

Experimental Investigation of the Effect of Vertical Distance of Openings in Gypsum Boards on the Seismic Performance of Cold-Formed Steel Frames

Ehsan Haji Soltani^{1*}, Hamid Reza Ronagh², Mohammad Reza Javaheri Tafti^{3*}

¹ Ph. D candidate, Department of Civil Engineering, Taft. C., Islamic Azad University, Taft, Iran

² Professor, School of Civil and Environmental Engineering, The University of New South Wales, Sydney, Australia

³ Faculty Member, Department of Civil Engineering, Taft. C., Islamic Azad University, Taft, Iran

ABSTRACT

This study investigates the effect of the opening-to-track vertical distance on the cyclic (seismic) behavior of cold-formed steel (CFS) shear walls sheathed with gypsum boards. Two full-scale wall specimens (2400×2400 mm) with a single central opening of 1200×1200 mm were constructed: Type A with a 300 mm distance and Type B with a 400 mm distance from the bottom track. The thickness of steel members was 0.95 mm, and gypsum boards were 12.5 mm thick. Three nominally identical specimens of each type ($n = 3$) were tested under displacement-controlled cyclic loading according to ASTM E2126, Procedure B (ISO 16670 protocol). The results indicated that reducing the opening-to-track distance increased lateral strength; the average peak resistance was 4.82 kN for Type A and 3.84 kN for Type B (a reduction of about 20–25% in Type B). The ultimate displacement capacity was nearly the same for both types, around 48 mm. Failure observations showed that Type A exhibited delayed damage initiation and screw withdrawal around the opening, implying a more favorable stress distribution and better connection performance. Overall, placing the opening closer to the horizontal track can enhance lateral resistance without reducing drift capacity. The findings provide practical implications for the detailing of openings in CFS shear walls and may support future design recommendations.

ARTICLE INFO

Receive Date: 14 August 2025

Revise Date: 19 October 2025

Accept Date: 13 November 2025

Keywords:

Cold-Formed Steel Frame Shear Wall, Opening-to-track distance, Cyclic loading, Gypsum board sheathing, Seismic performance

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/jsce.2025.538940.3795

*Corresponding author: Mohammad Reza Javaheri Tafti

Email address: MR.javaheritafti@iau.ac.ir

بررسی آزمایشگاهی تأثیر فاصله عمودی بازشوهای صفحات گچی از عضو افقی، بر عملکرد لرزه‌ای قاب‌های فولادی سردنوردشده

احسان حاجی سلطانی^۱، حمیدرضا رونق^۲، محمدرضا جواهری تفتی^{۳*}

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، واحد تفت، دانشگاه آزاد اسلامی، تفت، ایران.

۲- استاد گروه مهندسی، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه نیو سات ولز، سیدنی، استرالیا

۳- عضو هیئت علمی، گروه مهندسی عمران، واحد تفت، دانشگاه آزاد اسلامی، تفت، ایران.

چکیده

این پژوهش اثر فاصله عمودی بازشو تا رانر افقی را بر رفتار چرخه‌ای (لرزه‌ای) دیوارهای برشی فولاد سردنوردشده (CFS) با پوشش صفحه گچی بررسی می‌کند. برای این منظور، دو نمونه تمام‌مقیاس به ابعاد ۲۴۰۰×۲۴۰۰ میلی‌متر با یک بازشوی مرکزی ۱۲۰۰×۱۲۰۰ میلی‌متر ساخته شد: نوع A با فاصله ۳۰۰ میلی‌متر و نوع B با فاصله ۴۰۰ میلی‌متر از رانر پایین. ضخامت اعضای فولادی ۰٫۹۵ میلی‌متر و ضخامت صفحات گچی ۱۲٫۵ میلی‌متر بود. از هر نوع سه نمونه مشابه ساخته و تحت بارگذاری جابجایی‌محور چرخه‌ای طبق استاندارد ASTM ۲۱۲۶E، روش B (پروتکل ISO ۱۶۶۷۰) آزمایش شدند. نتایج نشان داد که کاهش فاصله بازشو تا رانر موجب افزایش مقاومت جانبی می‌شود؛ میانگین مقاومت نهایی برای نوع A برابر ۴٫۸۲ کیلونیوتن و برای نوع B ۳٫۸۴ کیلونیوتن بود (کاهش حدود ۲۰ تا ۲۵ درصد در نوع B). ظرفیت جابجایی نهایی در هر دو نوع تقریباً برابر و حدود ۴۸ میلی‌متر به دست آمد. مشاهدات خرابی نشان داد در نوع A آسیب‌دیدگی و جدایش پیچ‌ها با تأخیر رخ می‌دهد که بیانگر توزیع تنش مناسب‌تر و عملکرد بهتر اتصالات است. در مجموع، قرارگیری بازشو نزدیک‌تر به رانر افقی می‌تواند بدون کاهش ظرفیت دررفت، مقاومت جانبی دیوار را افزایش دهد. این یافته می‌تواند در جزئیات‌گذاری بازشوها در دیوارهای برشی CFS مورد استفاده طراحی و آیین‌نامه‌ای قرار گیرد.

