

بررسی عملکرد لرزه‌ای میان‌قاب‌های مصالح بنایی بازشودار و بدون بازشو با در نظر گرفتن اندرکنش رفتار داخل و خارج از صفحه و ارائه ضریب کاهش سختی مؤثر و مقاومت نهایی

دلارام استاد^۱، جلیل شفائی^{۲*}

^۱ دانشجوی دکتری سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود

^۲ دانشیار گروه مهندسی عمران سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود

دریافت: ۱۴۰۱/۸/۹، بازنگری: ۱۴۰۲/۱/۲۶، پذیرش: ۱۴۰۲/۱/۲۷، نشر آنلاین: ۱۴۰۲/۱/۲۷

چکیده

قاب با میان‌قاب مصالح بنایی رایج‌ترین نوع سازه‌ای است که برای ساخت سازه‌های چندطبقه در کشورهای در حال توسعه استفاده می‌شوند. اثر میان‌قاب مصالح بنایی عمدتاً باعث افزایش سختی اولیه و مقاومت ساختمان‌های قاب بتن مسلح (RC) است. از سوی دیگر، بازشوهای پنجره و درب به دلایل کاربردی جزء اجتناب‌ناپذیر میان‌قاب‌های مصالح بنایی هستند. مشاهده آسیب‌های زلزله‌های گذشته نشان می‌دهد که، آسیب‌دیدگی و خسارت میان‌قاب‌ها در داخل صفحه و کاهش سطح تماس میان‌قاب و قاب پیرامونی منجر به افزایش آسیب‌پذیری در خارج از صفحه میان‌قاب می‌شود. در این مقاله، قاب‌های میان‌پر با بازشو با ابعاد مختلف (پنجره و درب) تحت سه بارگذاری که عبارتند از: بارگذاری خارج از صفحه، بارگذاری خارج از صفحه بعد از بارگذاری داخل صفحه، بارگذاری داخل صفحه بعد از بارگذاری خارج از صفحه، با استفاده از نرم‌افزار اجزا محدود ABAQUS ارزیابی شده است. تحلیل‌های پوش‌آور غیرخطی برای هر یک از سه بارگذاری انجام شده است. بر اساس نتایج اجزای محدود موجود، معادلات تحلیلی برای به‌دست آوردن ضریب کاهش پیشنهاد شد. میانگین کاهش سختی میان‌قاب با در نظر گرفتن اندرکنش داخل صفحه و خارج از صفحه با استفاده از ضریب کاهش سختی ۳۰ درصد محاسبه شد.

کلیدواژه‌ها: میان‌قاب مصالح بنایی، بازشو، بارگذاری خارج از صفحه، بارگذاری داخل صفحه، روش اجزای محدود.

۱- مقدمه

میان‌قاب مصالح بنایی در ساختمان‌ها از جمله اعضای غیرسازه‌ای محسوب می‌شود که وزن قابل توجهی دارند و باعث افزایش سختی و مقاومت سازه و کاهش شکل‌پذیری قاب می‌شوند (Asteris و همکاران، ۲۰۱۷). با توجه به الزامات معماری ساختمان‌ها، در بسیاری از موارد ایجاد پنجره یا درب در میان‌قاب‌های مصالح بنایی اجتناب‌ناپذیر است. وجود بازشوها در یک میان‌قاب مصالح بنایی رفتار آن را تغییر می‌دهد و مقاومت و سختی را کاهش می‌دهد (Ozturkoglu و همکاران، ۲۰۱۵). ظرفیت میان‌قاب مصالح بنایی در دو حالت مجزا نیروی داخل

صفحه (Ip) و نیروی خارج از صفحه (Oop) تعریف می‌شود. از دهه ۱۹۵۰، مطالعات گسترده‌ای بر روی رفتار بار جانبی قاب با میان‌قاب مصالح بنایی به صورت آزمایشگاهی و تحلیلی انجام شده است.

Mosalam و همکاران (۱۹۹۷) یک سری آزمایشات را بر روی قاب‌های فولادی طراحی شده با بار ثقلی با اتصالات نیمه‌صلب پر شده با میان‌قاب‌های مصالح بنایی تقویت نشده تحت بارهای جانبی چرخه‌ای انجام دادند، بازشوها در میان‌قاب‌های مصالح بنایی منجر به شکل‌پذیری بیشتر شد.

Asteris و همکاران (۲۰۰۳) با استفاده از روش اجزای محدود برای تحلیل قاب با میان‌قاب مصالح بنایی تحت جابه‌جایی

2. Out of Plane

1. In Plane



و بلند با در نظر گرفتن بازشوها با اندازه‌ها و شکل‌های مختلف درب‌ها و پنجره‌ها انجام دادند، نتایج نشان داد که افزایش بازشو در میان‌قاب‌های مصالح بنایی به‌طور قابل‌توجهی بر عملکرد لرزه‌ای تأثیر می‌گذارد و در نتیجه شکنندگی، مقاومت جانبی، سختی، شکل‌پذیری را کاهش می‌دهد، در حالی که دوره تناوب، ظرفیت تغییر شکل کلی و احتمال آسیب را افزایش می‌دهد.

آزمایشات تجربی مختلفی برای ارزیابی ظرفیت مقاومت در برابر بارگذاری خارج از صفحه انجام شده است. مطالعات آزمایشگاهی توسط محققانی از جمله (Hak و همکاران، ۲۰۱۴)، (Akhoundi و همکاران، ۲۰۱۵-۲۰۱۶-۲۰۲۰؛ Preti و همکاران، ۲۰۱۵؛ Verlato و همکاران، ۲۰۱۶؛ Sepasdar و همکاران، ۲۰۱۷؛ Furtado و همکاران، ۲۰۱۸-۲۰۲۱؛ Di Domenico و همکاران، ۲۰۲۱؛ Verdereme و همکاران، ۲۰۲۲؛ Nie و همکاران، ۲۰۲۲) انجام شد. مقایسه نتایج این آزمایش‌ها بیان می‌کند که پارامترهای اصلی در رفتار خارج از صفحه عبارتند از: نسبت لاغری (نسبت ارتفاع به ضخامت)، نسبت ارتفاع به طول، مقاومت فشاری، شرایط مرزی، وجود بازشو و آسیب داخل صفحه قبلی بر روی میان‌قاب‌های مصالح بنایی است. در این مقاله هدف اصلی بررسی قاب با میان‌قاب مصالح بنایی با بازشوهای مختلف درب و پنجره با ابعاد و موقعیت متفاوت تحت سه نوع بارگذاری که عبارتند از:

۱- بارگذاری میان‌قاب‌های مصالح بنایی تحت شتاب‌های مختلف

۲- بارگذاری خارج از صفحه بعد از بارگذاری داخل از صفحه در جابه‌جایی‌های نسبی^۵ (رانش) ۰/۱۵٪، ۱٪، ۲٪ و ۳٪ و بررسی آسیب‌های خارج از صفحه.

۳- بارگذاری داخل از صفحه تا ۰/۶ جابه‌جایی نسبی (رانش) پس از بارگذاری خارج از صفحه و بررسی آسیب داخل صفحه. مدل‌های عددی در نرم‌افزار اجزای محدود ABAQUS مدل‌سازی شده است. در پایان، ضرایب کاهش سختی مؤثر و مقاومت نهایی پیشنهاد شده است. با استفاده از این ضرایب کاهش پیشنهادی، مهندس طراح می‌تواند اثرات اندرکنش داخل صفحه و خارج از صفحه را با استفاده از روش دستک مورب مدل‌سازی کند.

۲- عملکرد قوسی

McDowell در سال ۱۹۵۶ فرضیه عملکرد قوسی را گزارش کرد (McDowell و همکاران، ۲۰۱۶). امروزه عملکرد قوسی یک پدیده استاندارد است و به نام تئوری عملکرد قوسی ترجمه شده

جانبی، تأثیر موقعیت و تعداد بازشوها را در کاهش سختی بررسی کردند.

Karayannis و Kakaletsis (۲۰۰۷) برای تأثیر شکل و مکان بازشو، یک برنامه آزمایشی برای یافتن تأثیر بازشوهای پنجره و درب بر روی ویژگی‌های هیسترتیک^۳ قاب‌های پرشده RC انجام دادند. براساس نتایج مشخص شد، موقعیت بازشو باید تا حد امکان نزدیک به لبه میان‌قاب باشد تا عملکرد قاب دارای میان‌قاب مصالح بنایی را بهبود بخشد.

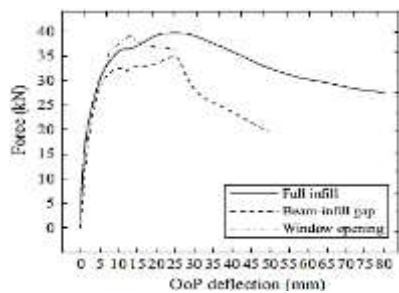
Karayannis و Kakaletsis (۲۰۰۸) به‌طور تجربی تأثیر شکل بازشو و مقاومت فشاری میان‌قاب‌های مصالح بنایی را بر رفتار قاب‌های RC پرشده مورد مطالعه قرار دادند.

