



University Of Qom



In-plane Behavior of Steel Frames with Various Infill Materials; A Parametric Finite Element Study

Hamzeh Omidvar¹, Seyed Jafar Hashemi², Mahdi Yazdani³

1. Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Arak University, Arak, Iran. E-mail: omid70726@gmail.com
2. Corresponding author, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Arak University, Arak, Iran.
E-mail: j-hashemi@araku.ac.ir
3. Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Arak University, Arak, Iran. E-mail: m-yazdani@araku.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 24 Sep 2024
Revised 26 Jan 2025
Accepted 15 Feb 2025
Published 17 Feb 2025

Keywords:
Steel Frame,
In-plane Behavior,
Infill Wall,
Masonry,
Concrete Sandwich Panel.

ABSTRACT

With development of new technologies in recent years, traditional masonry infills have gradually been replaced by modern one like Concrete Sandwich Panels (CSP). In the present paper, the seismic in-plane behavior of steel frame infilled with CSP has been compared with masonry-infilled frames. To this end, two widely used masonry infill types, i.e. clay brick and Autoclaved Aerated Concrete (AAC) block, were selected to investigate and compare with the behavior of CSP-infilled steel frames. First, numerical models were created through finite element (FE) method and then validated against experimental results for single bay bare and infilled frames. Afterwards, by considering the factors affecting the lateral behavior of infilled frames, i.e. the infill material, aspect ratio and number of spans, a parametric study was carried out on the infilled frames. The results showed that the steel frame infilled with CSP has higher initial stiffness and maximum lateral strength than masonry-infilled frames. The initial stiffness of the infilled frame with CSP was computed to be 1.90 and 2.95 times that of the steel frame infilled with brick and AAC block, respectively. Also, the maximum lateral strength of the CSP-infilled frame was 1.48 and 1.80 times, respectively, of the frame with brick and AAC block. The results of infilled frames with various aspect ratios displayed that the effect of increasing the span length on the in-plane behavior of the CSP-infilled frame is more significant than that of the masonry models. Also, by studying the behavior of multi-bay infilled frames, it was found that the contribution of the CSP infill in increasing the initial stiffness and maximum strength of multi-bay infilled frames is directly related to the contribution of CSP in the one-bay infilled frames.

Cite this article: Omidvar H, Hashemi SJ, Yazdani M. In-plane Behavior of Steel Frames with Various Infill Materials; A Parametric Finite Element Study. Civil Infrastructure Researches. 2025; 11(1): 203-215.
<https://doi.org/10.22091/cer.2025.11867.1587>



Introduction

In recent years, Concrete Sandwich Panel (CSP) infills have gradually replaced traditional masonry infills due to several advantages. These benefits include ease and speed of installation, effective thermal and acoustic insulation, adequate out-of-plane stability, and overall cost-efficiency. However, from a structural perspective, there is a clear gap in the literature, namely that a comprehensive study that fully examines the behavior of these panels and compares them to conventional masonry infills has not yet been conducted.

The present study investigates and compares the in-plane behavior of CSP infills and masonry infills bounded by steel frames. Finite element modeling is employed for numerical simulation, with model validation carried out using available experimental data. Following this, comparative models are developed to assess the seismic response of frames with masonry infills versus those with CSP infills under monotonic lateral loading. Two commonly used masonry materials, i.e. clay brick and Autoclaved Aerated Concrete (AAC) block, are considered here. Additionally, key parameters affecting in-plane behavior, including aspect ratio and the number of spans, are examined.

Modeling Strategy and Verification

Finite element modeling was carried out using a macro-modeling approach in the ABAQUS software. To validate the numerical models, three experimental studies were utilized as follows:

- A steel frame infilled with solid clay brick masonry.
- A steel frame infilled with AAC block masonry.
- A steel frame infilled with CSP.

Two criteria were considered for model validation: (i) the agreement between load–displacement curves, and (ii) the comparison of crack patterns and stress distribution within the infill panels. Based on these criteria, the numerical results showed good agreement with the corresponding experimental data, indicating the models' accuracy.

Parametric Study

To better understand the in-plane behavior of the investigated infilled frames, three key parameters, widely identified in the literature as influential, were selected for a parametric study. These parameters are: (i) the type of infill material, (ii) the aspect ratio of the infill panel, and (iii) the number of spans of the frame.

Effect of Infill Material:

To examine this issue in detail, an infilled frame available in the literature and tested by other researchers, with an aspect ratio of 1.0, was selected as the reference model and various infill types were incorporated into it. With the exception of the infill material properties, all other parameters, including frame geometry and boundary conditions, were considered similarly for all models. Then, the infilled frames were subjected to monotonic in-plane lateral loading. As expected, due to the superior mechanical properties of CSPs, the corresponding infilled frame exhibited the highest initial stiffness and lateral strength. In contrast, the AAC-infilled frame demonstrated the lowest stiffness and strength. This behavior can be attributed to the porous and highly brittle nature of AAC blocks. Notably, this result is consistent with the findings reported by other researchers.

Effect of Aspect Ratio:

The aspect ratio is one of the most critical factors influencing the in-plane behavior of infilled frames. To investigate this parameter, three types of infilled frames were developed, each with infill panels having aspect ratios of 0.5, 1.0, and 1.5, representing values less than, equal to, and greater than one, respectively. It is important to note that in this study, the aspect ratio is defined as the ratio of the span length to the frame height.

For all three aspect ratios, the CSP infill models demonstrated greater lateral strength and stiffness compared to the masonry infill models. Moreover, the difference in strength and stiffness between the two infill types became more pronounced as the aspect ratio increased. This trend can be attributed to the increased contribution of the infill to the in-

plane behavior of the frame as the span length becomes larger.

Effect of Number of Spans:

To investigate this parameter, in addition to the single-bay frame whose results were presented in previous sections, two-bay and three-bay infilled frames with various infill types were also modeled and analyzed. Although, on average, the stiffness and lateral strength of the CSP infilled frames increased by approximately twofold and threefold for the two-bay and three-bay configurations, respectively, the corresponding rate of increase for the masonry-infilled frames was lower than that observed for the CSP models. In other words, the contribution of the CSP infill to the enhancement of stiffness and strength in multi-bay frames is directly proportional to its contribution in single-bay frames. Therefore, in practical modeling of infill behavior, such as the use of equivalent diagonal strut models, this aspect should be carefully considered.

Conclusion

In summary, the key findings of this study can be outlined as follows:

1. The finite element models developed in this study showed good agreement with experimental results in terms of both load-displacement curve and the distribution of stresses and damage propagation for all three infill types.
2. Among the models examined, the frame with the concrete sandwich panel (CSP) infill exhibited the highest initial stiffness and lateral load capacity.
3. The frame infilled with autoclaved aerated concrete (AAC) blocks demonstrated the lowest stiffness and strength, with a load-displacement response closely resembling that of the bare frame.
4. Given the significant influence of CSPs and solid clay brick infills on the behavior of steel frames, the structural effects of these typically non-structural elements should not be neglected in analysis and design of steel frame structures.

5. For the three aspect ratios studied here, i.e. 0.5, 1.0, and 1.5, the CSP infill models consistently demonstrated greater lateral strength and stiffness compared to masonry infills. This difference became more pronounced as the aspect ratio increased.

Funding Statement

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Declaration of Competing Interest

☒ **No competing interests:** The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Authors' Contributions

Hamzeh Omidvar:

Data curation; Formal analysis; Investigation; Writing – original draft.

Seyed Jafar Hashemi:

Conceptualization; Methodology; Supervision; Writing – review & editing.

Mahdi Yazdani:

Methodology; Software; Supervision; Writing – review & editing.

