

Developing a macro-element method for the analysis of masonry infill walls under in-plane lateral loading

Mohammad Mosa Ahmadvand¹, Ahmad Maleki^{2*} , Masoud Pourbaba²

1. Ph.D. student, Department of Civil Engineering, Maragheh Branch, Islamic Azad University, Maragheh, Iran.
2. Assistant professor, Department of Civil Engineering, Maragheh Branch, Islamic Azad University, Maragheh, Iran.

Abstract

Understanding the effect of masonry infill walls on the behavior of moment frames is crucial for advancing structural engineering practices. Comprehensive investigation into the various parameters affecting the behavior of masonry infills and their interaction with surrounding flexural frames remains limited. This gap is partly due to the limitations of existing numerical models and the high costs associated with experimental models. Therefore, defining the influence of different parameters on the interaction between frames and masonry infill walls is essential. Such knowledge enhances the accuracy of structural and component design, ultimately reducing project costs and increasing the safety of residents. Currently, existing numerical models exhibit limitations, and the cost of conducting experimental studies is prohibitive. As a result, there is a pressing need for a fast, accurate, and comprehensive method to evaluate masonry infill walls under in-plane loading conditions. This research aims to develop a novel model to explore the nonlinear behavior of masonry infill walls and their interaction with surrounding frames. The proposed model employs truss elements and material homogenization techniques, enabling modeling and analysis using commercially available software. Despite its simplicity and minimal input requirements, this method provides detailed insights into the structure's state in the nonlinear stage, including load-displacement curves and failure mechanisms. The innovative aspect of this research lies in the model's ability to determine the responses of masonry infill walls with ease and high accuracy. In the proposed method, the masonry infill is represented as a regular set of vertical and inclined bracing members. The vertical members are referred to as "piers," while the inclined members are known as "braces." This configuration allows for an effective simulation of the infill's behavior under various loading conditions. The outcomes of this research have the potential to significantly enhance the engineering community's understanding of masonry infill walls and their interaction with structural frames. By shedding light on the factors influencing this interaction, the study provides valuable insights that can inform future development of regulations and standards for masonry structures. Moreover, the proposed method's ability to accurately predict the nonlinear behavior of masonry infill walls can aid in the development of retrofit strategies for existing structures. By understanding how these walls interact with the surrounding frame, engineers can design more effective reinforcement techniques that enhance the overall seismic performance of buildings. This is particularly important in regions prone to earthquakes, where the failure of masonry infill walls can lead to significant structural damage and loss of life. The integration of this method into commercially available software also ensures that it can be readily adopted by practicing engineers. This accessibility means that the insights gained from this research can be quickly translated into practical applications, improving the safety and performance of both new and existing buildings. The ability to conduct accurate and efficient analyses of masonry infill walls will not only save time and resources but also provide engineers with the tools they need to design safer and more resilient structures. The development of a fast, accurate, and comprehensive method to evaluate the behavior of masonry infill walls under in-plane loading is a significant advancement in structural engineering. By enhancing the understanding of the interaction between masonry infills and surrounding frames, this research provides valuable insights that can inform the design, analysis, and construction of more resilient and safe buildings.

Review History

Received: Jan 27, 2024

Revised: Apr 24, 2024

Accepted: Jul 10, 2024

Keywords

Masonry infill

Macro element method

Nonlinear analysis

Truss-based method

* Corresponding Author Email: a.maleki@iau-maragheh.ac.ir - ORCID: 0000-0002-4649-4347

ارائه روش المان‌های بزرگ برای تحلیل میانقاب‌های بنایی تحت بارگذاری جانبی درون‌صفحه

محمد موسی احمدوند^۱، احمد ملکی^{۲*} , مسعود پوربابا^۲

۱. دانشجوی دکتری، دانشکده فنی مهندسی، گروه مهندسی عمران، واحد مراغه، دانشگاه آزاد اسلامی، مراغه، ایران.

۲. استادیار، دانشکده فنی مهندسی، گروه مهندسی عمران، واحد مراغه، دانشگاه آزاد اسلامی، مراغه، ایران.

چکیده

تاریخچه داوری

اطلاع از چگونگی تاثیر میانقاب‌های بنایی بر رفتار قاب‌های خمشی از اهمیت زیادی برخوردار بوده و باید تاثیر پارامترهای مختلف بر چگونگی اندرکنش قاب و میان قاب بنایی به خوبی مشخص شد. با این کار، طراحی سازه‌ها و اجزا متصل به آنها با دقت بهتری انجام شده و هزینه نهایی طرح نیز کاهش، و امنیت جانی ساکنین افزایش خواهد یافت. به دلیل محدودیت‌های موجود در مدل‌های عددی پیشین و همچنین هزینه‌های زیاد مدل‌های آزمایشگاهی، بررسی جامعی به منظور شناخت تاثیر پارامترهای مختلف بر رفتار درون صفحه میانقاب بنایی و عملکرد آن بر قاب خمشی پیرامون در دسترس نبوده و نیاز به ارائه روشی دقیق، سریع، جامع و قابل فهم به منظور ارزیابی رفتار میانقاب بنایی تحت بارگذاری درون صفحه کاملاً احساس می‌شود. در این تحقیق سعی بر آن است مدلی برای بررسی رفتار غیرخطی میانقاب‌های بنایی و اندرکنش آنها با قاب اصلی توسعه داده شود. در مدل پیشنهادی از المان‌های خربایی و همگن سازی مصالح بنایی بهره برده شده که این امر امکان مدل سازی و تحلیل میانقاب‌های بنایی را در نرم افزارهای تجاری قابل دسترس، فراهم می‌کند. این روش با وجود سادگی و نیاز به تعداد حداقل ورودی‌ها، قادر به ارائه نتایج جامعی از وضعیت سازه در مرحله غیرخطی، شامل منحنی بار-تغییر مکان و نهایتاً سازوکار شکست سازه می‌باشد. مقایسه نتایج تحلیل مدل‌های درستی آزمایی شده با استفاده از روش پیشنهادی نشان از خطای حدود ۱۹ و ۱۰ درصدی به طور میانگین برای تخمین بار بیشینه و سختی سازه دارد. به علاوه، روش پیشنهادی قادر بود خرابی صورت گرفته در نمونه‌های آزمایشگاهی را به خوبی تخمین بزند.

کلمات کلیدی

میانقاب بنایی
روش المان‌های بزرگ
تحلیل غیرخطی
روش خربایی

۱- مقدمه

قاب) خواهند شد. همچنین به دلیل اختلاف شکل پذیری قاب سازه و میانقاب‌های بنایی، اندرکنش این دو از اهمیت خاصی برخوردار بوده و باید در هنگام طراحی و محاسبات سازه مورد توجه ویژه قرار گیرد. برای نمونه، با افزایش تغییرشکل جانبی سازه تحت اثر بارهای لرزه‌ای، میانقاب‌ها که باعث افزایش سختی اولیه در سازه بودند به دلیل شکل پذیری کم متحمل شکستی ترد خواهند شد. تغییرشکل‌های پلاستیک در اعضای قاب اصلی معمولاً بعد از کاهش مقاومت میانقاب اتفاق خواهد افتاد و در موارد بسیاری

میانقاب‌های بنایی یکی از اعضای غیرسازه‌ای، یعنی اعضای جزء سیستم باربر اصلی سازه نیستند، می‌باشند که بر رفتار اسکلت سازه در مقابل بارهای جانبی ناشی از زلزله تاثیرگذارند. این اعضای غیر سازه‌ای از یک نظر در افزایش سختی اولیه قاب‌های اصلی سازه نقش موثری داشته و از طرف دیگر با اعمال نیروهای فشاری (به ویژه قطری ناشی از میدان‌های قطری کششی و فشاری) سبب بروز خرابی خمشی یا برشی (بسته به مشخصات

* رایانامه نویسنده مسئول: a.maleki@iau-maragheh.ac.ir - ORCID: 0000-0002-4649-4347

کپی‌رایت © ۲۰۲۵، انتشارات دانشگاه تربیت مدرس (TMU Press). این مقاله به صورت دسترسی آزاد منتشر شده و تحت مجوز بین‌المللی Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 قرار دارد (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>). بر اساس این مجوز، شما می‌توانید این مطلب را در هر قالب و رسانه‌ای کپی، باز نشر و باز آفرینی کنید و یا آن را ویرایش و بازسازی نمایید، به شرط آنکه نام نویسنده را ذکر کرده و از آن برای مقاصد غیرتجاری استفاده کنید.



