

## Capacity Assessment of Cold Formed Steel Shear Walls Using Numerical Modeling and Regression Surrogate Model

Shahin Lale Arefi<sup>1\*</sup> , Mahdi Bitarafan<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Department of Civil Engineering, Esfarayen University of Technology, Esfarayen, Iran

<sup>2</sup> International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES), Tehran, Iran

### ARTICLE INFO

#### Article Type

Original Research

#### Article History

Received: January 07, 2026

Revised: February 20, 2026

Accepted: February 21, 2026

ePublished: April 23, 2026

### ABSTRACT

Cold formed steel structures, known for their efficiency, cost-effectiveness and environmental benefits, play a pivotal role in meeting the needs of societies for durable, cost-effective and environmentally friendly structures. However, what ensures its stability and safety against lateral forces are steel shear walls. In this paper, a finite element model was developed based on laboratory data, which includes 3D deformable shell elements for columns, beams and steel cladding. In previous studies, the issue of bolts and their spacing, as well as the effect of steel sheet thickness, has not been addressed. The aim of this paper is to investigate the factors affecting steel shear walls through the analysis of data from the finite element analysis of CFS shear walls. Then, using a regression substitution model, the effects of the parameters of plate thickness ( $t$ ) and edge screw spacing ( $s$ ) on the maximum shear capacity, displacement, initial stiffness and energy dissipation of the investigated escapement were investigated. The results showed that the maximum shear capacity increases nonlinearly with  $t$  and decreases with  $s$ . To evaluate the proposed model, the performance metrics  $R^2=0.9816$ ,  $MAE=12.42$ , and  $RMSE=17.28$  were used. These values indicate a very good fit between the model predictions and the results obtained from numerical simulations and experimental data. The findings provide practical tools for optimizing CFS shear walls, improving seismic performance and filling gaps in key parameters. Finally, the model output was converted into a design plan that allows for direct estimation of the shear wall capacity in each combination.

**Keywords:** Cold formed steel structures, shear wall, connections, numerical analysis, regression model.

### How to cite this article

Lale Arefi Sh, Bitarafan M, Capacity Assessment of Cold Formed Steel Shear Walls Using Numerical Modeling and Regression Surrogate Model. Modares Mechanical Engineering; 2026;26(06):451-462.

\*Corresponding author's email: [sh.arefi@esfarayen.ac.ir](mailto:sh.arefi@esfarayen.ac.ir)

\*Corresponding ORCID ID: 0000-0002-3595-1303.



Copyright© 2025, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.



## ارزیابی ظرفیت دیوارهای برشی فولادی سردنورد شده با استفاده از مدل سازی عددی و مدل جانشین رگرسیونی

شاهین لعل عارفی<sup>۱\*</sup>، مهدی بیطرفان<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> گروه مهندسی عمران، مجتمع آموزش عالی فنی و مهندسی اسفراین، اسفراین، ایران  
<sup>۲</sup> پژوهشگاه سازه، پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران

### چکیده

سازه های فولادی سرد نورد شده که به دلیل کارایی، مقرون به صرفه بودن و مزایای زیست محیطی شناخته شده اند، نقش مهمی در تأمین نیازهای جوامع برای سازه های مقاوم ایفا می کند. با این حال، آنچه پایداری و ایمنی آن را در برابر نیروهای جانبی همچون زلزله و باد تضمین می نماید، دیوارهای برشی فولادی است. در این مقاله یک مدل اجزای محدود بر اساس داده های آزمایشگاهی توسعه یافت، که شامل المان های پوسته تغییر شکل پذیر سه بعدی برای ستونک ها، تیرک ها و روکش فولادی است. در مطالعات قبلی به موضوع بررسی پیچ ها و فواصل آنها و همچنین تأثیر ضخامت ورقهای فولادی پرداخته نشده است. هدف این مقاله، بررسی عوامل تأثیرگذار بر روی دیوارهای برشی فولادی از طریق تجزیه و تحلیل داده های ناشی از تحلیل اجزای محدود دیوارهای برشی CFS است. در ادامه با استفاده از مدل جانشینی رگرسیونی اثرات پارامترهای ضخامت ورق (t) و فاصله پیچ لبه (s) بر ظرفیت برشی ماکزیمم، جابجایی، سختی اولیه و اتلاف انرژی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد ظرفیت برشی ماکزیمم به طور غیرخطی با t افزایش و با s کاهش می یابد. جهت ارزیابی مدل ارائه شده از پارامترهای  $RMSE = 17.28$ ،  $MAE = 12.42$ ،  $R^2 = 0.9816$  استفاده گردید که این اعداد نشان دهنده کیفیت خوب برازش مدل با نتایج حاصل از مدل سازی عددی و آزمایشگاهی می باشد. یافته ها ابزارهای عملی برای بهینه سازی دیوارهای برشی CFS ارائه می دهند، عملکرد لرزه ای را بهبود می بخشند و شکاف های موجود را در پارامترهای کلیدی پر می کنند. در نهایت خروجی مدل به یک نقشه طراحی تبدیل شد که امکان برآورد مستقیم ظرفیت دیوارهای برشی در هر ترکیب (t,s) را فراهم می نماید.

**کلیدواژه ها:** سازه های فولاد سرد نورد شده، دیوار برشی، اتصالات، تحلیل عددی، مدل رگرسیون.

### اطلاعات مقاله

#### نوع مقاله

مقاله پژوهشی

#### تاریخچه مقاله

دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۱۷

بازنگری: ۱۴۰۴/۱۲/۰۱

پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۰۲

ارائه آنلاین: ۱۴۰۵/۰۲/۰۳

### نحوه ارجاع به این مقاله

شاهین لعل عارفی، مهدی بیطرفان، ارزیابی ظرفیت دیوارهای برشی فولادی سردنورد شده با استفاده از مدل سازی عددی و مدل جانشین رگرسیونی، مهندسی مکانیک مدرس. ۴۶۲-۴۵۱(۰۶):۲۶(۰۶)۱۴۰۵

\*پست الکترونیکی نویسنده عهده دار مکاتبات: sh.arefi@esfarayen.ac.ir

\*شناسه ارکید نویسنده عهده دار مکاتبات: 0000-0002-3595-1303



## ۱- مقدمه

دادند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که رفتار کلی صفحات ساخته شده از تخته سه لا و نئوپان بسیار به هم شبیه بوده در بعضی از نمونه‌ها مقاومت نهایی در صفحات ساخته شده از تخته سه لا کمی بالاتر بوده و کاهش فاصله بین پیچ‌ها افزایش قابل توجهی در مقاومت برشی پدید می‌آورد. سلنکوویچ و همکاران [۱۸] در سال ۲۰۰۰ نتایج حاصل از آزمایش‌های خود را بر روی شانزده دیوار برشی با و بدون بازشو، تحت بارهای استاتیکی و چرخه‌ای ارائه کردند. هدف آن‌ها از این آزمایش‌ها بررسی اثر ابعاد بازشوها بر عملکرد دیوارهای برشی بوده است. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که دیوارهای طویل برشی بدون بازشو به صورت چشمگیری سخت‌تر و قوی‌تر از دیوارهای برشی با بازشو هستند اما شکل پذیری کمتری نسبت به آن‌ها دارند.

در سال ۲۰۰۳ فیورینو [۱۹] آزمایش‌هایی به منظور بررسی چگونگی انتقال بارهای جانبی از دیافراگم سقف به دیوارهای برشی انجام دادند. در این تحقیقات به بررسی تأثیر جزئیات اجرایی مانند سخت کننده‌ها و تیرهای انتهایی، جزئیات مهاربندی، اتصال بین تیرهای سقف و ترک‌های بالای پایه‌ها پرداخته شده است. برانستون و همکاران در سال ۲۰۰۶ به توسعه روش طراحی دیوارهای برشی قاب فولادی سبک با پانل‌های چوبی پرداختند [۲۰]. آنها برنامه آزمایشی گسترده‌ای برای ایجاد پایگاه داده‌ای از اطلاعات دیوارهای برشی انجام دادند و از رویکرد تحلیل الاستیک-پلاستیک انرژی معادل (EEEE) برای استخراج پارامترهای کلیدی مانند مقاومت برشی اسمی، سختی الاستیک، بیش‌استحکام و شکل‌پذیری استفاده کردند. در نهایت، روش پیشنهادی شامل مقادیر مقاومت اسمی و سختی الاستیک واحد بر اساس برنامه پیچ‌های محیطی و نوع پوشش بود، که با بارهای بادی کد ملی ساختمان کانادا ۲۰۰۵ کالیبره شد و عوامل بیش‌استحکام برای طراحی لرزه‌ای مبتنی بر ظرفیت ارائه داد.