رفتار درون صفحه قاب‌های فولادی دارای میان‌قاب‌های با مصالح مختلف؛ مطالعه پارامتری به روش اجزای محدود

حمزه امیدوار^۱، سید جعفر هاشمی^۲✉، مهدی یزدانی^۳

۱. گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران. رایانامه: omid70726@gmail.com

۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران. رایانامه: j-hashemi@araku.ac.ir

۳. گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران. رایانامه: m-yazdani@araku.ac.ir

چکیده

در سال‌های اخیر با گسترش فناوری‌های نوین در صنعت ساختمان، پانل‌های ساندویچی بتنی به تدریج جایگزین میان‌قاب‌های مصالح بنایی شده‌اند. در پژوهش حاضر، رفتار لرزه‌ای درون صفحه میان‌قاب ساندویچی بتنی با میان‌قاب‌های مصالح بنایی مقایسه شده است. برای این منظور دو نوع میان‌قاب مصالح بنایی متداول شامل آجر فشاری و بلوک سبک بتنی (اتوکلاو) برای بررسی و مقایسه با رفتار پانل ساندویچ بتنی در قاب‌های فولادی در نظر گرفته شد. ابتدا مدل‌های اجزای محدود نمونه‌های مورد مطالعه ایجاد و براساس نتایج آزمایشگاهی موجود، صحت‌سنجی شدند. سپس با در نظر گرفتن عوامل مؤثر بر رفتار جانبی قاب‌های میان‌پر مانند نسبت بعدی و تعداد دهانه، با ایجاد مدل‌های مشابه، مقایسه بین میان‌قاب‌های مصالح بنایی با میان‌قاب پانل ساندویچی انجام شد. نتایج نشان داد قاب میان‌پر با پانل ساندویچی بتنی دارای سختی اولیه و مقاومت جانبی بیشتری نسبت به میان‌قاب‌های مصالح بنایی است؛ به طوری که سختی اولیه قاب دارای میان‌قاب ساندویچی بتنی به ترتیب ۱/۹۰ و ۲/۹۵ برابر قاب میان‌پر با آجر فشاری و بلوک بنایی اتوکلاو محاسبه شد. همچنین حداکثر مقاومت جانبی قاب با پانل ساندویچی بتنی به ترتیب ۱/۴۸ و ۱/۸۰ برابر قاب با آجر فشاری و بلوک بنایی اتوکلاو بدست آمد. با مقایسه‌ی نتایج سه میان‌قاب مشخص شد اثر افزایش طول دهانه بر رفتار درون صفحه‌ی قاب در مورد میان‌قاب ساندویچی بتنی نسبت به دو نوع میان‌قاب مصالح بنایی محسوس‌تر است. همچنین با مقایسه رفتار قاب‌های میان‌پر دو و سه دهانه نسبت به قاب‌های متناظر خالی مشاهده شد میزان مشارکت میان‌قاب ساندویچی بتنی در افزایش سختی و مقاومت قاب‌های میان‌پر چنددهانه، نسبت مستقیم با میزان مشارکت میان‌قاب در قاب‌های میان‌پر تک دهانه دارد.

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۷/۰۳

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۱/۰۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۲۷

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۱۱/۲۹

کلیدواژه‌ها:

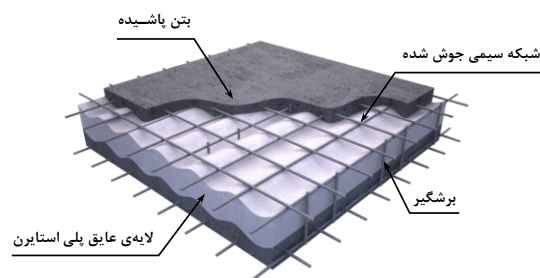
قاب فولادی،
رفتار درون صفحه،
میان‌قاب،
مصالح بنایی،
پانل ساندویچی بتنی.

استناد: امیدوار حمزه، هاشمی سید جعفر، یزدانی مهدی. رفتار درون صفحه قاب‌های فولادی دارای میان‌قاب‌های با مصالح مختلف؛ مطالعه پارامتری به روش اجزای محدود. پژوهش‌های زیرساخت‌های عمرانی، ۱۴۰۴؛ ۱۱(۱): ۲۰۳-۲۱۵.

<https://doi.org/10.22091/cer.2025.11867.1587>

۱- مقدمه

امروزه قاب‌های میان‌پُر یا قاب‌های مرکب، سهم قابل توجهی از ساختمان‌های موجود و یا در حال ساخت کشور را تشکیل می‌دهند. رفتار سازه‌ای این ساختمان‌ها معمولاً متأثر از قاب‌های فولادی یا بتنی و دیوارهای جداکننده میان‌قاب‌هاست. در بیشتر موارد، مهندسین طراح در تحلیل و طراحی این نوع سازه‌ها از اثر اندرکنش میان‌قاب‌ها با قاب پیرامونی تحت اثر بارهای جانبی صرف‌نظر می‌نمایند. این در حالی است که در واقعیت، میان‌قاب‌ها بر رفتار درون صفحه‌ای این قاب‌ها تأثیر می‌گذارند و افزایش سختی و مقاومت جانبی آن‌ها را به دنبال دارند. مصالح بنایی متداول‌ترین مصالح استفاده شده در میان‌قاب‌هاست و به همین دلیل پژوهش‌های پیشین، بیشتر به بررسی رفتار این نوع دیوارها پرداخته‌اند. در سال‌های اخیر با گسترش فناوری‌های نوین در صنعت ساختمان، به تدریج مصالح جدیدتری مانند پانل‌های ساندویچی بتنی، جایگزین میان‌قاب‌های بنایی در ساختمان‌ها شده‌اند؛ اما مطالعات کمتری را به خود اختصاص داده‌اند. پانل‌های ساندویچی بتنی متشکل از یک لایه‌ی پلی‌استایرن با شبکه‌ی سیمی فولادی در طرفین آن و دو لایه‌ی پوشش بتنی بر روی شبکه‌های سیمی است که به صورت پاشیده در طرفین پانل اجرا می‌شود (شکل ۱).



شکل ۱- اجزای تشکیل دهنده پانل ساندویچی بتنی

در مراجع مختلف، از پژوهش پولیاکف در سال ۱۹۵۶ به عنوان اولین مطالعه در زمینه میان‌قاب‌ها یاد شده است. پولیاکف در مطالعه آزمایشگاهی خود به اندرکنش میان‌قاب و قاب محیطی پی برد و به بررسی انواع ترک‌های ایجاد شده در میان‌قاب پرداخت [۱]. در ادامه‌ی این مطالعات،

پژوهش‌های دیگری توسط افراد مختلف انجام شد و تأثیر عواملی از قبیل سختی نسبی قاب و میان‌قاب، وجود بازشو، نوع ملات و نوع قاب، درنظر گرفتن فاصله‌ی اجرایی بین میان‌قاب و قاب مورد بررسی قرار گرفت که بر اساس نتایج حاصله، تخمین سختی و مقاومت قاب‌های مرکب در حالت‌های مختلف را به دنبال داشت [۵-۲]. لازم به ذکر است در این پژوهش‌ها از میان‌قاب مصالح بنایی استفاده شده بود. اخیراً، محمدی و امامی برای بررسی اثر صلبیت اتصال تیر به ستون و تعداد دهانه‌ها بر رفتار درون صفحه‌ی قاب‌های فولادی میان‌پُر با مصالح بنایی، مطالعات جامعی را به صورت آزمایشگاهی و عددی انجام دادند [۶]. پنج نمونه قاب بزرگ مقیاس شامل یک قاب خالی با اتصال فولادی صلب و چهار نمونه قاب میان‌پُر با تعداد دهانه‌های مختلف و انواع اتصال تیر به ستون به صورت صلب و مفصلی، مورد آزمایش قرار گرفتند. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که سختی و مقاومت قاب‌های میان‌پُر با اتصال مفصلی تیر به ستون، به ترتیب ۵۰ و ۹۰ درصد نمونه‌های قاب میان‌پُر متناظر با اتصالات صلب است. علاوه بر این، حداکثر مقاومت و سختی نمونه قاب‌های میان‌پُر دو دهانه به ترتیب ۱/۹ و ۲ برابر قاب‌های میان‌پُر تک‌دهانه به دست آمد.

اسدزاده و همکاران در مطالعه‌ی آزمایشگاهی خود، اثر نوع اتصال قاب و میان‌قاب بر رفتار لرزه‌ای قاب‌های فولادی میان‌پُر با بلوک‌های سبک بتنی (اتوکلاو) را ارزیابی نمودند [۷]. شش نمونه قاب فولادی بزرگ‌مقیاس یک طبقه، دارای میان‌قاب بلوک اتوکلاو تحت بارگذاری چرخه‌ای قرار گرفتند. نمونه‌ها با توجه به مراحل مختلف آزمایش شامل استحکام اولیه، کاهش سختی و تکامل آسیب بررسی شدند و براساس آن، الگوی ترک‌خوردگی، رفتار چرخه‌ای، میرایی ویسکوز و ظرفیت اتلاف انرژی آن‌ها با هم مقایسه شدند. در نهایت دو نوع اتصال به عنوان اتصال‌های قابل اعتماد معرفی شدند. نتایج حاکی از آن بود که میان‌قاب‌ها در حالت‌های اتصال کامل به ستون‌ها یا اتصال از طریق میلگردهای L شکل به ستون‌ها تخریب بیشتری دارند. همچنین میان‌قاب با اتصال به ستون به

کمک نبشی نسبت به حالت بدون نبشی و با فاصله آزاد از ستون و دارای اتصال جزئی از طریق اعضای V و T شکل، عملکرد ضعیفتری دارند. بات و همکاران طی یک مطالعه‌ی آزمایشگاهی بر روی سه نوع میان‌قاب مصالح بنایی با بلوک‌های متفاوت شامل آجر رسی، آجر خاکستر بادی و بلوک اتوکلاو در قاب‌های بتن مسلح دریافتند میان‌قاب از نوع بلوک اتوکلاو رفتار متفاوت‌تری نسبت به دو نوع میان‌قاب دیگر دارد و در دریافت‌های کمتر دچار خسارت می‌شود [۸].