آزمون Karayannis و Kakaletsis نشان می‌دهد که اندازه بازشوهای یک شکل بر رفتار نمونه‌ها تأثیری ندارد (Kakaletsis و Karayannis، ۲۰۰۹).

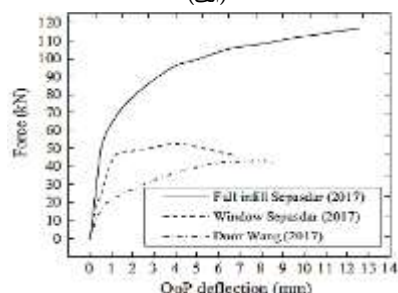
Akhoundi و همکاران (۲۰۱۵) یک تحلیل عددی پارامتریک گسترده برای بررسی تأثیر انواع بازشوهای مختلف بر رفتار داخل صفحه قاب با میان‌قاب مصالح بنایی را با استفاده از نرم‌افزار DIANA انجام دادند. برای قاب دارای میان‌قاب با بازشوهای معمولی (بازشوهای پنجره و درب با موقعیت‌های مختلف)، یک فرمول تجربی به‌دست آوردند؛ این فرمول تجربی می‌تواند به‌طور رضایت بخشی سختی اولیه قاب با میان‌قاب را پیش‌بینی کند. مشاهده کردند که افزایش عرض دستک^۴ مورب سختی اولیه قاب با میان‌قاب را به صورت خطی افزایش می‌دهد. Zhai و همکاران (۲۰۱۶) یک برنامه آزمایشی را بر روی رفتار لرزه‌ای میان‌قاب‌های مصالح بنایی با و بدون بازشو چهار نمونه تک دهانه و یک طبقه در مقیاس کامل تحت بار ثابت و بار جانبی چرخه‌ای شبه‌استاتیکی انجام دادند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که قاب میان‌پر نسبت به نمونه‌های دارای بازشو از مقاومت و سختی بیشتری برخوردار است.

Ozturkoglu، ۳۶ نمونه تحلیلی قاب با میان‌قاب مصالح بنایی با پارامترهای مختلفی مانند طول، ارتفاع میان‌قاب، موقعیت و ابعاد مختلف بازشوها را مورد بررسی قرار دادند. با توجه به نتایج مطالعه، هر پارامتر در نظر گرفته شده، از جمله موقعیت بازشو، به‌طور قاطع بر رفتار غیرخطی قاب‌های RC چه از نظر تقاضا و چه از نظر ظرفیت تأثیر می‌گذارد (Ozturkoglu و همکاران، ۲۰۱۷).

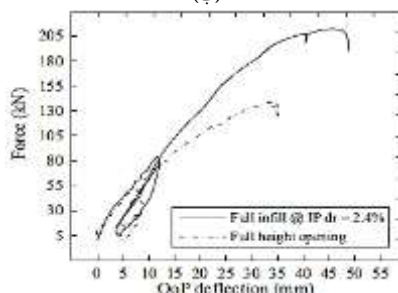
Budiwati و Sukrawa (۲۰۱۸) از نتایج تحلیل عددی فرمولی برای عرض دستک‌های مورب میان‌قاب مصالح بنایی با بازشو ارائه کردند. Kurmi و Haldar (۲۰۲۲) یک مطالعه تحلیلی گسترده را بر روی مجموعه‌ای از قاب‌های میان‌پر با ارتفاع متوسط



(الف)



(ب)



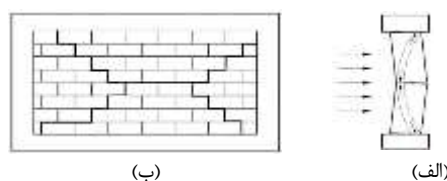
(ج)

شکل ۳- نمودارهای نیرو- جابه‌جایی نمونه‌های دارای بازشو:
 (الف) Akhondi و همکاران، (۲۰۱۶)،
 (ج) Verlato و همکاران، (۲۰۱۶)

در نمودار شکل (۳) نشان داده شده که میان‌قاب‌های دارای بازشو در مقایسه با قاب‌های کاملاً پر شده باعث کاهش قابل توجه تغییر شکل می‌شوند. با این حال، نمی‌توان با قاطعیت بیان کرد، زیرا برخی از نتایج متضاد در ادبیات فنی خارج از صفحه وجود دارد. برای مثال آخوندی با ابعاد بازشو مرکزی ۸۰×۶۳۵ میلی‌متر هیچ کاهش در ظرفیت مقاومت مشاهده نکرد شکل (۳-الف)، در حالی که سپاسدار شکل (۳-ب) Verlato شکل (۳-ج) کاهش قابل توجهی در ظرفیت مقاومت مشاهده کردند.

تفاوت در کاهش مقاومت بین آزمایش‌های آخوندی با آزمایش سپاسدار ممکن است به دلیل تیر نعل درگاهی باشد. پنجره مرکزی با تیر نعل درگاهی مقاومت آن تقریباً برابر با قاب میان‌پر بدون بازشو است. علاوه بر این در نمونه آخوندی خطوط تسلیم در قسمت پایین میان‌قاب توسعه یافته است شکل (۳-الف). این موضوع را نمی‌توان در نمونه بدون تیر نعل درگاهی سپاسدار مشاهده کرد، شکل (۳-ب). در نمونه آزمایشگاهی با

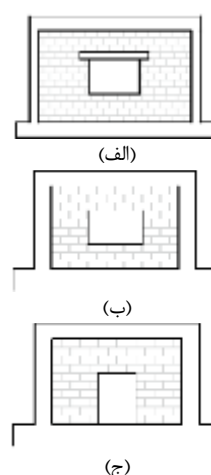
است. مطالعات مختلف نشان داده‌اند که میان‌قاب‌های مصالح بنایی زمانی که در معرض اعمال بارهای خارج از صفحه قرار می‌گیرند، می‌توانند حتی در برابر بارهای بزرگ با ایجاد یک مکانیسم قوسی مقاومت کنند شکل (۱-الف). الگوهای ترک معمولی قابل مشاهده پس از آزمایش‌های تجربی خارج از صفحه شکل (۱-ب) نشان می‌دهد که رفتار میان‌قاب مصالح بنایی، مهار شده توسط قاب اطراف، می‌تواند به رفتار یک صفحه شبیه‌سازی شود (Asteris و همکاران، ۲۰۱۷).



شکل ۱- مکانیسم میان‌قاب در خارج از صفحه (Asteris و همکاران، ۲۰۱۷): (الف) عملکرد قوسی، (ب) نوع ترک خوردگی

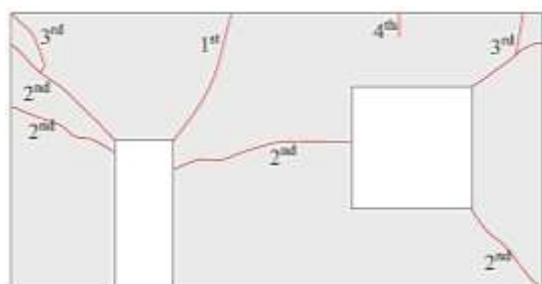
۲-۱- اثرات بازشو

نوع بازشو روی عملکرد قوسی تأثیر می‌گذارد، زیرا می‌تواند این تأثیرات را محدود کند. بررسی مطالعات محققان نشان داده، که بازشوها ظرفیت مقاومتی را کاهش داده و مکانیسم‌های شکست را تحت تأثیر قرار می‌دهد. با بررسی بارگذاری خارج از صفحه قاب‌های دارای میان‌قاب بازشودار کارهای محققینی از جمله آخوندی، سپاسدار و Verlato که نمونه‌های آزمایشگاهی آن‌ها در شکل (۲) و نمودار نیرو- جابه‌جایی نمونه‌های محققین در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل ۲- در مطالعات محققین: (الف) بازشو پنجره با تیر نعل درگاهی (Akhondi و همکاران، ۲۰۱۶)، (ب) پنجره بدون تیر نعل درگاهی (Sepasdar و همکاران، ۲۰۱۷)، (ج) درب بدون تیر نعل درگاهی (Wang و همکاران، ۲۰۱۷)

و در سمت راست، میان قاب‌های مصالح بنایی آزمایش شده توسط Griffith ارائه شده است. می‌توان نتیجه گرفت که پیش‌بینی با الگوهای ترک واقعی همبستگی زیادی دارد. با این حال، بازشوها، به‌ویژه گوشه‌های آن‌ها، بر موقعیت و طول خطوط تسلیم تأثیر می‌گذارند. با این وجود، عملکرد قوسی مشهود است.