گونالان و ماهدردان در سال ۲۰۱۳ به مدل‌سازی المان محدود دیوارهای باربر فولادی سردنورد تحت شرایط آتش پرداختند [۲۱]. آنها مدل‌های ABAQUS را برای شبیه‌سازی رفتار حرارتی و ساختاری دیوارهای LSF با پوشش‌های مختلف و عایق خارجی توسعه دادند و عملکرد را تحت منحنی‌های آتش استاندارد ارزیابی کردند. در نهایت، مدل‌ها رتبه مقاومت آتش را با دقت ۵ دقیقه پیش‌بینی کردند، اثرات کمناش محلی و خمش حرارتی را در نظر گرفتند، و نشان دادند که سیستم پنل کامپوزیت جدید مقاومت آتش را نسبت به عایق حفره‌ای بهبود می‌بخشد، که این مدل‌سازی برای دیوارهای برشی LSF در شرایط آتش‌سوزی قابل اعمال است. لیو و همکاران در سال ۲۰۲۳ به مطالعه عددی عملکرد لرزه‌ای دیوارهای برشی فولادی سردنورد با پوشش فولادی و گچی پرداختند [۲۲]. آنها شبیه‌سازی‌های عددی نمونه‌ها تحت بارگذاری یکنواخت و چرخه‌ای انجام دادند و تحلیل لرزه‌ای مدل‌های ساختمان میان‌طبقه برای بررسی تأثیر دیوار برشی پیشنهادی بر عملکرد ساختمان را ارزیابی کردند. در نهایت، روش مدل‌سازی سختی و ظرفیت برشی دیوار را به طور مؤثر شبیه‌سازی کرد، و دیوار پیشنهادی سختی ساختاری را به طور قابل توجهی افزایش داد و عملکرد لرزه‌ای ساختمان را تحت زلزله بهبود بخشید. یانگ و همکاران در سال ۲۰۲۴ به بررسی رفتار لرزه‌ای قاب فولادی سبک با دیوار کامپوزیت اسکلت فولادی نازک بتن سبک پرداختند [۲۳]. آنها

در دنیای ساخت‌وساز معاصر، سیستم قاب‌های فولادی سبک سردنورد شده (Cold Formed Steel - CFS) به عنوان یکی از مهمترین انواع سازه‌ها، نقش محوری در تأمین نیازهای جوامع برای ساختمان‌های مقاوم، مقرون‌به‌صرفه و دوست‌دار محیط زیست ایفا می‌کند. با این حال، علی‌رغم مزایای متعدد سیستم CFS، بررسی خرابی‌های احتمالی در این سازه‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، زیرا مقاطع نازک و سبک فولادی آن‌ها می‌تواند در برابر بارهای لرزه‌ای، باد یا حتی بارهای محلی (مانند کمناش محلی یا پیچشی) حساس‌تر باشد و منجر به خرابی پیش‌رونده شود. شناسایی خرابی در انواع سازه‌ها موضوعی است که مورد توجه بسیاری از محققین بوده است [۸-۱]. از طرفی سازه‌های فولادی سبک سردنورد شده، بر پایه مقاطع فولادی نازک و سبک استوار است که امکان اجرای سریع، کاهش وزن کلی سازه و افزایش بهره‌وری را فراهم می‌آورد و وقوع خرابی در آنها نیز محتمل است. با این حال، آنچه پایداری و ایمنی آن را در برابر نیروهای جانبی همچون زلزله و باد تضمین می‌نماید، دیوارهای برشی فولادی (Steel Shear Walls) است.

این دیوارها، به عنوان اجزای کلیدی سیستم مقاومت جانبی، بارهای لرزه‌ای را به طور کارآمد به پی منتقل کرده و از تغییر شکل‌های بیش از حد جلوگیری می‌کنند، که این ویژگی در نواحی پرخطر لرزه‌ای مانند ایران، اهمیت استراتژیک دارد. علاوه بر عملکرد لرزه‌ای برتر، دیوارهای برشی فولادی در سیستم CFS مزایایی نظیر عایق‌بندی حرارتی و صوتی مؤثر، دوام طولانی‌مدت و کاهش هزینه‌های نگهداری را عرضه می‌دارند، که این عوامل آن‌ها را به گزینه‌ای بهینه برای ساختمان‌های مسکونی، تجاری و صنعتی تبدیل کرده است [۹-۱۱]. تحقیقات اخیر نشان می‌دهد که این سیستم‌ها می‌توانند تغییر شکل‌های جانبی را تا ۵۰-۷۹ درصد کاهش دهند، که این امر بر کارایی آن‌ها در سازه‌های بلندمرتبه تأکید دارد. در این مقاله، با بررسی دقیق‌تر ساختار، رفتار مکانیکی و کاربردهای عملی دیوارهای برشی فولادی در سیستم CFS به تبیین نقش حیاتی آن‌ها در تحولات آینده صنعت ساخت‌وساز پرداخته شده است. در این سامانه سازه‌ای، علاوه بر بادبندهای فلزی، برای تحمل نیروهای جانبی، از دیوارهای برشی نیز استفاده می‌شود. در گذشته تحقیقات زیادی بر روی قاب‌های فولادی سرد نورد شده با دیوار برشی صورت گرفته است که در بیشتر آن‌ها جنس صفحه میانی از چوب یا گچ بود و تحقیقات محدودی بر روی این سامانه با صفحات فلزی صورت گرفته است. متغیرها و عوامل تأثیرگذار بر رفتار این سامانه شامل ضخامت صفحه، نسبت ارتفاع به عرض دیوار، فاصله پیچ‌ها و نوع بارگذاری می‌باشند [۱۶-۱۲]. در این پژوهش تمرکز بر روی ارزیابی تأثیر ضخامت، اعضای قاب و صفحه میانی و فاصله پیچ‌ها در مقاومت دیوارهای برشی دیوارهای سرد نورد شده می‌باشد. در زمینه دیوارهای برشی فولادی تحقیقات مختلفی انجام شده است که در ادامه به بررسی آنها پرداخته شده است.

در سال ۱۹۹۶ سرت و همکاران [۱۷] بیست و چهار آزمایش تحت بارهای استاتیکی و شش آزمایش تحت بارهای چرخه‌ای با صفحات میان قابی از جنس تخته‌های سه لایه‌ای و نئوپان انجام

محدود پایه از دیوار برشی مرجع ساخته و در چارچوب بارگذاری استاندارد، با نتایج آزمایشگاهی متناظر صحت‌سنجی شد تا اطمینان حاصل شود مدل عددی رفتارهای کلیدی (منحنی نیرو-جابجایی، الگوی کمانش/خرابی و ظرفیت پیک) را به‌درستی بازتولید می‌کند. سپس با ثابت نگه‌داشتن سایر پارامترها، یک مطالعه پارامتری روی دو متغیر اصلی طراحی یعنی ضخامت ورق روکش  $t$  و فاصله پیچ لبه  $s$  انجام گرفت و از پاسخ هر مدل، شاخص‌های مهندسی شامل ظرفیت پیک  $V_{max}$ ، جابجایی متناظر با پیک  $\delta_{peak}$ ، سختی اولیه  $K_0$  و انرژی شکست استخراج شد.

برای تعمیم‌پذیری نتایج و ارائه ابزاری ساده برای انتخاب ضخامت و گام پیچ، یک مدل جانشین رگرسیونی فیزیک‌محور برای  $V=V(t,s)$  تدوین شد که ضمن رعایت روندهای فیزیکی (افزایش ظرفیت با افزایش  $t$  و کاهش ظرفیت با افزایش  $s$ )، برهم‌کنش  $t/s$  و خمیدگی نسبت به  $t$  را نیز پوشش می‌دهد. به‌منظور استفاده مستقیم در طراحی، ظرفیت‌ها به فاصله مرجع  $S_{ref}=50.8$  mm نرمال‌سازی شد و یک منحنی تابع ضخامت  $V_s=50.8$  (t) برای غربالگری اولیه استخراج گردید؛ بر اساس این منحنی، جدول طراحی برای ضخامت موردنیاز در برابر ظرفیت هدف تنظیم شد. کیفیت مدل جانشین با معیارهایی مانند  $R^2$  و MAE ارزیابی و یکنواختی رفتاری آن (عدم کاهش ظرفیت با افزایش ضخامت و عدم افزایش کاذب با افزایش فاصله پیچ) کنترل شد. در پایان، دامنه اعتبار نتایج مطابق بازه داده‌ها (ضخامت‌ها و فواصل پیچ بررسی‌شده) به‌صراحت گزارش شده است تا استفاده خارج از محدوده کالیبراسیون به‌درستی مدیریت شود.

## ۲-۱- هندسه، اجزا و پیکربندی المان محدود

مدل اجزای محدود این پژوهش بر پایه آزمایش‌های آقای یو [۲۶] در دانشگاه تگزاس توسعه داده شده است. فرآیند شبیه‌سازی به شرح زیر است: یک دیوار ۸ فوتی از نوع 350s150-43 مدل‌سازی شد. مقطع C به‌کاررفته در دیوار دارای عرض بال ۱/۵ اینچ، ارتفاع جان ۳/۵ اینچ و ضخامت ۰/۰۴۳ اینچ است. برای تیرهای کلاف از 350T150-43 استفاده شد که به‌دلیل نداشتن لبه‌ها با ستونک‌ها (Studs) تفاوت دارند. صفحه میانی (روکش) 0.033 اینچ ضخامت دارد و فاصله پیچ‌های خودحفر که این صفحه را به ستونک‌ها و تیرها متصل می‌کند ۶ اینچ در نظر گرفته شد. برای مقابله با نیروهای برکنش (uplift)، از مهارکشی S/HD10S استفاده شد.

برای مدل‌سازی تمامی اجزای دیوار برشی (از پروفیل‌های ستونک و تیر، صفحه میانی چارچوب و تقویت‌های تحتانی) نرم‌افزار ABAQUS اجزا را به‌صورت اجسام سه‌بعدی تغییرشکل‌پذیر از نوع پوسته برون‌ریز (Extrusion Shell) در نظر گرفته است. همه اجزا به‌صورت مجزا نشان داده شده‌اند تا ساختار کامل دیوار برشی قابل مشاهده باشد. در مدل اجزای محدود سازه‌های سردنورد شده، المان پوسته‌ای به کار گرفته شده است.

چهار نمونه مقیاس کامل شامل یک قاب LSF و سه LSF-TSLC با روش‌های نصب دیوار و توزیع اسکلت متفاوت را تحت بارگذاری چرخه‌ای آزمایش کردند و ویژگی‌هایی مانند منحنی‌های هیستریزس، حالت شکست، ظرفیت باربری نهایی، عملکرد تغییرشکل، کاهش سختی و اتلاف انرژی را ارزیابی کردند. در نهایت، LSF-TSLC نسبت به LSF ظرفیت باربری نهایی و سختی را به ترتیب ۲.۱ و ۵.۱ برابر افزایش داد، و روش محاسبه ظرفیت باربری نهایی بر اساس مدل پلاستیک و Strut-and-Tie پیشنهاد شد.