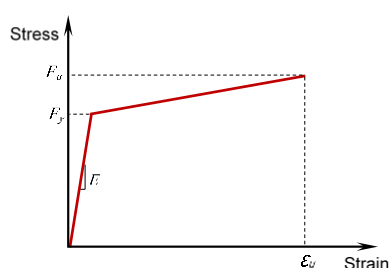
از مطالعات انجام شده در زمینه‌ی پانل‌های ساندویچی به عنوان میان‌قاب، می‌توان به پژوهش‌های هاشمی و همکاران اشاره نمود [۹ و ۱۰]. در سال ۲۰۱۸، هاشمی و همکاران رفتار لرزه‌ای درون صفحه‌ی قاب‌های فولادی دارای میان‌قاب‌های ساندویچی بتنی را به طور آزمایشگاهی ارزیابی نمودند. آن‌ها در پژوهش خود، دو پارامتر مهم یعنی نسبت بُعدی و فاصله‌ی اجرایی بین میان‌قاب و قاب را مدنظر قرار دادند. نتایج نشان داد نسبت بُعدی می‌تواند مود شکست میان‌قاب را تغییر دهد؛ به گونه‌ای که مود شکست میان‌قاب با نسبت بُعدی (نسبت طول دهانه به ارتفاع طبقه) بزرگتر از یک، خُردشدگی گوشه و برای میان‌قاب با نسبت بُعدی برابر با یک، ظهور ترک‌های قطری به عنوان مود شکست میان‌قاب مشاهده شد. این در حالی بود که برای میان‌قاب با نسبت بُعدی کمتر از یک، مود خرابی حاکم، ترکیبی از دو مود قبلی بود. درباره فاصله‌ی اجرایی بین پانل و قاب نیز مشخص شد با وجود این فاصله، رفتار قاب میان‌پر از نظر سختی اولیه و مقاومت حداکثر مانند یک قاب خالی خواهد بود؛ در صورتی که از نظر استهلاک انرژی، قاب میان‌پر با فاصله اجرایی در مقایسه با قاب خالی و قاب میان‌پر بدون فاصله اجرایی، به ترتیب ظرفیت بیشتر و کمتری از خود نشان داد.

هاشمی و رزاقی در سال ۲۰۲۲، از میان مدل‌های دستک قطری موجود برای درشت مدل‌سازی میان‌قاب‌های مصالح بنایی، هفت مدل از پرکاربردترین آن‌ها را انتخاب

نمودند و از آن‌ها برای مدل‌سازی پانل ساندویچی بتنی در قاب‌های فولادی استفاده کردند و با توجه به نتایج آزمایشگاهی قبلی، مدلی که بهترین عملکرد را داشت، معرفی نمودند [۱۱]. هاشمی و همکاران همچنین طی یک مطالعه‌ی عددی به کمک مدل‌سازی اجرای محدود، مهم‌ترین عوامل مؤثر بر رفتار درون صفحه‌ی قاب‌های میان‌پر از جمله مقاومت فشاری و ضخامت بتن پاشیده، سختی قاب پیرامونی، وجود بار ثقیل بر روی تیر فوقانی و نیز اثر بازشوها را بررسی نمودند [۱۲]. آن‌ها همچنین روابطی را برای تخمین مقاومت و سختی جانبی قاب‌های میان‌پر با پانل ساندویچی بتنی دارای بازشو پیشنهاد دادند. یاسمی و همکاران تأثیر سختی میان‌قاب پانل ساندویچی را در قاب ساده فلزی به طور آزمایشگاهی بررسی نمودند. آن‌ها دو نمونه قاب فولادی یک طبقه‌ی یک دهانه را در دو حالت اتصال کامل میان‌قاب به قاب و وجود فاصله اجرایی بین قاب و میان‌قاب تحت بارگذاری یک جهته شبه استاتیکی قرار دادند. نتایج نشان داد با توجه به رفتار مناسب میان‌قاب ساندویچی بتنی، سختی جانبی نمونه‌ها با شیب ملایم کاهش می‌یابد و در هیچ یک از نمونه‌ها با شرایط متفاوت اتصال قاب به میان‌قاب، شکست تُرد رخ نمی‌دهد [۱۳]. در تازه‌ترین پژوهش انجام شده در این حوزه، جاسم‌زاده و همکاران با درنظر گرفتن اثر پانل ساندویچی بتنی در قاب‌های فولادی، رابطه جدیدی را برای محاسبه زمان تناوب اصلی این سیستم سازه‌ای ارائه دادند و ادعا نمودند رابطه‌ی پیشنهادی نسبت به روابط تجربی موجود، از دقت بالاتری برخوردار است [۱۴].

همان‌گونه که اشاره شد، اگرچه از نظر اجرایی میان‌قاب‌های ساندویچی بتنی به دلیل فوایدشان - از جمله سهولت نصب و سرعت در اجرا، عایق مناسب صوتی و حرارتی، پایداری خارج از صفحه و ملاحظات اقتصادی - به تدریج جایگزین میان‌قاب‌های سنتی از نوع مصالح بنایی شده‌اند، اما از نظر فنی به ویژه از دیدگاه سازه‌ای، مطالعه‌ی جامعی که رفتار این دو نوع میان‌قاب را بررسی نموده و

میان‌قاب‌ها به ترتیب از المان پوسته چهار گرهی S4R و المان سه بعدی هشت گرهی C3D8R استفاده شده است. به منظور در نظر گرفتن اندرکنش بین دیوار و بدنه‌ی قاب شامل تیر و ستون‌ها از المان تماسی و از نوع تماس سخت استفاده شده است. خصوصیات مکانیکی سطوح تماس با استفاده از روش پنالتی و با در نظر گرفتن ضریب اصطکاک ۰/۵ تعریف شده است. برای تعریف رفتار غیرخطی مصالح فولادی، از معیار تسلیم فون-میسز با در نظر گرفتن منحنی دو خطی تنش-کرنش با سخت شدگی کرنشی مطابق شکل ۲ استفاده شده است.



شکل ۲- منحنی تنش-کرنش دوخطی تعریف شده برای رفتار غیرخطی فولاد

هم‌چنین برای رفتار غیرخطی میان‌قاب‌ها، معیار بتن آسیب دیده پلاستیک^۳ در نظر گرفته شده است. یکی از مدل‌های رفتاری برای مصالح ترد که اخیراً بسیار مورد توجه قرار گرفته است، مدل ساختاری بتن آسیب‌دیده پلاستیک است که در شکل ۳ به صورت شماتیک مبانی آن ارائه شده است. در این مدل که در کتابخانه نرم‌افزار آباکوس وجود دارد، پس از آنکه مصالح در حالت فشاری یا کششی به حداکثر مقاومت خود می‌رسند، آسیب شروع می‌شود (قسمت نرم‌شدگی) و میزان آسیب به صورت درصد توسط شاخص d (در حالت کشش و فشار) محاسبه می‌شود و سپس توزیع آسیب و خرابی سازه به صورت کانتور شاخص آسیب ارائه می‌شود. به منظور استفاده از مدل ساختاری بتن آسیب‌دیده پلاستیک در نرم‌افزار آباکوس، باید منحنی تنش-کرنش مصالح در حالت فشاری و کششی به صورت

خواص سازه‌ای آن‌ها را با یکدیگر مقایسه نماید، در پژوهش‌های پیشین دیده نمی‌شود. بنابراین پژوهش پیش‌رو با هدف مقایسه‌ی رفتار درون صفحه‌ی پانل ساندویچی بتنی با میان‌قاب مصالح بنایی در قاب‌های فولادی تعریف شده است. برای این منظور پس از مدل‌سازی عددی به روش اجزای محدود و اعتبارسنجی مدل‌ها با نتایج آزمایشگاهی موجود، با ایجاد مدل‌های مشابه، مقایسه‌ی بین میان‌قاب‌های مصالح بنایی با میان‌قاب پانل ساندویچی بتنی تحت بار جانبی یکنوا انجام می‌شود. دو نوع میان‌قاب مصالح بنایی متداول از قبیل آجر فشاری و بلوک بنایی اتوکلاو برای این مطالعه در نظر گرفته شده است. عوامل مهم در رفتار درون صفحه‌ی قاب‌ها از جمله نسبت بُعدی و تعداد دهانه نیز مورد بررسی قرار خواهند گرفت.