کلمات کلیدی: قاب فولادی سردنوردشده، دیوار برشی، فاصله بازشو تا رانر، بارگذاری چرخه‌ای، پوشش گچی، عملکرد لرزه‌ای

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:			
10.22065/jsce.2025.538940.3795	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
doi: https://doi.org/10.22065/jsce.2025.538940.3795	۱۴۰۴/۱۱/۳۰	۱۴۰۴/۰۸/۲۲	۱۴۰۴/۰۸/۲۲	۱۴۰۴/۰۷/۲۷	۱۴۰۴/۰۵/۲۳
محمدرضا جواهری تفتی MR.javaheritafti@iaue.ac.ir				*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

۱- مقدمه

دیوارهای برشی فولاد سردنوردشده (CFS) با پوشش صفحات گچی، به دلیل وزن کم، سهولت اجرا، و مقاومت مناسب در برابر نیروهای جانبی، به صورت گسترده در ساختمان‌های کوتاه و میان مرتبه استفاده می‌شوند. رفتار لرزه‌ای این دیوارها به عوامل مختلفی همچون نوع پوشش، جزئیات اتصالات، و نحوه آرایش بازشوها بستگی دارد. با وجود پژوهش‌های متعدد در زمینه ابعاد، شکل و تعداد بازشوها، تأثیر مکان قرارگیری بازشو، به ویژه فاصله عمودی آن از رانر افقی (Track)، کمتر بررسی شده است. در حالی که در طراحی‌های معماری، جایگاه بازشو معمولاً بر اساس نیازهای فضایی تعیین می‌شود و می‌تواند بر مسیر انتقال برش و نحوه توزیع تنش اثر مستقیم بگذارد.

پژوهش‌های گذشته نشان داده‌اند که افزایش ابعاد بازشو موجب کاهش سختی و مقاومت دیوار برشی می‌شود، اما هنوز مشخص نیست که تغییر مکان بازشو در ارتفاع دیوار چه اثری بر رفتار چرخه‌ای و مکانیسم خرابی دارد. از آنجا که آیین‌نامه‌های AISI S240:2020 و AISI S400:2020 تنها به ابعاد و نوع بازشو اشاره کرده و فاصله آن تا اعضای مرزی را کمی نکرده‌اند، بررسی آزمایشگاهی این پارامتر برای بهبود توصیه‌های طراحی ضروری است.

هدف این تحقیق، بررسی تأثیر فاصله عمودی بازشو از رانر افقی بر رفتار چرخه‌ای دیوارهای برشی فولاد سردنوردشده با پوشش گچی است. برای این منظور، دو نمونه تمام‌مقیاس با فاصله‌های متفاوت بازشو از رانر (۳۰۰ و ۴۰۰ میلی‌متر) تحت بارگذاری چرخه‌ای آزمایش شدند. بارگذاری مطابق استاندارد ASTM E 1۹-۲۱۲۶، روش B (پروتکل ISO ۱۶۶۷۰) انتخاب شد، زیرا این پروتکل پرتکرارترین روش در ارزیابی رفتار لرزه‌ای دیوارهای برشی فولاد سردنوردشده است و در مقایسه با روش A، امکان بررسی تدریجی کاهش سختی و اتلاف انرژی در چرخه‌های با دامنه افزایشی را فراهم می‌کند. علاوه بر این، روش B با رویه‌های آیین‌نامه‌ای AISI S ۴۰۰ برای طراحی لرزه‌ای دیوارهای سبک سازگار است و داده‌های آن قابلیت مقایسه با مطالعات آزمایشگاهی پیشین را دارد.

برای حفظ کاربردپذیری نتایج، ابعاد بازشوی ۱۲۰۰×۱۲۰۰ میلی‌متر انتخاب شد که با مدول متعارف پنجره‌های مسکونی/اداری در دیوارهای سبک هم‌خوان است و نسبت به ابعاد دیوار ۲۴۰۰×۲۴۰۰ میلی‌متر یک نسبت مقیاسی ۱:۲ ایجاد می‌کند. این اندازه علاوه بر بازتاب واقعیت‌های معماری، امکان مقایسه منصفانه با تحقیقات موجود را فراهم می‌سازد و در عین حال آن قدر بزرگ هست که اثر کاهنده پیوستگی پوشش را فعال کند، بدون آن که به صورت افراطی ظرفیت دیوار را از بین ببرد. بدین ترتیب می‌توان اثر مکان بازشو (فاصله تا رانر) را با کمترین مداخله از جانب «اندازه بازشو» جدا و تحلیل کرد.

۲- پیشینه تحقیق

پژوهش‌های انجام‌شده در زمینه دیوارهای برشی فولاد سردنوردشده به همراه صفحات گچی را می‌توان در چند محور اصلی خلاصه کرد:

۱-۲ رفتار کلی دیوارهای برشی فولاد سردنوردشده با پوشش صفحات گچی

در دو دهه اخیر، دیوارهای برشی فولاد سردنوردشده به عنوان یکی از سیستم‌های مقاوم جانبی متداول در سازه‌های سبک مطرح شده‌اند. مطالعات متعددی رفتار چرخه‌ای این دیوارها را تحت بارگذاری جانبی مورد ارزیابی قرار داده‌اند.