نقی‌پور و همکاران در سال ۲۰۲۵ به بررسی عددی عملکرد لرزه‌ای دیوارهای برشی صفحه فولادی تقویت‌شده با تقویت‌کننده‌های صلیبی و دایره‌ای پرداختند [۲۴]. آنها مدل‌های المان محدود قاب‌های سه‌دهانه پنج‌طبقه را در ANSYS توسعه دادند و اثرات تعداد و پیکربندی تقویت‌کننده‌ها را با تحلیل‌های پوش‌آور و بارگذاری چرخه‌ای ارزیابی کردند. در نهایت، دیوارهای با تقویت‌کننده‌های دایره‌ای شاخص شکل‌پذیری ۲۹.۴۱ نشان دادند، در حالی که صلیبی‌ها ظرفیت برشی بالاتری ۸۱۵ کیلونیوتن داشتند، و مدل هیبریدی سختی حداکثری ۹۲۱.۵ کیلونیوتن بر میلیمتر ارائه کرد، با بهینه‌سازی نشان‌دهنده حداکثر اتلاف انرژی با چهار تقویت‌کننده دایره‌ای عمودی. فیورینو و همکاران در سال ۲۰۲۵ به بررسی تجربی عملکرد لرزه‌ای دیوارهای برشی فولادی سبک با پوشش گچی پرداختند [۲۵]. در نهایت، دیوارها به طور مداوم در اتصالات پیچ پوشش گچی به قاب شکست خوردند، که رفتار اتلافی مورد نظر را تأیید کرد، و تأثیر پارامترهایی مانند بارگذاری چرخه‌ای، فاصله پیچ‌ها و نسبت ابعاد دیوار بر عملکرد لرزه‌ای برجسته شد.

همانطور که مشاهده می‌شود در مطالعات قبلی مدل طراحی پیوسته و فیزیک‌محور مبتنی بر اجزای محدود صحت‌سنجی شده ارائه نشده است. هدف این مقاله، بررسی عوامل تاثیرگذار بر روی دیوارهای برشی فولادی از طریق تجزیه و تحلیل داده‌های ناشی از تحلیل اجزای محدود دیوارهای برشی فولادی سرد نورد شده و ارائه ابزار گرافیکی بر پایه مدل رگرسیونی قابل استفاده مستقیم در طراحی است.

## ۲-۲ روش تحقیق

پژوهش حاضر بر پایه یک چارچوب عددی برای تحلیل درون‌صفحه‌ای دیوارهای برشی فولادی سردنورد (CFS) تدوین شده است. ابتدا مدل اجزای محدود دیوار برشی مرجع ساخته می‌شود و سناریوی بارگذاری یکنواخت (مونوتونیک) مطابق استاندارد آزمایشگاهی رایج اعمال می‌گردد. پس از اطمینان از کفایت مدل، مطالعه پارامتری برای ضخامت ورق روکش ( $t$ ) و فاصله پیچ لبه ( $s$ ) اجرا و شاخص‌های پاسخ استخراج می‌شود. در گام نهایی، یک مدل جانشین رگرسیونی برای  $V=V(t,s)$  به‌منظور تولید نمودار طراحی ارائه می‌گردد. این پژوهش با هدف کمی‌سازی اثر ضخامت ورق روکش و فاصله پیچ بر ظرفیت برشی دیوارهای فولادی سردنورد طراحی شده است. رویکرد در نظر گرفته شده یک زنجیره منظم «مدل‌سازی عددی-استخراج شاخص‌ها-مدل جانشین» است که هم قابلیت تبیین فیزیکی دارد و هم برای طراحی عملی قابل استفاده است. در این راستا ابتدا یک مدل اجزای

جدول ۲ نیروی بیرون‌کنی اتصالات پیچی در قاب فولادی سردنورد شده

Table 2 Pull-out strength of screw connections in the cold-formed steel frame

Connection type	Sheet thickness (in)	Pull-out strength (lb)
Track-to-stud connection	0.033	0.043
Stud-to-stud connection	43.4	47.6
Infill sheet-to-track connection	53.8	55.1
Infill sheet-to-stud connection	٪27	٪29

جدول ۳ نتایج آنالیز همگرایی دیوار برشی فولادی

Table 3 Results of the convergence analysis for the steel shear wall

Sample	Loading Condition	Shear Force at Support (lb)	Variation
1-inch mesh	0.4 in. displacement in Z-direction	32,767.2	-
0.5-inch mesh	0.4 in. displacement in Z-direction	32,737	<1%

### • تعیین اندازه مش

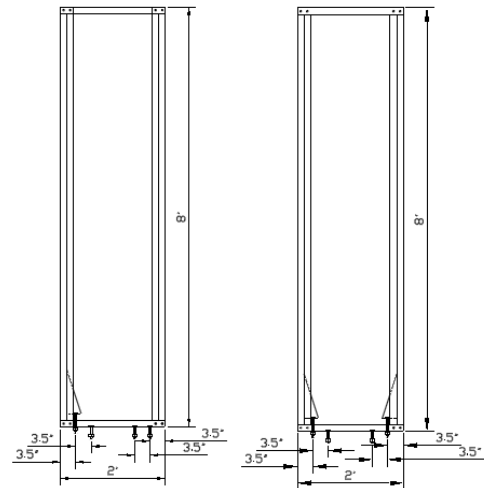
یکی از مهم‌ترین گام‌ها در مدل‌سازی اجزای محدود، تعیین اندازه مش است. مش با المان‌های چهاروجهی (Tetrahedron) و نیز المان‌های مکعبی ساختاری (HEX) از نوع Stress 3D و مرتبه هندسی خطی تولید شد. برای هر جزء از دیوار برشی مش مناسب تعریف گردید. تعیین مش بر پایه تحلیل همگرایی روی اجزای منتخب از ورق نازک فولادی انجام شد.

برای مش بندی مناسب دیوار برشی فولادی، باید محل اتصالات نیز در نظر گرفته شده است و ابتدا با سایز یک اینچ مش بندی گردید و سپس با توجه به نحوه بارگذاری در مدل آزمایشگاهی، قسمت بالایی آن تحت جابجایی ۰/۴ اینچ قرار گرفت و قسمت انتهایی آن به صورت تکیه گاه مفصل در نظر گرفته شد و در ادامه پس از تحلیل نیروی برشی آن در تکیه گاه محاسبه گردید و سپس دانه بندی این صفحه نصف گردید و تحت شرایط ذکر شده در حالت قبل قرار گرفت و در نهایت نتایج حاصل با هم مقایسه گردید که همان‌طور که در جدول ۳ آمده است، اختلاف نتایج آن‌ها کمتر از ۱ درصد است که با توجه به آن می‌توان مش بندی ۱ اینچ را مورد استفاده قرار داد.

### • فرایند بارگذاری و تحلیل

بارگذاری مونوتونیک بر قاب فولادی به صورت زیر اعمال شد: یک جک هیدرولیک ۵۶ کیلویی (kip) با سرعت ثابت ۰/۲۲۹ اینچ/ثانیه برای اعمال بار به قاب به کار رفت. بارگذاری از تراز بالا به صورت یکنواخت تا گسیختگی دیوار برشی ادامه یافت. بارگذاری بر اساس استاندارد ASTM E564 انجام شد. ابتدا یک‌دهم بار نهایی پیش‌بینی شده به مدت پنج دقیقه اعمال و سپس برداشته شد؛ در ادامه بار تا مقادیر بالاتر (مطابق روال استاندارد) افزایش یافته و در نهایت نمونه به شکست رسید.

در مدل‌سازی شرایط مرزی از رویکرد شبه‌استاتیک در نرم‌افزار استفاده شد. در عین حال، فرایند بارگذاری به صورت تحلیل دینامیکی شبه‌استاتیک پیاده‌سازی شد. ابتدا مدهای کم‌انرژی



شکل ۱ جزئیات قاب‌بندی دیوارهای برشی CFS برای آزمایش مونوتونیک  
Fig. 1 Framing details of cold-formed steel (CFS) shear walls for monotonic testing.

مصالح فولادی به کاررفته در اجزای دیوار برشی ایزوتروپیک فرض شده‌اند. رفتار تنش-کرنش مصالح بر پایه مدل اجزای محدود تحلیل شده و روابط به صورت نمودار چندخطی نمایش یافته‌اند. با این حال، برای دستیابی به نتایج پایتزر، ارائه منحنی با ناپیوستگی کمتر مناسب‌تر است؛ از این رو، در این تحقیق منحنی دوخطی تنش-کرنش به کار رفته است که بخش نخست الاستیک و بخش دوم نشان دهنده مدل پلاستیک می باشد. مصالح سردنورد در نواحی خم شده معمولاً سخت‌کاری شده‌تر هستند و این امر بسته به نوع مقطع متفاوت است. مشخصات مصالح مدل نرم‌افزاری بر پایه آزمون کوپن انجام شده توسط یو تنظیم شده است (جدول ۱).