بر اساس مشاهدات زلزله‌های اخیر، اندرکنش بین میانقاب و ستون‌های فولادی موجب گسیختگی ترد می‌شود. وجود میانقاب در داخل قاب فولادی حائز اهمیت فراوان بوده و اثر تعیین کننده در رفتار سازه‌های فولادی در هنگام زلزله دارد. در زلزله‌های اخیر، خرابی‌های قابل توجهی به علت پدیده اندرکنش بین قاب و میانقاب اتفاق افتاد. در زلزله رودبار - منجیل در سال ۱۳۶۹ گروهی از ساختمان‌های فولادی در این شهرها دارای اسکلت‌های فولادی با مهاربندی یا قابهای دارای میانقاب مصالح بنایی یا ترکیب این دو سیستم بوده‌اند و از نظر کیفیت اجرایی این ساختمان‌ها تفاوتی با دیگر ساختمان‌ها نداشتند، ولی رفتار متفاوتی نشان داده‌اند [3]. در شکل (۱) سازه‌ای مشاهده می‌شود که با عملکرد مشترک میانقاب همچنان پا برجاست، در حالیکه برخی ساختمان‌های مشابه بدون میانقاب فرو ریخته‌اند. در زلزله سال ۱۳۸۲ بم، موارد متعددی از ساختمان‌های مهاربندی شده دارای میانقاب مشاهده شد [4]. دیوارهایی که مهاربندی را در خود جای دادند، دو اثر مهم داشتند: اولاً مهاربندها به پایداری و ایستایی دیوارها کمک کرده‌اند، دوم اضلاع مهاربندی رفتار بهتری داشته‌اند. در مهاربند بدون دیوار بنایی، که مهاربندها برای کشش طرح شده بودند بیشتر خسارت‌های این مهاربندها به صورت شکست در اتصال بوده است. لیکن مهاربندی‌هایی که داخل میانقاب بوده‌اند کمتر از ناحیه اتصال دچار شکستگی و کمائنش خارج از صفحه شده‌اند.

در شکل (۲) نیز تصاویری از رفتار متفاوت میانقاب‌ها نشان داده شده است. در برخی ساختمان در مناطق زلزله‌زده، دیوار بنایی بدون تخریب بوده و در برخی مناطق، تخریب کلی این دیوارها و تاثیر آن بر رفتار اعضای مجاور دیده می‌شود. با توجه به اینکه رفتار این اعضای ترکیبی، یعنی قاب‌های خمشی و میانقاب‌های بنایی، به صورت کامل مشخص نبوده و همچنین تاثیر زیادی بر رفتار کلی و مدهای شکست سازه دارند و به علاوه به منظور ارائه نگرشی به زلزله‌های اخیر، از جمله زلزله سال ۱۳۹۶ سرپل ذهاب و تحلیل علل خرابی ساختمان‌های فولادی حاوی این نوع میانقاب‌ها، ضرورت بررسی این موضوع بیشتر نمایان می‌شود.

برخی از خرابی‌های تیر، ستون و یا اتصال تیر به ستون ناشی از اعمال نیروهای فشاری قطری ناشی از میانقاب و کاهش مقاومت ناگهانی آن به دلیل ترک خوردگی است.

اگر چه میانقاب‌ها به طور چشمگیری سختی و مقاومت قاب را افزایش می‌دهند، با این حال، تاثیر این اعضا در طراحی سازه‌ها به دلیل نداشتن نقش باربری در نظر گرفته نمی‌شود. البته قاب‌ها نیز باید کفایت لازم را برای تبدیل دیوار به میانقاب داشته باشند که شرایط آن در فیما ۳۵۶ [1] و دستورالعمل بهسازی ساختمان‌ها در برابر زلزله [2] ذکر شده است. آنچه به تجربه هنگام زلزله‌های گذشته به دست آمده است نشان می‌دهد که عدم توجه به رفتار این اعضا موجب بروز خسارات مالی و جانی بسیاری می‌شود. از طرف دیگر، دیوارهای غیرسازه‌ای یکی از مهمترین اعضای غیرسازه‌ای محسوب می‌شود. اهمیت این نوع اعضا در درجه اول به دلیل استفاده زیاد از آن است به طوری که کمتر سازه ساختمانی را می‌توان یافت که فاقد این نوع عضو باشد. علاوه بر این با توجه مشاهدات زلزله‌های گذشته این نوع اعضا نقش بسیار مهمی در فروریزش و یا جلوگیری از خرابی سازه‌ها ایفا کرده‌اند. به علاوه، این اعضا پتانسیل بالقوه زیادی در ایجاد خسارات جانی و مالی نسبت به سایر اعضای موجود در سازه دارند. به این دلیل رفتار دیوارهای غیرسازه‌ای توجه بسیاری از پژوهشگران در سراسر دنیا را به خود معطوف کرده و تحقیقات زیادی در سرتاسر جهان در این زمینه در حال انجام است.



شکل ۱. نمونه عملکرد میانقاب در زلزله رودبار منجیل [5]

Fig. 1. Behaviour of infill in Roudbar-Manjil earthquake[5]

بالا در برخی مدل‌ها، و غیره میسر نبوده و باید روشی دقیق، سریع، جامع و قابل فهم به منظور ارزیابی رفتار میانقاب‌های بنایی تحت بارگذاری درون‌صفحه پایه‌گذاری شود. به دلیل محدودیت‌های موجود در مدل‌های عددی پیشین و همچنین هزینه‌های زیادی مدل‌های آزمایشگاهی، بررسی جامعی به منظور شناخت تاثیر پارامترهای مختلف بر رفتار درون صفحه میان قاب بنایی و عملکرد آن بر قاب خمشی پیرامون در دسترس نیست. نوآوری تحقیق حاضر را می‌توان در ارائه روشی سریع و قابل اطمینان به منظور ارزیابی رفتار قاب‌های خمشی حاوی میانقاب عنوان کرد.

۲- ادبیات تحقیق

در سال‌های اخیر مطالعات آزمایشگاهی و عددی بسیاری روی رفتار قاب‌های خمشی حاوی میانقاب بنایی انجام شده است. این آزمایش‌ها با تغییر پارامترهای متعددی صورت گرفته است. بیشترین تعداد آزمایش‌ها در بارگذاری‌های یک جهته بوده و تعداد کمی از این آزمایش‌ها رفتار چرخه‌ای اعضا را نشان می‌دهد. می‌توان گفت اولین کار جدی صورت گرفته روی میانقاب‌های بنایی در سال ۱۹۶۱ توسط هولمز صورت پذیرفت. هولمز فرض کرد عملکرد میان قاب مانند المان قطری معادل بوده و اتصال این المان به سیستم قاب اصلی را به صورت مفصلی در نظر گرفت. همچنین فرض کرد که عرض موثر المان معادل یک سوم طول قطر میانقاب است [7]. اسمیت در سال ۱۹۶۶ مطالعات روی المان خربایی معادل را ادامه داد [8]. در سال ۱۹۷۱ میلادی مین استون با وابسته نمودن نتایج تئوری و عملی معادلات مربوط به ارتفاع میانقاب و تاثیرگذاری آن بر رفتار قاب را اصلاح نمود [9]. در سال ۱۹۸۳ کوان و همکاران از اثر اصطکاک بین قاب و میانقاب در محل اتصال صرف‌نظر کرده و روابطی برای بیان رفتار میانقاب ارائه کردند [10].

