

Experimental Investigation of the Effect of Number and Configuration of Openings in Gypsum Boards on the Seismic Performance of Cold-Formed Steel Frames

Ehsan Haji Soltani¹, 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, Australia.
3. Faculty Member, Department of Civil Engineering, Taft. C., Islamic Azad University, Taft, Iran.

Abstract

In recent decades, the use of cold-formed steel structures has grown significantly in the construction industry due to their low weight, high speed of construction, economic efficiency, and good seismic performance. This study investigates the structural performance of cold-formed steel (CFS) frames sheathed with gypsum board, with particular emphasis on the influence of the number, size, and configuration of openings. In these structural systems, gypsum boards, as one of the most common interior and exterior wall coverings, play an important role in structural and non-structural performance. Therefore, it seems necessary to conduct research based on experimental tests to investigate the actual behavior of gypsum boards and cold-rolled steel structures in order to identify resistance mechanisms, failure patterns, and parameters affecting system performance. Two distinct full-scale CFS frame specimens, each measuring 2400 × 2400 mm and sheathed on one side with gypsum board, were designed and fabricated. The difference between sample A and sample B was in the geometry of the opening in the cover sheet, and the opening area was considered the same in both frames. Cyclic lateral loading tests were performed on each frame type in triplicate to ensure repeatability and reliability of the experimental data. The tests were conducted at the Structural and Earthquake Engineering Laboratory of the Islamic Azad University, Taft Branch, using a servo-controlled hydraulic actuator. Then, the hysteresis curve of all samples was extracted and from the hysteresis envelope curve of the samples, the lateral resistance and the final lateral displacement of the samples were extracted.

The experimental results showed that increasing the number of openings along with reducing their dimensions changed the behavior of the system from a brittle and fragile state to a more ductile state. Consequently, the use of symmetrical arrangement of openings in the design of LSF frame gypsum walls can improve the lateral stability and durability of the connections. Also, in Light Steel Frame (LSF) structural systems, lateral force transmission is mainly through gypsum board or OSB-clad partition walls. In these systems, gypsum boards, in addition to their architectural and space separation roles, also act as part of the lateral load-resistant system by contributing to the shear stiffness of the wall. The results of this study showed that the cyclic behavior of LSF frames is significantly affected by the continuity of the interframes and the way the gypsum boards are attached to the frame; such that premature loosening of the screws causes a rapid loss of system strength. Therefore, in the seismic design of this type of system, the role of the interframes should not be considered solely non-structural, but the combined effect of the frame and the panel should be modeled and controlled. Overall, the results showed that the symmetrical arrangement of smaller openings in the plaster walls of LSF frames improves the cyclic behavior, increasing the ultimate strength and ductility of the system. However, due to the aforementioned limitations, the findings should be interpreted in the context of preliminary experimental results. However, due to the aforementioned limitations, the findings should be interpreted as preliminary laboratory results. To develop realistic design models, additional experiments including panel separation, double-sided cladding effect investigation, and advanced numerical analyses are necessary.

Review History

Received: Sep 22, 2025
Revised: Oct 19, 2025
Accepted: Dec 10, 2025

Keywords

Cold-Formed Steel Frame
Gypsum Board
Wall Opening
Seismic Performance
Cyclic Loading

* Corresponding Author Email: MR.javaheritafti@iau.ac.ir - ORCID: 0000-0001-6860-0705



بررسی آزمایشگاهی تأثیر تعداد و آرایش بازشوهای صفحات گچی 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 محیط‌زیست، دانشگاه نیو ساوت ولز، استرالیا.

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

چکیده

تاریخچه داوری

در این پژوهش، تأثیر تعداد و آرایش بازشوها در صفحات گچی بر عملکرد لرزه‌ای سازه‌های قاب‌های فولادی سردنوردشده مورد بررسی قرار گرفته است. دو نمونه منحصربه‌فرد قاب فولادی با ابعاد 2400×2400 میلی‌متر با پوشش گچی در یک طرف، با هندسه مختلف بازشو در شرایط آزمایشگاهی تحت بارگذاری چرخه‌ای قرار گرفتند. به صورتی که برای حصول اطمینان از نتایج حاصل‌شده از هر مدل قاب ۳ نمونه منحصربه‌فرد مورد آزمایش قرار گرفت. آزمایش‌ها در آزمایشگاه سازه و زلزله دانشگاه آزاد اسلامی واحد تفت با استفاده از جک هیدرولیکی انجام شد. نتایج نشان داد که افزایش تعداد بازشوها با ابعاد کوچک‌تر، در مقایسه با یک بازشوی بزرگ مرکزی، موجب بهبود نسبی عملکرد سازه‌ای در برابر بارگذاری چرخه‌ای شده است. همچنین آرایش قرینه بازشوها موجب توزیع یکنواخت‌تری از تغییر شکل‌ها و کاهش تمرکز تنش شد. این نتایج می‌تواند راهنمایی مؤثر برای طراحی بازشو در دیافراگم‌های غیرسازه‌ای در این نوع سیستم‌ها باشد.

کلمات کلیدی

قاب فولادی سردنوردشده
صفحات گچی
بازشو دیوار
عملکرد لرزه‌ای
بارگذاری چرخه‌ای

۱- مقدمه

واقعی، وجود بازشوهایی در صفحات گچی برای عبور تأسیسات، درها یا پنجره‌ها امری اجتناب‌ناپذیر است. این بازشوها می‌توانند عملکرد سازه‌ای کلی سیستم را تحت تأثیر قرار دهند؛ به ویژه در شرایط بارگذاری لرزه‌ای که تمرکز تنش و تغییرشکل‌های موضعی نقش مهمی در آغاز گسیختگی دارند. مطالعات پیشین عمدتاً بر بررسی رفتار کلی دیوارهای غیر باربر یا اثرات موضعی تمرکز داشته‌اند، اما تأثیر تعداد و آرایش هندسی بازشوها در صفحات گچی در سیستم‌های CFS هنوز به صورت دقیق مورد مطالعه قرار نگرفته است. در این تحقیق، ۶ عدد قاب فولادی سردنوردشده