نتیجه مشترک این پژوهش‌ها آن است که عملکرد لرزه‌ای دیوار به شدت وابسته به نوع پوشش، آرایش پیچ‌ها و چگونگی انتقال نیرو از صفحه گچی به اعضای فولادی است، Peterman & Schafer, ۲۰۱۴. این گروه از مطالعات چارچوبی برای شناخت مکانیزم کلی رفتار فراهم کردند، ولی اثر بازشوها را اغلب حذف یا نادیده گرفته‌اند.

۲-۲. مطالعات مرتبط با بازشوها: اندازه، شکل، و نسبت سطح

تحقیقات متعددی (Fiorino et al., ۲۰۱۶; Yu & Zhao, ۲۰۱۸) بر روی تأثیر ابعاد و نسبت سطح بازشو به کل دیوار متمرکز بوده‌اند. نتایج نشان داده که افزایش سطح بازشو، به‌ویژه در دیوارهای دارای پوشش گچی، موجب کاهش مقاومت برشی و سختی اولیه می‌شود. فورینو و همکاران (۲۰۱۶) مشاهده کردند که بازشو باعث تمرکز تنش در اطراف لبه‌های آن می‌شود و الگوی خرابی از پارگی صفحه به اطراف بازشو منتقل می‌شود. در مطالعات عددی یو و ژائو (۲۰۱۸) نیز مشخص شد که افزایش ابعاد بازشو مسیر انتقال نیرو را تغییر می‌دهد و موجب افزایش تغییرشکل‌های موضعی می‌شود.

با این حال، تمام این پژوهش‌ها بازشو را صرفاً از نظر ابعاد و سطح بررسی کرده‌اند، نه مکان قرارگیری آن در ارتفاع دیوار.

۳-۲. مطالعات مربوط به اتصالات و نقش آنها در اتلاف انرژی

Moghim & Ronagh (۲۰۱۹) با آزمایش دیوارهای گچی CFS نشان دادند که رفتار چرخه‌ای دیوار عمدتاً توسط اتصالات پیچ کنترل می‌شود.

آنها گزارش کردند که جداشدگی پیچ‌ها و پارگی گچ در اطراف پیچ‌ها عامل اصلی در شکل‌گیری پدیدهٔ پینچینگ و افت سختی است. سایر پژوهش‌ها (شامل آزمون‌های با پوشش OSB یا دوطرفه) نیز نتایج مشابهی داشته‌اند.

از آنجا که محل بازشو می‌تواند الگوی درگیری پیچ‌ها و مسیر انتقال برش را تغییر دهد، رفتار اتصالات مستقیماً به موقعیت بازشو وابسته است؛ ولی تاکنون پژوهشی این اثر را به‌صورت جداگانه بررسی نکرده است.

۴-۲. روش‌های بارگذاری چرخه‌ای و مقایسه‌پذیری نتایج

برای ارزیابی رفتار لرزه‌ای، استاندارد ASTM E ۲۱۲۶ (Procedure B) متداول‌ترین پروتکل بارگذاری است که در پژوهش‌های Fiorino, Moghim و دیگران استفاده شده است.

روش B به دلیل اعمال دامنه‌های افزایشی جابجایی و تکرار چندچرخه‌ای در هر سطح، برای سنجش اتلاف انرژی و پینچینگ مناسب است. استفاده از همین روش در این پژوهش باعث می‌شود نتایج با سایر مطالعات قابل مقایسه و از نظر تحلیل انرژی معتبر باشد.

۵-۲. جایگاه پارامتر مکان بازشو در آیین‌نامه‌ها و پژوهش‌ها

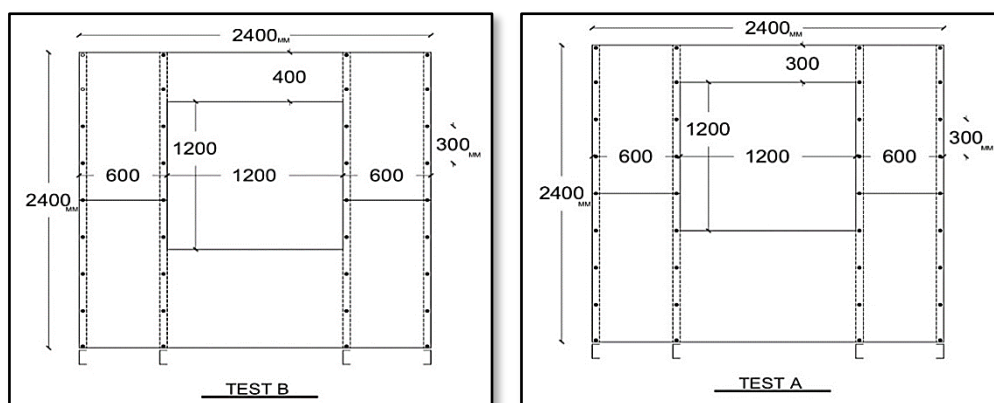
در آیین‌نامه‌های AISI S ۲۴۰:۲۰۲۰ و AISI S ۴۰۰:۲۰۲۰، جزئیات طراحی دیوارهای برشی CFS به تفصیل آمده، اما پارامتری تحت عنوان «فاصله بازشو از رانر افقی» تعریف نشده است.

پژوهش‌های گذشته نیز اثر مکان بازشو را معمولاً به‌صورت کیفی یا ضمنی (مانند قرارگیری بازشو در مرکز یا گوشه) مطرح کرده‌اند، نه به‌عنوان متغیر مستقل با کنترل آزمایشگاهی.