جدول ۱ مشخصات مصالح اجزای مورد استفاده در دیوارهای برشی

Table 1 Material properties of the components used in the CFS shear walls

Component	Sheathing sheet	Studs	Tracks
Thickness (inches)	0.033	0.043	0.043
Yield Stress (ksi)	43.4	47.6	43.1
Ultimate Strength (ksi)	53.8	55.1	55.6
Ultimate Elongation	٪27	٪29	٪25

### ۲-۲- مدل‌سازی اتصالات پیچی

پیچ‌های خودحفار به صورت المان‌های سیمی (Wire) مدل‌سازی شدند. برای تعریف رفتار اتصال، گسیختگی برشی پیچ و بیرون‌کنی (Pull-out) شبیه‌سازی شد؛ به گونه‌ای که با اعمال نیروهای فرساینده/سایش، کاهش مقاومت در مدل پیچ نیز بازتولید گردد. نتایج آزمایشگاهی نشان داده است که در حالت بیرون‌کنی، پارگی در اطراف سوراخ پیچ در قاب یا ورق روکش رخ می‌دهد. (جدول ۲)

لازم بذکر است مدل در نظر گرفته شده برای پیچ‌ها در این تحقیق یک مدل معادل است و برای بازتولید رفتار کلی دیوار (global response) به کار رفته است.

ایده اصلی این رویکرد، بهره‌گیری از روندهای فیزیکی شناخته شده یعنی افزایش مقاومت برشی با افزایش ضخامت ورق روکش و کاهش آن با افزایش فاصله پیچ‌ها برای برازش تابعی با تعداد پارامترهای محدود اما دارای معنای فیزیکی روشن است. این برازش با اهداف زیر انجام شد:

- پیش‌بینی دقیق ظرفیت برشی پیک ( $V_{max}$ ) برای ترکیب‌های مختلف ضخامت و فاصله پیچ؛
- کمی‌سازی حساسیت‌ها و برهم‌کنش بین این دو عامل؛
- فراهم کردن امکان ساخت منحنی‌های ضخامت موردنیاز و جدول‌های طراحی عملی.

#### ۲-۴-۱- فرم تابع پاسخ

بر پایه استدلال فیزیکی و نتایج مقدماتی، رابطه زیر برای ( $V$ ) بر حسب ( $\text{kN/m}$ ) انتخاب شد:

$$V(t, s) = \beta_0 + \beta_1 t + \beta_2 \frac{1}{s} + \beta_3 \frac{t}{s} + \beta_4 t^2 \quad (1)$$

که در آن  $t$  و  $s$  بر حسب میلی‌متر هستند.

پارامتر  $t$ : اثر ضخامت؛

پارامتر  $\frac{1}{s}$ : اثر فاصله پیچ؛

پارامتر  $\frac{t}{s}$ : برهم‌کنش ضخامت-فاصله پیچ؛

پارامتر  $t^2$ : پارامتر خمیدگی رابطه ظرفیت برشی با ضخامت ورق. این فرم، حداقل الزامات لازم جهت پوشش روندهای فیزیکی و اثرات برهم‌کنشی را برآورده می‌سازد و از پیچیدگی بی‌مورد و خطر بیش‌برازش مدل پرهیز می‌کند.

#### ۲-۴-۲- پیش‌پردازش و مقیاس‌دهی

برای کاهش هم‌خطی و بهبود شرطیت ماتریس طراحی، متغیرها حول نقطه مرکزی مقیاس‌دهی شدند:

$$x_t = \frac{t-t_0}{\Delta_t}, \quad x_s = \frac{s-s_0}{\Delta_s} \quad (2)$$

و سپس در مدل فوق از  $t$ ،  $\frac{1}{s}$ ،  $\frac{t}{s}$  و  $t^2$  (یا معادل گذگاری شده آن‌ها) استفاده شد. تمام داده‌ها پیش‌تر به سیستم SI (mm, kN/m) معادل سازی شده‌اند.

#### ۲-۴-۳- روش برآورد

ضرایب مدل ( $\beta$ ) به روش کمترین مربعات معمولی (OLS) و بر اساس رابطه خطی  $V = X\beta + \varepsilon$  تخمین زده شدند. در صورت بروز هم‌خطی شدید و شرایط عددی نامطلوب، مقیاس‌دهی متغیرها اعمال گردید و گزینه رگرسیون ريج به‌عنوان آزمون کمکی مورد ارزیابی قرار گرفت، اما مدل نهایی همچنان بر روش OLS تکیه دارد. تمامی محاسبات در محدوده پارامترهای ( $t, s$ ) مشخص شده در طرح آزمایش‌ها (DOE) انجام شد تا از برون‌یابی خارج از دامنه داده‌های موجود جلوگیری به عمل آید.

#### ۲-۳-۴- ارزیابی برازندگی و اعتبارسنجی

برای سنجش کیفیت مدل از معیارهای زیر استفاده شد:

- ضریب تعیین  $R^2$  برای برازندگی کلی؛
- خطای مطلق میانگین (MAE) و جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) برای دقت پیش‌بینی؛

محاسبه شد تا زمان بارگذاری مناسب تعیین گردد؛ سپس زمان بارگذاری برابر با 10 برابر زمان متناظر با کمانش انتخاب شد. در پایان، برای اطمینان از ماهیت شبه‌استاتیک، انرژی درونی و انرژی جنبشی مقایسه شدند تا نسبت انرژی جنبشی در طول تحلیل کوچک باقی بماند.

#### ۲-۳- طرح مطالعه پارامتری (DOE)

طرح مطالعه پارامتری (Design of Experiments - DOE) روشی نظام‌مند برای برنامه‌ریزی و سازمان‌دهی آزمایش‌ها یا تحلیل‌ها می‌باشد تا با کمترین تعداد اجرا، بیشترین اطلاعات درباره اثر عوامل ورودی بر پاسخ سازه به‌دست آید. در این پژوهش، DOE به منظور کمی‌سازی اثرات اصلی و برهم‌کنش دو متغیر کلیدی سامانه یعنی ضخامت ورق روکش و فاصله پیچ لبه بر ظرفیت برشی پیک دیوار به‌کار گرفته شده است. هدف آن است که مشخص شود تغییر  $t$  و  $s$  چگونه و با چه شدتی بر مقاومت برشی اثر می‌گذارند و یک مدل جانشین فیزیک‌محور توسعه یابد و نمودار طراحی مستخرج شود.

در نتایج عددی-آزمایشگاهی موجود، ابتدا پاک‌سازی واحدها (تبدیل  $\text{in}$  و  $\text{plf}$  به  $\text{mm}$  و  $\text{kN/m}$ ) و یکپارچه‌سازی شاخص‌ها (استخراج  $V_{max}$ ،  $\delta_{peak}$ ،  $K_0$  و انرژی شکست) انجام شد و سپس در قالب یک شبکه منظم برحسب ( $t, s$ ) مرتب شد. این بازچینش جدول امکان ارزیابی همزمان اثر ضخامت  $t$ ، اثر فاصله  $s$  و برهم‌کنش  $t/s$  را فراهم می‌کند؛ همچنین با پیش‌بینی خمیدگی نسبت به ضخامت، زمینه برازش دقیق مدل را مهیا می‌سازد. برای ارتقای قابلیت اتکای مدل، تا حد امکان نقاط مرکزی (سطوح میانی  $t$  و  $s$ ) استفاده شده و یکنواختی روندها (افزایش  $V_{max}$  با افزایش  $t$  و کاهش آن با افزایش  $s$ ) کنترل گردیده است.

نتیجه مستقیم این طراحی پارامتری، یک جدول واضح و روشن است که رابطه بین ضخامت ورق ( $t$ ) و فاصله پیچ‌ها ( $s$ ) را با حداکثر ظرفیت برشی ( $V_{max}$ ) در واحدهای SI نشان می‌دهد. این جدول هم دامنه عملیاتی واقعی (ضخامت‌های رایج ورق و فواصل معمول پیچ) را به‌خوبی پوشش می‌دهد و هم نیاز به برون‌یابی پریسک و نامطمئن را به حداقل می‌رساند.

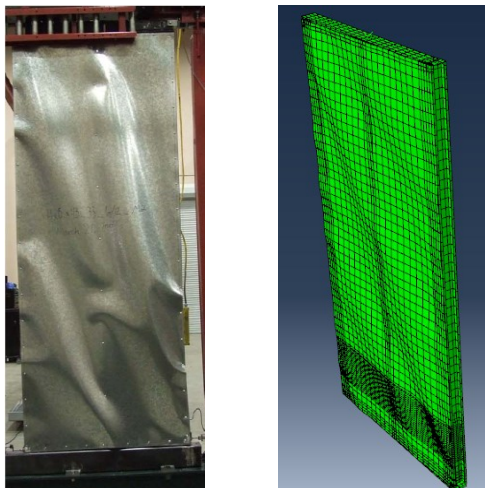
این جدول به‌عنوان ورودی مرحله بعدی یعنی رگرسیون مبتنی‌بر فیزیک استفاده می‌شود. با نرمال‌سازی داده‌ها نسبت به یک فاصله پیچ مرجع  $s_{ref}=50.8 \text{ mm}$ ، رابطه به منحنی‌ای تبدیل می‌شود که فقط تابعی از ضخامت است و در نهایت به جدولی می‌رسد که ضخامت موردنیاز را برای ظرفیت برشی هدف مشخص می‌کند.

به این ترتیب، روش طراحی پارامتری (DOE) در این پژوهش نقش پل مهمی را ایفا می‌کند و داده‌های پراکنده و اولیه را به یک ابزار طراحی قابل اعتماد و کاربردی تبدیل می‌نماید.