استفاده از سیستم‌های سازه‌ای سبک به ویژه قاب‌های فولادی سردنوردشده CFS در سال‌های اخیر به دلیل مزایایی مانند وزن کم، سهولت اجرا، و سرعت ساخت، در پروژه‌های عمرانی کشور به ویژه در انبوه‌سازی، گسترش یافته است. یکی از اجزای مکمل این سیستم‌ها، صفحات پوششی گچی هستند که علاوه بر ایفای نقش معماری و جداکننده، در تأمین سختی جانبی و کنترل تغییرشکل‌ها نیز مؤثر واقع می‌شوند. با این حال، در کاربردهای

* رایانامه نویسنده مسئول: MR.javaheritafti@iaui.ac.ir - ORCID: 0000-0001-6860-0705

کپی‌رایت © ۲۰۲۶، انتشارات دانشگاه تربیت مدرس (TMU Press). این مقاله به صورت دسترسی آزاد منتشر شده و تحت مجوز بین‌المللی Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 قرار دارد (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>). بر اساس این مجوز، شما می‌توانید این مطلب را در هر قالب و رسانه‌ای کپی، بازنشر و بازآفرینی کنید و یا آن را ویرایش و بازسازی نمایید، به شرط آنکه نام نویسنده را ذکر کرده و از آن برای مقاصد غیرتجاری استفاده کنید.



در این زمینه، مطالعات شفافی و استاد [8] نشان داده‌اند که شرایط مرزی میانقاب‌های بنایی اثر قابل توجهی بر رفتار خارج از صفحه دارد و این رفتار با پاسخ درون‌صفحه‌ای در تعامل است. در پژوهش‌های دیگر، همین نویسندگان اثر بازشو را بر کاهش سختی مؤثر و مقاومت نهایی بررسی کرده و روابط اصلاحی برای مدل‌سازی دقیق‌تر ارائه داده‌اند [9، 11]. مقایسه روش‌های مختلف مدل‌سازی عددی میانقاب‌ها نیز حساسیت رفتار لرزه‌ای را به فرضیات مدل و شرایط مرزی نشان داده است [10]. هرچند مصالح و جزئیات ساخت در میانقاب‌های بنایی و پنل‌های گچی متفاوت‌اند، اما از نظر رفتار مکانیکی، مانند تمرکز تنش در گوشه‌های بازشو، جداسازی موضعی و کاهش سختی تدریجی، شباهت‌های قابل توجهی میان دو سیستم وجود دارد.

در راستای آزمایش‌های تجربی جدید، استاد و شفافی [7] با انجام آزمایش کشش قطری بر نمونه‌های بلوک سفالی دارای اندوهای غیرسازه‌ای مختلف (سیمان و گچ) نشان دادند که نوع و پیوستگی لایه پوششی بر الگوی ترک‌زایی و کاهش سختی برشی دیوار تأثیرگذار است. یافته‌های آن‌ها بیانگر این نکته است که حتی در دیوارهای غیرسازه‌ای، نوع و چسبندگی لایه پوششی می‌تواند رفتار کلی سیستم را در برابر بارگذاری چرخه‌ای تغییر دهد؛ مشابه نقشی که صفحات گچی در قاب‌های CFS دارند.

در مجموع، مرور پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد:

- ۱- وجود بازشو با ابعاد بزرگ‌تر و آرایش نامتقارن موجب تمرکز تنش و خرابی موضعی زودهنگام می‌شود [2-5].
- ۲- تقارن بازشوها و کاهش ابعاد آن‌ها موجب توزیع یکنواخت‌تر تنش و بهبود شکل‌پذیری سیستم می‌شود.
- ۳- شرایط مرزی و نوع پوشش غیرسازه‌ای نقش مهمی در پایداری جانبی و ظرفیت چرخه‌ای دیوارها دارد [7-11].

بر این اساس، ضرورت انجام آزمایش‌های تمام‌مقیاس برای مقایسه دو نوع آرایش بازشو - یعنی یک بازشوی مرکزی بزرگ در مقابل دو بازشوی قائم قرینه با ابعاد کوچک‌تر - دنوردشده احساس می‌شود؛ موضوعی که در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفته است.

۳- برنامه آزمایش

همان‌طور که اشاره شد، در این مطالعه برنامه آزمایش برای به

(شامل ۲ مدل منحصربه‌فرد) با ابعاد 2400×2400 میلی‌متر و پوشش گچی یک‌طرفه طراحی و در آزمایشگاه سازه و زلزله دانشگاه آزاد اسلامی واحد تفت تحت بارگذاری چرخه‌ای [1] ASTM-E2126-07 قرار گرفتند. قاب اول دارای یک بازشوی مربعی مرکزی و قاب دوم دارای دو بازشوی قائم قرینه بود. هدف این پژوهش، بررسی و مقایسه عملکرد این دو مدل از نظر مقاومت نهایی، شکل‌پذیری، و الگوی شکست در برابر بارگذاری چرخه‌ای است تا بتوان بر مبنای آن توصیه‌هایی برای طراحی مهندسی صفحات گچی دارای بازشو در سیستم‌های CFS ارائه داد.