(الف)



(ب)

شکل ۵- نتایج آزمایش دیوار مصالح بنایی با وقوع ترک تعیین شده (Mays و همکاران، ۲۰۱۷): (الف) بازشو درب و پنجره،

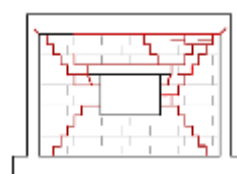
(ب) بازشو درب غیرمرکزی

۳- مدل‌سازی عددی

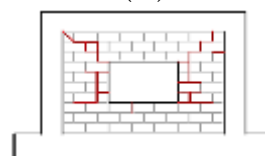
۳-۱- مشخصات هندسی مدل‌ها

در این مقاله از مدل‌های آزمایشگاهی Mansouri برای مدل‌سازی تحلیلی استفاده شده است (Mansouri و همکاران، ۲۰۱۴). نمونه‌های تحلیلی، همان‌طور که در شکل (۷) نشان داده شده است، شامل یک قاب بتن‌آرمه، یک قاب بتن‌آرمه با میان قاب مصالح بنایی، یک قاب بتن‌آرمه با میان قاب مصالح بنایی با بازشو درب غیرمرکزی و سه قاب بتن‌آرمه با میان قاب مصالح بنایی با بازشو پنجره با ابعاد و موقعیت متفاوت با مقیاس ۱:۲ است. مشخصات هندسی قاب بتن مسلح غیرلرزه‌ای در شکل (۸) نشان داده شده است. ابعاد آجر به ترتیب $۱۰۶ \times ۴۹ \times ۳۱$ (ضخامت \times ارتفاع \times طول) برحسب میلی‌متر است. ویژگی‌های نمونه‌های تحلیلی در جدول (۱) تعریف شده است.

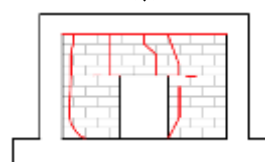
بارگذاری خارج از صفحه Verlato یک نمونه بازشودار با یک نمونه قاب میان‌پر مقایسه شد.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۴- الگوهای شکست میان قاب‌های دارای بازشو با

بارگذاری خارج از صفحه: (الف) بازشو پنجره مرکزی

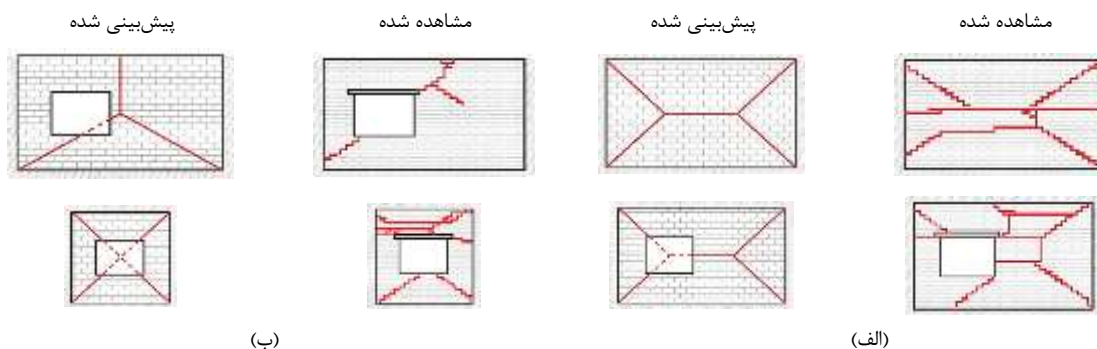
(Akhoundi و همکاران، ۲۰۱۶)، (ب) بازشو پنجره مرکزی

(Sepasdar و همکاران، ۲۰۱۷)، (ج) بازشو پنجره مرکزی

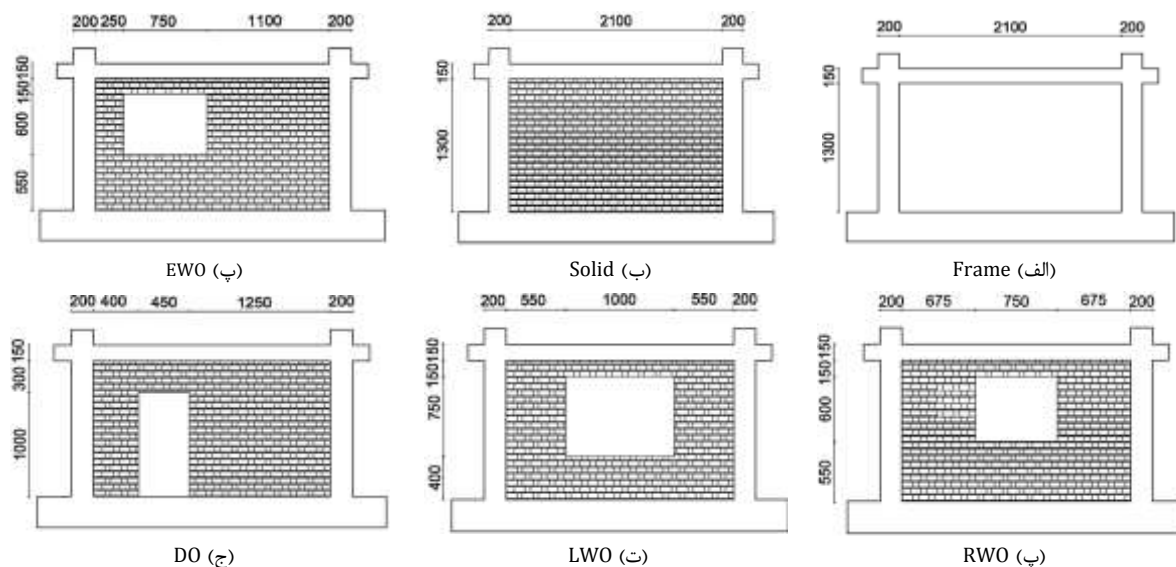
(Wang و همکاران، ۲۰۱۷)

۲-۲- مدهای گسیختگی

وجود بازشو حالت شکست را تغییر می‌دهد، سطح آسیب را افزایش می‌دهد و شکل‌پذیری، مقاومت و سختی قاب با میان قاب مصالح بنایی را کاهش می‌دهد. الگوهای ترک در نمونه‌های آخوندی، سپاسدار و Wang در شکل (۴) نشان داده شده است. Mays همچنین نمونه‌ای را با بازشو درب و پنجره تحت بارگذاری خارج از صفحه آزمایش کرد، با نتایج مشابهی در مقایسه با نمونه درب غیرمرکزی توسط Wang، که در شکل (۵) نشان داده شده است. در ابتدا، شکاف سمت چپ و راست را از هم جدا کرد، زیرا درب غیرمرکزی استفاده شده است. پس از آن یک عملکرد قوسی با شکاف در سمت راست (نمای عمودی) رخ داد. Griffith مقاومت میان قاب مصالح بنایی با بازشوها پنجره مرکزی و غیرمرکزی را بررسی کردند. در این مطالعات، عملکرد قوسی کم و بیش از خط تسلیم پیروی می‌کند، همان‌طور که بدون بازشوها انجام می‌شود (Griffith و Vaculik، ۲۰۰۷). همان‌طور که در شکل (۶) نشان داده، در سمت چپ نظریه Mays ارائه شده است



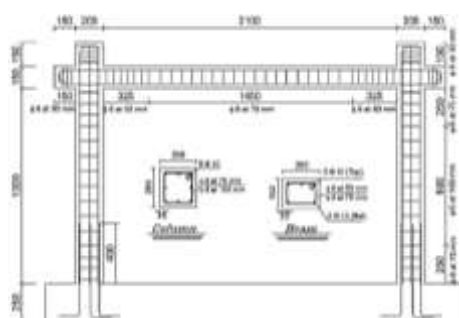
شکل ۶- پیش‌بینی شکست دیوارهای مصالح بنایی: (الف) Griffith و Vaculik، (ب) Mays و همکاران، (۲۰۰۷)



شکل ۷- ابعاد و مشخصات نمونه‌های آزمایشگاهی (Mansouri و همکاران، ۲۰۱۴)

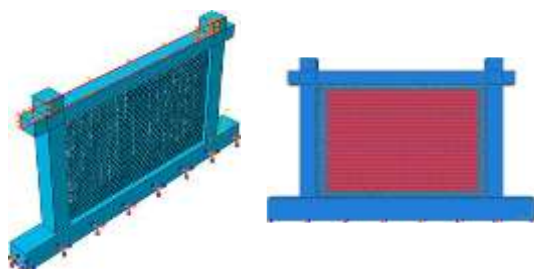
جدول ۱- مشخصات نمونه‌های آزمایشگاهی (Mansouri و همکاران، ۲۰۱۴)

| نمونه | شکل | طول بازشو (میلی‌متر) | ارتفاع بازشو (میلی‌متر) | موقعیت بازشو (x/l) |
|-------|---------------------------------------|----------------------|-------------------------|--------------------|
| FRAME | قاب بتن مسلح | --- | --- | --- |
| SOLID | قاب میان پر مصالح بنایی | --- | --- | --- |
| EWO | میان قاب دارای بازشو پنجره غیرمرکزی | ۷۵۰ | ۶۰۰ | ۰/۲ |
| RWO | میان قاب دارای بازشو پنجره مرکزی | ۷۵۰ | ۶۰۰ | ۰ |
| LWO | میان قاب دارای بازشو پنجره بزرگ مرکزی | ۱۰۰۰ | ۷۵۰ | ۰ |
| DO | میان قاب دارای بازشو درب غیرمرکزی | ۴۵۰ | ۱۰۰۰ | ۰/۲ |



شکل ۸- جزئیات اجرایی قاب بتن مسلح (اندازه بر حسب میلی‌متر) (Mansouri و همکاران، ۲۰۱۴)

نیروی خارج از صفحه به صورت نیرو- کنترل به یک سوم میانی سطح میان قاب به صورت فشاری وارد می شود. علاوه بر این در مدل سازی حرکت تیر بتن مسلح در جهت خارج از صفحه به طور کامل بسته می شود تا دیافراگم سازه حفظ شود. سطح بارگذاری و شرایط تکیه گاهی بارگذاری خارج از صفحه مدل سازی تحلیلی در شکل (۹) نشان داده شده است.