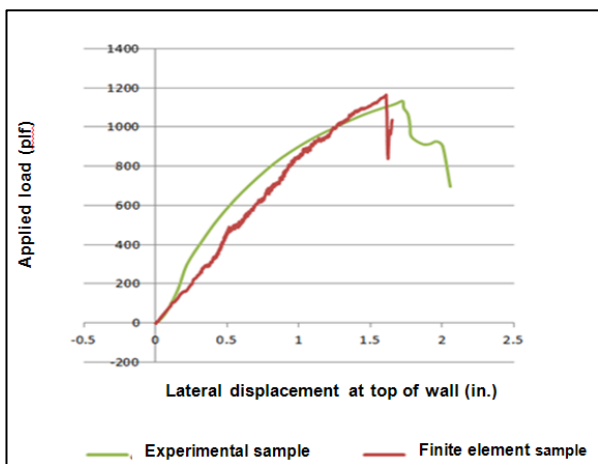
#### ۲-۴- مدل جانشین رگرسیونی فیزیک‌محور (Surrogate)

##### (Regression)

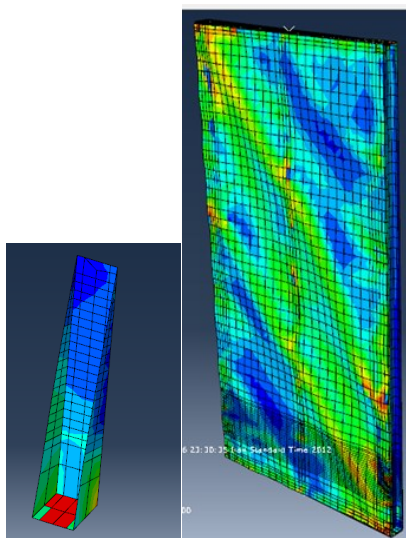
به منظور تبدیل داده‌های پراکنده حاصل از پارامترهای ( $t, s$ ) به یک رابطه مهندسی عملی و قابل کاربرد در طراحی، از یک مدل رگرسیونی جانشین (surrogate regression model) استفاده گردید.



شکل ۲ نمای تغییرشکل یافته مدل اجزای محدود و نمونه آزمایشگاهی  
 Fig.2 Comparison of deformed shapes at ultimate load: (a) finite element analysis and (b) corresponding experimental test



شکل ۳ منحنی بار-جابجایی جانبی بالای دیوار در آزمایش مونوتونیک  
 Fig.3 Load-displacement curve at the top of the wall obtained from finite element analysis and experimental testing



شکل ۴ شکل کانتور تنش در طول بارگذاری یکنواخت

- اعتبارسنجی برون نمونه ای از طریق LOOCV یا k-fold CV (برحسب حجم داده) برای ارزیابی پایداری؛
- تحلیل باقی مانده ها به منظور تأیید عدم وجود روند سیستماتیک؛
- بررسی نقاط نفوذی و پرت با فاصله کوچک و در صورت تأثیر قابل توجه، گزارش تحلیل حساسیت نسبت به حذف یا حفظ آن ها.

### ۳- بحث و نتایج

در این بخش، ابتدا صحت سنجی مدل اجزای محدود در برابر داده های آزمایشگاهی ارائه می شود تا کفایت مدل برای تحلیل های بعدی تأیید گردد. سپس نتایج مطالعه پارامتری با تمرکز بر دو متغیر گزارش و روندهای اصلی پاسخ برشی (افزایش ظرفیت با t و کاهش با s) همراه با شاخص های مکمل نظیر جابجایی متناظر با پیک، سختی اولیه و انرژی شکست بررسی می شود.

در نهایت، بر اساس مجموعه نتایج به دست آمده، یک مدل رگرسیونی جانشین فیزیک محور برای پیش بینی ظرفیت برشی V(t, s) توسعه داده می شود و کیفیت این مدل با استفاده از شاخص های آماری مناسب و تحلیل باقی مانده ها ارزیابی می گردد.

### ۳-۱- صحت سنجی مدل اجزای محدود

بر اساس نمودارهای نیرو-جابجایی دیوار برشی/ستونک، مقادیر بیشینه نیروی برشی و بیشینه جابجایی مدل تجربی استخراج و با نتایج مدل اجزای محدود مقایسه شد. جزئیات در جدول ۴ آمده است. همان طور که دیده می شود، نرخ خطا برای نیروی برشی و جابجایی به ترتیب ۹٪ و ۳٪ است که قابل قبول ارزیابی می شود. در شکل ۲ نمای تغییرشکل یافته مدل اجزای محدود و نمونه آزمایشگاهی در کنار هم نشان داده شده است. کمانش ورق میانی و نیز خرابی پیچ در گوشه راست دیوار برشی در هر دو مدل مشاهده می شود و از این نظر قابل مقایسه هستند.

بخش عمده تسلیم مصالح در مدل ناشی از کمانش ورق میانی، پیچ ها و ناحیه های اتصال روکش به قاب است. شکل ۴ خروجی مدل اجزای محدود را در ناحیه مجاور اتصال انتهایی نمایش می دهد. بررسی دقیق تر نشان می دهد به دلیل وجود سرگیره صلب و تیرک پایینی، تنها بخشی از تیرک پایینی مهار شده وارد ناحیه تسلیم شده است.

### جدول ۴ مقایسه نیروی بیشینه و جابجایی بیشینه بین مدل اجزای محدود و نمونه آزمایشگاهی

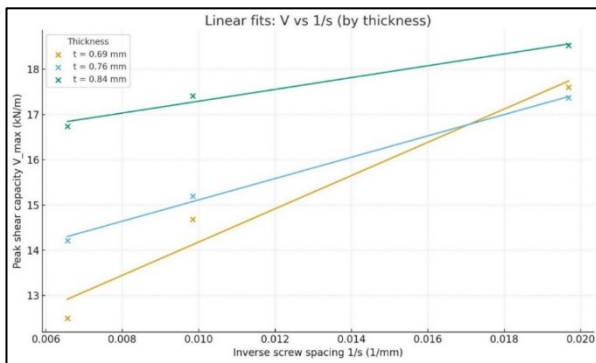
Table 4 Comparison of maximum shear strength and corresponding displacement at peak load between finite element model (FEM) and experimental results.

Source	Peak shear force (plf)	Peak displacement (in)
Experimental specimen	1133.619	1.732
Finite element model	1116.442	1.577

### ۳-۳- اثر فاصله پیچ

برای هر ضخامت مثلاً  $t = \{0.8, 1.0, 1.2\}$  mm، نمودارهای  $V_{max}-s$  روندی یکنواخت و کاهشی را نشان می‌دهند: با افزایش فاصله پیچ، ظرفیت پیچ بطور مداوم کاهش می‌یابد. این کاهش به‌ویژه در گذار از  $s = 50.8$  mm به  $s = 101.6$  mm برجسته‌تر است و پس از آن، آهنگ کاهش ملایم‌تر می‌گردد. در هیچ‌یک از ضخامت‌های بررسی شده، افزایش غیرمنتظره ظرفیت برشی با بزرگ‌تر شدن فاصله پیچ مشاهده نشد؛ بنابراین، اثر فاصله پیچ در سراسر دامنه مطالعه شده کاملاً سازگار با اصول فیزیکی و یکنواخت باقی می‌ماند.

برای هر ضخامت نماینده، رابطه ظرفیت پیچ و فاصله پیچ به‌صورت خطی در برابر متغیر معکوس فاصله  $1/s$  برازش شد. در تمام ضخامت‌ها ضرایب تعیین  $R^2$  بالا به‌دست آمد و شیب مثبت است؛ بدین معنا که با کاهش فاصله پیچ ظرفیت برشی افزایش می‌یابد. حساسیت  $\partial V/\partial s = -b/s^2$  در فواصل کوچک‌تر بزرگ‌تر است، لذا بیشترین کاهش ظرفیت بین فاصله پیچ 50.8 تا 101.6 رخ می‌دهد.



شکل ۶ اثر فاصله پیچ‌ها بر ظرفیت برشی پیچ  
Fig.6 Effect of screw spacing on peak shear capacity

### ۳-۴- مدل جانشین رگرسیونی فیزیک‌محور و کیفیت برازش

هدف اصلی این پژوهش، تعمیم نتایج حاصل از مطالعه پارامتری گسترده و ارائه یک رابطه طراحی ساده، کم‌پارامتر و دارای تفسیر فیزیکی روشن است. به این منظور، یک مدل رگرسیونی جانشین (surrogate model) مبتنی بر روندهای فیزیکی شناخته‌شده انتخاب گردید و با استفاده از روش کمترین مربعات معمولی بر داده‌های پارامتری به‌دست‌آمده از مطالعه (که ضخامت  $t$  و فاصله پیچ  $s$  را به ظرفیت برشی بیشینه  $V_{max}$  مرتبط می‌سازند) برازش داده شد.

فرم پیشنهادی مدل به‌طور همزمان اثرات اصلی (ضخامت ورق روکش  $t$  و معکوس فاصله پیچ‌ها  $1/s$ )، اثر برهم‌کنشی  $(t/s)$  و خمیدگی رابطه نسبت به ضخامت  $(t^2)$  را در بر می‌گیرد تا ضمن حفظ دقت مناسب، پیچیدگی غیرضروری را کاهش دهد و از بیش‌برازش جلوگیری نماید. برای تعمیم نتایج، مدل زیر برازش شد:

$$V(t, s) = -9.512 + 25.65t + 1239.895 \frac{1}{s} + 1355.331 \frac{t}{s} + 5.73t^2 \quad (4)$$

Fig.4 Stress contours during monotonic uniform loading

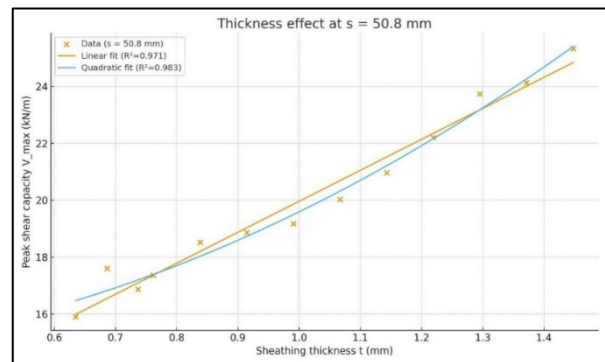
مدل اجزای محدود پاسخ پیش از پیک را به‌خوبی بازتولید می‌کند، اما در ناحیه پس از پیک اختلاف عمدتاً به ساده‌سازی‌های مدل در اتصالات پیچی، مکانیزم‌های شکست و کمانش و مدل‌سازی آسیب پیش‌رونده نسبت داده می‌شود.