بنابراین خلأ پژوهشی مشخص است: اثر فاصله عمودی بازشو از رانر افقی بر عملکرد چرخه‌ای دیوار برشی فولاد سردنورد شده تاکنون به‌طور سیستماتیک بررسی نشده است.

۳- برنامه آزمایش

همان طوری که اشاره شد، در این مطالعه برنامه آزمایش برای به دست آوردن اطلاعاتی در مورد حالت‌های مختلف خرابی دیوار فولادی سردنورد شده با پوشش ورق گچی در یک طرف با مختصات هندسی مختلف در بازشوها تحت بار چرخه‌ای و مقایسه عملکرد این دو مدل از نظر مقاومت نهایی و شکل‌پذیری می‌باشد. با توجه به شکل ۱، این برنامه شامل ۶ نمونه دیوار با مقیاس کامل (شامل ۲ نمونه منحصربه‌فرد) بوده که این دیوارها در آزمایشگاه سازه و زلزله دانشگاه آزاد اسلامی واحد تفت مورد آزمایش قرار گرفتند که نمایی از دستگاه آزمایش در شکل ۳ نشان داده شده است. مشابه شکل ۲ در تمام دیوارها، ترک‌های^۱ بالا و پایین از ناودانی، ۱۱۱ میلی‌متر و تمامی استادهای^۲ از ناودانی ۳۴/۵×۱۰۹ میلی‌متر به همراه سخت‌کننده‌هایی در جان ناودانی بودند که توسط یک پیچ در هر بال به یکدیگر متصل شده بودند. همچنین برای عضو ناگین^۳ تمامی نمونه‌ها از تسمه ۱۰۰ میلی‌متر استفاده شده است. تمام نمونه‌ها دارای پوشش صفحات گچی^۴ به ضخامت ۱۲٫۵ میلی‌متر در یک طرف بودند که توسط پیچ‌های مته سرخود در فواصل ۳۰۰ میلی‌متر به دیوارها متصل شده بودند. همان طوری که در شکل ۱ نشان داده شده است، دیوارها به ۲ دسته A و B تقسیم‌بندی شده که در هر دو نمونه ابعاد بازشو ۱۲۰۰×۱۲۰۰ میلی‌متر بوده؛ به طوری که در نمونه A، فاصله بازشو از ترک بالای ۳۰۰ میلی‌متر و در نمونه B، فاصله بازشو از ترک بالای ۴۰۰ میلی‌متر می‌باشد.



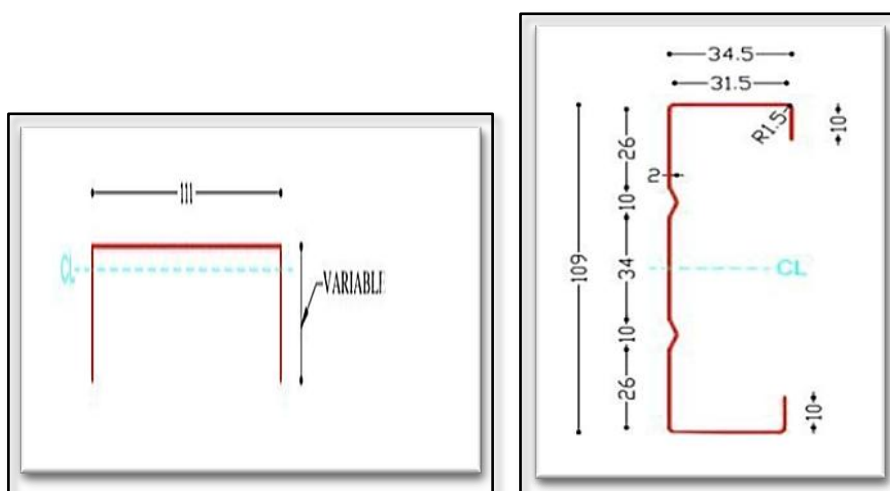
شکل ۱: جزئیات نمونه‌های مورد آزمایش. از راست به چپ: نمونه A، نمونه B

¹ Track

² Stud

³ Nogging

⁴ Gypsum board



شکل ۲: سطح مقطع مقاطع استفاده شده در دیوارها. از راست به چپ: استاد، رانر



شکل ۳: نمای کلی از دیوار مورد آزمایش و جک هیدرولیکی آزمایشگاه

۴- مشخصات مکانیکی مصالح

۴-۱- اعضای اصلی

مشخصات مکانیکی مقاطع استاد، رانر و ناگین در جدول ۱ و مشخصات مکانیکی صفحات پوشش گچی در جدول ۲ آمده است:

جدول ۱: مشخصات مکانیکی ورق استفاده شده در مقاطع استاد، تراک و ناگین

member	Nominal thickness	Yield Stress, F_y	Yield Strain	Ultimate Stress, F_u	Ultimate Strain	F_u / F_y
Stud, track, noggin	0.95mm	174.82Mpa	0.25%	350.22Mpa	2.75%	2