شکل ۹- شرایط تکیه گاهی و سطح بارگذاری خارج از صفحه: الف) سطح بارگذاری، ب) شرایط تکیه گاهی

شکل ۹- شرایط تکیه گاهی و سطح بارگذاری خارج از صفحه: الف) سطح بارگذاری، ب) شرایط تکیه گاهی

۴- مدل اجزای محدود

در این مقاله، پیکربندی ها با استفاده از نرم افزار اجزای محدود آباکوس^۷، که قوانین ساختاری مواد جامع و ویژگی های تعاملی توانمند را برای شبیه سازی میان قاب های مصالح بنایی ارائه می دهد، ارزیابی شده اند. این رویکرد مدل سازی برای انجام مطالعه پارامتریک بر روی رفتار قاب های RC با میان قاب مصالح بنایی مورد استفاده قرار گرفت. به منظور گیرداری بین میان قاب مصالح بنایی و قاب بتن مسلح در هر چهار طرف تای تعریف گردیده است. به منظور مدل سازی رفتار واقعی قاب بتن مسلح تمام آرماتورها در درون قاب بتنی مدفون شده اند. جزئیات هندسه و مش های المان، رویکرد مدل سازی و روش های تحلیل به شرح زیر است:

۴-۱- هندسه و مش بندی

نرم افزار تحلیل اجزای محدود آباکوس دارای چندین نوع المان است که برای هر مدل باید المان مناسب انتخاب شود تا از نتایج اطمینان حاصل گردد. در این مقاله از المان های یکپارچه سازی کاهش یافته سه بعدی هشت گره با نقطه ادغام گاوسی در المان ها (C3D8R) برای شبیه سازی قاب های بتن مسلح و از آجر و المان جامد (TRUSS T3D2) برای شبیه سازی طولی و عرضی استفاده شده است. تجزیه و تحلیل حساسیت مش برای اطمینان از مناسب بودن نوع و اندازه مش انتخاب شده، انجام شد.

۳-۲- مشخصات مصالح

مشخصات مصالح میان قاب مصالح بنایی در جدول (۲) نشان داده شده است:

| جدول ۲- مشخصات نمونه های آزمایشگاهی | | |
|-------------------------------------|--------------|-----------------|
| مقدار MPa | مشخصات | مصالح |
| ۲۱/۹ | مقاومت فشاری | بتن |
| ۹/۱۶ | مقاومت فشاری | آجر |
| ۸/۳۳ | مقاومت فشاری | سیمان ماسه ملات |
| ۴۳۸/۳ | مقاومت تسلیم | میلگردهای طولی |
| ۶۴۵ | مقاومت نهایی | میلگردهای طولی |
| ۳۹۶/۳ | مقاومت تسلیم | میلگردهای عرضی |
| ۵۰۹/۳ | مقاومت نهایی | میلگردهای عرضی |

۳-۳- شرایط بارگذاری

مدل های عددی میان قاب های مصالح بنایی با باز شو در سه سطح بارگذاری با تحلیل پوش آور غیر خطی بررسی می شوند:

- بارگذاری خارج از صفحه تحت شتاب های مختلف.
- بارگذاری خارج از صفحه پس از بارگذاری داخل صفحه در جابه جایی های نسبی ۰/۵٪، ۱٪، ۲٪ و ۳٪.
- بارگذاری داخل صفحه تا ۶٪ جابه جایی نسبی پس از بارگذاری خارج از صفحه (۱g).

۳-۳-۱- شرایط بارگذاری داخل صفحه

در مطالعه Mansouri برای در نظر گرفتن سطح بار محوری و تأثیر آن در صحت سنجی مدل های تحلیلی سطح بار محوری ۰/۱Ag.f.c به صورت کنترل شده توسط نیرو به بالای هر ستون از نمونه ها اعمال گردید، این میزان بار در طول آزمایش ها ثابت بوده است. همچنین از روند پیشنهادی ACI T1.1-01 به منظور طرح پروتکل بارگذاری داخل صفحه استفاده شده است.

۳-۳-۲- شرایط بارگذاری خارج از صفحه

نیروی خارج از صفحه طبق رابطه (۱) به عنوان وزن واحد سطح دیوار محاسبه می شود:

$$w = \rho g \times t$$

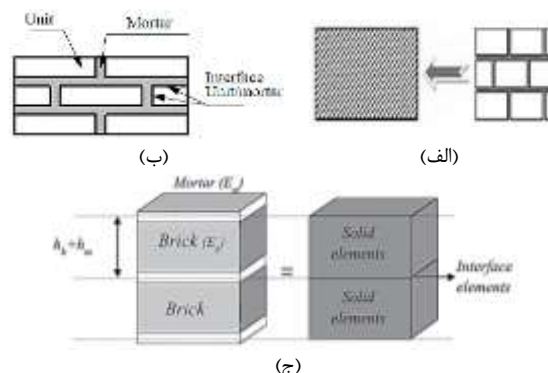
$$W = 185 \times 10^{-7} \left(\frac{N}{mm^3} \right) \times 106 (mm) \quad (1)$$

$$= 0.00196 \approx 0.002 g \left(\frac{N}{mm^2} \right)$$

ρ چگالی مصالح بنایی بر حسب نیوتن بر میلی متر مکعب است. g برابر با شتاب گرانشی زمین (بر حسب $\frac{mm}{g^2} = 9810$) است. t مقدار ضخامت میان قاب مصالح بنایی بر حسب میلی متر است.

۲-۴- رویکرد مدل سازی

مدل سازی عددی مواد شکننده مانند بتن و مصالح بنایی در چند دهه گذشته عمدتاً در سه گروه میکرو، ماکرو و مقیاس مزو طبقه بندی می شوند که در شکل (۱۰) نشان داده شده است.



شکل ۱۰- مدل سازی میان قاب مصالح بنایی: الف) رویکرد ماکرو (Pantò و همکاران، ۲۰۱۸)، ب) رویکرد میکرو (Laurenco و همکاران، ۱۹۹۵)، ج) رویکرد مزو (Aref و Dolatshahi، ۲۰۱۳)

ماکرو) رویکردهای مقیاس ماکرو برای سازه های بزرگ و به ویژه برای تحلیل لرزه ای ترجیح داده می شوند. تجزیه و تحلیل مقیاس ماکرو با بسیاری از مفروضات ساده شده برای کاهش قابل توجه زمان محاسباتی همراه است (Pantò و همکاران، ۲۰۱۸). میکرو) در رویکرد مدل سازی در مقیاس میکرو، هر قسمت از میان قاب های مصالح بنایی با استفاده از روش اجزای محدود به طور دقیق مدل سازی می شود. مدل سازی در مقیاس میکرو بالاترین سطح دقت را دارد و عمدتاً پاسخ دقیق سازه در کنار مسیر دقیق ترک ها نقطه مورد توجه است. با این حال، زمان ایجاد یک مدل عددی کامل و تجزیه و تحلیل تقاضای محاسباتی بسیار قابل توجه است (Laurenco و همکاران، ۱۹۹۵).

مزو) در مدل سازی اجزای محدود در مقیاس مزو، آجر و ملات به طور مشخص توسط دو نوع عنصر تعریف می شوند. برای هر دو نوع عنصر، رفتار خطی و غیرخطی به طور جداگانه تعریف شده است تا به سطح دقت بهتری دست یابد. آجرها به نصف ضخامت ملات منبسط می شوند و برهم کنش بلوک های منبسط

شده مختلف، توسط مدل تماس چسب سطحی شبیه سازی شده است. عناصر رابط بین عناصر آجری نشان دهنده ملات است. ملات با جزئیات تعریف نشده است و با استفاده از عناصر رابط ضخامت صفر نشان داده می شود. در مقیاس مزو، مسیر دقیق ترک مهم نیست، بلکه رفتار کلی سازه مهم است (Aref و Dolatshahi، ۲۰۱۳). در این مقاله از مدل سازی در مقیاس مزو استفاده شده است.

