plate shear panels. *Thin-Walled Structures*. ۱۹۹۲; ۱۴(۲): ۱۳۹-۵۱.

[۶] Astaneh-Asl A, editor *Steel plate shear walls*. Proceedings, US-Japan Partnership for Advanced Steel Structures, US-Japan Workshop on Seismic Fracture Issues in Steel Structures; ۲۰۰۰.

[۷] M. Behbahanifard, R. Hussain, G. Driver, and G. Y. Grondin, "Recent Developments and Future Directions in Steel Plate Shear Wall Research," *Proc. North American Steel Construction Conf.*, May, Ft. Lauderdale, FL, USA, ۲۰۰۳.

[۸] Vian D, Lin Y-C, Bruneau M, Tsai K-C, editors. Cyclic performance of low yield strength steel panel shear walls. Proceedings of The Sixteenth KKCNN Symposium on Civil