۲- پیشینه تحقیق

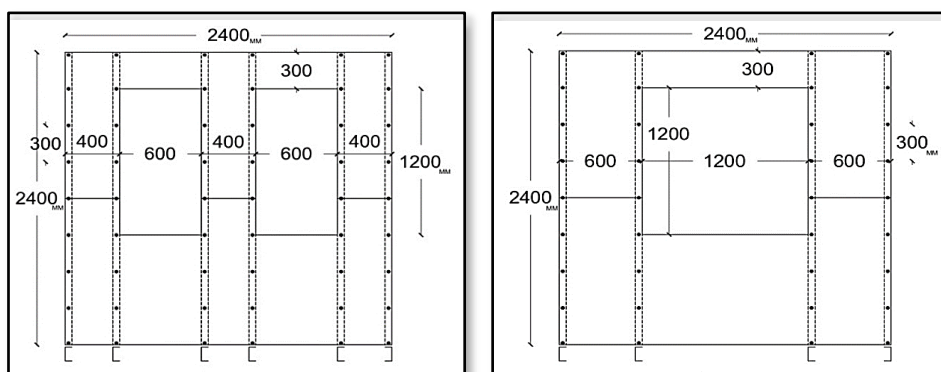
در سال‌های اخیر، مطالعات متعددی بر رفتار برشی و لرزه‌ای دیوارهای فولادی سردنوردشده (CFS) دارای پوشش گچی و بازشو انجام شده است. شافر و همکاران [2] با انجام آزمایش‌های چرخه‌ای بر دیوارهای دارای بازشوی مرکزی، گزارش کردند که افزایش ابعاد بازشو به‌ویژه در ناحیه میانی باعث کاهش سختی اولیه و تغییر سازوکار خرابی به گسیختگی موضعی می‌شود. در ادامه، سرته و همکاران [3] نشان دادند که استفاده از دو بازشوی قرینه با ابعاد کوچک‌تر در مقایسه با یک بازشوی بزرگ منفرد، موجب رفتار پایداری و افزایش شکل‌پذیری جانبی می‌شود. همچنین موئن و شافر [4] با مدل‌سازی اجزای محدود در نرم‌افزار ABAQUS نشان دادند که محل و اندازه بازشو، چگونگی توزیع تنش و الگوی کمانش را به‌طور قابل توجهی تغییر می‌دهد. نتایج مطالعه پارامتریک لیو و یو [5] نیز تأیید کرد که نسبت سطح بازشو، فاصله لبه بازشو تا اعضای افقی و تقارن آرایش بازشوها از عوامل اصلی در تعیین ظرفیت نهایی و سختی جانبی دیوارهای CFS هستند.

با وجود این تحقیقات، بررسی جامع اثر تعداد و آرایش بازشوها در صفحات گچی یک‌طرفه و تأثیر مستقیم آن‌ها بر رفتار چرخه‌ای قاب‌های فولادی سردنوردشده در مقیاس واقعی هنوز به‌طور دقیق انجام نشده است. از سوی دیگر، بررسی پژوهش‌های مرتبط با میانقاب‌های بنایی دارای بازشو می‌تواند به درک بهتر پدیده‌های مشابه در دیوارهای گچی کمک کند؛ زیرا در هر دو سیستم، وجود بازشو باعث تمرکز تنش در گوشه‌ها، تغییر مسیر انتقال نیرو و کاهش سختی مؤثر می‌شود.

همچنین برای عضو ناگین تمامی نمونه‌ها از تسمه ۱۰۰ میلی‌متر استفاده شده است. تمام نمونه‌ها دارای پوشش صفحات گچی (gypsum board) به ضخامت ۱۲۵ میلی‌متر در یک طرف بودند که توسط پیچ‌های مته سرخود در فواصل ۳۰۰ میلی‌متر به دیوارها متصل شده بودند.

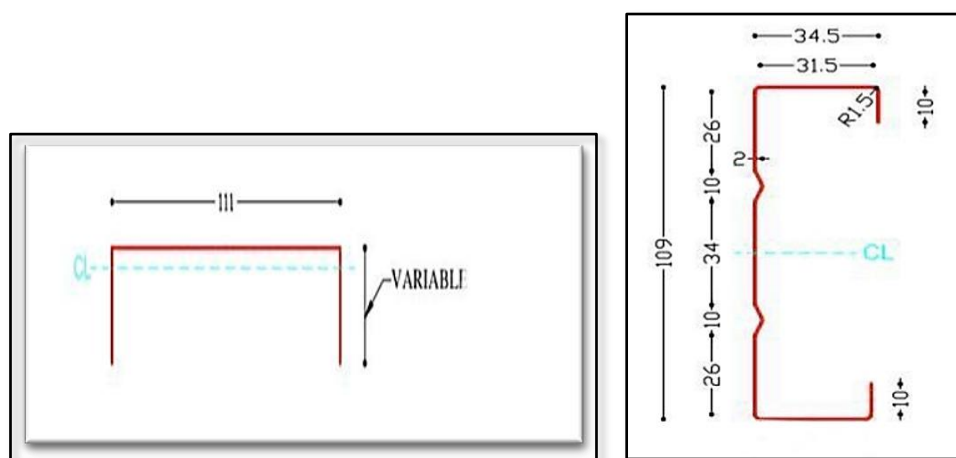
همان‌طور که در شکل (۱) نشان داده شده است، دیوارها به ۲ دسته A و B تقسیم‌بندی شده که در نمونه A فاصله بازشو از ترک بالایی ۳۰۰ میلی‌متر به ابعاد ۱۲۰۰×۱۲۰۰ میلی‌متر و نمونه B دارای بازشوهایی به ابعاد ۶۰۰×۱۲۰۰ میلی‌متر و فاصله این بازشوها از ترک بالایی ۳۰۰ میلی‌متر به صورت نشان داده شده می‌باشد.

دست آوردن اطلاعاتی در مورد حالت‌های مختلف خرابی دیوار فولادی سردنوردشده 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 بالا و پایین از ناودانی ۱۱۱ میلی‌متر و تمامی استادها از ناودانی ۵/۳۴×۱۰۹ میلی‌متر به همراه سخت‌کننده‌هایی در جان ناودانی بودند که توسط یک پیچ در هر بال به یکدیگر متصل شده بودند.



شکل ۱. جزئیات نمونه‌های مورد آزمایش. راست نمونه (A)، چپ نمونه (B)

Fig. 1. Details of the tested specimens. Right: Specimen A, Left: Specimen B



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

Fig. 2. Cross-sectional profile of the sections used in the walls, from right to left: runner, stud



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

Fig. 3. Overall view of the tested wall and the laboratory hydraulic jack

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

Table 1. Mechanical properties of the materials used in the walls.

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

Table 2. Mechanical properties of gypsum boards used in the tests.

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

مورد استفاده از پانل‌های گچ‌برگ با ضخامت ۵/۱۲ میلی‌متر تهیه شدند؛ به گونه‌ای که برای آزمون خمشی، نمونه‌ها به صورت نوارهایی با ابعاد ۵۰×۳۰۰ میلی‌متر و برای آزمون فشاری به صورت قطعات مربعی با ابعاد ۵۰×۵۰ میلی‌متر بریده شدند. میانگین مقادیر به‌دست‌آمده از سه نمونه آزمایشی در جدول (۲) آورده شده است.