جدول ۲: مشخصات مکانیکی صفحات گچی استفاده شده در آزمایش

member	Nominal thickness	density	Elastic modulus	Bending strength, F_{mk}	Compression strength, F_{ck}
Gypsum board	12.5mm	$680 \frac{kg}{m^3}$	2200Mpa	2Mpa	3.5Mpa

۴-۲- اتصالات

ترک‌های بالا و پایین و استاده‌ها به وسیله دو پیچ (یکی در هر بال) در هر تقاطع به یکدیگر متصل شده‌اند و صفحات گچی به وسیله پیچ‌های مته سرخود^۱ در فواصل ۳۰۰ میلی‌متر به دیوار متصل شده‌اند. حالت‌های احتمالی خرابی می‌تواند در پاره شدن صفحات گچی در نقاط اتصال به دیوار باشد. همچنین به جهت نصب دستگاه در قاب آزمایش و جلوگیری از لغزش افقی دیوارها در قاب آزمایش، دیوارهای مورد آزمایش توسط ۳ عدد رول بولت M16 با مقاومت بالا در ترک پایین و ۳ عدد رول بولت M16 با مقاومت بالا در ترک بالا به یک هیدرولیکی دستگاه آزمایش متصل شده بودند.

۵- برنامه آزمایش

۵-۱- راه‌اندازی آزمایش

برای اندازه‌گیری جابجایی‌های افقی از یک مبدل دقیق در تیر پایینی استفاده شد. همچنین برای اندازه‌گیری مقاومت قاب‌ها از یک Load-cell استفاده شد. تمامی داده‌ها از مبدل و Load-cell به نرم‌افزار Lab View Signal Express [۸] در کامپیوتر فرستاده شد. در انتها نمودار بار - جابجایی برای هر یک از نمونه‌ها ترسیم شد.

۵-۲- پروتکل بارگذاری

رژیم بارگذاری رفت و برگشتی مورد استفاده در آزمایش‌ها بر اساس روش B در استاندارد ASTM E2126-7 [۱] که در اصل برای استاندارد ISO 16670، تدوین شده است می‌باشد. بارگذاری شامل یک سیکل کامل در ۱/۲۵، ۱/۵، ۲/۵، ۳/۵، ۴/۵، ۵/۵، ۶/۵، ۷/۵، ۸/۵، ۹/۵، ۱۰/۵ و سه سیکل کامل در ۱/۲۰، ۲/۲۰، ۳/۲۰، ۴/۲۰، ۵/۲۰، ۶/۲۰، ۷/۲۰، ۸/۲۰، ۹/۲۰، ۱۰/۲۰، ۱۱/۲۰، ۱۲/۲۰، ۱۳/۲۰، ۱۴/۲۰، ۱۵/۲۰ و ۱۶/۲۰ از جابجایی نهایی نمونه می‌باشد مگر اینکه زودتر شکست یا کاهش قابل ملاحظه‌ای در مقاومت پدید آید.

¹ Self-Drilling Screw

در روش B در استاندارد ASTM E2126-7 [۱] آمده است که دامنه جابجایی‌ها باید بر اساس کسری از جابجایی نهایی در بارگذاری یکنواخت انتخاب شود. اما اگر این موضوع در این تحقیق اعمال می‌شد، به دلیل اینکه هر نمونه جابجایی نهایی مخصوص خود را دارا است، رژیم بارگذاری برای نمونه‌های مختلف متفاوت می‌گردید. این موضوع ایجاب می‌کند که برای تعالی نمونه‌ها از رژیم بارگذاری یکسان استفاده شود. بنابراین در این تحقیق از روش B ذکر شده در دامنه مستقل از بارگذاری یکنواخت استفاده شده است. در این تحقیق جابجایی نهایی قاب‌ها، حداکثر جابجایی نسبی واقعی طبقه^۱ می‌باشد. با توجه به ارتفاع قاب‌ها، جابجایی نهایی نمونه‌ها ۶۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است.

۶- نتایج تست‌های آزمایشگاهی

۶-۱- تست A

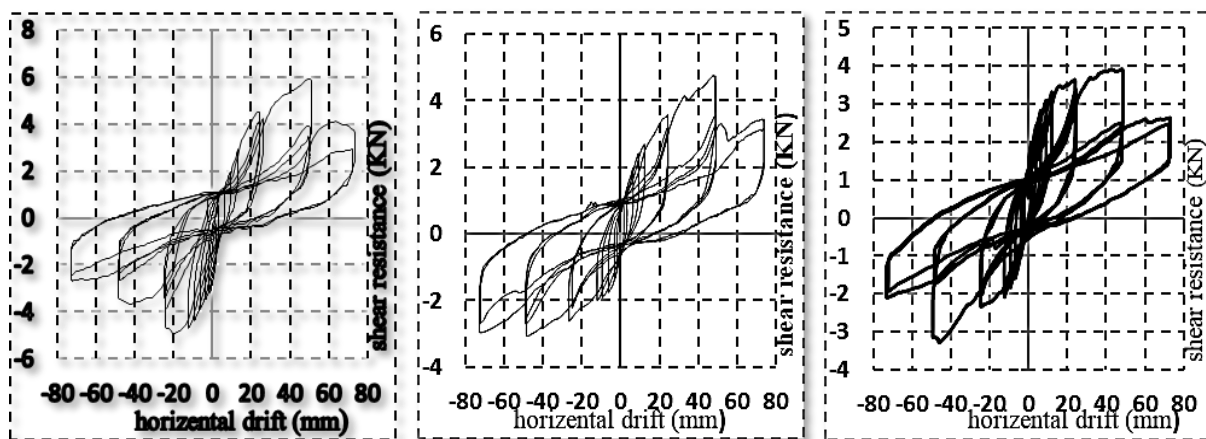
در این قاب از تغییر مکان‌های حداقل ۹ میلی‌متر وجود اولین ترک‌ها اطراف بازشو مشاهده گردید. به همراه اینکه در دور اول از جابجایی‌های سیکل ۲۴ میلی‌متر ترک‌های اطراف بازشوها اتفاق افتاد. همچنین در تمامی قاب‌ها در جابجایی‌های سیکل ۲۴ میلی‌متر ترک‌های قطری در گوشه‌های چپ و راست کناف در قسمت بالا مشاهده گردید که در همین سیکل تعدادی از پیچ‌های اطراف بازشو به صورت کامل از اتصال کناف به قاب جدا شدند.