### ۳-۲- اثر ضخامت ورق روکش

برای نمایش اثر خالص ضخامت، منحنی  $V_{max}$  در فاصله پیچ ثابت  $s=50.8$ mm (یکی از رایج‌ترین مقادیر در صنعت و پُر داده‌ترین زیرمجموعه دیتاست) گزارش می‌شود. این انتخاب، تفسیر شیب  $V-t$  را بدون آمیختگی با تغییرات  $s$  ممکن می‌سازد. توجه شود که نتیجه اصلی مطالعه سطح پاسخ دومتغیره  $V(t,s)$  است؛ لذا علاوه بر منحنی مرجع در  $s=50.8$ mm، خانواده منحنی‌های  $V-t$  برای چند  $s$  متداول و نمودارهای  $V-s$  برای چند  $t$  نماینده نیز ارائه شده و برای سایر مقادیر  $s$  از رابطه کامل  $V(t,s)$  استفاده می‌گردد.

در زیرمجموعه داده با فاصله پیچ ثابت  $s=50.8$  mm، رابطه  $V_{max}$  برازش شد. مدل درجه‌دو نسبت به مدل خطی برتری داشت ( $R^2=0.983$ ) و خمیدگی ملایم وابستگی ظرفیت به ضخامت را نشان داد. معادله نهایی ابزار طراحی در همین فاصله پیچ (منحنی فقط ضخامت) به‌صورت زیر است:

$$V(t) = 14.8947 - 1.0289t + 5.7301t^2 \quad (3)$$

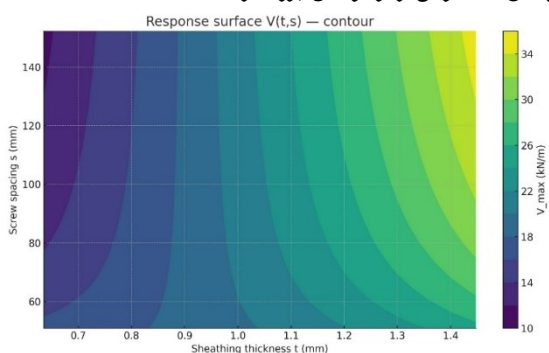


شکل ۵ اثر ضخامت روکش بر ظرفیت برشی پیچ در  $s=50.8$  mm نقاط داده‌ها؛ خطوط برازش خطی و درجه‌دو  
Fig.5 Effect of coating thickness on peak shear capacity at  $s=50.8$  mm data points; linear and quadratic regression fits

هر دو مدل برازش نتایج خوبی بدست آورده اند، اما مدل درجه‌دو بهتر جواب داده است  $R^2=0.983$  در برابر  $R^2 = 0.971$  برای خطی. خمیدگی ملایم رو به بالا نشان می‌دهد بازده حاشیه‌ای افزایش ضخامت کمی بیشتر می‌شود؛ یعنی اثر افزودن  $0.1$ mm در ضخامت‌های بالاتر، کمی بزرگ‌تر از ضخامت‌های پایین‌تر است. تفاوت رفتاری دو مدل نشان می‌دهد که مدل خطی در انتهای بازه‌ها (ضخامت‌های خیلی کم/زیاد) کمی کم‌دقت‌تر است؛ مدل درجه‌دو در انتهای بازه‌ها (پایین و بالا) را بهتر برازش کرده است و داده‌های دو سر بازه را واقع‌بینانه‌تر پیش‌بینی می‌کند.

نمی‌شود. تنها یک گرایش خفیف به کم‌برآوردی در انتهای بالای دامنه  $V=22-25$  kN/m مشاهده می‌شود که مقدار آن ناچیز است و تأثیر معناداری بر نتیجه‌گیری‌های کلی ندارد. در مجموع این الگو کفایت مدل جانشین رگرسیونی برای استفاده طراحی را تأیید می‌کند.

نقشه کانتوری سطح پاسخ ظرفیت برشی نشان می‌دهد که ظرفیت با ضخامت روکش افزایش و با فاصله پیچ کاهش می‌یابد. افزونی خطوط هم‌ارزش قائم بیانگر آن است که در بازه بررسی شده حساسیت ظرفیت برشی نسبت به تغییرات ضخامت ورق روکش قوی‌تر از حساسیت آن نسبت به تغییرات فاصله پیچ‌ها می‌باشد. همچنین، خمیدگی ملایم منحنی‌ها حاکی از غیرخطی بودن وابستگی به ضخامت و وجود برهم‌کنش ضخامت و فاصله پیچ‌ها است؛ چنان‌که کاهش ظرفیت ناشی از افزایش ضخامت در فواصل محسوس‌تر از فواصل بزرگ‌تر است.



شکل ۹ نقشه کانتوری ظرفیت برشی پیش‌بینی شده  
Fig.9 Contour map of the predicted maximum shear strength

#### ۴- کاربرد عملی در طراحی

هدف این بخش ارائه یک روند گام‌به‌گام برای استفاده مستقیم مهندس طراح از «نقشه کانتوری ظرفیت برشی» (شکل ۹) یا روابط رگرسیونی  $V=V(t,s)$  جهت انتخاب ضخامت ورق روکش  $t$  و فاصله پیچ لبه  $s$  است.

##### گام ۱) تعیین نیاز طراحی

- ظرفیت برشی موردنیاز دیوار را از تحلیل سازه استخراج کنید (به صورت برش خطی بر واحد طول، مثلاً  $V_{req}$  بر حسب kN/m)
- معیار کنترل را مشخص کنید: ظرفیت پیک  $V_{max}$  و در صورت نیاز معیارهای بهره‌برداری/شکل‌پذیری مانند  $K_0$ ،  $\delta_{peak}$  و انرژی شکست.

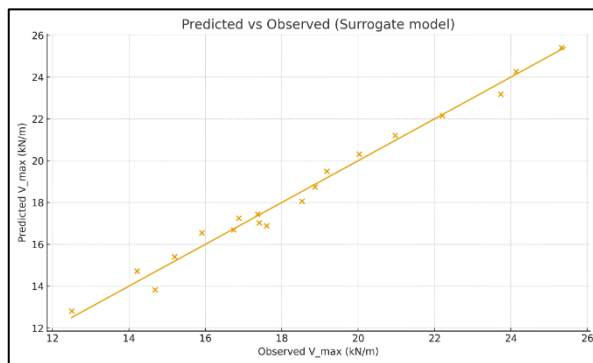
##### گام ۲) کنترل دامنه اعتبار

اطمینان حاصل کنید که  $t$  و  $s$  انتخابی داخل بازه ضخامت‌ها و فواصل پیچ بررسی شده در DOE باشد؛ استفاده خارج از محدوده کالیبراسیون توصیه نمی‌شود.

##### گام ۳) انتخاب اولیه از روی نقشه طراحی (شکل ۹)

- روی «نقشه کانتوری ظرفیت برشی پیش‌بینی شده» (شکل ۹)، مقدار  $V_{req}$  را به صورت یک خط هم‌ارزش (Contour) در نظر بگیرید.
- از میان ترکیب‌های  $(t,s)$  که روی این کانتور قرار می‌گیرند، گزینه‌هایی را انتخاب کنید که با محدودیت‌های اجرایی شما سازگارند (مثلاً فواصل رایج پیچ در کارگاه).

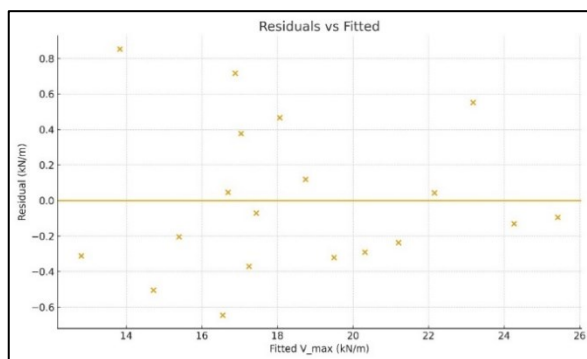
همانطور که در بخش متودولوژی اشاره شد جهت ارزیابی کیفیت مدل بدست آمده از پارامترهای  $R^2=0.9816$ ،  $MAE=12.42$ ،  $RMSE=17.28$  استفاده گردید که اعداد به دست آمده نشان دهنده کیفیت خوب برازش مدل با نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی و آزمایشگاهی می‌باشد. نمودار «پیش‌بینی در برابر مشاهده» نزدیک به خط  $45^\circ$  قرار می‌گیرد و باقی‌مانده‌ها فاقد روند سیستماتیک‌اند؛ بنابراین مدل، تغییرات ظرفیت را با دقت مناسب و بدون بیش‌برازش آشکار بازنمایی می‌کند.



شکل ۷ نمودار پیش‌بینی مدل در برابر داده‌های عددی و آزمایشگاهی  
Fig.7 Model prediction plot for numerical and experimental data.

پیش‌بینی مدل در برابر داده‌های عددی و آزمایشگاهی نشان می‌دهد مدل جانشین رگرسیونی پاسخ را به خوبی پیش‌بینی می‌کند. نقاط عمدتاً پیرامون خط  $45^\circ$  درجه قرار دارند. کم‌برآوردی خفیف در ظرفیت‌های پایین و بیش‌برآوردی خفیف در انتهای دامنه مشاهده شد اما روند منسجمی در باقی‌مانده‌ها وجود ندارد. این نتایج بیانگر کفایت مدل برای استفاده طراحی در دامنه داده‌های مطالعه است.