۲-۴-۲- 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 در فواصل ۳۰۰ میلی‌متر به دیوار متصل شده‌اند. حالت‌های احتمالی خرابی می‌تواند در پاره شدن صفحات گچی در نقاط اتصال به دیوار باشد. همچنین برای 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 جک هیدرولیکی دستگاه آزمایش متصل شده بودند.

۴- مشخصات مکانیکی مصالح

۴-۱-۱- اعضای اصلی

برای تعیین مشخصات مکانیکی اعضای فولادی شامل استاد، تراک و ناگین، آزمایش کشش مطابق استاندارد M-VE/ASTM E ۱۳ با استفاده از دستگاه SANTAM Universal Testing Machine با ظرفیت ۱۰۰ کیلونیوتن در آزمایشگاه مصالح و سازه دانشگاه آزاد اسلامی واحد تفت انجام شد. نمونه‌ها از ورق سردنوردشده به صورت نوارهای تهیه شدند و پس از کالیبراسیون دستگاه، مقادیر تنش تسلیم، تنش نهایی و کرنش شکست اندازه‌گیری شد. نتایج حاصل در جدول (۱) گزارش شده‌اند. برای تعیین مشخصات مکانیکی صفحات گچ‌برگ، آزمون‌های مکانیکی شامل آزمون خمشی و فشاری به ترتیب بر اساس استانداردهای ASTM C473 و ASTM C367 انجام گرفت. آزمایش‌ها با استفاده از دستگاه SANTAM STM-150 در آزمایشگاه مصالح دانشگاه آزاد اسلامی واحد تفت صورت گرفت. نمونه‌های

۵- برنامه آزمایش

۵-۱- راه‌اندازی آزمایش

برای اندازه‌گیری جابه‌جایی‌های 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 [6] در کامپیوتر فرستاده شد. در انتها نمودار بار - جابه‌جایی برای هریک از نمونه‌ها ترسیم شد.

۵-۲- پروتکل بارگذاری

رژیم بارگذاری رفت‌وبرگشتی مورد استفاده در آزمایش‌ها بر اساس روش B در استاندارد ASTM E2126-7 [1] که در اصل برای استاندارد Iso 16670، تدوین شده است می‌باشد. بارگذاری شامل یک سیکل کامل در $1/25$ ، $2/5$ ، $5/5$ ، $7/5$ و $10/5$ و سه سیکل کامل در $20/40$ ، $40/60$ ، $60/80$ ، $80/100$ ، $100/120$ ، $120/140$ ، $140/160$ و $180/1$ از جابه‌جایی نهایی نمونه می‌باشد مگر اینکه زودتر شکست یا کاهش قابل ملاحظه‌ای در مقاومت پدید آید.

در روش B در استاندارد ASTM E2126-7 [1] آمده است که دامنه جابه‌جایی‌ها باید بر اساس کسری از جابه‌جایی نهایی در بارگذاری یک‌نواخت انتخاب شود. لیکن اگر این موضوع در این تحقیق اعمال می‌شد، به دلیل اینکه هر نمونه جابه‌جایی نهایی مخصوص خود را دارد، نمایش رژیم بارگذاری برای نمونه‌های مختلف متفاوت به نظر می‌آمد. این موضوع ایجاب می‌کند که برای تعالی نمونه‌ها از رژیم بارگذاری یکسان استفاده شود. بنابراین در این تحقیق از روش B ذکرشده در دامنه مستقل از بارگذاری یک‌نواخت استفاده شده است. در این تحقیق جابه‌جایی نهایی قاب‌ها، حداکثر جابه‌جایی نسبی واقعی طبقه می‌باشد. با توجه به ارتفاع قاب‌ها جابه‌جایی نهایی نمونه‌ها 60 میلی‌متر در نظر گرفته شده است.

۶- نتایج تست‌های آزمایشگاهی

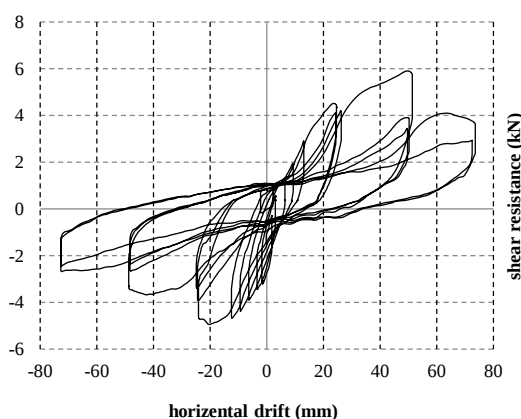
۶-۱- تست A

در این قاب از تغییر مکان‌های حداقل 9 میلی‌متر وجود اولین ترک‌ها اطراف بازشو مشاهده شد. به همراه اینکه در دور اول از جابه‌جایی‌های سیکل 24 میلی‌متر ترک‌های اطراف بازشو اتفاق افتاد. همچنین در تمامی قاب‌ها در جابه‌جایی‌های سیکل 24 میلی‌متر ترک‌های قطری در گوشه‌های چپ و راست کناف در قسمت بالا مشاهده شد. که در همین سیکل تعدادی از پیچ‌های اطراف بازشو به صورت کامل از اتصال کناف به قاب جدا شدند.