در دور اول از سیکل جابجایی 48mm کمانش موضعی^۲ در بال استاد میانی و همچنین کمانش کلی^۳ در در استادهای کناری و در دور دوم از سیکل جابجایی 48mm تابیدگی در تسمه‌ها (ناگین) اتفاق افتاد. اما در دور سوم از جابجایی سیکل 48mm ترک خوردگی کامل در قسمت بالای بازشو مشاهده گردید. در تغییر مکان‌های کمتر از 50mm جدا شدن کامل کناف از دیوار اتفاق افتاد. لازم به ذکر است که در تغییر مکان‌های کمتر از 60mm کمانش کلی و تابیدگی کلی قاب مشاهده گردید.

^۱ Drift

^۲ Local buckling

^۳ Global buckling



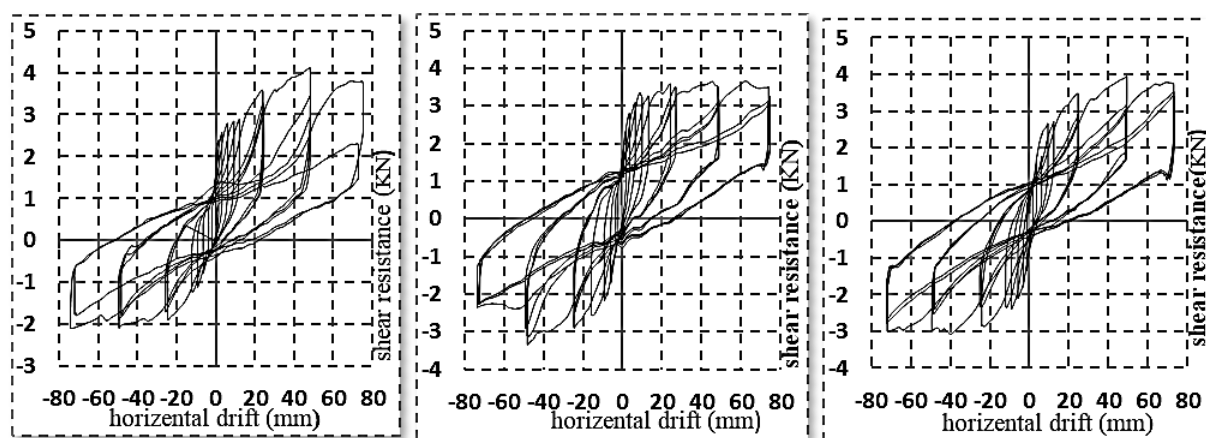
شکل ۴: منحنی هیستریزیس بار - تغییر مکان نمونه‌های آزمایش A: چپ: A1، وسط: A2، راست: A3



شکل ۵: مود خرابی‌های نمونه A

۶-۲- نمونه B

اولین ترک‌ها در اطراف بازشو در تغییر مکان‌های بیشتر از 12mm مشاهده گردید. در دور اول از سیکل جابجایی 24mm ترک خوردگی کناف اطراف بازشو (محل اتصال کناف به استاد میانی) ایجاد و در دور دوم از سیکا جابجایی 24mm تعدادی از پیچ‌های اتصال کناف به قاب در اطراف بازشو به صورت کامل جدا شدند. اما در دور اول از سیکل جابجایی 48mm کمانش پلاستیک^۱ در بال استاد کناری و کمانش موضعی در بال استاد میانی مشاهده گردید. همچنین وجود ترک‌های قطری در بالا و گوشه صفحات گچی در تغییر مکان‌های بیشتر از 24mm مشاهده گردید. مشابه تست A در این آزمایش نیز تابیدگی^۲ و اعوجاج در تسمه‌ها (ناگین) در دور دوم از جابجایی سیکل 48mm مشاهده گردید. در دور نهایی از سیکل جابجایی 48mm جداشدگی کامل کناف از قاب و کمانش کلی و تابیدگی کلی قاب در تغییر مکان‌های کمتر از 60mm اتفاق افتاد.