۳-۴- معرفی مصالح در نرم افزار اجزای محدود آباکوس

مشخصات اولیه مصالح بتنی و آجری از جمله مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته، چگالی و ضریب پواسون براساس مطالعه Mansouri و همکاران انتخاب گردیده است. به منظور صحت سنجی بین نتایج تحلیلی و آزمایشگاهی و انطباق منحنی های نیرو- جابه جایی نمونه های تحلیلی و آزمایشگاهی برای تعریف رفتار بتن آسیب دیده پلاستیک در نرم افزار پارامترهای نظیر زاویه اتساع، خروج از مرکزیت، انرژی شکست در کشش و برش، سختی ملات در کشش و برش، ضریب اصطکاک با انجام آنالیزهای زیادی انتخاب گردید. جدول های (۳) و (۴) خواص مکانیکی آجرهای بنایی و پارامترهای رابط برشی مورد استفاده در مطالعات پارامتری در کار فعلی را نشان می دهد.

۴-۴- روش های تحلیل

با توجه به روش های عددی، تجزیه و تحلیل در مقیاس مزو را می توان به طور عمده به تحلیل ضمنی^۸ و صریح^۹ طبقه بندی کرد.

در این پژوهش از روش حل صریح استفاده شده است، تحلیل های غیرخطی با استفاده از یک حل کننده صریح برای کاهش مسائل همگرایی انجام می شود. پیشرفت تجزیه و تحلیل در حوزه زمانی با استفاده از افزایش های کوچک زیادی که توسط معیار پایداری دیکته می شود. روش تحلیل دینامیکی صریح از داشتن یک تحلیل پایدار، افزایش زمان تنها محدودیتی است که باید کنترل شود. این پارامتر باید با بالاترین فرکانس طبیعی عناصر بررسی شود (Dolatshahi و همکاران، ۲۰۱۴).

جدول ۳- مشخصات مکانیکی بتن آسیب دیده پلاستیک

| نمونه شاهد | مصالح | زاویه اتساع | خروج از مرکزیت | σ_{bo}/σ_{co} | k | پارامتر ویسکوزیته |
|----------------------------------|-------|-------------|----------------|---------------------------|-------|-------------------|
| قاب بتن مسلح | بتن | ۳۰ | ۰/۱ | ۱/۱۶ | ۰/۶۶۷ | ۰/۰۰۱ |
| میان قاب با باز شو و بدون باز شو | بتن | ۳۰ | ۰/۱ | ۱/۱۶ | ۰/۶۶۷ | ۰/۰۰۱ |
| | آجر | ۱۰ | ۰/۱ | ۱/۱۶ | ۰/۶۷ | ۰/۰۰۱ |

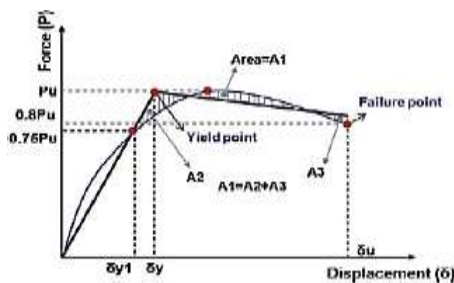
8. Implicit
9. Explicit

جدول ۴- مشخصات مکانیکی المان رابط و ملات قاب میان پر مصالح بنایی

| رفتار چسبنده | | رفتار نرمال | | | رفتار مماسی | | نمونه شاهد |
|-------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|-------------------|------|------------|
| خرابی | | رفتار کشش-جداشدگی | | | | | |
| شروع خرابی | | | | | | | |
| تکامل خرابی | | | | | | | |
| f_t (N/mm ²) | $C = 1.4f_t$ (N/mm ²) | k_{nn} (N/mm ³) | k_{ss} (N/mm ³) | k_{tt} (N/mm ³) | $\mu = \tan \phi$ | | |
| ۰/۲۴ | ۰/۱۶ | ۱۱۰ | ۵۰ | ۵۰ | ۰/۷۵ | Hard | SOLID |
| ۰/۲۵۲ | ۰/۱۸ | ۱۰۰ | ۴۰ | ۴۰ | ۰/۷۵ | Hard | EWO |
| ۰/۲۲۴ | ۰/۱۶ | ۱۱۰ | ۵۰ | ۵۰ | ۰/۷۵ | Hard | LWO |
| ۰/۱۲۹ | ۰/۰۱۸ | ۱۰۰ | ۴۰ | ۴۰ | ۰/۷۵ | Hard | RWO |
| ۰/۱۵ | ۰/۱۱ | ۲۰۰ | ۱۴۰ | ۱۴۰ | ۰/۷۵ | Hard | DO |

$$K_e = \frac{P_U}{\delta_y} \quad (2)$$

$$\mu = \frac{\delta_{tt}}{\delta_y} \quad (3)$$



شکل ۱۲- دوخطی سازی نمودار نیرو- جابه جایی
(Shafaei و همکاران، ۲۰۱۴)

۴-۵- رفتار پلاستیک المان های آجری

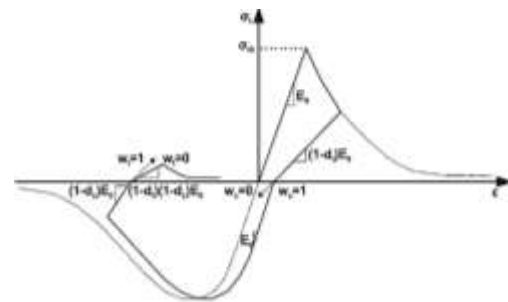
مدل مواد پلاستیسیته آسیب دیده بتن (GDP) در آباکوس برای مدل سازی رفتار غیرخطی آجرها استفاده شد. این مدل مواد به طور خاص برای بتن نوشته شده است. با این حال، می توان از آن برای سایر مواد شکننده از جمله آجر استفاده کرد. این مدل فرض می کند که دو مکانیسم اصلی شکست برای مواد شکننده، ترک کششی و خرد کردن فشاری هستند. در این مدل مواد، موقعیت سطح تسلیم همیشه به ترتیب توسط دو متغیر سخت کننده، کرنش پلاستیک کششی و فشاری کنترل می شود. این رفتار ماده همچنین برای نشان دادن رفتار چرخه های مواد شکننده با در نظر گرفتن کاهش سختی همان طور که در شکل (۱۱) نشان داده شده است.

۵- صحت سنجی

در مطالعه حاضر، نمونه های میان قاب مصالح بنایی با بازشوهای مختلف (پنجره و درب) از نمونه های آزمایشی Mansouri استفاده شده است (Mansouri و همکاران، ۲۰۱۴). قاب RC با استفاده از تحلیل استاتیکی غیرخطی و قاب پر شده مصالح بنایی با بازشوهای مختلف با استفاده از تحلیل دینامیکی صریح و مدل سازی مزو تحلیل شد و نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شد. پس از آن، برای کالیبراسیون شبیه سازی عددی قاب های پر شده تحت بارگذاری خارج از صفحه، از نمونه آزمایشی Furtado استفاده شده است (Furtado و همکاران، ۲۰۱۵). صحت سنجی شامل مقایسه حالت شکست و منحنی نیرو- جابه جایی نمونه های آزمایشی و مدل عددی مربوطه است. همانطور که نشان داده شده است، تطابق بسیار خوبی بین نتایج عددی و تجربی وجود دارد.

۵-۱- صحت سنجی رفتار داخل صفحه

قاب بتن مسلح (RC) تحت بارگذاری یکنواخت داخل صفحه تا ۳ درصد رانش ادامه داشت. ابتدا مفصل پلاستیک در دو سر