بررسی‌های صورت گرفته در زمینه آزمایش بر روی میانقاب‌های بنایی نشان می‌دهد که تاکنون، تعداد ۳۰۴ قاب یک دهانه یک طبقه و ۷ قاب چنددهانه یک طبقه ساخته شده و مورد آزمایش قرار گرفته است. نتایج مربوط به این تحقیقات در قالب ۵۹ مقاله در ژورنال‌های مختلف به چاپ رسیده است. با بررسی نمونه‌های مطالعه شده در تحقیقات عنوان شده می‌توان گفت بخش اعظمی از کارهای صورت گرفته روی مقاطع بتنی بوده است. این میزان، ۷۶٪ از کارهای آزمایشگاهی



شکل ۲. تخریب میانقاب‌ها در زلزله سرپل ذهاب [6]

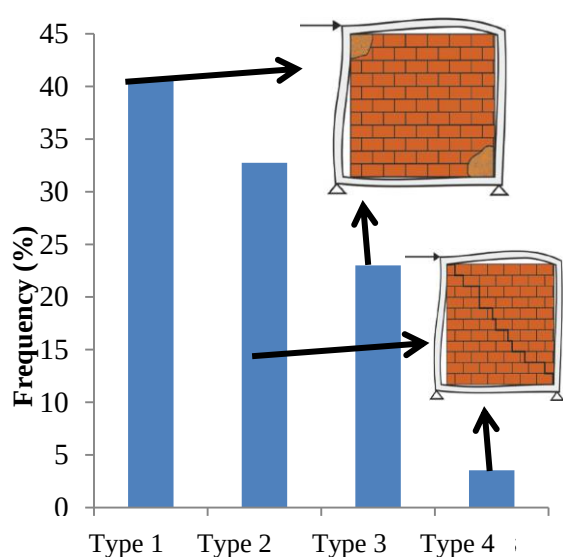
Fig. 2. Infill failure in Sarpol-e Zahab Earthquake [6]

تاکنون بررسی‌های متعددی روی رفتار میانقاب‌های بنایی و اندرکنش آنها با قاب خمشی صورت گرفته است. برخی از این تحقیقات توسط مدلسازی‌های عددی و برخی نیز در آزمایشگاه انجام شده است. در روش عددی به دلیل نیاز به مدلسازی غیرهمگن (Heterogeneous Model) به روش المان محدود (Finite Element Method) به صورت سه‌بعدی، از یک طرف نیاز به مدلسازی پیچیده با صرف زمان زیاد برای مدلسازی و حصول نتایج تحلیل دارد و از طرف دیگر حساسیت بالای نتایج حاصل از روش المان محدود به ورودی‌های مدلسازی ازجمله بارگذاری، ابعاد سازه و تعداد مِش بندی امکان بررسی جامع رفتار میانقاب‌ها را فراهم نمی‌کند. به علاوه در روش‌های عددی نیاز به نیروی ماهر و آشنا با مفاهیم مدلسازی و قوانین حاکم بر تئوری اجزا محدود است. از سوی دیگر نیز امکان ساخت و بارگذاری مدل‌های آزمایشگاهی متعدد هم وجود ندارد.

با توجه به مطالب عنوان شده، آگاهی یافتن از چگونگی تاثیرگذاری میانقاب‌های بنایی بر عملکرد قاب‌های خمشی اهمیت فراوانی داشته و باید تاثیر عوامل مختلف بر چگونگی اندرکنش قاب و میانقاب بنایی به خوبی مشخص شود. با این کار، طراحی سازه‌ها و اجزا متصل به آنها با دقت بهتری انجام شده و هزینه نهایی طرح نیز کاهش خواهد یافت. به علاوه، امنیت جانی ساکنین نیز افزایش خواهد یافت. تعیین پارامترهای موثر بر رفتار میانقاب بنایی از طریق مدل‌های عددی و آزمایشگاهی به دلیل محدودیت‌هایی مانند نیاز به هزینه و زمان زیاد، عدم وجود دقت

به علاوه، با بررسی خرابی‌های ایجاد شده در میانقاب‌های بنایی در اثر بارگذاری‌های مختلف اعمالی، مشاهده شد که حدود ۴۰٪ خرابی‌های ایجاد شده به دلیل لغزش در مراحل اولیه بارگذاری و خردشدگی میانقاب در جابه‌جایی‌های نسبی بالاتر و ایجاد مفاصل پلاستیک خمشی در ستون می‌باشد (خرابی نوع ۱). همچنین، بیش از ۳۲٪ خرابی ایجاد شده به دلیل ترک‌خوردگی قطری برشی میانقاب و تشکیل مفاصل پلاستیک خمشی در ستون‌ها بود (خرابی نوع ۲). از طرفی، ۲۳٪ خرابی‌های مشاهده شده در تحقیقات آزمایشگاهی صورت گرفته به دلیل ترک قطری میانقاب به همراه شکست ترد برشی ستون‌ها بود (خرابی نوع ۳). مابقی خرابی‌ها که در حدود ۳/۵٪ بود، از نوع خردشدگی میانقاب به همراه شکست برشی در ستون‌ها بود (خرابی نوع ۴).

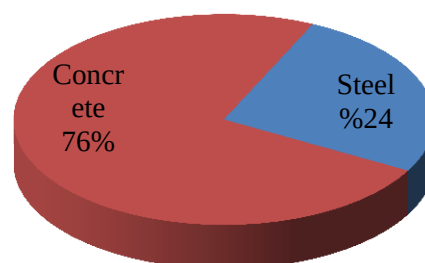
با توجه به گستردگی نوع خرابی‌های ایجاد شده در میانقاب‌های بنایی و توجه به اهمیت تاثیر این اعضا بر سازه‌های باربر جانبی، نیاز است مدل‌های عددی پیشنهادی به منظور بررسی رفتار این اعضای غیرسازه‌ای به گونه‌ای باشد که تمامی مدهای خرابی در آن لحاظ شده، از طرفی بتواند اندرکنش میان میانقاب و اعضای پیرامونی را نیز در نظر بگیرد. با در نظر گرفتن این موارد، مدل عددی پیشنهادی باید قادر باشد با دقت و سرعت نتایج تحلیل را نشان دهد. به علاوه، از این روش باید بتوان در تحلیل سازه‌های واقعی و تمام مقیاس نیز استفاده کرد تا تاثیر بررسی‌های صورت



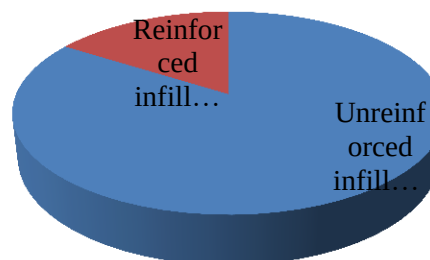
شکل ۶. فراوانی خرابی‌های ایجاد شده در میانقاب‌های مورد بررسی در تحقیقات
Fig. 6. Frequency of different failures in studied infills

صورت گرفته را شامل می‌شود (شکل ۳). در شکل (۴) فراوانی نوع میانقاب‌های مورد بررسی در تحقیقات آزمایشگاهی صورت گرفته نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود قسمت اعظمی از تحقیقات روی بررسی رفتار میانقاب بدون تقویت متمرکز است. دلیل این حجم از تحقیقات را می‌توان به تلاش برای تعیین رفتار میانقاب‌های موجود و اطلاع از میزان و چگونگی تاثیر آنها بر قاب‌های ساختمانی نسبت داد.

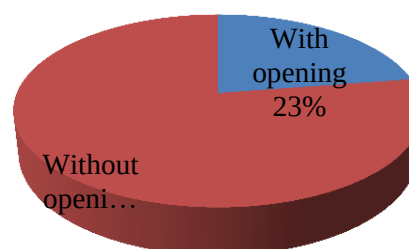
در شکل (۵) فراوانی وجود بازشو در میانقاب‌های بنایی نشان داده شده است. همانطور که مشخص است، سهم عمده تحقیقات روی میانقاب‌های بنایی فاقد بازشو متمرکز شده است.