نمودار باقی‌مانده‌ها در برابر مقادیر پیش‌بینی شده مدل نشان می‌دهد که باقی‌مانده‌ها به صورت تصادفی و بدون الگوی مشخص حول خط صفر پراکنده شده‌اند و هیچ نشانه‌ای از ناهم‌واریانسی (الگوی قیفی‌شکل) مشاهده نمی‌گردد. این امر فرض هم‌واریانسی (homoscedasticity) و نبود بایاس سیستماتیک را تأیید می‌نماید.



شکل ۸ باقی‌مانده‌ها در برابر مقادیر برازش شده مدل جانشین  
Fig.8 Residuals plotted against predicted values from the surrogate regression model

دامنه خطاها عمدتاً در بازه  $\pm 0.7$  kN/m قرار دارد و بیشینه آن‌ها  $\pm 0.8$  kN/m با در نظر گرفتن  $RMSE=17.28$ ، نامطلوب محسوب

تحلیل‌های DOE است و امکان بازنمایی خمیدگی و برهم‌کنش را فراهم می‌کند.

### ۲-۵- مدل توانی

با توجه به انتظار فیزیکی افزایش ظرفیت با ضخامت و کاهش آن با افزایش فاصله پیچ، یک مدل توانی ساده نیز بررسی شد:

$$V = c t^{\alpha} s^{-\beta} \quad (6)$$

که می‌توان ضرایب آن را با تبدیل لگاریتمی و برازش خطی (OLS) روی  $\ln(V)$  بر حسب  $\ln(t)$  و  $\ln(s)$  برآورد کرد. این فرم از نظر تفسیرپذیری بسیار مناسب است، اما ممکن است در بازنمایی خمیدگی‌های ظریف یا برهم‌کنش‌های پیچیده محدودیت داشته باشد.

### ۳-۵- کنترل «یکنواختی فیزیکی» به‌عنوان قید انتخاب مدل

علاوه بر معیارهای خطا، یک شرط فیزیکی برای جلوگیری از پاسخ‌های غیرواقعی در دامنه کالیبراسیون اعمال شد. مدل منتخب نباید با افزایش ضخامت  $t$  کاهش ظرفیت و نباید با افزایش فاصله پیچ  $s$  افزایش کاذب ظرفیت نشان دهد. این کنترل همان رویکردی است که در بازچینش DOE و تحلیل روندها نیز مورد توجه قرار گرفته است.

به‌صورت عملی، این شرط با بررسی علامت مشتق‌های جزئی  $\partial V / \partial t \geq 0$  و  $\partial V / \partial s \leq 0$  (یا بررسی گسسته روی شبکه  $(t, s)$ ) کنترل می‌شود.

### ۴-۵- جمع‌بندی مقایسه

نتایج برازش و مقایسه سه مدل (مدل فیزیک‌محور معادله (۴) و دو فرم جایگزین) در جدول ۵ خلاصه شده است. در انتخاب نهایی، مدلی ترجیح داده می‌شود که ضمن دقت مناسب (RMSE/MAE کمتر)، شرط یکنواختی فیزیکی را نیز در دامنه مطالعه نقض نکند و از پیچیدگی غیرضروری (افزایش پارامترها و خطر بیش‌برازش) پرهیز دهد.

مطابق نتایج ارائه‌شده در جدول ۵، هر سه فرم بررسی‌شده توانایی قابل‌قبولی در تقریب ظرفیت برشی  $V_{max}$  در دامنه DOE دارند. با این حال، مدل پیشنهادی فیزیک‌محور یعنی معادله (۴) به دلیل توازن مناسب میان دقت (MAE و RMSE)، پیچیدگی کمتر نسبت به مدل درجه‌دو کامل، و به‌ویژه حفظ رفتار فیزیکی مورد انتظار (افزایش ظرفیت با افزایش ضخامت ورق  $t$  و کاهش ظرفیت با افزایش فاصله پیچ لبه  $s$ ) برای توسعه ابزار طراحی ترجیح داده شد.

روند کلی مطابق نتایج آن است که افزایش  $t$  ظرفیت را زیاد و افزایش  $s$  ظرفیت را کم می‌کند.

### گام ۴) استفاده از رابطه طراحی (در صورت نیاز)

در صورت نیاز به برآورد عددی دقیق، از رابطه رگرسیونی  $V=V(t,s)$  (مدل فیزیک‌محور) استفاده کنید و  $V$  را برای چند گزینه  $(t,s)$  حساب کنید تا نزدیک‌ترین و اقتصادی‌ترین گزینه به  $V_{req}$  به‌دست آید. (این همان مدلی است که با شاخص‌های دقت گزارش‌شده اعتبارسنجی شده است.)

### گام ۵) مسیر سریع انتخاب ضخامت با فاصله پیچ مرجع

اگر طراح بخواهد ابتدا فقط ضخامت را سریع انتخاب کند:

- فاصله پیچ مرجع  $s_{ref}=50.8$  mms را مبنا بگیرید و از منحنی/رابطه  $(V_s=50.8(t)$  (منحنی «فقط ضخامت») ضخامت لازم برای  $V_{req}$  را استخراج کنید.
- سیس اگر قصد دارید  $s$  را بزرگ‌تر از 50.8 انتخاب کنید، کاهش ظرفیت ناشی از افزایش  $s$  را با مدل  $V(t,s)$  یا نقشه کانتوری اصلاح یا کنترل کنید.

### گام ۶) کنترل‌های تکمیلی

پس از انتخاب  $(t,s)$ :

- اگر شرایط بهره‌برداری یا عبارتی تغییرمکان برای شما مهم است،  $K_0$  و  $\delta_{peak}$  و انرژی شکست را نیز کنترل کنید تا انتخاب صرفاً بر اساس  $V_{max}$  نباشد.
- از نظر اجرایی، به حساسیت بیشتر ظرفیت در فواصل کوچک‌تر (مثلاً افت محسوس در گذار از  $s = 50.8$  mm به  $s = 101.6$  mm) توجه کنید.

### ۵- مقایسه با فرم‌های جایگزین مدل جانشین

به‌منظور اطمینان از اینکه انتخاب فرم «مدل جانشین رگرسیونی فیزیک‌محور» معادله (۴) صرفاً یک انتخاب سلیقه‌ای نبوده و از نظر دقت و رفتار فیزیک‌سازگار در دامنه DOE توجیه‌پذیر است، دو فرم رایج دیگر نیز به‌عنوان مدل‌های جایگزین برازش و با مدل پیشنهادی مقایسه شدند. معیارهای مقایسه، همان معیارهای گزارش‌شده برای مدل اصلی شامل  $R^2$ ، MAE و RMSE بودند.

### ۱-۵- مدل سطح پاسخ درجه‌دو

یک مدل چندجمله‌ای درجه‌دو کامل به‌صورت زیر در نظر گرفته شد:

$$V = a_0 + a_1 t + a_2 s + a_3 t^2 + a_4 s^2 + a_5 t s \quad (5)$$

که در آن  $V$  بر حسب kN/m و متغیرهای  $t$  و  $s$  بر حسب mm هستند. این فرم از رایج‌ترین الگوهای پاسخ‌سطحی در

جدول ۵ مقایسه مدل جانشین پیشنهادی با فرم‌های جایگزین به‌همراه معادلات نهایی

Table 5 Comparison of the proposed surrogate model with alternative formulations, including the final equations

Model	Final equation	Number of parameters	R <sup>2</sup>	MAE	RMSE	LOOCV-RMSE	Uniformity over DOE grid
Proposed physics-informed model (Eq. 4)	$V_{max} = -9.512 + 25.65t + 1239.895 1/s + 1355.331 t/s + 5.73t^2$	5	0.9816	12.42	17.28	38.17	Nearly uniform (minor oscillations)
Full quadratic Response Surface Methodology (RSM)	$V_{max} = 6086.27 - 305383.22 \cdot t - 395.69 \cdot s + 4.96e + 06 \cdot t^2 + 6.7655 \cdot s^2 + 9474.54 \cdot (t \cdot s)$	6	0.9976	5.13	6.28	19.51	Nearly uniform (minor oscillations)
Power-law model	$V_{max} = 2.7378e + 04 \cdot t^{0.8470} \cdot s^{(-0.1939)}$	3	0.8451	45.47	50.20	86.37	Uniform

sensors using a two-stage method and model reduction," *Applied soft computing*, vol. 66, pp. 264–277, May 2018, DOI:10.1016/j.asoc.2018.02.028.

[2] Z. Li, S. Xia, J. Wang, and X. Su, "Damage detection of cracked beams based on wavelet transform," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 32, no. 7, pp. 1190–1200, Jul. 2006, DOI:10.1016/j.ijimpeng.2004.09.012.

[3] Z. Luo, J. Chen, C. Chiu, R. Luo, and H. Liu, "Improved sensitivity equation of mode shapes and adaptive strategy with elastic net regularization for structural damage detection," *Structures*, vol. 78, p. 109304, Aug. 2025, DOI:10.1016/j.istruc.2025.109304.

[4] S. L. Arefi, A. Gholizad, "Damage Detection of Truss Structures by Reduction of Degrees of Freedom Using the Serep Method," *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, vol. 15, no. 1, pp. 1–25, Mar. 2020, DOI:10.7250/bjrbe.2020-15.459.

[5] S. L. Arefi, A. Gholizad, S.M. Seyedpoor, "A modified index for damage detection of structures using improved reduction system method," *Smart Structures and Systems*, vol. 25, no. 1, pp. 1–22, Jan. 2020, DOI:10.12989/sss.2020.25.1.001.