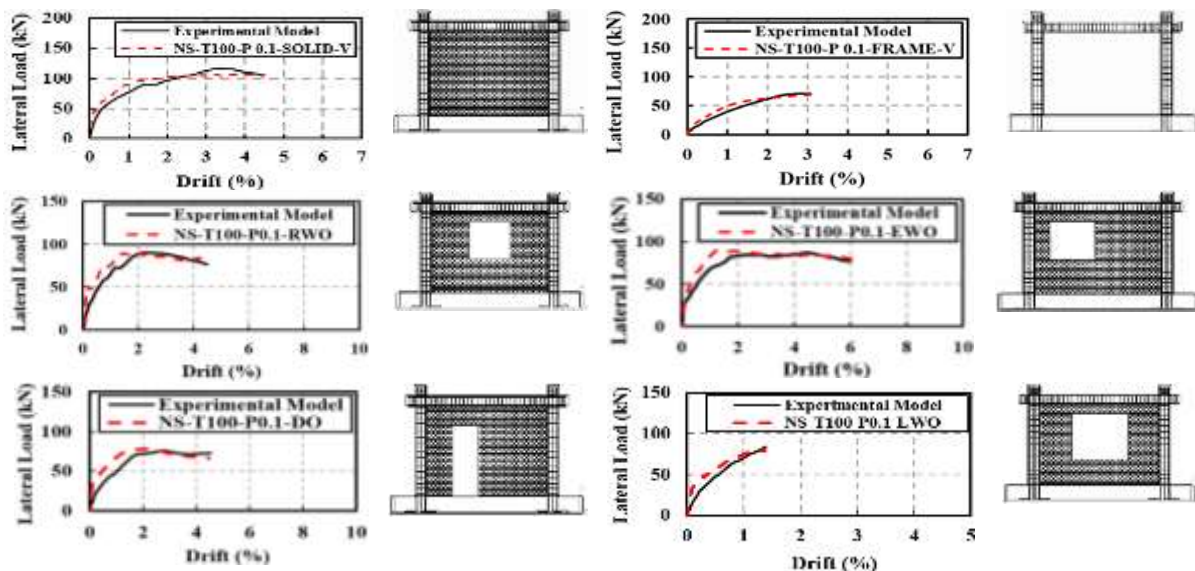
شکل ۱۱- رفتار بتن در بارگذاری تک محوره
(Dolatshahi و همکاران، ۲۰۱۴)

۴-۶- روش دوخطی

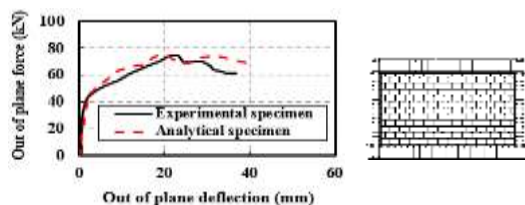
از آنجایی که منحنی های نیرو- جابه جایی برای نمونه های تحلیلی نقطه تسلیم مشخصی ندارند، ظرفیت شکل پذیری با استفاده از یک روش تقریب دوخطی ایده آل پیشنهاد شده توسط Priestley و Paulay تعیین شد، همان طور که در شکل (۱۲) نشان داده شده است. ظرفیت شکل پذیری و سختی مؤثر به ترتیب با استفاده از روابط (۲) و (۳) تعیین شد.

میان قاب مصالح بنایی با بازشو پنجره بزرگ مرکزی (LWO) که در معرض بارگذاری یکنواخت داخل صفحه قرار گرفت تا ۱/۵٪ رانش ادامه یافت. اولین ترک در انتهای پایین ستون‌ها بوده و منجر به اتصال پلاستیکی در دو سر تیر و ستون شده است. میان قاب مصالح بنایی با نمونه بازشو درب غیرمرکزی (DO) که در معرض بارگذاری یکنواخت داخل صفحه قرار گرفت تا ۴/۳٪ رانش ادامه یافت. اولین ترک مرزی بین قاب و میان قاب مصالح بنایی و محل ترک‌های افقی در اتصالات ملات در بالای بازشو ترک‌های مورب ایجاد شده در سمت راست بازشو آشکار است. مقایسه پارامترهای مورد بررسی از جمله مقاومت و سختی مؤثر و شکل‌پذیری نمونه‌های تحلیلی و آزمایشگاهی در جدول (۵) نشان داده شده است. نمودار نیرو-جابجایی، در شکل (۱۳) نشان داده شده است.

تیر و سپس در انتهای ستون‌ها ایجاد می‌شود که رفتار خمشی اعضا را نشان می‌دهد. نمونه‌های قاب با میان قاب مصالح بنایی (Solid) که تحت بارگذاری یکنواخت داخل صفحه قرار گرفتند تا ۴/۳٪ رانش ادامه دادند. ایجاد شکاف در محل اتصال بین میان قاب مصالح بنایی و قاب مشاهده شد. که نشان دهنده تسلط حالت لغزشی در محل مرزهای ملات بر رفتار کلی میان قاب مصالح بنایی است. میان قاب مصالح بنایی با نمونه بازشو پنجره غیرمرکزی (EWO) که در معرض بارگذاری یکنواخت داخل صفحه قرار گرفته بود تا ۶٪ رانش ادامه یافت. اولین ترک خوردگی به صورت محل ترک افقی در درزهای ملات در بالای بازشو تشکیل می‌شود. میان قاب مصالح بنایی با بازشوی پنجره مرکزی (RWO) که در معرض بارگذاری یکنواخت داخل صفحه قرار گرفت تا ۴/۳٪ رانش ادامه یافت. ترک‌های افقی در بالای بازشو و چند ترک مورب ایجاد شده در دو طرف بازشو مشاهده شد.



شکل ۱۳- صحت‌سنجی در بارگذاری داخل صفحه



شکل ۱۴- صحت‌سنجی نمونه در بارگذاری خارج از صفحه

۶- نتایج و بحث

در این بخش، نتایج ارائه شده برای بررسی بیشتر اندرکنش داخل صفحه و خارج از صفحه مصالح بنایی با بازشوها شرح داده شده است.

۵-۲- صحت‌سنجی رفتار خارج از صفحه

برای صحت‌سنجی بارگذاری خارج از صفحه از مدل آزمایشگاهی Furtado استفاده شده است (Furtado و همکاران، ۲۰۱۵). ترک‌های افقی، عمودی و مورب در درزهای ملات و در نقاط مختلف از جمله مرکز میان قاب ایجاد شد که نشان می‌دهد عملکرد قوسی دوطرفه در میان قاب رخ داده است. مقایسه پارامترهای مورد بررسی شامل مقاومت و سختی مؤثر و شکل‌پذیری نمونه تحلیلی و آزمایشی در جدول (۵) نشان داده شده است. نمودار نیرو-جابجایی نمونه تحلیلی و آزمایشگاهی در شکل (۱۴) مطابقت خوبی دارند.

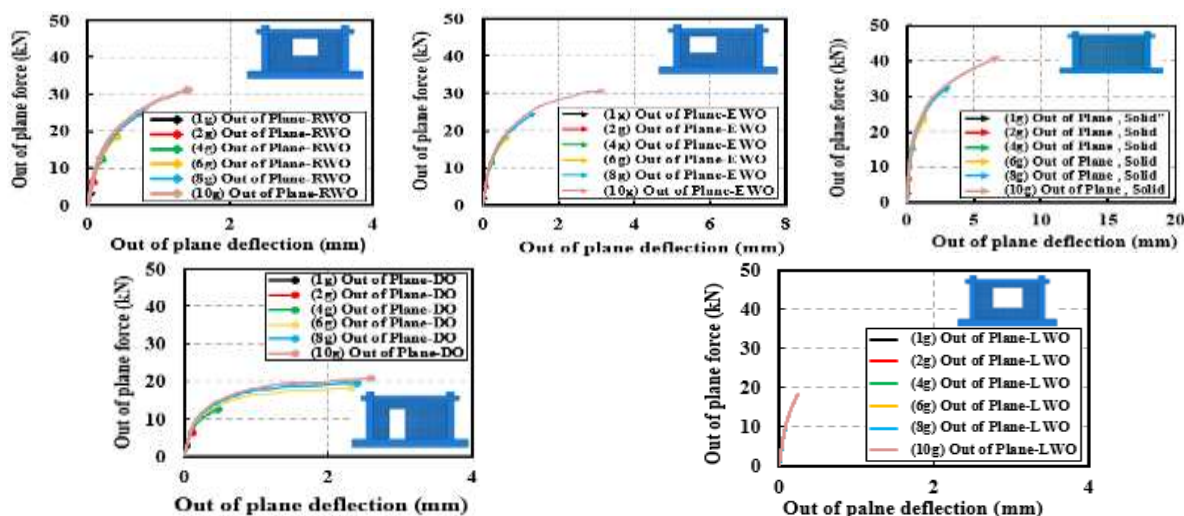
۶-۱- رفتار خارج از صفحه

بارگذاری خارج از صفحه بر روی تمام سطح میان قاب‌های مصالح بنایی برابر با شتاب زمین از (۱g) تا (۱۰g) اعمال می‌شود.

در مرحله بارگذاری هیچ بار محوری در نظر گرفته نشد. تیر پایین قاب به‌طور کامل مهار شد تا یک تیر فونداسیون صلب را شبیه‌سازی کند. منحنی‌های نیرو-جابجایی در شکل (۱۵) نشان داده شده است.