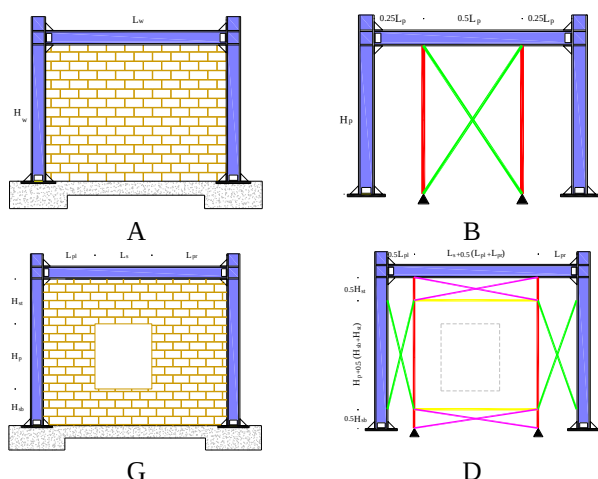
شکل ۳. توزیع کارهای صورت گرفته بر روی میانقاب‌های بنایی
Fig. 3. Distribution of studies on masonry infills



شکل ۴. فراوانی انواع مختلف میانقاب تقویت شده و بدون تقویت
Figure 4. Frequency of different reinforced and unreinforced infills

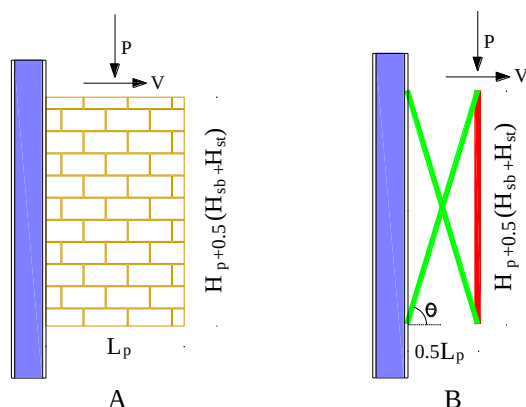


شکل ۵. فراوانی وجود و یا عدم وجود بازشو در میانقاب‌های بررسی شده
Fig. 5. Frequency of presence or absence of an opening in masonry infills



شکل ۷. میانقاب بنایی و سیستم معادل در روش ستون‌های چندگانه

Fig. 7. Masonry infills and equivalent model in multi pier method



شکل ۸. ستون ها در میانقاب بنایی و سازه خریایی معادل

Fig. 8. Columns in masonry infill and in equivalent model

۳-۱-۱- سختی محوری

از تساوی سختی‌های محوری در یک ستون و نعل درگاه واقعی با مجموعه خرابایی معادل آن‌ها به ترتیب سطح مقطع ستونک‌های قائم (قرمز رنگ) و افقی (زرد رنگ) بدست می‌آید. از آنجایی که مدول الاستیسیته و ضریب پواسون در هر دو سیستم یکسان و همان مشخصات مکانیکی مصالح بنایی است، در نتیجه تساوی سختی‌های دو سیستم، معادل تساوی سطوح مقطع آن‌ها می‌باشد. مطابق شکل (۸-الف و ب) سطح مقطع ستونک واقعی و سطح مقطع عضو قائم آن در مجموعه خرابایی به ترتیب از روابط ۱ و ۲ بیان می‌شود. حال با تساوی این عبارات سطح مقطع هر ستون تکی در سیستم معادل (عضو قرمز) طبق رابطه ۳ بر حسب طول و ضخامت دیوار بدست می‌آید.

$$A_{\text{wall}} = t_w L_p \quad (1)$$

$$A_{\text{system}} = \sum_{p=1}^2 A_{\text{pn}} = A_{\text{p}} \quad (2)$$

گرفته بیشتر کاربردی شود. همچنین روش‌های پیشنهادی باید به گونه‌ای باشند که بتوان آن‌ها را در نرم‌افزارهای تجاری موجود به کار بست و تنها به بیان سازوکار بسنده نشود.

۳- معرفی روش پیشنهادی

در روش ستون‌های چندگانه، میانقاب بنایی به صورت مجموعه‌ای منظم از اعضای خربایی قائم و مورب معادل می‌شود. اعضای قائم با عنوان ستون^۱ و اعضای مورب^۲ به عنوان مهاربند شناخته می‌شوند. در شکل (۷-الف) تصویری از میانقاب بنایی فاقد بازشو به همراه قاب خمشی پیرامونی آن آورده شده است. شکل (۷-ب) سیستم خربایی معادل میانقاب بنایی را در روش ستون‌های چندگانه نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، اعضای قائم در سیستم معادل به صورت پیوسته مدل شده‌اند و مهاربندها به صورت مفصلی به این اعضا متصل شده‌اند. اعضای قائم به فاصله نصف طول میانقاب در مرکز آن جانمایی شده‌اند. در مورد میانقاب‌های دارای بازشو برای سهولت انجام تحلیل و کاهش تعداد اعضای خربایی، مطابق شکل‌های (۷-ج و ۷-د) می‌توان قسمتی از میانقاب در اطراف بازشو را فقط با یک عضو قائم ممتد در مرکز آن جایگزین نمود، که در این صورت مهاربندها، که با رنگ سبز نشان داده شده‌اند، عضو قائم را به ستون کناری قاب متصل می‌کنند. این امر در مورد نعل درگاهی‌های بالا و پایین بازشو نیز صادق است. به شکلی که یک عضو افقی (زرد رنگ) در مرکز نعل درگاهی تعبیه شده و این عضو توسط مهاربندهای مربوطه (بنفش رنگ) به تیر فوقانی یا تحتانی متصل می‌شوند. مانند کلیه مهاربندها، اتصال اعضای افقی زرد رنگ به اعضای قائم به صورت مفصلی بوده که فقط قادر به انتقال نیروی محوری می‌باشند.

۳-۱- مشخصات هندسی اعضای سیستم خریایی معادل

در این بخش با توجه به نقش هر یک از اعضای سیستم خرابایی معادل در تحمل نیروهای وارد شده به میانقاب بنایی، مشخصات هندسی شامل طول اعضا و سطح مقطع آنها تعیین می‌شود. برای دستیابی به این هدف، سختی‌های محوری و برشی در یک میانقاب و خرابای معادل آن در روش ستون‌های چندگانه برابر قرار داده می‌شود.

¹ Pier

² Brace

دست آورد.

$$A_{sb} = \frac{Gt_w \left(\left(\frac{H_s}{2} \right)^2 + \left(L_s + \frac{L_{pl} + L_{pr}}{2} \right)^2 \right)^{\frac{3}{2}}}{0.6EH_s(L_s + \frac{L_{pl} + L_{pr}}{2})} \quad (11)$$

شایان ذکر است که در رابطه ۱۱، H_s ارتفاع نعل درگاه واقعی می‌باشد، که می‌تواند با H_{st} و H_{sb} به ترتیب برای تعیین سطوح مقطع مهاربندهای مربوط به نعل درگاه‌های بالا و پایین بازشو جایگزین شود. در دیوارهای بدون بازشو نیز در رابطه ۱۰ مقادیر H_{st} و H_{sb} برابر صفر منظور می‌شود.

۲-۳- مشخصات مکانیکی اعضای سیستم خرابایی معادل

رفتار غیرخطی ستون‌ها و مهاربندها با الهام از منحنی تنش- کرنش مصالح بنایی در حالت کششی و فشاری و همچنین جایگزینی مقادیر مقاومت‌های کششی و فشاری اعضا قابل استخراج می‌باشد. در نمودار تنش-کرنش نشان داده شده در شکل (۹) سختی اولیه مصالح یا همان شیب نمودار در ناحیه خطی برابر مدول الاستیسیته در حالت فشاری فرض شده است. مقادیر کرنش‌های متناظر با ترک‌خوردگی در حالت کششی و فشاری (به ترتیب ϵ_{tcr} و ϵ_{ccr}) و همچنین کرنش نهایی در حالت فشاری (ϵ_{cu}) طبق روابط ۱۲، ۱۳ و ۱۴ تعریف می‌شود. کرنش نهایی متناظر در حالت کششی نیز برابر 0.001 می‌باشد [11].

$$\epsilon_{tcr} = \frac{f_{tm}}{E_c} \quad (12)$$

$$\epsilon_{ccr} = \frac{f_{cm}}{E_c} \quad (13)$$

$$\epsilon_{cu} = 2.75 \frac{f_{cm}}{E_c} \quad (14)$$

۲-۳-۱- مقاومت کششی و فشاری پیرها در سیستم معادل

در ستون‌ها مقادیر مقاومت‌های کششی و فشاری که برای تعریف رفتار غیرخطی آن‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد براساس مقاومت‌های کششی و فشاری مصالح بنایی با لحاظ ضرایب آیین‌نامه FEMA تعریف می‌شود [1]. طبق روابط ۱۵ و ۱۶ داریم:

$$f_t = f_{tm} \quad (15)$$

$$f_c = 0.68f_{cm} \quad (16)$$

$$A_{vp} = \frac{1}{2} t_w L_p \quad (3)$$

همچنین با تساوی سختی‌های محوری افقی یا به عبارتی سطح مقطع در نعل درگاه واقعی و سیستم معادل آن، سطح مقطع اعضای افقی (اعضای زرد رنگ) نیز طبق رابطه ۴ استخراج می‌شود.