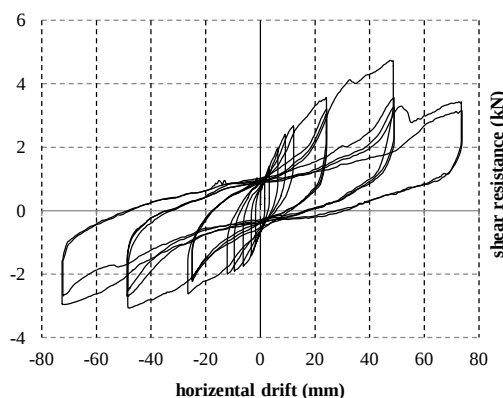
۶-۲- تست B

در این قاب ترک‌خوردگی در صفحات گچی در جابه‌جایی‌های بیش‌تر از 24 میلی‌متر شروع شده است. که در دور دوم از سیکل جابه‌جایی 24 میلی‌متر گسترش ترک در اطراف بازشو مشاهده شد. همچنین در جابه‌جایی‌های بیشتر از 30 میلی‌متر گشاد شدن سوراخ پیچ‌های اتصال صفحات گچی به قاب مشاهده شد. سپس در دور اول از سیکل جابه‌جایی 48 میلی‌متر بیرون‌زدگی پیچ‌های اتصال صفحات گچی اطراف بازشو مشاهده شد. و بعد از آن در دور دوم از سیکل جابه‌جایی 48 میلی‌متر کم‌انحراف موضعی بال استناد میانی مشاهده شد. در نهایت در دور سوم از سیکل 48 میلی‌متر کم‌انحراف کلی در استادهای میانی و کناری دیده شد. در این نوع قاب، کم‌انحراف کلی قاب و کاهش بار برداری قاب در تغییر مکان‌های کم‌تر از 60 میلی‌متر اتفاق افتاد. اما جداسازی کامل صفحات گچی از قاب در جابه‌جایی‌های بیش‌تر از 60 میلی‌متر مشاهده شد.

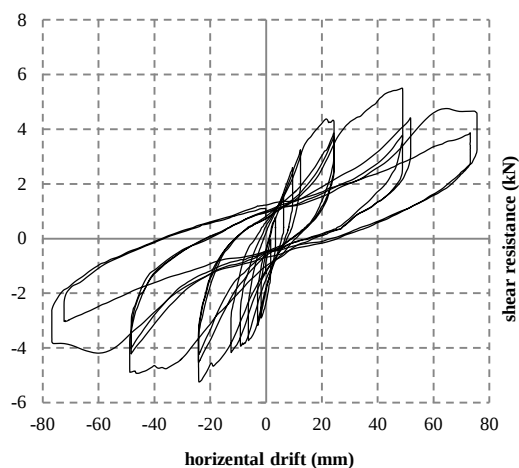
۷- نمودارهای آزمایشگاهی



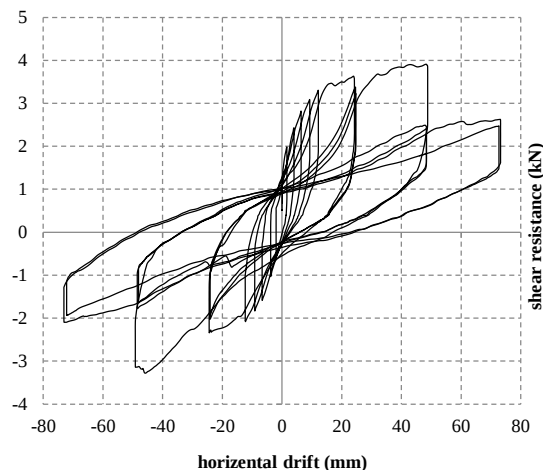
نمودار بار - تغییر مکان تست A1
Load-displacement curve of test A1



نمودار بار - تغییر مکان تست A2
Load-displacement curve of test A2



نمودار بار - تغییر مکان تست B3
Load-displacement curve of test B3



نمودار بار - تغییر مکان تست A3
Load-displacement curve of test A3

۸- بحث و مقایسه

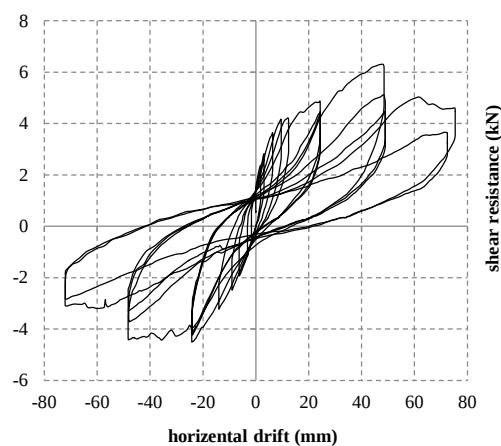
بر اساس نتایج حاصل از آزمایش‌های چرخه‌ای بر شش نمونه قاب فولادی سردنوردشده با پوشش گچ‌برگ، رفتار لرزه‌ای سیستم‌ها از نظر مقاومت نهایی، شکل‌پذیری، جذب انرژی و الگوی شکست مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت. هدف از این بخش، ارائه تفسیر مکانیکی و مقایسه عملکرد دو نوع آرایش بازشوی مرکزی بزرگ (مدل A) و دو بازشوی قائم قرینه با ابعاد کوچک‌تر (مدل B) در شرایط بارگذاری رفت‌وبرگشتی است.

۸-۱- رفتار کلی قاب‌ها

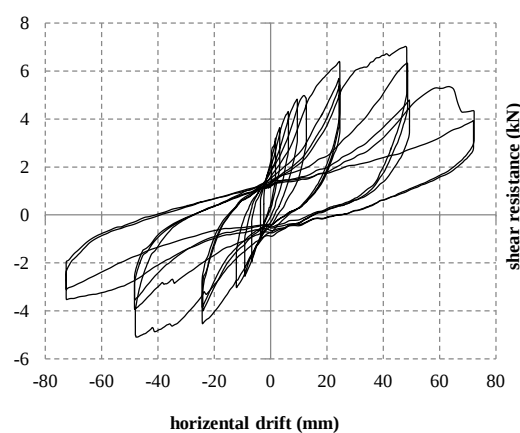
نتایج آزمایش‌ها نشان داد که هر دو گروه قاب در مراحل ابتدایی بارگذاری، رفتار خطی و سختی اولیه نسبتاً بالایی داشتند. با افزایش دامنه جابه‌جایی، ترک‌های اولیه در اطراف بازشوها ظاهر شده و به تدریج به نواحی میانی دیوار گسترش یافتند. در قاب‌های نوع A، تمرکز تنش در اطراف بازشوی مرکزی منجر به گسیختگی زودهنگام صفحات گچ‌برگ و جداشدگی پیچ‌ها از قاب شد، در حالی که در قاب‌های نوع B توزیع تنش یکنواخت‌تر بوده و فرآیند خرابی تدریجی‌تر اتفاق افتاد.