۲- مدل‌سازی و اعتبارسنجی

در این بخش به نحوه‌ی مدل‌سازی و اعتبارسنجی مدل‌ها با نتایج آزمایشگاهی موجود برای میان‌قاب‌های مورد نظر، پرداخته می‌شود. اگر چه هر دو مصالح بتنی و بنایی از نوع مصالح ترد هستند، اما مصالح بنایی به دلیل وجود درز ملات، خصوصیات متفاوتی در جهات مختلف نسبت به بتن خواهد داشت. مصالح بنایی معمولاً با استفاده از دو رویکرد ریزمدل‌سازی^۱ و درشت مدل‌سازی^۲ شبیه‌سازی می‌شوند. در روش ریزمدل‌سازی، آجرها و ملات بین آن‌ها توسط المان‌های پیوسته و اتصال بین ملات و آجر به وسیله‌ی المان‌های ناپیوسته مدل می‌شود؛ این در حالی است که در روش درشت مدل‌سازی، آجر، ملات و سطح تماس آجر و ملات توسط یک محیط پیوسته با خصوصیات معادل مجموع مواد به کار رفته، به صورت همگن شبیه‌سازی می‌شوند. در مطالعه حاضر، از روش درشت مدل‌سازی به کمک نرم افزار اجزای محدود ABAQUS [۱۵] استفاده شده است. بر این اساس، برای مدل‌سازی قاب فولادی و

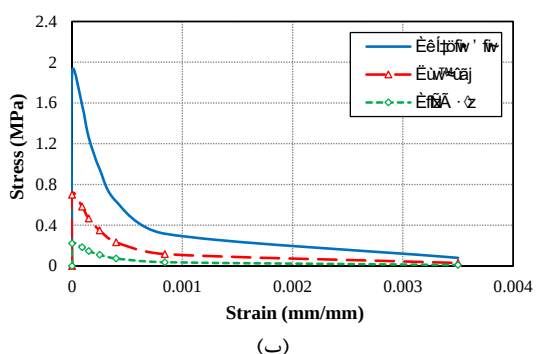
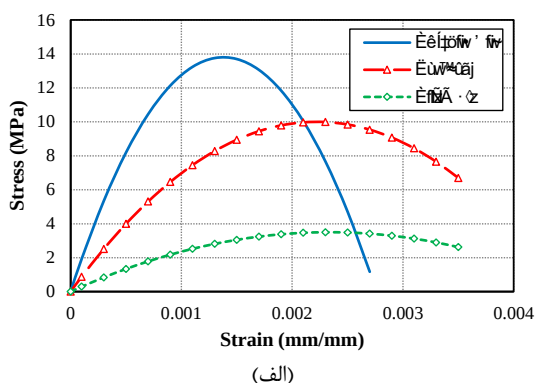
³- Concrete Damage Plasticity (CDP)

¹- Micro modeling

²- Macro modeling

نمونه آزمایشگاهی اول یک قاب فولادی با ستون‌هایی به مقطع IPB_{L180} و تیرهایی به مقطع IPB_{L120} و میان‌قابی به عرض ۲/۰۷۹ متر و ارتفاع ۱/۳۸۶ متر با ضخامت ۹/۵ سانتی‌متر را شامل می‌شد [۶]. نمونه آزمایشگاهی دوم از یک قاب فولادی با تیرها و ستون‌هایی به مقطع IPB_{L120} و میان‌قابی به عرض ۲/۳۸ متر و ارتفاع ۱/۵۰ متر و ضخامت ۱۰ سانتی‌متر تشکیل شده بود [۷]. نمونه آزمایشگاهی سوم نیز عبارت بود از یک قاب فولادی با ستون‌هایی به مقطع IPB_{L140} ، تیرهایی به مقطع IPB_{L160} و میان‌قابی به عرض ۱/۶۰ متر و ارتفاع ۱/۶۲ متر [۹].

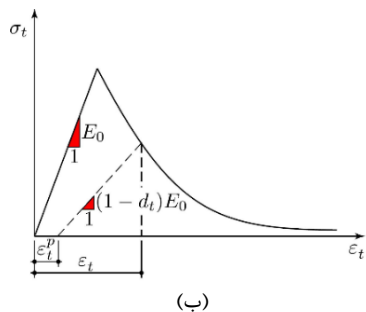
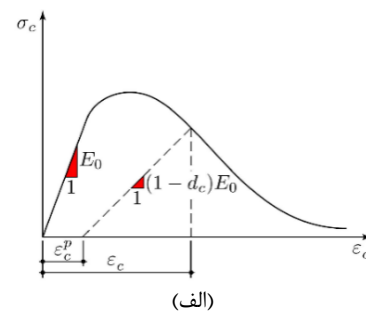
جزئیات اجرایی پانل ساندویچی بتنی همانند شکل ۱ در نظر گرفته شد. به منظور تعیین اندازه مناسب مش‌ها، از تحلیل حساسیت بر روی مش مطابق مراجع [۱۶ و ۱۷] استفاده شد.



شکل ۴- منحنی تنش-کرنش استخراج شده برای میان‌قاب‌های مختلف؛ (الف) فشاری، (ب) کششی

مش‌بندی به صورت منظم با اندازه ۷ سانتیمتر برای قاب و دیوار در همه مدل‌ها در نظر گرفته شد. مشخصات غیرخطی مصالح قاب و میان‌قاب به طور کامل برای هر سه

مجزا در نرم‌افزار آباکوس وارد شود (قسمت خطی، غیرخطی و نرم‌شدگی باید به صورت کامل تعریف شود).



شکل ۳- تعریف شاخص آسیب در مدل ساختاری بتن آسیب‌دیده پلاستیک برای مصالح تُرد؛ (الف) در فشار، (ب) در کشش [۱۵]

برای این منظور مطابق مشخصات مصالح مورد استفاده در مراجع، منحنی تنش-کرنش مصالح استخراج شده و مطابق شکل ۴ منحنی تنش-کرنش مصالح ارائه شده است. از آنجا که به دست آوردن مقادیر پلاستیسیته مصالح بنایی آجری، نیازمند آزمایش‌های مختلف است، در پژوهش حاضر، با توجه به تشابهات موجود، از مقادیر پیشنهادی مرجع [۱۶] استفاده شده است.

برای اعتبارسنجی مدل‌های عددی از سه مطالعه‌ی آزمایشگاهی به شرح ذیل استفاده شده است:

- قاب فولادی با میان‌قاب مصالح بنایی از نوع آجر فشاری توپر از مطالعه‌ی محمدی و امامی [۶].
- قاب فولادی با میان‌قاب مصالح بنایی از نوع بلوک سبک بتنی (اتوکلاو) از مطالعه‌ی اسدزاده و همکاران [۷].

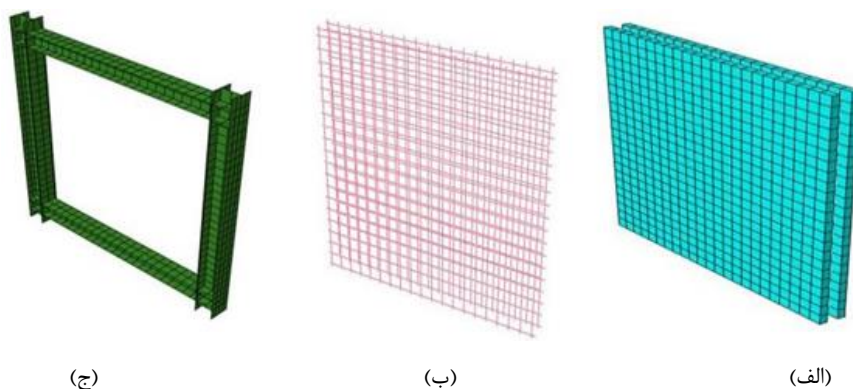
- قاب فولادی با پانل ساندویچی بتنی (به صورت پاشیده) از مطالعه‌ی هاشمی و همکاران [۹].

مدل در جدول ۱ ارائه شده است. لازم به ذکر است از آنجایی که هسته میانی پانل ساندویچی، یعنی لایه پلی استایرن، در رفتار درون صفحه‌ی قاب‌های میان‌پر نقش سازه‌ای ایفا نمی‌کند، در مدل‌سازی این نوع پانل به عنوان میان‌قاب، تنها دو لایه بتن پاشیده^۴ به علاوه شبکه سیمی فولادی به صورت کاملاً مدفون در بتن پاشیده مدل‌سازی شد (شکل ۵). شبکه سیمی فولادی از سیم‌هایی به قطر ۲/۴ میلی‌متر با چشمه‌های ۸۰ میلی‌متری و برشگیرهایی به قطر ۳ میلی‌متر تشکیل شده بود. مدل‌های سه بُعدی ایجاد شده، تحت بارگذاری درون صفحه‌ی یکنوا اعمالی به تراز تیر فوقانی قرار گرفتند.

برای اعتبارسنجی مدل‌ها دو معیار در نظر گرفته شد: (۱) تطابق منحنی بار- تغییرمکان بود که نمودار آن‌ها برای هر سه نمونه آزمایشگاهی مورد مطالعه در شکل‌های ۶ الی ۸ آمده است؛ و (۲)، مقایسه الگوی ترک‌خوردگی و نحوه‌ی توزیع تنش در میان‌قاب‌ها بود که نتایج آن در شکل‌های ۹ الی ۱۱ قابل مشاهده است. مطابق شکل‌های ۶ الی ۸، نمودارهای بار- تغییرمکان برای مدل‌های اجزای محدود، هم از نظر سختی اولیه و هم از نظر حداکثر مقاومت جانبی، تطابق قابل قبولی با نمونه‌های آزمایشگاهی نشان دادند.