$$A_{hp} = t_w H_s \quad (4)$$

در مورد دیوارهای بدون بازشو (شکل ۷-الف)، از آنجایی که سیستم خرابایی معادل دارای دو عضو قائم می‌باشد، سطح مقطع هر کدام برابر نصف سطح مقطع افقی میانقاب می‌باشد (رابطه ۵).

$$A_{vp} = \frac{1}{2} t_w L_p \quad (5)$$

۲-۱-۳- سختی برشی

به منظور تعیین سطح مقطع هر یک از مهاربندها در سیستم معادل، باید سختی‌های برشی آن‌ها برابر با سیستم معادل خرابایی قرار داده شود. سختی برشی سیستم واقعی و سیستم معادل آن به ترتیب در روابط ۶ و ۷ ارائه شده است.

$$K_{wall} = \frac{GL_p t_w}{1.2(H_p + \frac{H_{st} + H_{sb}}{2})} \quad (6)$$

$$K_{system} = \frac{2EA_b}{L_b} (\cos \theta)^2 \quad (7)$$

که در این روابط L_b و θ به ترتیب طول مهاربند (سبز رنگ) و زاویه آن با سطح افقی هستند. با استفاده از روابط هندسی می‌توان L_b و $(\cos \theta)^2$ را به صورت روابط ۸ و ۹ بیان نمود.

$$L_b = \sqrt{\left(\frac{L_p}{2} \right)^2 + \left(H_p + \frac{H_{st} + H_{sb}}{2} \right)^2} \quad (8)$$

$$(\cos \theta)^2 = \frac{\left(\frac{L_p}{2} \right)^2}{\left(\frac{L_p}{2} \right)^2 + \left(H_p + \frac{H_{st} + H_{sb}}{2} \right)^2} \quad (9)$$

پس از حل تساوی دو معادله ۶ و ۷ سطح مقطع هر یک از مهاربندهای سبز رنگ را می‌توان طبق رابطه ۱۰ بدست آورد.

$$A_{pb} = \frac{Gt_w \left(\left(\frac{L_p}{2} \right)^2 + \left(H_p + \frac{H_{st} + H_{sb}}{2} \right)^2 \right)^{\frac{3}{2}}}{0.6EL_p(H_p + \frac{H_{st} + H_{sb}}{2})} \quad (10)$$

با حل معادلات مشابه می‌توان سطح مقطع هر یک از مهاربندها در سیستم معادل خرابایی برای نعل درگاه را نیز طبق رابطه ۱۱ به

پس از جایگزینی روابط ۱۹ و ۲۰ به ترتیب در روابط ۱۷ و ۱۸، مقاومت کششی مهاربندهای مربوط به میانقاب بنایی طبق روابط ۲۱ و ۲۲ محاسبه می‌شود.

$$F_t = (0.375f_{v0}) \frac{L_p(H_p + \frac{H_{st} + H_{sb}}{2})}{(\frac{L_p}{2})^2 + (H_p + \frac{H_{st} + H_{sb}}{2})^2} \quad (21)$$

$$F_c = 0.63f_{cm}(1 - \frac{(H_p + \frac{H_{st} + H_{sb}}{2})^2 - (\frac{L_p}{2})^2}{(\frac{L_p}{2})^2 + (H_p + \frac{H_{st} + H_{sb}}{2})^2}) \quad (22)$$

پس از تکرار روندی مشابه برای نعل درگاهی‌ها و بهره‌گیری از روابط هندسی، سرانجام مقاومت کششی و فشاری مهاربندهای مربوط به نعل درگاه در سیستم معادل بنایی طبق روابط ۲۳ و ۲۴ بدست می‌آید.

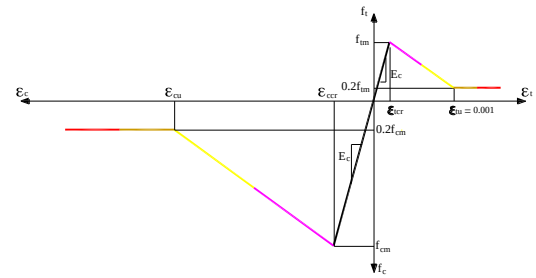
$$F_t = (0.375f_{v0}) \frac{H_s(L_s + \frac{L_{pl} + L_{pr}}{2})}{(\frac{H_s}{2})^2 + (L_s + \frac{L_{pl} + L_{pr}}{2})^2} \quad (23)$$

$$F_c = 0.63f_{cm}(1 - \frac{(L_s + \frac{L_{pl} + L_{pr}}{2})^2 - (\frac{H_s}{2})^2}{(\frac{H_s}{2})^2 + (L_s + \frac{L_{pl} + L_{pr}}{2})^2}) \quad (24)$$

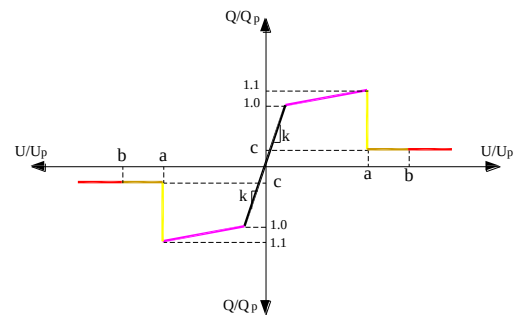
شایان ذکر است که در روابط ۲۳ و ۲۴، ارتفاع نعل درگاه واقعی بوده، که می‌تواند با H_{st} و H_{sb} به ترتیب برای تعیین مقاومت‌های کششی و فشاری مهاربندهای مربوط به نعل درگاهی‌های بالا و پایین بازشو جایگزین شود. بدیهی است در کلیه روابط ذکر شده، برای محاسبه سطح مقطع مهاربندهای سیستم معادل A_{pb} و همچنین مقاومت‌های کششی و فشاری مربوط به آنها در دیوارهای بدون بازشو مقادیر H_{st} و H_{sb} برابر صفر منظور می‌شود.

۳-۲-۳- تعیین فاصله بین اعضای قائم

همان‌طور که عنوان شد، به منظور تخمین رفتار واقعی میانقاب محصور در قاب پیرامونی باید رفتار خمشی درون صفحه آن نیز به درستی توسط سیستم معادل خرابایی لحاظ شود. در این بخش با تساوی سختی‌های خمشی درون صفحه دو سیستم معادل و واقعی، دهانه خرابای معادل تعیین می‌شود. از آنجایی که مدول الاستیسیته در هر دو حالت یکسان است، در نتیجه تساوی سختی‌ها به تساوی ممان‌های اینرسی میانقاب واقعی و خرابای معادل منجر می‌شود. با فرض اینکه فاصله اعضای قائم خرابا برابر نصف دهانه قاب اصلی بوده، ممان اینرسی سیستم معادل طبق رابطه ۲۵ بیان می‌شود.



الف



ب

شکل ۹. رفتار غیرخطی اعضا، الف) منحنی تنش کرنش اعضای خرابای معادل در

حالت کششی و فشاری، ب) رفتار بار تغییر مکان تیرها و ستون‌های قاب اصلی.

Fig. 9. Nonlinear response of elements, a) stress-strain curve of equivalent truss in tension and compression, b) load-displacement response of beams and columns

۳-۲-۳- مقاومت کششی و فشاری مهاربندها در سیستم معادل

طبق روابط تانسور تنش کوشی و معادلات ساده شده در روش ستون‌های چندگانه، مقاومت کششی و فشاری مهاربندهای مربوط به سیستم معادل را می‌توان به صورت روابط ۱۷ و ۱۸ بیان نمود. در این روابط θ' زاویه مهاربندها با اعضای مرزی می‌باشند. این زاویه، متمم زاویه θ می‌باشد.

$$F_t = (0.375f_{v0}) \sin(2\theta') \quad (17)$$

$$F_c = 0.63 f_{cm}(1 - \cos(2\theta')) \quad (18)$$

در این روابط $\sin(2\theta')$ و $\cos(2\theta')$ را با استفاده از روابط هندسی می‌توان به صورت روابط ۱۹ و ۲۰ بیان نمود.

$$\sin(2\theta') = \sin(2(90 - \theta)) \quad (19)$$

$$= \frac{L_p(H_p + \frac{H_{st} + H_{sb}}{2})}{(\frac{L_p}{2})^2 + (H_p + \frac{H_{st} + H_{sb}}{2})^2} \quad (20)$$

$$\cos(2\theta') = \cos(2(90 - \theta))$$

$$= \frac{(H_p + \frac{H_{st} + H_{sb}}{2})^2 - (\frac{L_p}{2})^2}{(\frac{L_p}{2})^2 + (H_p + \frac{H_{st} + H_{sb}}{2})^2}$$

قائم در صورت وجود.