۸-۲- مقایسه مقاومت و شکل‌پذیری

میانگین مقاومت نهایی قاب‌های گروه A حدود ۴/۸۲ کیلونیوتن و برای گروه B حدود ۶/۲۵ کیلونیوتن به دست آمد که



نمودار بار - تغییر مکان تست B1
Load-displacement curve of test B1



نمودار بار - تغییر مکان تست B2
Load-displacement curve of test B2

شدند ولی تا مراحل پایانی بارگذاری (بیش از ۴۸ میلی‌متر جابه‌جایی) به گسیختگی کلی منجر نشدند. تنها در سیکل‌های انتهایی، کمناش موضعی بال استاد میانی و جداسازی محدود پیچ‌ها مشاهده گردید. بنابراین، قاب‌های نوع B با وجود داشتن دو بازشو، رفتار یکنواخت‌تر و پایدارتر از خود نشان دادند و شکست آن‌ها تدریجی و قابل پیش‌بینی‌تر بود.

۸-۵- مقایسه با تحقیقات پیشین

رفتار مشاهده‌شده در این پژوهش با یافته‌های مطالعات پیشین از جمله پژوهش‌های Serrette et al. [3]، Moen & Schafer [4] و Liu & Yu [5] مطابقت دارد؛ به گونه‌ای که همگی تأیید کرده‌اند کاهش ابعاد بازشو و تقارن هندسی آن باعث افزایش پایداری و شکل‌پذیری دیوار می‌شود. علاوه بر این، نتایج این تحقیق از نظر تأثیر چگونگی توزیع تنش و الگوی ترک‌زایی، با مطالعات اخیر Ostad et al. [7] در مورد دیوارهای بنایی دارای پوشش غیرسازه‌ای (گچ و ملات) نیز هم‌راستا است؛ زیرا در هر دو مورد، تداوم لایه پوششی و آرایش بازشوها نقش کلیدی در کنترل تمرکز تنش دارد.

به طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که افزایش تعداد بازشوها با ابعاد کوچک‌تر و آرایش قرینه در دیوارهای CFS موجب بهبود رفتار چرخه‌ای سیستم در برابر بارهای جانبی می‌شود.

این پیکربندی ضمن حفظ سختی جانبی، باعث افزایش مقاومت نهایی، جذب انرژی بیشتر، کاهش تمرکز تنش و افزایش دوام اتصالات پیچ به صفحات گچ‌برگ می‌شود.

در مقابل، وجود یک بازشوی بزرگ مرکزی باعث تمرکز تنش، گسیختگی موضعی زودهنگام و افت سریع مقاومت پس از حداکثر بار می‌شود.

بنابراین، از دیدگاه طراحی لرزه‌ای، استفاده از بازشوهای قرینه و کوچک‌تر در صفحات گچ‌برگ به جای بازشوی منفرد و بزرگ توصیه می‌شود تا رفتار کلی سیستم از حالت شکننده به شکل‌پذیر و پایدار تبدیل شود.

نشان‌دهنده افزایش حدود ۲۷ درصدی ظرفیت باربری در قاب‌های دارای دو بازشوی قرینه است.

میانگین تغییرمکان نهایی نیز از ۴۸/۱۲ میلی‌متر در قاب‌های نوع A به ۴۸/۲۰ میلی‌متر در قاب‌های نوع B افزایش یافت. این موضوع نشان می‌دهد که حضور دو بازشوی کوچک‌تر نه تنها باعث کاهش مقاومت نشده، بلکه به دلیل کاهش تمرکز تنش در مرکز دیوار، موجب افزایش شکل‌پذیری و ظرفیت جذب انرژی سیستم گردیده است.

۸-۳- تفسیر رفتار هیستریزس و جذب انرژی

منحنی‌های بار-تغییرمکان قاب‌های نوع A، رفتار هیستریزس با سطح بسته کوچک‌تر و افت مقاومت سریع را نشان می‌دهند؛ به عبارت دیگر، پس از رسیدن به حداکثر بار، کاهش ناگهانی مقاومت و بازشدگی حلقه‌های هیستریزس بیانگر رفتار ترد و شکننده است.

در قاب‌های نوع B، منحنی‌های هیستریزس گسترده‌تر بوده و سطوح محصور بین منحنی‌های بارگذاری و باربرداری، انرژی بیشتری را نشان می‌دهند. این رفتار حاکی از ظرفیت بالاتر جذب انرژی و میرایی مؤثرتر در قاب‌های دارای بازشوهای قرینه است. در واقع، افزایش تعداد بازشوها با ابعاد کوچک‌تر باعث توزیع بهتر تنش‌ها و کاهش تمرکز کرنش‌های موضعی در صفحات گچ‌برگ شده است.

۸-۴- تحلیل الگوی خرابی

در قاب‌های نوع A، گسیختگی معمولاً از گوشه‌های بازشو مرکزی آغاز شده و به صورت ترک‌های قطری در امتداد گوشه‌ها به سمت لبه‌های دیوار توسعه یافت. جداسازی پیچ‌ها از قاب و بیرون‌زدگی موضعی صفحات در همان سیکل‌های میانی بارگذاری (در حدود جابه‌جایی ۲۴ میلی‌متر) مشاهده شد. این نوع خرابی نشان‌دهنده تمرکز شدید تنش بر اثر ابعاد بزرگ بازشو و کاهش مسیر انتقال نیرو در مرکز دیوار است.