جدول ۵- مقایسه نمونه تحلیلی با نمونه شاهد آزمایشگاهی برای صحت‌سنجی

| نمونه | نوع | مقاومت نهایی (kN) | سختی مؤثر (kN/mm) | شکل‌پذیری | سطح زیر نمودار (mm) | % اختلاف سطح دو نمودار |
|-------|------------|-------------------|-------------------|-----------|---------------------|------------------------|
| FRAME | آزمایشگاهی | ۷۰ | ۲/۶ | ۱/۶۵ | ۱۹۲۹ | ۷/۳ |
| | تحلیلی | ۶۷ | ۳/۷ | ۲/۶ | ۲۰۶۷ | |
| SOLID | آزمایشگاهی | ۱۱۵ | ۷/۲ | ۴/۱۶ | ۵۳۴۱/۸ | ۲/۱۹ |
| | تحلیلی | ۱۰۶ | ۹ | ۵ | ۵۵۶۸/۲ | |
| EWO | آزمایشگاهی | ۸۵ | ۶/۶ | ۶/۳ | ۵۸۹۹/۳۷ | ۳/۱۶ |
| | تحلیلی | ۹۰ | ۷/۹ | ۷ | ۶۲۶۲/۳۱۹ | |
| RWO | آزمایشگاهی | ۸۹/۷ | ۷/۱ | ۴/۲۳ | ۴۳۳۱/۴۵۳ | ۵/۳ |
| | تحلیلی | ۸۷ | ۸/۸ | ۵/۹ | ۴۵۶۱/۳۱ | |
| LWO | آزمایشگاهی | ۸۴ | ۷/۳ | ۲/۴ | ۹۶۲/۸۶ | ۱۳/۳۸ |
| | تحلیلی | ۸۰ | ۵/۳ | ۱/۲ | ۱۰۹۱/۷۷ | |
| DO | آزمایشگاهی | ۷۷/۲ | ۴/۹ | ۴/۲۸ | ۳۶۷۵/۸ | ۶/۱۷ |
| | تحلیلی | ۷۸ | ۶/۵ | ۴/۸ | ۳۹۲۳/۰۸ | |
| قاب | آزمایشگاهی | ۱۹۴ | ۳۲/۳۴ | ۳/۵ | ۳۵۳۹/۵۲ | ۳/۱۶ |
| | لرزه‌ای | ۲۰۲ | ۳۱ | ۳/۲۳ | ۳۶۶۸/۳۸ | |



شکل ۱۵- بارگذاری خارج از صفحه نمونه‌های تحلیلی

جابجایی خارج از صفحه مهار شد. هیچ بار محوری در هر دو مرحله بارگذاری در نظر گرفته نشد. در هر دو مرحله، تیر پایین قاب به‌طور کامل مهار شد تا یک تیر پی صلب را شبیه‌سازی کند. پس از آن، تأثیر آسیب داخل صفحه بر رفتار خارج از صفحه بررسی می‌شود.

نمونه قاب با میان قاب مصالح بنایی (Solid)، همان‌طور که در شکل (۱۶) و جدول (۶) نشان داده شده است، برای رانش تا ۱/۵۰٪، تأثیر مقاومت نهایی و سختی مؤثر حدود ۱/۴۴٪ و ۱/۶۴٪

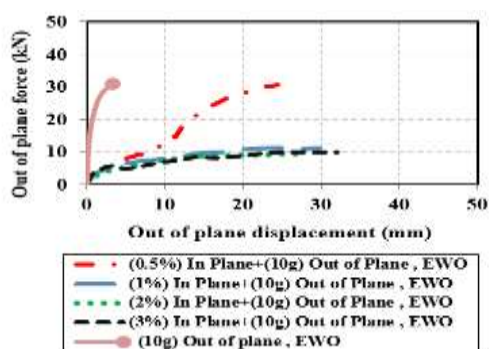
۶-۲- بارگذاری خارج از صفحه پس از بارگذاری داخل صفحه

در این بخش، نمونه‌ها تحت بارگذاری داخل صفحه و سپس تحت بارگذاری خارج از صفحه مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. در مرحله داخل صفحه، قاب با سطح رانش (به ترتیب ۱/۵، ۱/۱، ۱/۲ و ۱/۳) اعمال و تحلیل شد. در طول مرحله خارج از صفحه، میان قاب آسیب‌دیده تحت فشار یکنواخت خارج از صفحه تا (۱۰g) بارگذاری شد. در مرحله خارج از صفحه، قاب RC برای

جدول ۶- نتایج دو خطی نمونه SOLID

| نمونه SOLID | مقاومت نهایی (kN) | سختی مؤثر (kN/mm) |
|-----------------------|-------------------|-------------------|
| Oop (10g) | ۴۱/۶ | ۱۱ |
| Ip (%0.5) + Oop (10g) | ۴۱ | ۴ |
| Ip (%1) + Oop (10g) | ۲۲/۵ | ۱/۷۵ |
| Ip (%2) + Oop (10g) | ۱۸/۵ | ۱/۱۵ |
| Ip (%3) + Oop (10g) | ۱۶/۵ | ۱ |

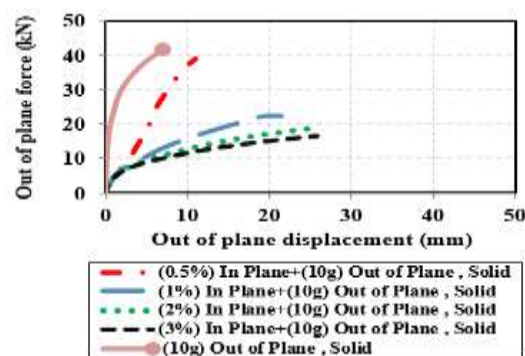
میان قاب با باز شو پنجره غیرمرکزی (EWO)، همان طور که در شکل (۱۷) و جدول (۷) نشان داده شده است، برای رانش تا ۰/۵٪، اثر مقاومت نهایی و سختی مؤثر در مقایسه با نمونه بدون آسیب در صفحه حدود ۰/۱۱٪ و ۰/۹۰٪ کاهش می‌یابد. در رانش‌های ۱٪، ۲٪ و ۳٪ به ترتیب، مقاومت نهایی حدود ۰/۶۶٪، ۰/۷۱٪ و ۰/۷۲٪ و سختی مؤثر حدود ۰/۹۴٪، ۰/۹۵٪ و ۰/۹۷٪ است. در مقایسه با نمونه بدون آسیب در داخل صفحه کاهش می‌یابد. بنابراین مشاهده شد که در صورت بروز آسیب در داخل صفحه، ظرفیت خارج از صفحه به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد. به نظر می‌رسد که نمونه‌های تحلیلی در آسیب‌های داخل صفحه مستقیماً با کاهش مقاومت و سختی مؤثر مرتبط هستند. مشاهده شد که در نمونه EWO با افزایش رانش‌های داخل صفحه، ظرفیت خارج از صفحه و سختی کاهش می‌یابد. تغییر شکل پلاستیک و آسیب نمونه EWO شکل (۲۱-ب) نشان داده شده است. مقاومت نهایی نمونه EWO رانش قبلی در صفحه ۰/۱٪ در مقایسه با رانش در داخل صفحه ۰/۰۵٪ حدود ۰/۶۲٪ کاهش می‌یابد. در رانش ۰/۱٪، ترک‌های بیشتر ناشی از جدا شدن ملات از آجر نیز در قسمت سمت راست باز شو در میان قاب ظاهر شد. نمونه با رانش ۰/۱٪ و مقاومت نهایی ۹/۵ کیلونیوتن در اثر شکست خارج از صفحه سمت راست باز شو فرو ریخت. با رانش ۰/۱٪ به ۰/۳٪، مشاهده شد که قسمت سمت راست باز شو یک‌تکه جدا شده است. در رانش ۰/۳٪، علاوه بر جدا شدن در سمت راست قسمت پایین باز شو، ترک‌های افقی از وسط میان قاب مصالح بنایی شروع شده و تا پایین امتداد می‌یابد.