۹- تعیین الگوی بار جانبی به صورت بار متمرکز افقی در سطح فوقانی میانقاب.

۱۰- اختصاص تکیه‌گاه گیردار به ستون‌های قاب‌میانی و ساده به اعضای قائم در محل فونداسیون.

۱۱- انجام تحلیل استاتیکی غیرخطی به صورت کنترل بار برای بارهای ثقلی.

۱۲- انجام تحلیل استاتیکی غیرخطی به صورت کنترل تغییر مکان به دنبال تحلیل بارهای ثقلی برای بار جانبی.

۱۳- استخراج رفتار جانبی و تعیین ظرفیت جانبی نهایی و تغییر مکان متناظر با آن، سختی اولیه و تغییر مکان نهایی.

۱۴- تعیین مود ترک خوردگی میانقاب با توجه به وضعیت مفاصل پلاستیک محوری اختصاص یافته به اعضای قائم و مهاربندها به صورت زیر:

الف: ترک‌های کششی افقی: کرنش کششی مفاصل پلاستیک اعضای قائم.

ب: خوردشدگی: کرنش فشاری مفاصل پلاستیک اعضای قائم یا مهاربندها.

پ: ترک‌های قطری: کرنش کششی مفاصل پلاستیک مهاربندها.

۱۵- تعیین مود خرابی تیر و ستون‌های کناری میانقاب با توجه به نوع مفصل پلاستیک (خمشی یا برشی).

۳-۴- درستی آزمایشی روش ستون‌های چندگانه

در این بخش به منظور درستی آزمایشی نتایج این روش در تحلیل رفتار درون صفحه‌ای، ۴ نمونه آزمایشگاهی مختلف که توسط تسنیمی و محب‌خواه [12] مورد بررسی قرار گرفته بود، انتخاب شد. با استفاده از مشخصات مکانیکی بدست آمده از آزمایش، دیوارهای موجود مدل‌سازی، و به روش حاضر و با استفاده از نرم‌افزار SAP2000 تحلیل شده، و نتایج بدست آمده با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شد. به منظور ارزیابی توانایی روش پیشنهادی در تحلیل طیف وسیعی از میانقاب‌های بنایی، سعی بر آن شده است که میانقاب‌های انتخابی از نظر مشخصات هندسی و مکانیکی با یکدیگر تفاوت داشته باشند. به همین منظور، میانقاب‌های حاوی و فاقد بازشو مدل‌سازی و تحلیل شد. به علاوه،

(۲۵)

$$I_{\text{system}} = \sum_{n=1}^2 i_{pn} + A_{pn} d_n^2$$

$$I_{\text{system}} = 2 \times \frac{1}{12} t_p \left(\frac{L_w}{2}\right)^3 + 2 \times \frac{1}{2} t_w L_w \left(\frac{L_w}{4}\right)^2 = \frac{1}{12} t_w L_w^3$$

مقدار بدست آمده برابر ممان اینرسی درون صفحه میانقاب حول وسط دهانه قاب می‌باشد. در نتیجه می‌توان گفت فاصله بین ستونک‌های خرابی معادل برابر نصف دهانه قاب بوده که در وسط دهانه قاب به صورت متقارن تعبیه می‌شوند.

۳-۳- سازوکار مدل پیشنهادی

۱- تعیین مشخصات هندسی میانقاب شامل ابعاد میانقاب، ابعاد بازشو، ضخامت دیوار و مقاطع قاب پیرامونی.

۲- تعیین مشخصات مکانیکی مصالح بنایی میانقاب و فولاد یا بتن مسلح قاب پیرامونی.

۳- تشکیل سیستم معادل خرابی میانقاب، شامل اعضای قائم و مهاربندها مطابق بخش ۳.

۴- تعیین مشخصات هندسی اعضای قائم و مهاربندها شامل طول و سطح مقطع آنها مطابق بخش ۳-۱.

۵- تعیین مشخصات مکانیکی اعضای قائم و مهاربندها شامل سختی اولیه، مقاومت‌های کششی و فشاری و رفتار غیرخطی آنها مطابق بخش ۳-۲. لازم به ذکر است که رفتار غیرخطی اعضای خرابی معادل به صورت مفصل پلاستیک محوری در نرم افزار SAP 2000 به اعضا اختصاص یافته است. یک مفصل در وسط اعضای قائم و دو مفصل در دو سر مهاربندها رفتار غیرخطی آنها را نشان می‌دهد.

۶- تعیین رفتار غیرخطی تیر و ستونهای قاب پیرامونی مطابق شکل ۹-ب. ذکر این نکته ضروری است که رفتار ارائه شده در شکل ۹ به صورت مفاصل خمشی و محوری-خمشی به ترتیب به تیر و ستون‌ها اختصاص یافته است. همچنین مفاصل برشی نیز مانند دیگر مفاصل به دو سر تیر و ستون‌های کناری به منظور لحاظ خرابی برشی اختصاص یافت.

۷- اختصاص قیود غشایی^۱ به گره‌های فوقانی میانقاب. در این صورت کلیه گره‌ها دارای تغییر مکان افقی برابری خواهند بود.

۸- اعمال بارگذاری ثقلی بر روی ستون‌ها به صورت بار متمرکز

¹ Diaphragm joint constraint

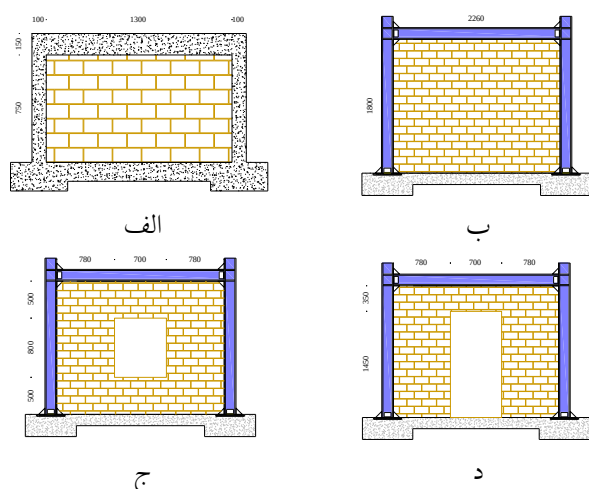
و میانه تیر، مهار شده بود. نمونه دیگر که به عنوان نمونه آزمایشگاهی به منظور درستی آزمایی روش پیشنهادی در نظر گرفته شد، میانقاب بنایی فاقد بازشو در قاب خمشی بتن مسلح بود. مقاطع ستون ها ۱۰۰ در ۱۵۰ mm و تیرها ۱۵۰ در ۱۵۰ mm بودند. ستون‌ها و تیرها به ترتیب حاوی ۴ و ۶ میلگرد با قطر ۸ میلی‌متر بودند. مقاومت فشاری بتن، ۱۷/۳ مگاپاسکال بود. نتایج تحلیل آزمایشگاهی به همراه نتایج به دست آمده از تحلیل عددی با استفاده از روش پیشنهادی در شکل (۱۱) آورده شده است.

همانطور که از اشکال (۱۱-الف تا ۱۱-د) و همچنین نتایج جدول (۲) مشاهده می‌شود، تطابق مناسبی به ویژه در سختی اولیه بین نتایج آزمایشگاهی و نمونه‌های عددی به دست آمده از روش ستون‌های چندگانه وجود دارد. باید این نکته را مد نظر داشت که نتایج عددی از روشی به دست آمده است که قابلیت به کارگیری در نرم‌افزارهای تجاری موجود را داشته و علاوه بر این، نیاز به ورودی‌های اندکی برای تعیین پاسخ سازه دارد. همچنین این روش حجم محاسبات را به میزان قابل توجهی کاهش داده و سبب می‌شود نتایج با سرعت بالایی در اختیار کاربر قرار گیرد.