در قاب‌های نوع B، ترک‌ها ابتدا در لبه‌های بازشوها ظاهر

جدول ۳. نتایج استخراج شده از داده‌های آزمایشگاهی

Table 3. Results extracted from the laboratory test data

specimen		Ultimate strength (KN)	average	Ultimate Displacement (mm)	average
	A1	5.840		48.164	
A	A2	4.710	4.820	48.163	48.124
	A3	3.910		48.100	
	B1	6.303		48.160	
B	B2	7.021	6.253	48.060	48.203
	B3	5.493		48.403	



شکل ۴. مودهای خرابی نمونه‌های گروه A

Fig. 4. failure modes of A specimens

۹-۱- تأثیر آرایش بازشوها

قاب‌های دارای دو بازشوی قائم قرینه (مدل B) در مقایسه با قاب‌های دارای یک بازشوی مرکزی بزرگ (مدل A)، عملکرد لرزه‌ای بهتری از خود نشان دادند. وجود دو بازشوی کوچک‌تر موجب توزیع یکنواخت‌تر تنش، کاهش تمرکز کرنش و افزایش توان جذب انرژی در چرخه‌های بارگذاری شد.

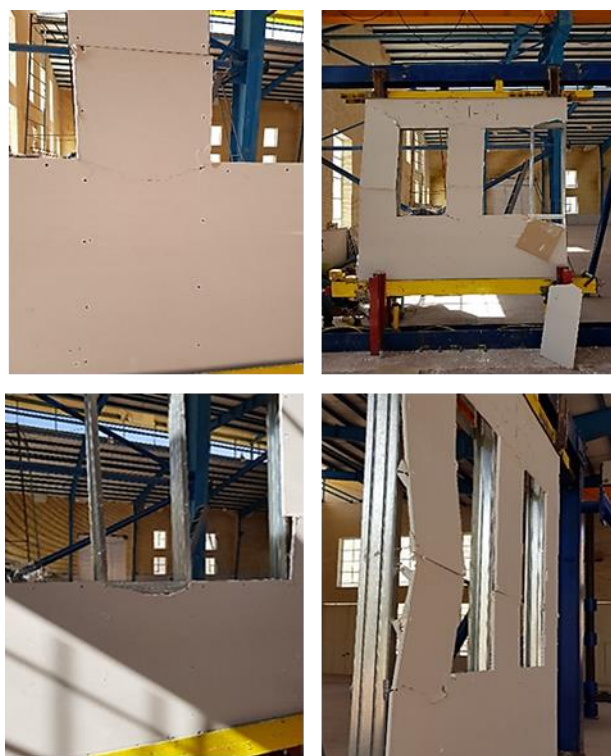
۹- نتیجه‌گیری و ملاحظات آزمایشگاهی

بر اساس نتایج آزمایش‌های چرخه‌ای انجام شده بر قاب‌های فولادی سردنورد شده (LSF) با پوشش گچ‌برگ و آرایش‌های مختلف بازشو، نکات زیر قابل جمع‌بندی است:

جدول ۴. مقایسه پارامترهای رفتاری قاب‌های سرد نورد شده گروه A و B

Table 4. Comparison of Behavioral Parameters of Cold-Formed Steel Frames in Groups A and B

specimen		Ultimate strength (KN)	Initial hardness (KN/mm)	Reduce strength (%)	Absorbed energy (KN.mm)
A	A1	5.840	0/06	13/7	213/409
	A2	4.710	0/38	19/5	171/034
	A3	3.910	0/02	17/2	162/554
B	B1	6.303	0/37	15/3	254/459
	B2	7.021	0/34	16/1	270/055
	B3	5.493	0/87	14/3	253/779



شکل ۵. مودهای خرابی نمونه‌های گروه B

Fig. 5. failure modes of B specimens

نتیجه، استفاده از آرایش قرینه بازشوها در طراحی دیوارهای گچی قاب‌های LSF می‌تواند پایداری جانبی و دوام اتصالات را بهبود دهد.

۴-۹- نقش میان‌قاب‌ها در سیستم LSF

در سیستم‌های سازه‌ای Light Steel Frame (LSF)، انتقال نیروهای جانبی عمدتاً از طریق دیوارهای میان‌قاب با پوشش گچ‌برگ یا صفحات OSB صورت می‌گیرد.

در این سیستم‌ها، صفحات گچی علاوه بر نقش معماری و جداسازی فضاها، با مشارکت در سختی برشی دیوار، به عنوان

۹-۲- رفتار شکست و تمرکز تنش

در قاب‌های نوع A تمرکز تنش در ناحیه بازشوی مرکزی باعث جداشدگی زودهنگام پیچ‌ها و گسیختگی موضعی صفحات شد. در مقابل، قاب‌های نوع B شکست تدریجی‌تری داشتند و ترک‌ها در مراحل پایانی بارگذاری به گسیختگی کلی منجر شدند که نشان‌دهنده رفتار شکل‌پذیرتر سیستم است.

۹-۳- بهبود عملکرد لرزه‌ای:

افزایش تعداد بازشوها همراه با کاهش ابعاد آن‌ها باعث تغییر رفتار سیستم از حالت ترد و شکننده به حالت شکل‌پذیرتر شد. در

در این تحقیق لحاظ نشده و می تواند در مطالعات بعدی بررسی شود.

در مجموع، نتایج نشان داد که آرایش قرینه بازشوها با ابعاد کوچک تر در دیوارهای گچی قاب های LSF، موجب بهبود رفتار چرخه ای، افزایش مقاومت نهایی و شکل پذیری سیستم می شود. با این حال، به دلیل محدودیت های ذکر شده، یافته ها باید در قالب نتایج آزمایشگاهی اولیه تفسیر شوند.

برای توسعه مدل های طراحی واقعی، انجام آزمایش های تکمیلی شامل جداسازی پانل، بررسی اثر پوشش دوطرفه و تحلیل های عددی پیشرفته ضروری است.

این نتایج می تواند مبنای مناسبی برای بهینه سازی طراحی لرزه ای سیستم های LSF در پروژه های سبک سازی و مقاوم سازی شهری باشد.

قدردانی

بدین وسیله مراتب سپاس و قدردانی خود را از مدیریت آزمایشگاه سازه و زلزله دانشگاه آزاد اسلامی واحد تفت، جناب آقای دکتر محمدرضا جواهری تفتی به دلیل همکاری های ارزشمند در انجام این پژوهش ابراز می دارد.

تعارض منافع

هیچ گونه تعارض منافع از سوی نویسندگان گزارش نشده است.

سهم نویسندگان

ایده پردازی و نظارت بر روند پژوهش توسط دکتر محمدرضا جواهری تفتی انجام شد.