شکل ۶: منحنی هیستریزیس بار - تغییر مکان نمونه‌های آزمایش B: چپ: B1، وسط: B2، راست: B3

¹ Plastic buckling

² Warping



شکل ۷: مود خرابی‌های نمونه B

مقاومت و جابجایی نهایی نمونه‌ها به شرح جدول ۳ می‌باشد:

جدول ۳: مقاومت و جابجایی نهایی قاب‌های فولادی مورد مطالعه

نمونه		مقاومت نهایی (kN)	میانگین	تغییر مکان نهایی (mm)	میانگین
A	A1	5,840	4,820	48,164	48,124
	A2	4,710		48,163	
	A3	3,910		48,10	
B	B1	4,120	3,846	48,140	48,225
	B2	3,623		48,020	
	B3	3,910		48,520	

۷- بحث و نتیجه گیری

نتایج به دست آمده از این پژوهش، شواهد روشنی در خصوص تأثیر مکان یابی بازشوها بر عملکرد لرزه ای دیوارهای فولادی سردنورد شده با پوشش گچی فراهم می کند. بررسی داده های آزمایشگاهی نشان داد که کاهش فاصله عمودی بازشو از رانر افقی می تواند به بهبود چشم گیر مقاومت جانبی قابها منجر شود، در حالی که جابجایی نهایی و شکل پذیری کلی سیستم تغییر قابل ملاحظه ای نخواهد داشت.

۱-۷. مکانیزم خرابی

بررسی منحنی های هیستریزس، تغییر شکل ها و مشاهدات عینی نشان داد که هر دو پیکربندی از الگوی خرابی مشابهی پیروی می کنند، اما زمان آغاز و شدت پیشروی خرابی با فاصله بازشو از رانر مرتبط است. در نمونه های نوع A (فاصله ۳۰۰ میلی متر) ترک های اولیه در اطراف لبه بازشو دیرتر ظاهر شدند و گسترش آنها با نرخ کمتری پیش رفت. در مقابل، در نمونه های نوع B (فاصله ۴۰۰ میلی متر)، ترک های موضعی در پوشش گچی زودتر شکل گرفتند و جدایش پیچها در مراحل اولیه تر بارگذاری اتفاق افتاد.

در مراحل میانی بارگذاری، جدایش پیچها از اطراف بازشو و پارگی لبه های پوشش در نزدیکی استادهای کناری قابل مشاهده بود. در مرحله نهایی، لهیدگی موضعی گچ و کنده شدن پیچها مسیر گسیختگی نهایی را تشکیل داد. به طور کلی، در نوع A خرابی با تأخیر بیشتر، پینچینگ کمتر و پایداری حلقه های هیستریزس بیشتر همراه بود.

۲-۷. تحلیل افزایش مقاومت در فواصل کمتر بازشو تا رانر

افزایش مقاومت جانبی در نمونه های نوع A ۴۰۸۲ kN در مقایسه با نوع B ۳۰۸۴ kN حدود ۲۰ تا ۲۵ درصد است. این اختلاف را می توان با چهار عامل توضیح داد:

- کاهش طول مسیر انتقال برش: با نزدیک تر شدن بازشو به رانر افقی، نیروهای برشی مسیر کوتاه تری تا عضو افقی طی می کنند. این امر تمرکز تغییر شکل ها را کاهش داده و سبب توزیع یکنواخت تر تنش در پانل های اطراف بازشو می شود.
- درگیری مؤثرتر پیچها: فاصله کمتر باعث می شود پیچهای واقع در نوار فشاری و کششی پایین دیوار نقش فعال تری ایفا کنند و جدایش پیچها با تأخیر اتفاق افتد.
- افزایش پیوستگی میدان برشی: نزدیک بودن بازشو به رانر موجب می شود میدان برشی در پانل های کناری پیوستگی بیشتری پیدا کند و عملکرد جعبه ای شکل تری داشته باشد.
- کاهش اثر پینچینگ و افت سختی: منحنی های هیستریزس در نوع A مساحت بیشتری را در بر می گیرند و نرخ افت سختی بین سیکل های تکراری کمتر است، که نشان دهنده میرایی مؤثرتر و پایداری بیشتر در چرخه های افزایشی است.

۳-۷. تحلیل کمی داده ها

میانگین مقاومت نهایی (P_{max}): ۴۰۸۲ kN در نوع A و ۳۰۸۴ kN در نوع B.

سختی اولیه (K_0): در نوع A حدود ۱۵ تا ۲۰ درصد بیشتر از نوع B.

ظرفیت جابجایی نهایی (Δ_u): در هر دو نوع حدود ۴۸ mm و تقریباً یکسان.

میرایی معادل (ξ_{eq}): در نوع A حدود ۱٫۲ برابر نوع B.

۸- مقایسه با تحقیقات پیشین

یافته‌های این تحقیق هم‌راستا با نتایج پژوهش‌های پیشین است. مقیمی^۱ و رونق^۲ (۲۰۱۸) در یک مطالعه عددی نشان دادند که بازشوهایی که در فاصله کمتری از رانر قرار دارند، کمترین اثر منفی را بر مقاومت دیوار دارند. در عین حال، فیورینو^۳ و همکاران (۲۰۱۶) نیز گزارش کردند که مکان‌یابی بازشو در مجاورت رانر می‌تواند سختی و مقاومت کلی دیوار را افزایش دهد و از شکست‌های زودرس جلوگیری کند. نتایج پژوهش حاضر این مشاهدات را در مقیاس آزمایشگاهی واقعی تأیید می‌کند و شواهد تجربی جدیدی برای بهبود دستورالعمل‌های طراحی ارائه می‌دهد.