جدول ۱. مشخصات مکانیکی نمونه‌های آزمایشگاهی (میانقاب و قاب اصلی)

Table 1. Mechanical properties of experimental specimens (infill and boundary frame)

f_{cm} (MPa)	f_{tm} (MPa)	f_{v0} (MPa)	E_v (MPa)	G (MPa)	E (GPa)	F_y (MPa)
7.63	0.74	0.48	4070	1628	210	240



شکل ۱۰. مشخصات هندسی نمونه‌های آزمایشگاهی (الف) CW، (ب) SW، (ج) PW2

(د) PW4

Fig. 10. Geometrical characteristics of experimental specimens, a) CW, b) SW, c) PW2, d) PW4

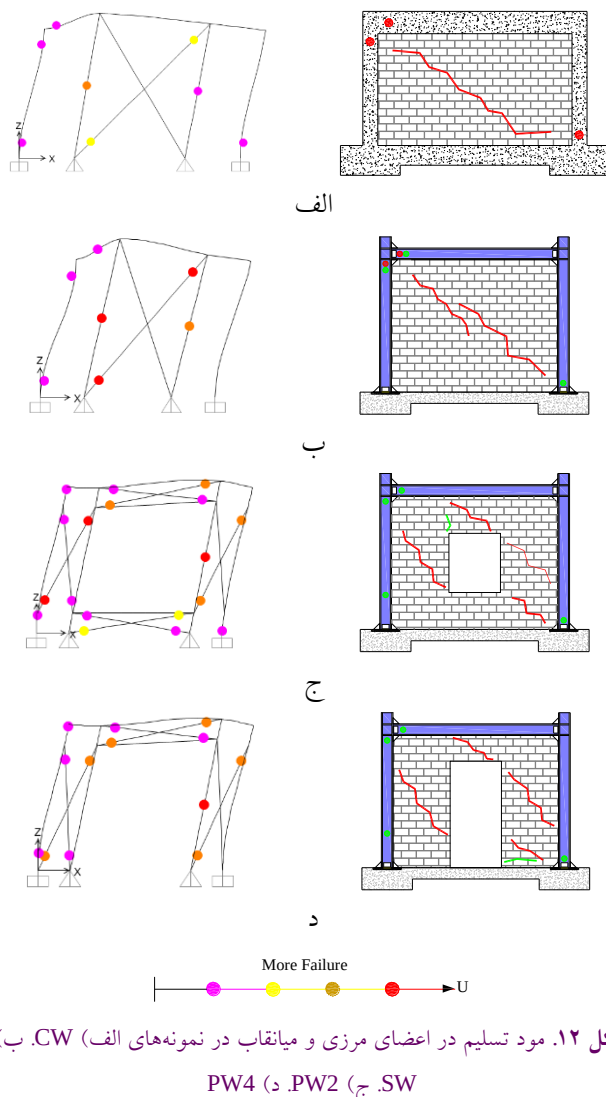
از بین میانقاب‌های بنایی حاوی بازشو، تلاش شد نسبت‌های مختلفی از بازشو ارزیابی شود. در این صورت توانایی مدل در تحلیل رفتار درون صفحه‌ای میانقاب شامل رفتار محوری، رفتار برشی، رفتار خمشی، اندرکنش تنش‌های محوری با برش و خمش و همچنین اندرکنش میانقاب با قاب اصلی به خوبی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. نتایج حاصل از تحلیل شامل سختی اولیه، بار نهایی و همچنین الگوی ترک‌های موجود به منظور تعیین مود شکستگی دیوار بررسی و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است.

ابعاد هندسی و مشخصات مکانیکی نمونه‌های انتخابی شامل مقاومت فشاری، مقاومت کششی، مقاومت برشی خالص، مدول الاستیسیته، مدول برشی به ترتیب در شکل (۱۰) و جدول (۱) مشخص شده است. همچنین در جدول (۱) مقدار بار محوری ستون‌ها قبل از اعمال بار جانبی ارائه شده است. از روش تحلیل استاتیکی غیرخطی به صورت کنترل بار برای بارهای قائم، و روش کنترل تغییر مکان بعد از اعمال بار قائم برای تحلیل سازه در برابر بارهای جانبی استفاده شده است.

نمونه‌های میانقاب واقع در قاب فولادی (نمونه‌های SW, PW2 و PW4)، توسط تسنیمی و محب خواه [12] ساخته و آزمایش شدند. تمامی قاب‌های بنایی دارای ابعاد ۲۲۶۰ در ۱۸۰۰ mm بوده که از آجرهای با ابعاد ۲۱۹ در ۱۱۰ در ۶۶ mm و با لایه ملات ۱۰ mm در بین آجرها ساخته شده بودند. قاب فلزی محصور کننده میان قاب‌ها شامل IPE140 بود.

مقاومت فشاری متوسط نمونه‌های ۵۰ mm مکعبی بر اساس استاندارد ASTM-C109 برابر ۱۰/۱ مگاپاسکال بود. به علاوه، مقاومت فشاری میانگین منشورهای بنایی ساخته شده بر اساس استاندارد ASTM-C1314 برابر ۷/۶۳ مگاپاسکال و مقاومت فشاری میانگین ۵ نمونه آجر ۱۲/۶ مگاپاسکال بود. دستگاه آزمایش برای نمونه‌های محصور در قاب خمشی فولادی، شامل سیستم بارگذاری، نمونه‌ها و قاب پیرامونی بود. بار جانبی با استفاده از جک‌های هیدرولیکی به ظرفیت ۱۰۰۰ kN به قسمت فوقانی قاب اعمال شد. جابه‌جایی جانبی نمونه‌ها نیز با استفاده از دو LVDT که به گوشه فوقانی قاب‌ها متصل شده بود، اندازه‌گیری شد. قاب پیرامونی با استفاده از پیچ‌های پر مقاومت به کف آزمایشگاه متصل شد تا از عدم تاثیر حرکت قاب بر نتایج اطمینان حاصل شود. به علاوه، تغییر مکان خارج از صفحه قاب نیز با استفاده از ۴ قید روی دو انتها

مفاصل پلاستیک اختصاص داده شده به اعضای قائم، مهاربندها، و اعضای مرزی می‌باشد. چنان در بخش‌های قبل اشاره شد، اعضای قائم، نشان دهنده رفتار محوری (کششی یا فشاری) دیوار بنایی هستند. از طرفی مهاربندها نیز برای تأمین سختی برشی میانقاب بنایی تعبیه شده‌اند. از این رو می‌توان نتیجه گرفت که مفاصل پلاستیک ایجاد شده در اعضای قائم و مهاربندها به ترتیب به ترک‌های کششی و برشی ایجاد شده در دیوار اشاره دارند. به عنوان مثال در شکل (۱۲-الف و ب) از مفاصل پلاستیک کششی ایجاد شده در مهاربندها می‌توان مود خرابی برشی قطری را فهمید، هماهنگی مناسبی بین نتایج آزمایشگاهی و نمونه‌های عددی به دست آمده از روش ستون‌های چندگانه وجود داشت.



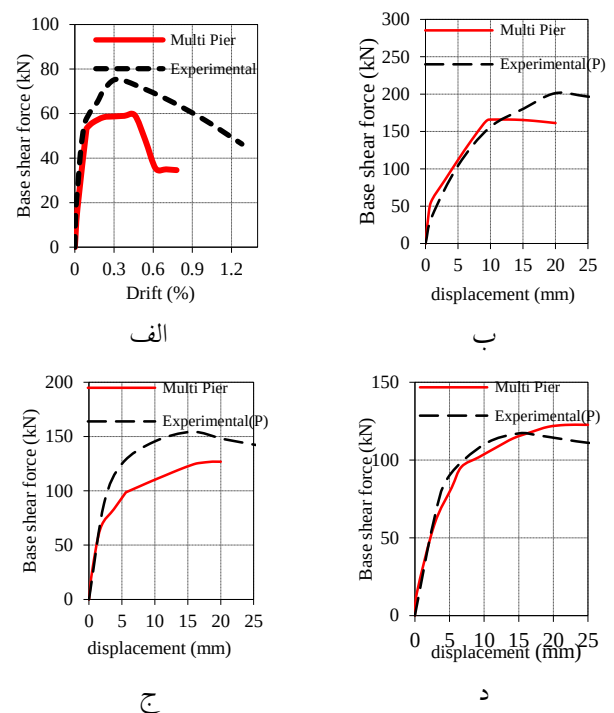
شکل ۱۲. مود تسلیم در اعضای مرزی و میانقاب در نمونه‌های الف) CW، ب) PW4، ج) SW، د) PW4