جدول ۱- مشخصات مکانیکی مصالح قاب و میان‌قاب‌ها، مورد استفاده برای اعتبارسنجی مدل‌ها

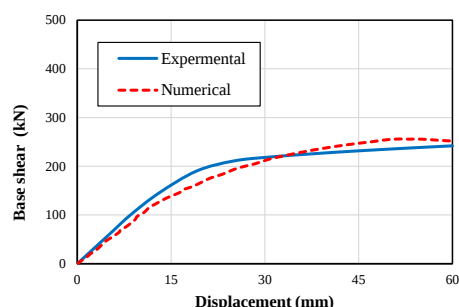
مدل	نوع مصالح	مشخصه مصالح	مقدار	واحد
قاب میانپر با آجر فشاری [۶]	فولاد	مدول الاستیسیته	۱۷۱	GPa
		مقاومت حد تسلیم	۳۱۳/۸	MPa
		مقاومت حد نهایی	۴۸۴/۴	MPa
		کرنش نهایی	۰/۱۴۱۵	
	منشور بنایی	مدول الاستیسیته	۱۸۹۲	MPa
		مقاومت فشاری	۹/۹	MPa
		مقاومت کششی	۰/۶۹	MPa
قاب میانپر با بلوک سبک بتنی [۷]	فولاد	مدول الاستیسیته	۲۰۲	GPa
		مقاومت حد تسلیم	۲۹۷/۵	MPa
		مقاومت حد نهایی	۴۳۵/۵	MPa
		کرنش نهایی	۰/۱۸	
	منشور بنایی	مدول الاستیسیته	۱۶۳۷	MPa
		مقاومت فشاری	۳/۴	MPa
		مقاومت کششی	۰/۲۲	MPa
قاب میانپر با پانل ساندویچی بتنی [۹]	فولاد	مدول الاستیسیته (E_s)	۲۰۰	GPa
		مقاومت حد تسلیم (F_y)	۴۲۰	MPa
		مقاومت حد نهایی (F_u)	۵۰۰	MPa
		کرنش نهایی (ϵ_u)	۰/۲۴	
	بتن پاشیده	مدول الاستیسیته (E_c)	۲۳/۴	GPa
		مقاومت فشاری (f_c)	۱۳/۸	MPa
		مقاومت کششی (f_t)	۱/۹	MPa
	شبکه سیمی فولادی	مدول الاستیسیته (E_w)	۲۰۰	GPa
		مقاومت حد تسلیم (F_y)	۳۲۰	MPa
		مقاومت حد نهایی (F_u)	۷۳۰	MPa



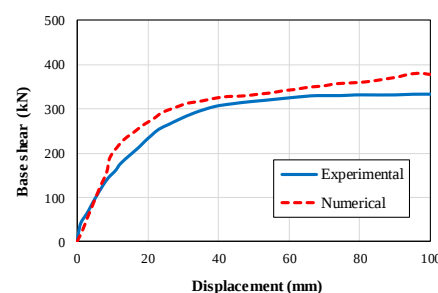
شکل ۵- نحوه مدل‌سازی قاب میان‌پر با پانل ساندویچی: (الف) دو لایه بتن پاشیده شده، (ب) شبکه سیمی فولادی، (ج) قاب پیرامونی فولادی

در مقایسه با نمونه‌ی آزمایشگاهی دیده می‌شود به این دلیل است که نمونه‌های آزمایشگاهی تحت بار چرخه‌ای قرار داشتند؛ در حالی که مدل‌های عددی، تحت بار یکنوا تحلیل شده‌اند. همچنین نوع مدل رفتاری مصالح تعریف شده برای مدل‌های اجزای محدود نیز می‌تواند از دیگر عوامل تأثیرگذار بر این مسئله باشد.

برای اطمینان بیشتر، علاوه بر قاب میان‌پر، قاب خالی نیز مدل‌سازی شد که نتایج آن در شکل‌های ۶ الی ۸ قابل مشاهده است. علاوه بر شکل‌های مذکور، مقایسه‌ی شاخص خرابی مدل‌های عددی با نمونه‌ی آسیب‌دیده‌ی آزمایشگاهی و نحوه‌ی تغییر شکل آن‌ها در شکل‌های ۹ الی ۱۱ ارائه شده است که بر اعتبار مدل عددی و نتایج آن، صحت می‌گذارد. برخی موارد اختلافی که در شکل خرابی‌ها

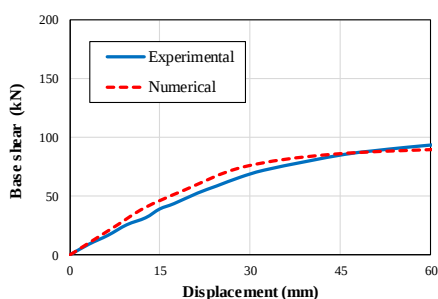


(ب)

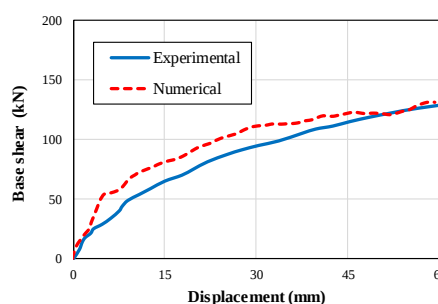


(الف)

شکل ۶- مقایسه منحنی نیرو-تغییر مکان مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی محمدی و امامی [۶]، برای میان‌قاب آجر فشاری؛ (الف) قاب میان‌پر، (ب) قاب خالی

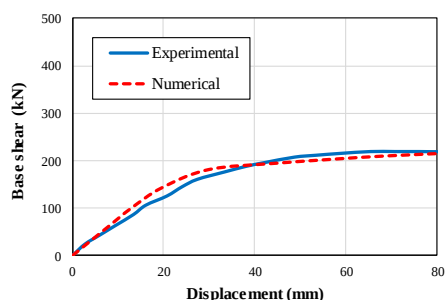


(ب)

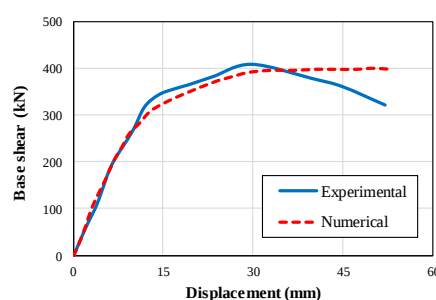


(الف)

شکل ۷- مقایسه منحنی نیرو-تغییر مکان مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی اسدزاده و همکاران [۷]، برای میان‌قاب بلوک سبک بتنی؛ (الف) قاب میان‌پر، (ب) قاب خالی



(ب)



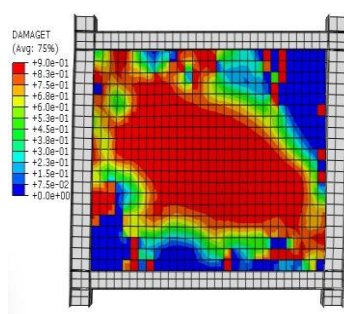
(الف)

شکل ۸- مقایسه منحنی نیرو-تغییر مکان مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی هاشمی و همکاران [۹]، برای میان‌قاب ساندیچی بتنی؛ (الف) قاب میان‌پُر، (ب) قاب خالی

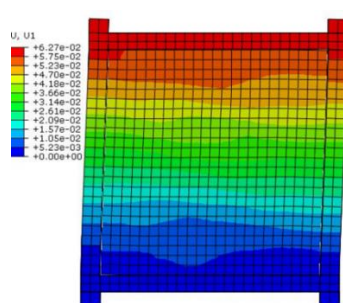
۳- مطالعه پارامتری

به منظور درک بهتر رفتار درون صفحه‌ی قاب‌های میان‌پُر مورد مطالعه، سه عامل مهم که در ادبیات فنی توسط پژوهشگران به آن‌ها اشاره شده، انتخاب و در این قسمت بررسی شده است.

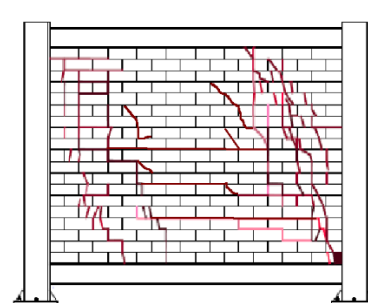
همان‌گونه که از شکل‌های ۶ الی ۱۱ مشخص است، مکانیزم خرابی هر سه میان‌قاب با یکدیگر متفاوت هستند، به طوری که برای میان‌قاب بلوک سبک بتنی الگوی خرابی به صورت افقی در وسط دیوار رخ داده است، این در حالی است که الگوی آسیب میان‌قاب آجری نسبتاً قطری و در میان‌قاب ساندیچی بتنی کاملاً قطری است.