همچنین، بررسی نتایج این تحقیق در مقایسه با مدل‌های عددی ارائه‌شده توسط یو^۴ و همکاران (۲۰۱۴) نشان می‌دهد که افزایش فاصله بازشو از رانر باعث افزایش تمرکز تنش در اطراف لبه‌های بازشو و در نتیجه کاهش ظرفیت باربری دیوار می‌شود. به عبارت دیگر، یافته‌های این مطالعه نه تنها با شواهد پیشین سازگار است، بلکه به دلیل استفاده از نمونه‌های تمام‌مقیاس، قابلیت تعمیم بیشتری به شرایط واقعی ساخت‌وساز دارد.

۹- نتیجه‌گیری و توصیه‌های طراحی

یافته‌های این تحقیق می‌تواند به‌طور مستقیم در بهبود دستورالعمل‌های طراحی دیوارهای فولادی سردنوردشده مورد استفاده قرار گیرد. مهم‌ترین نتایج را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

- ۱) کاهش فاصله بازشو از رانر افقی از ۴۰۰ به ۳۰۰ میلی‌متر، مقاومت جانبی دیوار را به‌طور متوسط ۲۰ تا ۲۵ درصد افزایش می‌دهد.
- ۲) جابجایی نهایی دیوارها تقریباً مستقل از موقعیت بازشو باقی می‌ماند و این پارامتر بیشتر بر مقاومت و سختی اولیه اثرگذار است.
- ۳) الگوی خرابی در هر دو گروه مشابه است، اما در فاصله‌های کمتر از رانر، تأخیر در شروع خرابی و عملکرد بهتر اتصالات مشاهده می‌شود.
- ۴) پیشنهاد می‌شود در طراحی دیوارهای CFS، بازشوها در کمترین فاصله ممکن از رانرها (حدود ۳۰۰ میلی‌متر) قرار گیرند تا مقاومت و ظرفیت انرژی دیوار افزایش یابد.
- ۵) محدودیت مطالعه شامل تنها یک اندازه بازشو و پوشش یک‌طرفه است؛ لذا بررسی ابعاد متفاوت بازشو، پوشش دوطرفه و اثر بار ثقلی برای آینده پیشنهاد می‌شود.

در نهایت، برای بهبود بیشتر عملکرد لرزه‌ای این سیستم‌ها، انجام تحقیقات آزمایشگاهی و عددی تکمیلی با در نظر گرفتن متغیرهایی همچون ابعاد بازشو، موقعیت افقی آن، استفاده از پوشش دوطرفه و نیز تقویت‌های موضعی در اطراف بازشو توصیه می‌شود.

¹ Moghimi, H.

² Ronagh, H.R.

³ Fiorino, L.

⁴ Yu, C.

۱۰- مراجع

- [1]. ASTM E2126-07, ASTM International. (2007). *Standard Test Methods for Cyclic (Reversed) Load Test for Shear Resistance of Vertical Elements of the Lateral Force Resisting Systems for Buildings*. West Conshohocken, PA, USA.
- [2]. Vieira, L.C.M., Schafer, B.W. (2010). Behavior and Design of Cold-Formed Steel Wall Studs. *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 66, No. 8-9, pp. 1116-1127.
- [3]. Vieira, L.C.M., Schafer, B.W. (2013). Cold-Formed Steel Framed Shear Walls: Sheathing Braced Design Methodology. *Thin-Walled Structures*, Vol. 67, pp. 78-92.
- [4]. Adham, M., LaBoube, R.A., Yu, W.W. (1990). Behavior of Cold-Formed Steel Wall Studs with Openings. *Final Report, University of Missouri-Rolla*.
- [5]. Yu, C., Chen, Y., Schafer, B.W. (2014). Simulation of Cold-Formed Steel Framed Shear Walls with Openings. *Thin-Walled Structures*, Vol. 84, pp. 406-419.
- [6]. Fiorino, L., Macillo, V., Landolfo, R. (2016). Seismic Behavior of Sheathed Cold-Formed Steel Structures: A Review. *Thin-Walled Structures*, Vol. 106, pp. 202-222.
- [7]. Moghimi, H., Ronagh, H.R. (2018). Behavior of Cold-Formed Steel Shear Walls with Openings under Seismic Loading. *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 144, pp. 55-68.
- [8]. National Instruments. *LabVIEW Signal Express User Manual*. National Instruments Corporation, Austin, Texas, USA, 2007.
- [9]. Peterman, K. D., & Schafer, B. W. (2014). Hysteretic Response of Cold-Formed Steel Framed Shear Walls with Sheathing. *Thin-Walled Structures*, 79, 173-184
- [10]. Yu, W., & Zhao, X. (2018). Numerical Study on the Seismic Performance of Cold-Formed Steel Shear Walls with Openings. *Journal of Constructional Steel Research*, 150, 1-12.
- [11]. Moghimi, H., & Ronagh, H. R. (2019). Experimental Study of Cold-Formed Steel Shear Walls with Gypsum Sheathing under Cyclic Loading. *Thin-Walled Structures*, 141, 351-362.