انجام آزمایش ها، تحلیل داده ها و نگارش اولیه مقاله توسط احسان حاجی سلطانی صورت گرفت.

هر سه نویسنده نسخه نهایی مقاله را خوانده و تأیید کرده اند.

منابع مالی

این پژوهش هیچ گونه حمایت مالی از سوی نهادها یا سازمان های بیرونی دریافت نکرده و تمامی هزینه ها توسط نویسندگان تأمین شده است.

بیانیه هوش مصنوعی

در این مقاله از ابزارهای هوش مصنوعی استفاده نشده است.

جزئی از سیستم مقاوم در برابر بار جانبی عمل می کنند.

نتایج این پژوهش نشان داد که رفتار چرخه ای قاب های LSF به طور محسوس تحت تأثیر پیوستگی میان قاب ها و چگونگی اتصال صفحات گچی به قاب قرار دارد؛ به طوری که جداشدگی زود هنگام پیچ ها باعث افت سریع مقاومت سیستم می شود.

بنابراین، در طراحی لرزه ای این نوع سیستم ها، نقش میان قاب ها نباید فقط غیرسازه ای در نظر گرفته شود، بلکه اثر ترکیبی قاب و پانل باید مدلسازی و کنترل شود.

۵-۹- پیشنهاد برای مطالعات تکمیلی

با توجه به مشاهدات آزمایشگاهی، پیشنهاد می شود در پژوهش های آتی:

۱- تأثیر جداسازی پانل از قاب فولادی بررسی شود تا میزان مشارکت واقعی پانل گچی در سختی و مقاومت جانبی سیستم مشخص شود. مقایسه نتایج دو حالت (قاب بدون پانل و قاب دارای پانل) می تواند دید دقیق تری نسبت به نقش سازه ای صفحات گچی ارائه دهد.

۲- اثر نوع اتصال پیچ، فاصله پیچ ها و ضخامت پانل در رفتار چرخه ای مطالعه شود، زیرا این پارامترها به طور مستقیم بر انتقال نیرو و تمرکز تنش در نواحی بازشو تأثیرگذارند.

۳- استفاده از پوشش دوطرفه گچ برگ و بررسی رفتار در مقیاس واقعی ساختمان پیشنهاد می شود تا داده های حاصل قابلیت تعمیم به طراحی لرزه ای در پروژه های اجرایی را داشته باشند.

۴- مدلسازی عددی با نرم افزارهای المان محدود مانند ABAQUS انجام شود تا اثر شکل بازشو و موقعیت آن در رفتار غیرخطی سیستم به صورت پارامتریک مورد تحلیل قرار گیرد.

۶-۹- ملاحظات و محدودیت ها

تعداد نمونه های آزمایش محدود به دو مدل اصلی (A و B) با سه تکرار از هر مدل بوده است. پس نتایج بیشتر بیانگر روند کلی رفتار هستند تا داده های آماری قطعی.

بارگذاری ها به صورت شبه استاتیکی چرخه ای انجام شد و آثار دینامیکی واقعی زلزله در نظر گرفته نشد.

پوشش گچ برگ تنها در یک طرف قاب نصب شد و ممکن است رفتار دوطرفه در شرایط واقعی نتایج متفاوتی ایجاد کند. اثر پارامترهای اجرایی مانند فاصله پیچ ها و تیرانس های نصب

References

- [1] ASTM, 2007. *ASTM E2126-07a: Standard test methods for cyclic (reversed) load test for shear resistance of walls for buildings*. West Conshohocken, PA: ASTM International. p.13.
- [2] Schafer, B.W., Peterman, K.D., Lee, J. and Madsen, R., 2006. Cyclic testing of cold formed steel framed shear walls with gypsum board and wood structural panel sheathing. *Thin-Walled Structures*, 44(2), pp.122-134.
- [3] Serrette, R., Ennis, D. and Dinehart, D., 2002. *Cyclic Shear Wall Tests on Cold-Formed Steel Framing*. Final Report. Santa Clara University, CA.
- [4] Moen, C.D. and Schafer, B.W., 2008. Finite Element Modeling of Cold-Formed Steel Framed Shear Walls. *Journal of Structural Engineering*, 134(5), pp.758-768.
- [5] Liu, F. and Yu, C., 2010. Parametric study on cold-formed steel framed shear walls with openings. In: *Proceedings of the 20th International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures*. Missouri University of Science and Technology.
- [6] LabVIEW, 2007. *LabVIEW Signal Express*. 2.0 ed. Austin, Texas: National Instruments Corporation.
- [7] Ostad, D., Shafaei, J. and Alaei, F.J., 2025. Experimental evaluation of diagonal tension test on hollow clay block wallettes with different configurations of non-structural materials (cement and plaster). *Structures*, 79, p.109418.
- [8] Shafaei, J. and Ostad, D., 2023. Effect of boundary conditions on the out-of-plane seismic behavior of masonry infill walls considering in-plane-out-of-plane interaction. *Journal of Ferdowsi Civil Engineering*, 37(1), pp.19-44.
- [9] Ostad, D. and Shafaei, J., 2023. Seismic performance of masonry infill walls with and without openings considering in-plane and out-of-plane interaction and proposing reduction factors for stiffness and ultimate strength. *Journal of Civil and Environmental Engineering, University of Tabriz*, 54(1), pp.63-83.
- [10] Ostad, D. and Shafaei, J., 2021. Comparative analytical study of different modeling methods for masonry infill walls considering in-plane and out-of-plane interaction. *Journal of Structural Engineering and Construction*, 8(3), pp.96-113.
- [11] Ostad, D. and Shafaei, J., 2021. Analytical study on the effect of various parameters on the seismic behavior of RC frames with masonry infill walls. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 53(3).

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم؟

Haji Soltani, E., Ronagh, H.R. and Javaheri Tafti, M.R., 2026. Experimental Investigation of the Effect of Number and Configuration of Openings in Gypsum Boards on the Seismic Performance of Cold-Formed Steel Frames. *Modares Civil Engineering journal*, 26(4), pp.7-18.