(ج)

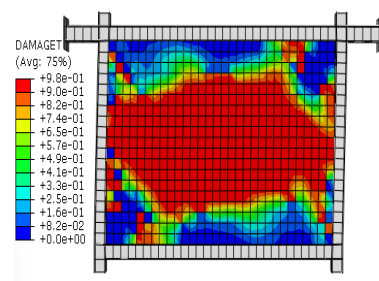


(ب)

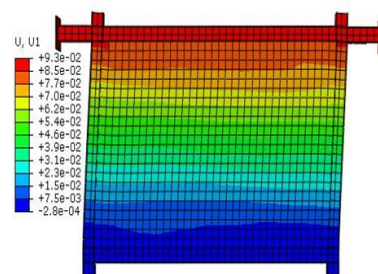


(الف)

شکل ۹- مقایسه نتایج مدل‌سازی عددی با نتایج آزمایشگاهی برای میان‌قاب بنایی آجر فشاری؛ (الف) نمونه آزمایشگاهی [۶]، (ب) تغییر شکل مدل، (ج) شاخص آسیب در مدل عددی



(ج)

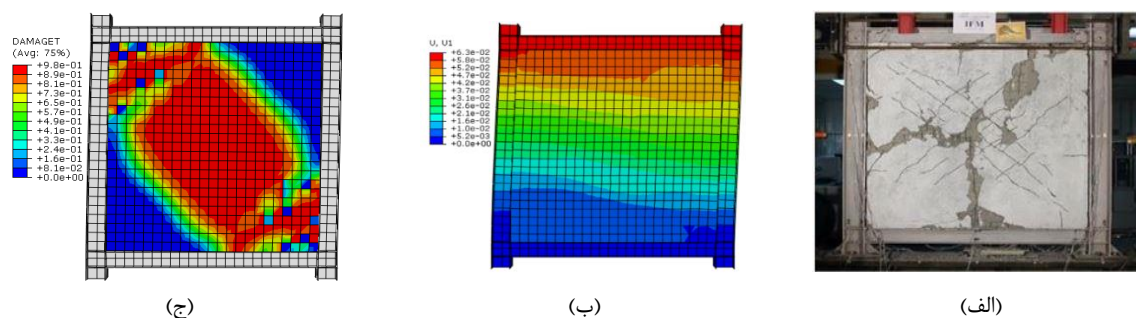


(ب)



(الف)

شکل ۱۰- مقایسه نتایج مدل‌سازی عددی با نتایج آزمایشگاهی برای میان‌قاب بلوک سبک بتنی؛ (الف) نمونه آزمایشگاهی [۷]، (ب) تغییر شکل مدل، (ج) شاخص آسیب در مدل عددی



شکل ۱۱- مقایسه نتایج مدل سازی عددی با نتایج آزمایشگاهی برای میان قاب ساندویچی بتنی؛ (الف) نمونه آزمایشگاهی [۹]، (ب) تغییر شکل مدل، (ج) شاخص آسیب در مدل عددی

این عوامل عبارتند از: (۱) نوع میان قاب از نظر مصالح که موضوع اصلی مقاله‌ی پیش‌رو است، (۲) نسبت بُعدی میان قاب و (۳) تعداد دهانه‌ی قاب. روش کار به این صورت بود که یک قاب فولادی از بین مطالعات آزمایشگاهی مرحله قبل، به عنوان مرجع انتخاب شد و با حفظ شرایط هندسی و سازه‌ای مشابه، عوامل مورد اشاره‌ی فوق، مطالعه شدند که در ادامه به تفصیل درباره‌ی آن‌ها توضیح داده می‌شود.

۱-۳- اثر نوع میان قاب

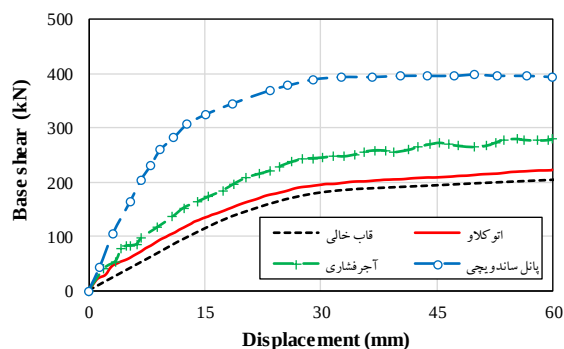
تأثیر نوع میان قاب به عنوان هدف اصلی مقاله‌ی پیش‌رو، در این بخش بررسی می‌شود. با توجه به رفتار متفاوت مصالح مورد مطالعه در این پژوهش به عنوان میان قاب که منحنی تنش- کرنش آن‌ها در شکل ۴ از نظر گذشت، قاب میان‌پر دارای این نوع میان قاب‌ها نیز رفتار درون صفحه‌ای متفاوتی خواهد داشت. برای بررسی دقیق این موضوع، قاب فولادی مرجع [۹] با نسبت بُعدی ۱/۰ انتخاب و سپس میان قاب‌های مختلف درون آن قرار داده شد. به جز مشخصات مصالح میان قاب، سایر موارد از قبیل هندسه و شرایط تکیه‌گاهی قاب‌ها در تمامی حالت‌ها یکسان در نظر گرفته شد. پس از آن، قاب‌های میان‌پر تحت بار جانبی درون صفحه به صورت یکنوا قرار گرفتند.

اعمال بار جانبی تا رسیدن تغییر مکان نسبی قاب‌ها به حد مجاز مذکور در استاندارد [۱۸] ۲۸۰۰، یعنی برابر ۲/۵ درصد ارتفاع قاب، ادامه یافت. نمودار بار- تغییر مکان مدل‌ها در شکل ۱۲ ارائه شده است. همان‌گونه که انتظار

می‌رفت، با توجه به مشخصات مکانیکی بالاتر پانل‌های ساندویچی، قاب میان‌پر متناظر آن، بیشترین سختی اولیه و مقاومت جانبی را نشان داده است. قاب میان‌پر با بلوک سبک بتنی (اتوکلاو) در بین قاب‌های میان‌پر کمترین سختی و مقاومت را دارد؛ به طوری که نزدیک‌ترین نمودار به نمودار قاب خالی را به دست داده است. علت آن را می‌توان ساختار متخلخل و بسیار ترد بلوک اتوکلاو دانست. این نتیجه با یافته‌های بات و همکاران [۸] نیز مطابقت دارد. طبق نتایجی که از شکل ۱۲ استخراج می‌شود، سختی اولیه قاب میان‌پر دارای میان قاب ساندویچی بتنی حدود ۱/۹۰ برابر قاب میان‌پر با آجر فشاری و ۲/۹۵ برابر قاب میان‌پر با بلوک اتوکلاو است. همچنین حداکثر مقاومت جانبی قاب میان‌پر دارای پانل ساندویچی به ترتیب ۱/۴۸ و ۱/۸۰ برابر بیشینه مقاومت جانبی قاب‌های میان‌پر با آجر فشاری و بلوک اتوکلاو است. این افزایش مقاومت و سختی در قاب فولادی میان‌پر با پانل ساندویچی بتنی نسبت به قاب فولادی دارای میان قاب مصالح بنایی را می‌توان به دو دلیل نسبت داد: اول، ماهیت خود مصالح بتن که در مقایسه با مصالح بنایی تا حدودی همگن است و شکست یا لغزش درز ملات که از جمله نقاط ضعف مصالح بنایی است، در بتن وجود ندارد. دوم، وجود شبکه‌ی سیمی فولادی در بتن پاشیده است که همانند فولاد مسلح کننده رفتار می‌کند و باعث بهبود عملکرد بتن پاشیده، در مقایسه با دیوار مصالح بنایی، می‌شود.

عامل، سه نوع قاب میان‌پر که دارای میان‌قاب با نسبت‌های بُعدی ۰/۵ و ۱/۰ و ۱/۵ (به نمایندگی از نسبت بُعدی کمتر، برابر و بزرگتر از یک) بودند، ایجاد شدند که در شکل ۱۳ به تصویر کشیده شده‌اند. لازم به ذکر است نسبت بُعدی در این پژوهش، به صورت نسبت طول دهانه به ارتفاع قاب تعریف شده است.

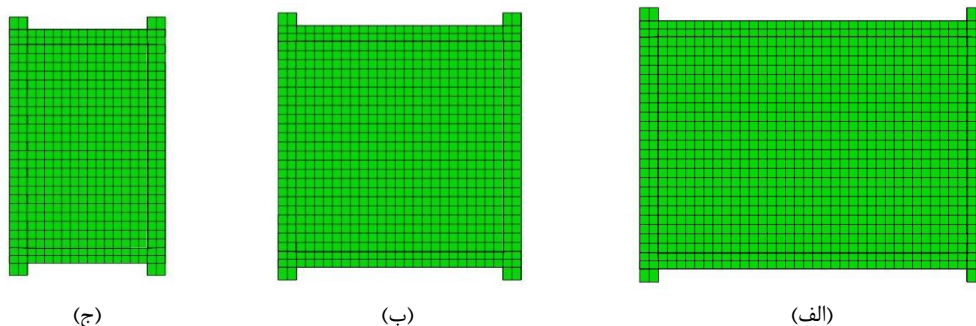
نتایج مربوط به مقایسه‌ی حداکثر مقاومت جانبی و سختی درون صفحه‌ی قاب‌های میان‌پر با نسبت‌های بُعدی مختلف برای هر سه نوع میان‌قاب در شکل ۱۴ ارائه شده است.