Fig. 12. Yielding modes in boundary elements and infill specimens, a) CW, b) SW, c) PW2, d) PW4

جدول ۲. مقایسه نتایج به دست آمده از روش ستون‌های چندگانه با نتایج آزمایشگاهی

Table 2. Comparison of the results of multi pier method and experimental results

Error (%)	Stiffness (kN/mm)		Error (%)	Peak Load (kN)		sample
	Num.	Exp.		Num.	Exp.	
19.9	63.8	53.2	26.6	59.2	75	CW
8.6	60.2	55.4	21.2	166	201.2	SW
5.4	46.1	48.6	24.6	123.8	154.3	PW2
8.4	32	29.5	4.7	122.5	117	PW4



شکل ۱۱. مقایسه منحنی پش آور بدست آمده از تحلیل عددی با روش

پیشنهادی با منحنی آزمایشگاهی الف) CW، ب) SW، ج) PW2، د) PW4

Fig. 11. Comparison of the pushover curves of experimental, numerical, and Multi pier method, a) CW, b) SW, c) PW2, d) PW4

به علاوه، روش پیشنهادی قادر است خرابی صورت گرفته در این نمونه‌ها را نیز تخمین بزند. خرابی‌های به دست آمده از روش ستون چندگانه به همراه نتایج آزمایشگاهی در شکل (۱۴) آورده شده است. لازم به ذکر است که مود تسلیم نشان داده شده در این شکل حاصل از تحلیل صورت گرفته در نرم افزار SAP2000 می‌باشد. تعیین مودهای خرابی با استفاده از روش پیشنهادی در نرم افزارهای مشابه دیگر نیز قابل تعیین است.

از دیگر قابلیت‌های مدل پیشنهادی، استخراج مود خرابی میانقاب بنایی و همچنین قاب اصلی پیرامونی با استفاده از وضعیت

اعلام تعارض منافع

نویسندگان اعلام می‌کنند که هیچ نوع تعارض منافع وجود ندارد.

مشارکت نویسندگان

تمامی نویسندگان به یک اندازه در این تحقیق مشارکت داشتند.

منابع مالی

این تحقیق بدون دریافت حمایت مالی از سوی مرکزی و یا دانشگاه آزاد اسلامی مراغه صورت گرفت.

نتایج این تحقیق می‌تواند به آشنایی جامعه مهندسی در درک رفتار میانقاب‌های بنایی و اندرکنش آن‌ها با قاب سازه و همچنین عوامل تاثیرگذار بر رفتار آن‌ها کمک نماید. همچنین این نتایج می‌تواند در توسعه آیین‌نامه‌ها و استانداردهای سازه‌های بنایی در آینده برای شناخت بیشتر رفتار میانقاب‌های بنایی موثر واقع شود.

قدردانی

نویسندگان مراتب قدردانی خود را از داوران این تحقیق اعلام می‌دارند. نظرات سازنده آنها سبب بهبود کیفی تحقیق شد.

علائم و اختصارات

d_n	فاصله بین دو عضو قائم
A_{sb}	سطح مقطع مهاربندهای مربوط به نعل درگاهی میانقاب
A_{pb}	سطح مقطع مهاربندهای مربوط به عضو قائم میانقاب
G	مدول برشی مصالح بنایی
E_c	مدول الاستیسیته مصالح بنایی
L_s	طول نعل درگاهی
L_{pl}	طول عضو قائم سمت چپ بازشو
L_{pr}	طول عضو قائم سمت راست بازشو
f_{tm}	مقاومت کششی مصالح بنایی
f_{cm}	مقاومت فشاری مصالح بنایی
ϵ_{tcr}	کرنش ترک خوردگی مصالح بنایی در حالت کششی
ϵ_{ccr}	کرنش ترک خوردگی مصالح بنایی در حالت فشاری
ϵ_{cu}	کرنش نهایی مصالح بنایی در حالت فشاری
f_t	مقاومت کششی اعضای قائم در سیستم خرابایی معادل
f_c	مقاومت فشاری اعضای قائم در سیستم خرابایی معادل
f_{v0}	مقاومت برشی اولیه مصالح بنایی
θ'	زاویه مهاربند با سطح قائم
F_t	مقاومت کششی مهاربند در سیستم خرابایی معادل
F_c	مقاومت فشاری مهاربند در سیستم خرابایی معادل
F_y	مقاومت تسلیم فولاد
E	مدول الاستیسیته فولاد

A_{wall}	سطح مقطع میانقاب بنایی
t_w	ضخامت میانقاب بنایی
L_p	طول اعضای قائم در سیستم معادل میانقاب
L_w	طول میانقاب
A_{system}	مجموع سطح مقطع اعضای قائم در سیستم معادل خرابایی
A_{pn}	سطح مقطع عضو قائم n ام
A_p	سطح مقطع عضو قائم
A_{vp}	سطح مقطع اعضای قائم (مربوط به سیستم معادل)
H_s	ارتفاع نعل درگاهی
A_{hp}	سطح مقطع اعضای افقی (مربوط به نعل درگاهی در سیستم معادل)
K_{wall}	سختی برشی میانقاب
H_{st}	ارتفاع نعل درگاهی بالای بازشو
H_{sb}	ارتفاع نعل درگاهی پایین بازشو
K_{system}	سختی برشی سیستم معادل خرابایی
A_b	سطح مقطع مهاربند
θ	زاویه مهاربند با سطح افق
L_b	طول مهاربند
H_p	ارتفاع عضو قائم
I_{system}	ممان اینرسی سیستم معادل خرابایی حول محور مرکز میانقاب
I_{pn}	ممان اینرسی هر عضو قائم حول مرکز میانقاب
i_{pn}	ممان اینرسی عضو قائم n ام حول محور مرکزی

References

- [1] FEMA 2000. *FEMA 356, Prestandard for the Seismic Rehabilitation of Buildings*. Second Draft. Federal Emergency Management Agency.
- [2] Management and Planning Organization, Office of Deputy for Technical Affairs, Technical Criteria Codification & Earthquake Risk, Reduction Affairs Bureau 2007. *Instruction for Seismic Rehabilitation of Existing Buildings, No. 360*. (In Persian)
- [3] Farshchi, H. and Moghadam, A. 2008. Experimental and Theoretical Studies on Cyclic Behavior of Braced Frame with Infill and without Infill. *Journal of Seismology and Earthquake Engineering*, 9(4), pp. 209-220. (In Persian)
- [4] Building and Housing Research Center, Ministry of Roads and Urban Development 2003. *Preliminary Earthquake Report of Bam on the December 26, 2003, Report No. 1 and 2*. (In Persian)

- [5] Building and Housing Research Center, Ministry of Roads and Urban Development 1990. *Open Conference (Manjil Earthquake, June 20, 1990)*. (In Persian)
- [6] Building and Housing Research Center, Ministry of Roads and Urban Development 2017. *Report on materials used in urban areas of Sarpol-e Zahab*.
- [7] Madan, A., Rainorn, M. and Mander, J. 1997. Modelling of Masonary Infill Panels for Structural Analysis. *Journal of Structural Engineering*, 123(10).
- [8] Smith, S. and Carter, C. 1969. A Method of Analysis for Infill Frames. *Institution of Civil Engineers*, London, 44, pp. 31-48.
- [9] Mainstone, R. 1971. On the Stiffness and Strength of Infilled Frames. *Transactions of the Institution of Civil Engineers*, Supplement 4, paper 7360s.
- [10] Kwan, K. and Liauw, T. 1983. Unified Plastic Analysis for Infilled Frames. *Journal of Structural Engineering*, 111(7), pp. 1427-1448.
- [11] Pirsaeheb, H., Moradi, M.J. and Milani, G. 2020. A Multi-Pier MP procedure for the non-linear analysis of in-plane loaded masonry walls. *Engineering Structures*, 212, p. 110534.
- [12] Tasnimi, A.A. and Mohebkah, A. 2011. Investigation on the behavior of brick-infilled steel frames with openings, experimental and analytical approaches. *Engineering Structures*, 33(3), pp. 968-980. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2010.12.018>

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم؟

Ahmadvand, M.M., Maleki, A., and Pourbaba, M., 2025. Developing a macro-element method for the analysis of masonry infill walls under in-plane lateral loading. *Modares Civil Engineering journal*, 25(4), pp.7-19.

DOI: 10.22034/25.4.2