[6] L. Wang, Z. Bai, B. Qian, Y. Hu, G. Zhou, and K. Di, "Research on the damage effects of buried explosions concerning the crater size and peak wave," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 206, pp. 105410–105410, Jun. 2025, DOI:10.1016/j.ijimpeng.2025.105410

[7] Arefi, A. Gholizad, S.M. Seyedpoor, "Damage Detection of Structures Using Modal Strain Energy with Guyan Reduction Method," *Journal of Rehabilitation in Civil Engineering*, vol. 8, no. 4, pp. 47–60, Nov. 2020, DOI:10.22075/jrce.2020.19803.1384.

[8] S. L. Arefi, A. Gholizad, "Damage identification of structures by reduction of dynamic matrices using the modified modal strain energy method," *Structural Monitoring and Maintenance*, vol. 7, no. 2, pp. 125–147, Jun. 2020, DOI:10.12989/smm.2020.7.2.125.

[9] M. Bitarafan, S. Hashemkhani Zolfani, S. L. Arefi, and E. K. Zavadskas, "Evaluating the construction methods of cold-formed steel structures in reconstructing the areas damaged in natural crises, using the methods AHP and COPRAS-G," *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, vol. 12, no. 3, pp. 360–367, Sep. 2012, DOI:10.1016/j.acme.2012.06.015.

[10] M. Bitarafan, Y. Hossainzadeh, and S. Yaghmayi, "Evaluating the connecting members of cold-formed steel structures in reconstruction of earthquake-prone areas in Iran using the AHP methods," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 52, no. 4, pp. 711–716, Dec. 2013, DOI: 10.1016/j.aej.2013.07.007.

[11] M. Bitarafan, Y. Hussein-Zadeh, F. Pichkah, and S.L. Arefi, "Finite Elements Modeling and Analysis of Cold-Formed Steel Frame Shear Walls," *International Journal of Engineering and Technology*, vol. 4, no. 6, pp 719–722. 2012. DOI:10.7763/IJET.2012.V4.471

[12] C. S. McCreless and T. S. Tarpy, "Experimental Investigation of Steel Stud Shear Wall Diaphragms," *In Proceedings of the 4th International Specialty Conference on Cold-formed Steel Structures. St. Louis, MO, USA'1978*. pp 647–672.

<https://scholarsmine.mst.edu/iscsccs/4iccfss/4iccfss-session3/9>.

علاوه بر این، شاخص‌های اعتبارسنجی برون‌نمونه‌ای (مانند LOOCV-RMSE) نشان می‌دهد که مدل فیزیک‌محور از نظر تعمیم‌پذیری در دامنه مطالعه پایدار بوده و ریسک بیش‌برازش را کاهش می‌دهد. بنابراین، این مدل به‌عنوان مدل نهایی برای تهیه نقشه طراحی (شکل ۹) و استخراج توصیه‌های کاربردی انتخاب گردید.

## ۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش با اتکا به یک مدل اجزای محدود گذاری‌سنجی‌شده و چیدمان منظم داده‌ها در قالب مطالعه پارامتری (DOE)، نقش دو متغیر کلیدی (ضخامت ورق روکش و فاصله پیچ) بر ظرفیت برشی پیک دیوارهای برشی فولادی سردنورد شده کمی‌سازی شد. نتایج نشان دادند که ظرفیت با افزایش ضخامت به‌صورت یکنواخت و غیرخطی افزایش می‌یابد و با افزایش فاصله پیچ کاهش می‌یابد؛ افت ظرفیت در گذار از  $s=50.8$  به  $101.6$  میلی‌متر چشمگیرتر است و سپس ملایم‌تر می‌شود. برای تعمیم نتایج، یک مدل جانشین رگرسیونی فیزیک‌محور برازش شد که هم اثرهای اصلی و هم برهم‌کنش و خمیدگی نسبت به ضخامت را پوشش می‌دهد.

به‌منظور اطمینان از اینکه انتخاب مدل جانشین رگرسیونی فیزیک‌محور یک مدل مناسب می‌باشد و از نظر دقت و رفتار فیزیک‌سازگار در دامنه DOE توجیه‌پذیر است، سه فرم رایج به‌عنوان مدل‌های جایگزین برازش انتخاب شدند تا نتایج آنها با همدیگر مقایسه شوند. معیارهای مقایسه، همان معیارهای گزارش‌شده برای مدل اصلی شامل  $R^2$ ، MAE و RMSE بودند. در نهایت مدل نهایی ارائه شده با  $R^2=0.9816$ ،  $MAE=12.42$  و  $RMSE=17.28$  دقت بالایی نشان داد و الگوی پیش‌بینی در برابر مشاهده نزدیک خط ۴۵ درجه قرار گرفت.

خروجی مدل به یک «نقشه طراحی» تبدیل شد که امکان برآورد مستقیم ظرفیت در هر ترکیب (t,s) را فراهم می‌کند. نقشه کانتوری سطح پاسخ ظرفیت برشی نشان می‌دهد که ظرفیت با ضخامت روکش افزایش و با فاصله پیچ کاهش می‌یابد.

بر اساس این منحنی، سود حاشیه‌ای افزایش ضخامت ثابت نیست و در ضخامت‌های بالاتر کمی بیشتر می‌شود. از منظر تصمیم‌سازی، نتایج نشان می‌دهند برای ارتقای ظرفیت، ابتدا کاهش منطقی فاصله پیچ و سپس افزایش هدفمند ضخامت، راهبردی کارآمد است؛ انتخاب نهایی نیز بهتر است با تکیه بر رابطه دو متغیره  $V(t,s)$  انجام شود و منحنی طراحی به‌عنوان مرجع سریع به کار رود.

**تأییدیه اخلاقی:** محتویات علمی این مقاله حاصل پژوهش نویسندگان است و در هیچ نشریه ایرانی و غیرایرانی منتشر نشده است.

**تعارض منافع:** هیچ تعارض منافعی برای اظهار وجود ندارد.

## منابع

[1] D. Dinh-Cong, T. Vo-Duy, and Trung Nguyen-Thoi, "Damage assessment in truss structures with limited

- [13] Tarpy, T.S, J.D.Girard, "Shear Resistance of Steel Stud Wall Panels: a Summary Report" International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures. 1, (1984).
- [14] Landolfo R, Di Lorenzo G, Fiorino L, Attualità e prospettive di sistemi costruttivi cold-formed, *Costruzioni metalliche*, No.1, 2002.
- [15] B. W. Schafer, "Review: The Direct Strength Method of cold-formed steel member design," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 64, no. 7-8, pp. 766-778, Jul. 2008, DOI:10.1016/j.jcsr.2008.01.022.
- [16] T.J.Kim, J.Wilcoski, D. A. Foutch, and M.H Lee, "Shakeable tests of a cold-formed steel shear panel," vol. 28, no. 10, pp. 1462-1470, Aug. 2006, DOI:10.1016/j.engstruct.2006.01.014.
- [17] R. Serrette, H .Nguyen, G. Hall. "Shear wall values for light weight steel framing". Report No.LGSRG-3-96, Light Gauge Steel Research Group, Department of Civil Engineering, Santa Clara University. Santa Clara, CA, USA, 1996.
- [18] A. J. Salenikovich, D.J. Dolan, S.W.Easterling, "Racking Performance of Long Steel-frame Shear Walls". CCFSS Proceedings of International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures (1971 - 2018). 4 , 2000.
- [19] Fiorino L, "Seismic Behavior of Sheathed Cold-Formed Steel Stud Shear Walls, An Experimental Investigation", ph. D thesis. University of Napoli Federico II Italy, 2003.
- [20] A. E. Branston, C. Y. Chen, F. A. Boudreault, C. A. Rogers, "Testing of light-gauge steel-frame - wood structural panel shear walls," *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 33, no. 5, pp. 561-572, May 2006, DOI: 10.1139/j06-014.
- [21] S. Gunalan and M. Mahendran, "Finite element modelling of load bearing cold-formed steel wall systems under fire conditions," *Engineering Structures*, vol. 56, pp. 1007-1027, Nov. 2013, DOI:10.1016/j.engstruct.2013.06.022.
- [22] S. Liu, R. Feng, and Y. Zhong, "Numerical Study on the Seismic Performance of Cold-Formed Steel Shear Walls with Steel Sheathing and Gypsum Board," *Materials*, vol. 16, no. 16, p. 5685, Aug. 2023, DOI:10.3390/ma16165685.
- [23] Z. Yang, Y. Shi, W. Cao, H. Dong, and J. Bian, "Seismic behavior of lightweight steel frame with thin-walled steel skeleton-lightweight concrete wall," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 222, p. 109003, Aug. 2024, DOI:10.1016/j.jcsr.2024.109003.
- [24] M. Naghipour, A. Jahani, and Hasani, S.M.R, "Numerical investigation of the seismic performance of steel shear plate walls reinforced with cross-shaped and circular stiffeners," *Journal of Chinese Architecture and Urbanism*, vol. 0, no. 0, pp. 5781-5781, Mar. 2025, DOI:10.36922/jcau.5781.
- [25] L. Fiorino, Alessandro Prota, Amirhossein Nikpour, and Raffaele Landolfo, "Seismic Performance of Lightweight Steel Shear Walls with Gypsum Sheathing: Experimental Investigation," *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Jun. 2025, DOI:10.1002/eqe.70008.
- [26] Yu, Guowang. Cold-formed Steel Framed Shear Wall Sheathed with Corrugated Sheet Steel, thesis, Denton, Texas, University of North Texas Libraries, UNT Digital Library, May, 2013.