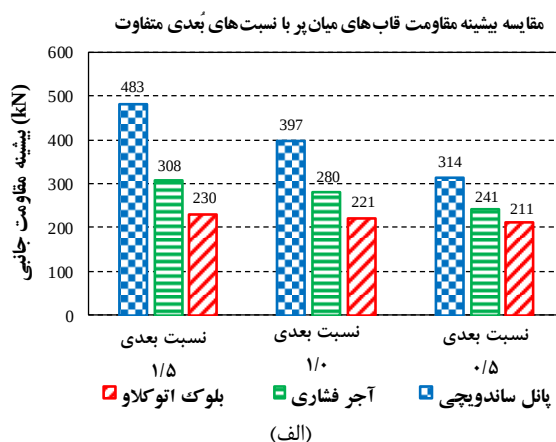
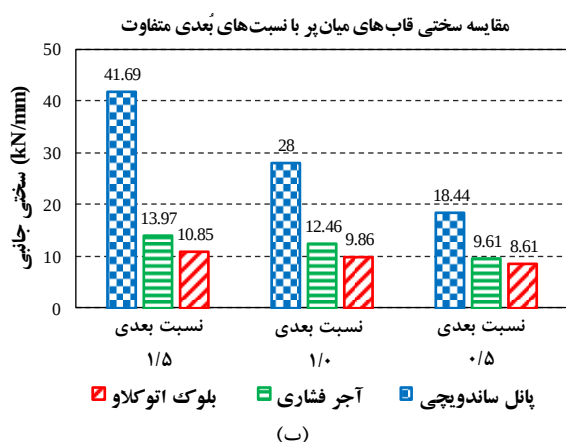
شکل ۱۲- مقایسه منحنی نیرو - جابجایی قاب خالی و قاب‌های میان‌پر در شرایط هندسی و سازه‌ای یکسان (نسبت بُعدی ۱/۰)

۳-۲- اثر نسبت بُعدی

نسبت بُعدی یکی از مهم‌ترین عوامل در رفتار درون صفحه‌ی قاب‌های میان‌پر است [۹]. به منظور بررسی این



شکل ۱۳- مدل قاب‌ها با نسبت ابعادی (طول دهانه به ارتفاع قاب) مختلف؛ (الف) نسبت بُعدی ۱/۵، (ب) نسبت بُعدی ۱/۰، و (ج) نسبت بُعدی ۰/۵



شکل ۱۴- مقایسه‌ی رفتار قاب‌های میان‌پر دارای نسبت‌های بُعدی مختلف؛ (الف) بیشینه مقاومت، و (ب) سختی جانبی

افزایش نسبت بُعدی، بیشتر می‌شود. دلیل آن را می‌توان به مشارکت بیشتر میان‌قاب در رفتار درون صفحه‌ی قاب‌ها با افزایش طول دهانه نسبت داد. یادآور می‌شود در استخراج این نتایج، از سختی مؤثر به جای سختی اولیه استفاده شده

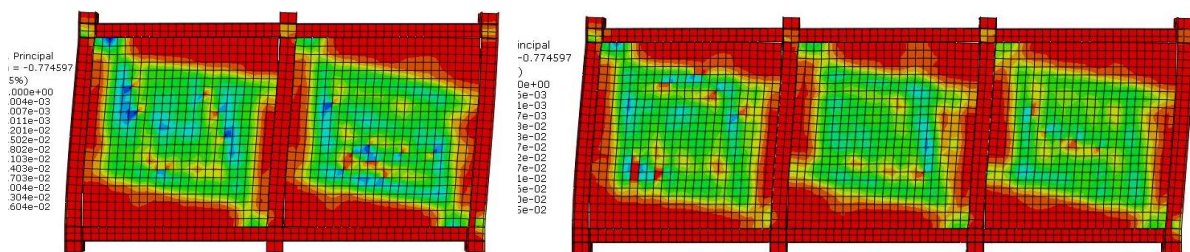
همان‌طور که ملاحظه می‌شود برای هر سه نوع نسبت بُعدی، مقاومت و سختی جانبی مدل‌های پانل ساندویچی نسبت به میان‌قاب‌های بنایی بیشتر به دست آمده است. این تفاوت در مقاومت و سختی مدل‌ها، با

است. سختی مؤثر به صورت شیب خط واصل از مبدأ تا نقطه‌ای روی منحنی پوش که بیانگر حد تسلیم سازه است، تعریف می‌شود.

۳-۳- اثر تعداد دهانه

با توجه به هزینه‌ی بالای انجام آزمایش بر روی نمونه‌های بزرگ مقیاس قاب‌های چنددهانه، معمولاً پژوهشگران در مطالعات آزمایشگاهی خود قاب‌های یک دهانه را مدنظر قرار می‌دهند. بر همین اساس در این بخش به بررسی اثر تعداد دهانه‌های قاب، به عنوان آخرین عامل مؤثر در رفتار جانبی قاب‌های میان‌پر در مقاله‌ی پیش رو

پرداخته می‌شود. برای بررسی آن، علاوه بر قاب یک دهانه که نتایج آن در بخش‌های قبلی ارائه شد، قاب‌های میان‌پر دو و سه دهانه با میان‌قاب‌های مختلف نیز مدل‌سازی و تحلیل شدند. شکل مربوط به توزیع کرنش اصلی برای مدل‌های دو و سه دهانه برای مدل دارای پانل ساندویچی بتنی در شکل ۱۵ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود مکانیزم تشکیل مفصل‌های خمیری در قاب و تشکیل دستک‌های قطری فشاری در دهانه‌های دوم و سوم نیز مشابه قاب‌های یک دهانه است. برای مقایسه‌ی بهتر، نتایج این بخش در جدول ۲ ارائه شده است.



شکل ۱۵- نحوه تغییر شکل و توزیع کرنش اصلی در مدل‌های دو و سه دهانه (میان‌قاب پانل ساندویچی بتنی)

جدول ۲- مقایسه سختی و مقاومت قاب‌های میان‌پر چند دهانه با قاب میان‌پر یک دهانه

نوع میان‌قاب	مشخصه سازه‌ای	یک دهانه	دو دهانه	سه دهانه	نسبت دو دهانه به یک دهانه	نسبت سه دهانه به یک دهانه
آجر فشاری	سختی (kN/mm)	۱۲/۴۶	۲۰/۶۸	۲۸/۴۵	۱/۶۶	۲/۲۸
	مقاومت (kN)	۲۸۰	۴۷۴	۶۴۷	۱/۶۹	۲/۳۱
بلوک اتوکلاو	سختی (kN/mm)	۹/۸۶	۱۸/۷۰	۲۴/۷۰	۱/۸۹	۲/۵۰
	مقاومت (kN)	۲۲۱	۳۴۸	۴۷۱	۱/۵۶	۲/۱۲
پانل ساندویچی	سختی (kN/mm)	۲۸/۰۰	۶۷/۹۰	۸۴/۳۲	۲/۴۲	۳/۰۱
	مقاومت (kN)	۳۹۷	۷۸۰	۱۱۸۷	۱/۹۶	۲/۹۹

اگر چه به طور میانگین برای میان‌قاب ساندویچی بتنی، میزان سختی و مقاومت در قاب‌های دو و سه دهانه تقریباً ۲ و ۳ برابر شده، اما نرخ افزایش مشخصه‌های متناظر برای میان‌قاب‌های مصالح بنایی در قاب‌های دو و سه دهانه کمتر از مقادیر متناظر در پانل ساندویچی است. به عبارت

دیگر میزان مشارکت میان‌قاب ساندویچی بتنی در افزایش سختی و مقاومت قاب‌های دو و سه دهانه نسبت مستقیم با میزان مشارکت میان‌قاب در قاب‌های تک دهانه دارد. بنابراین در مدل‌سازی کاربردی میان‌قاب‌ها، نظیر استفاده از قید قطری فشاری، باید به این نکته توجه کرد.

۴- نتیجه‌گیری

کم میان‌قاب متناظر بر رفتار جانبی قاب فولادی برشمرد.

۴- با توجه به تأثیر قابل توجه میان‌قاب‌های ساندویچی بتنی و آجر فشاری بر رفتار قاب‌های فولادی، اثر این اعضا که معمولاً غیرسازه‌ای تلقی می‌شوند، در تحلیل و طراحی سازه نباید نادیده گرفته شوند.

۵- برای سه نسبت بُعدی ۰/۵، ۱/۰ و ۱/۵، مقاومت و سختی جانبی مدل‌های پانل ساندویچی نسبت به میان‌قاب‌های بنایی بیشتر به دست آمد. این تفاوت در مقاومت و سختی مدل‌ها، با افزایش نسبت بُعدی، قابل ملاحظه‌تر شد.

۶- میزان مشارکت میان‌قاب ساندویچی بتنی در افزایش سختی و مقاومت قاب‌های میانپُر دو و سه دهانه، نسبت مستقیم با میزان مشارکت میان‌قاب در قاب‌های میانپُر تک دهانه دارد. این افزایش در مشخصه‌های سازه‌ای در مدل‌های دارای میان‌قاب مصالح بنایی نسبت به پانل ساندویچی کمتر محاسبه شد. لذا برای مدل‌سازی کاربردی میان‌قاب در قاب‌های چند دهانه، نظیر استفاده از مدل قید قطری فشاری، این نکته را باید مدنظر قرار داد.

در پایان، با توجه به نتایج بدست آمده، در یک اظهار نظر کلی می‌توان گفت استفاده از پانل‌های ساندویچی به عنوان میان‌قاب برای قاب‌های محیطی ساختمان (دیوار خارجی) می‌تواند مفید باشد. زیرا با توجه به افزایش سختی و مقاومت جانبی سازه بر اثر وجود این نوع میان‌قاب‌ها، نیاز ساختمان به عناصر قائم برابر جانبی مانند دیوار برشی (یا بادبند) را تا حدی مرتفع می‌سازد. همچنین به دلیل استفاده از لایه‌ی پلی‌استایرن، این پانل‌ها می‌توانند نقش عایق صوتی و حرارتی را به خوبی ایفا کنند. علاوه بر آن با توجه به وجود شبکه‌های سیمی فولادی مدفون در بتن، پایداری خارج از صفحه‌ی این دیوارها به خوبی تأمین شده و خطر ریزش آوار در زمین‌لرزه‌های احتمالی به حداقل می‌رسد. البته اتصال پانل‌های ساندویچی به قاب پیرامونی

این مطالعه با هدف مقایسه‌ی رفتار درون صفحه‌ای میان‌قاب ساندویچی بتنی با میان‌قاب‌های متداول مصالح بنایی انجام شد. ابتدا سه مطالعه‌ی آزمایشگاهی شامل یک نمونه قاب فولادی میانپُر با پانل ساندویچی بتنی و دو نمونه قاب فولادی دارای میان‌قاب مصالح بنایی از نوع آجر فشاری و بلوک سبک اتوکلاو انتخاب و به کمک نرم‌افزار اجزای محدود ABAQUS [۱۵] مدل‌سازی شدند. پس از اعتبارسنجی مدل‌ها، یک مطالعه‌ی پارامتری با درنظر گرفتن عوامل تأثیرگذار بر رفتار درون صفحه‌ی قاب‌های میانپُر از قبیل نوع مصالح میان‌قاب، نسبت بُعدی و تعداد دهانه انجام شد. به طور خلاصه، یافته‌های این پژوهش را می‌توان در قالب محورهای ذیل بیان نمود:

۱- مدل‌های اجزای محدود ارائه شده در این مطالعه، تطابق قابل قبولی هم از نظر منحنی رفتاری و هم از لحاظ توزیع تنش و گسترش آسیب با نتایج آزمایشگاهی برای هر سه نوع میان‌قاب نشان داد.

۲- در بین مدل‌های مورد مطالعه، مدل با میان‌قاب پانل ساندویچی بتنی دارای بیشترین سختی و مقاومت جانبی نسبت به سایر مدل‌ها بود؛ به گونه‌ای که سختی اولیه مدل مزبور حدود ۲ برابر قاب میانپُر با آجر فشاری و ۳ برابر قاب میانپُر با بلوک اتوکلاو به دست آمد. همچنین حداکثر مقاومت جانبی مدل قاب دارای میان‌قاب پانل ساندویچی به ترتیب حدود ۱/۵ و ۱/۸ برابر مدل‌های قاب با میان‌قاب آجر فشاری و بلوک اتوکلاو محاسبه شد.

۳- بر اساس نتایج به دست آمده، مدل قاب میانپُر با بلوک سبک اتوکلاو دارای کمترین سختی و مقاومت بود به گونه‌ای که نمودار بار-تغییر مکان آن تفاوت چندانی با قاب خالی نداشت. ساختار متخلخل بلوک اتوکلاو و پایین بودن مشخصات مکانیکی مصالح مربوطه را می‌توان از دلایل تأثیر

و مهار آن‌ها و نیز اثر این نوع میان‌قاب‌ها در تحلیل و طراحی سازه باید به نحو مناسبی مدنظر قرار گیرد.

References

- [1] Polyakov V. Masonry in framed buildings. Moscow: Gosudarstvennoe Izdatelstvo po Stroitelstvu I Arkhitekture; 1956. (Translated into English by Cairns GL).
- [2] Govindan P, Lakshmipathy M, Santhakumar AR. Ductility of infilled frames. *Journal Proceedings*. 1986;83(4):567–76.
- [3] Moghaddam HA, Dowling PJ. The state of the art in infilled frames. London: Imperial College of Science and Technology, Department of Civil Engineering; 1987.
- [4] Saneinejad A, Hobbs B. Inelastic design of infilled frames. *Journal of Structural Engineering*. 1995;121(4):634–50.
- [5] Mehrabi AB, Shing PB, Schuller MP, Noland JL. Performance of masonry-infilled R/C frames under in-plane lateral loads. Boulder (CO): University of Colorado; 1994. Report No.: CD/SR-94/6.
- [6] Mohammadi M, Motovali Emami SM. Multi-bay and pinned connection steel infilled frames; an experimental and numerical study. *Engineering Structures*. 2019;188:43–59. **doi:10.1016/j.engstruct.2019.03.028**
- [7] Asadzadeh SA, Mohammadi M, Attari NKA, Zareei SA. An experimental study on the effect of frame-to-wall connection type on the seismic behavior of steel frames infilled with autoclave-cured aerated concrete blocks. *Advances in Structural Engineering*. 2020;23(4):642–56. **doi:10.1177/1369433219877789**
- [8] Bhat ZM, Singh Y, Agarwal P. Cyclic testing and diagonal strut modelling of different types of masonry infills in reinforced concrete frames designed for modern codes. *Engineering Structures*. 2024;317:118695. **doi:10.1016/j.engstruct.2024.118695**
- [9] Hashemi SJ, Razzaghi J, Moghadam AA, Lourenço PB. Cyclic testing of steel frames infilled with concrete sandwich panels. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2018;18(2):557–72. **doi:10.1016/j.acme.2017.10.007**
- [10] Hashemi SJ, Razzaghi J, Moghadam AS. Behaviour of sandwich panel infilled steel frames with different interface conditions. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings*. 2018;171(2):166–77. **doi:10.1680/jstbu.16.00149**
- [11] Hashemi SJ, Razzaghi J. Comparative study on diagonal strut models for concrete sandwich panels in steel frames. *Asian Journal of Civil Engineering*. 2022;23:125–39. **doi:10.1007/s42107-022-00416-0**
- [12] Hashemi SJ, Razzaghi J, Lourenço PB. In-plane behavior of concrete sandwich panels bounded by steel frames: A numerical analysis approach. *International Journal of Civil Engineering*. 2022;20:885–905. **doi:10.1007/s40999-022-00705-4**
- [13] Yasemi K, Mirhosseini SM, Farahbod F, Salehi S, Zeighami E. Investigating the effect of stiffness of non-structural walls consisting of panels with polystyrene core and lightweight concrete coating in infill-steel frame interaction. *Journal of Structural and Construction Engineering*. 2023;10(5):129–43. **doi:10.22065/jsce.2022.349661.2871** [In Persian]
- [14] Ranjbar MJ, Hashemi SJ, Zakian P. Fundamental period of steel moment-resisting frames infilled with concrete sandwich panels. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*. 2025;34(5):e70012. **doi:10.1002/tal.70012**
- [15] Dassault Systèmes. ABAQUS Standard User's Manual. Version 6.14. Providence (RI): Dassault Systèmes Corp; 2014.
- [16] Bolhassani M, Hamid AA, Lau AC, Moon F. Simplified micro modeling of partially grouted masonry assemblages. *Construction and Building Materials*. 2015;83:159–73. **doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.03.021**
- [17] Rahnavard R, Naghavi M, Aboudi M, Suleiman M. Investigating modeling approaches of buckling-restrained braces under cyclic loads. *Case Studies in Construction Materials*. 2018;8:476–88. **doi:10.1016/j.cscm.2018.04.002**
- [18] Building and Housing Research Centre (BHRC). Iranian code of practice for seismic resistant design of buildings. Standard No. 2800. 4th ed. Tehran (Iran): BHRC; 2013.