شکل ۱۷- تأثیر آسیب داخل صفحه روی رفتار خارج از

صفحه

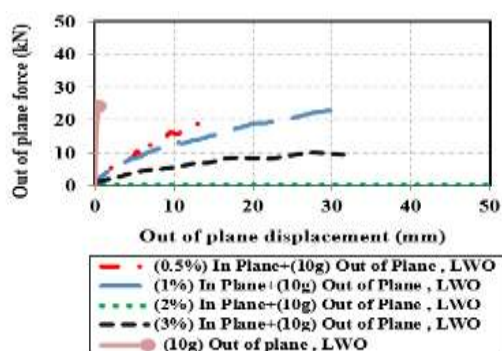
نسبت به نمونه بدون آسیب در صفحه کاهش می‌یابد. با توجه به این که رانش بیشتر می‌شود، در رانش‌های ۰/۱٪، ۰/۲٪ و ۰/۳٪ به ترتیب، مقاومت نهایی حدود ۰/۴۶٪، ۰/۵۵٪ و ۰/۶۰٪ و سختی مؤثر حدود ۰/۸۴٪، ۰/۸۹٪ و ۰/۹۱٪ در مقایسه با نمونه بدون آسیب در داخل صفحه کاهش می‌یابد. همان طور که در شکل (۱۶) نشان داده شده است، ظرفیت خارج از صفحه را می‌توان به میزان قابل توجهی در حضور آسیب‌های داخل صفحه کاهش داد. بنابراین، رانش بیشتر منجر به کاهش بیشتر در مقاومت و سختی مؤثر شد. با این وجود، با توجه به گستره نسبتاً اندک آسیب داخل صفحه (در رانش ۰/۵٪)، کاهش مقاومت نسبتاً پایینی در خارج از صفحه انتظار می‌رود. بنابراین مقاومت نهایی حدود ۰/۴۴٪ کاهش یافت. همان طور که در شکل (۲۱-الف) نشان داده شده است، اولین تغییر شکل‌های پلاستیکی در میان قاب‌های مصالح بنایی در مقادیر کوچکی از رانش رخ می‌دهد. با افزایش تعداد ترک‌ها در نمونه Solid، کاهش مقاومت افزایش می‌یابد. به طوری که در قاب با میان قاب مصالح بنایی با مقاومت نهایی با دریافت قبلی ۰/۱٪ در مقایسه با رانش در داخل صفحه ۰/۰۵٪ حدود ۰/۴۵٪ کاهش می‌یابد. در رانش ۰/۱٪، برخی ترک‌ها در مرکز میان قاب ظاهر شدند و برخی ترک‌ها در ردیف‌های انتهایی میان قاب ظاهر شد. با توجه به تجزیه و تحلیل، برخی از ترک‌های افقی در میان قاب مصالح بنایی شروع و به چهار گوشه در محدوده مشخص گسترش می‌یابد. با رسیدن به رانش ۰/۳٪، مرزهای عمودی میان قاب مصالح بنایی شروع به جدا شدن از ستون‌های مجاور کردند. چندین بلوک در ردیف‌های پایینی سقوط کردند، که نشان‌دهنده وقوع شکست فشاری، مطابق با جابه‌جایی نسبی مشاهده شده است. این آسیب در سرتاسر میان قاب مصالح بنایی پخش شد، هم به دلیل ایجاد ترک‌های جدید و هم به دلیل آسیب‌های قبلی در داخل صفحه، عمل قوسی خارج از صفحه در دو جهت افقی و عمودی شکل گرفت.



شکل ۱۶- تأثیر آسیب داخل صفحه روی رفتار خارج از

صفحه

میان قاب با بازشوی بزرگ پنجره مرکزی (LWO)، همان طور که در شکل (۱۹) و جدول (۹) نشان داده شده است، برای دریافت تا ۰/۵٪، تأثیر مقاومت نهایی و سختی مؤثر حدود ۰/۱۰ و ۰/۹۷٪ در مقایسه با نمونه بدون آسیب در صفحه کاهش می‌یابد. با توجه به این که رانش بیشتر می‌شود، در رانش‌های ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۳ به ترتیب، مقاومت نهایی حدود ۰/۱۰، ۰/۵۰ و ۰/۵۵٪ و سختی مؤثر حدود ۰/۹۸/۵، ۰/۹۹/۳۶ و ۰/۹۹/۲۸٪ است. در مقایسه با نمونه بدون آسیب در صفحه کاهش می‌یابد. تغییر شکل پلاستیک و آسیب نمونه LWO در شکل (۲۱-ت) نشان داده شده است. مقاومت نهایی نمونه LWO با رانش قبلی در صفحه ۰/۱٪ در مقایسه با رانش در داخل صفحه ۰/۵٪ حدود ۰٪ کاهش می‌یابد. اولین ترک خوردگی نمونه LWO در رانش ۰/۵٪ با تشکیل ترک‌های افقی میان قاب مصالح بنایی مشاهده شد. در رانش ۰/۱٪، ترک‌های از قبل موجود، به‌ویژه در قسمت پایینی میان قاب، گسترده‌تر شدند. در رانش ۰/۳٪، جدا شدن قسمت‌هایی از میان قاب در اطراف بازشو مشاهده شد. با توجه به تجزیه و تحلیل، برخی از ترک‌های افقی در میان قاب‌های مصالح بنایی شروع و تا چهار گوشه در محدوده مشخص گسترش می‌یابد.



شکل ۱۹- تأثیر آسیب داخل صفحه روی رفتار خارج از صفحه

جدول ۹- نتایج دو خطی نمونه LWO

| نمونه LWO | مقاومت نهایی (kN) | سختی مؤثر (kN/mm) |
|-----------------------|-------------------|-------------------|
| Oop (10g) | ۲۰ | ۶۲/۵ |
| Ip (%0.5) + Oop (10g) | ۱۸ | ۱/۷ |
| Ip (%1) + Oop (10g) | ۱۸ | ۰/۹۵ |
| Ip (%2) + Oop (10g) | ۱۰ | ۰/۴ |
| Ip (%3) + Oop (10g) | ۹ | ۰/۴۵ |

میان قاب با بازشو درب غیرمرکزی (DO)، همان طور که در شکل (۲۰) و جدول (۱۰) نشان داده شده است، برای دریافت تا ۰/۵٪، اثر مقاومت نهایی و سختی مؤثر حدود ۰٪ و ۰/۹۷٪ در مقایسه با نمونه بدون آسیب در صفحه کاهش می‌یابد.

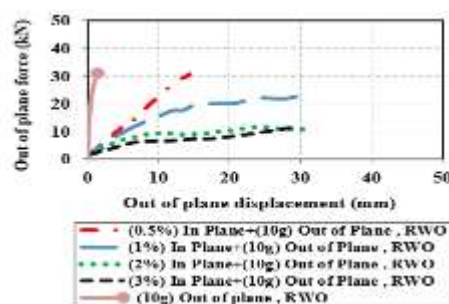
جدول ۷- نتایج دو خطی نمونه EWO

| نمونه EWO | مقاومت نهایی (kN) | سختی مؤثر (kN/mm) |
|-----------------------|-------------------|-------------------|
| Oop (10g) | ۲۸ | ۱۴ |
| Ip (%0.5) + Oop (10g) | ۲۵ | ۱/۴ |
| Ip (%1) + Oop (10g) | ۹/۵ | ۰/۷۹ |
| Ip (%2) + Oop (10g) | ۸ | ۰/۶۹ |
| Ip (%3) + Oop (10g) | ۸ | ۰/۴۴ |

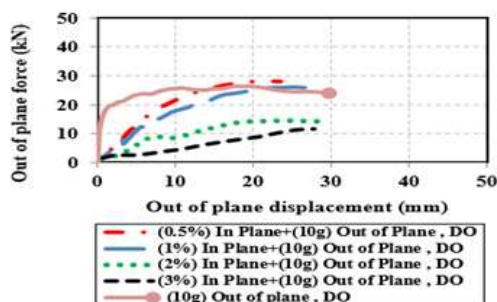
میان قاب با بازشوی پنجره مرکزی (RWO)، همان طور که در شکل (۱۸) و جدول (۸) نشان داده شده است، برای رانش تا ۰/۵٪، تأثیر مقاومت نهایی و سختی مؤثر حدود ۰/۴٪ و ۰/۱۰٪ در مقایسه با نمونه بدون آسیب در داخل صفحه کاهش می‌یابد. در رانش‌های ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۳ به ترتیب، مقاومت نهایی حدود ۰/۲۴٪، ۰/۶۰٪ و ۰/۶۰٪ و سختی مؤثر حدود ۰/۳۵٪، ۰/۵۰٪ و ۰/۷۹٪ است. در مقایسه با نمونه بدون آسیب در داخل صفحه کاهش می‌یابد. تغییر شکل پلاستیک و آسیب نمونه RWO در شکل (۲۱-پ) نشان داده شده است. با افزایش تعداد ترک‌ها در نمونه RWO، کاهش مقاومت افزایش می‌یابد. بنابراین مقاومت نهایی میان قاب مصالح بنایی با رانش قبلی در داخل صفحه ۰/۱٪ در مقایسه با رانش در داخل صفحه ۰/۵٪ حدود ۰/۲۰٪ کاهش می‌یابد. در رانش ۰/۱٪، ترک‌های بیشتری به دلیل جدا شدن ملات از آجرها نیز در قسمت سمت راست بازشو ظاهر شد. در رانش ۰/۱٪ به دلیل جدا شدن ملات از آجر، ترک‌های بیشتری در قسمت راست وسط میان قاب ظاهر شد. در رانش ۰/۲٪ علاوه بر سمت راست، سمت چپ بازشو نیز جدا می‌شود اما قسمت پایین بازشو آسیبی نمی‌بیند. در رانش ۰/۳٪، جدا شدن میان قاب نسبت به بازشو و همچنین خرد شدن گوشه بازشو مشاهده شد.

جدول ۸- نتایج دو خطی نمونه RWO

| نمونه RWO | مقاومت نهایی (kN) | سختی مؤثر (kN/mm) |
|-----------------------|-------------------|-------------------|
| Oop (10g) | ۲۵ | ۲ |
| Ip (%0.5) + Oop (10g) | ۲۴ | ۱/۸ |
| Ip (%1) + Oop (10g) | ۱۹ | ۱/۳ |
| Ip (%2) + Oop (10g) | ۱۰ | ۱ |
| Ip (%3) + Oop (10g) | ۱۰ | ۰/۴۳ |



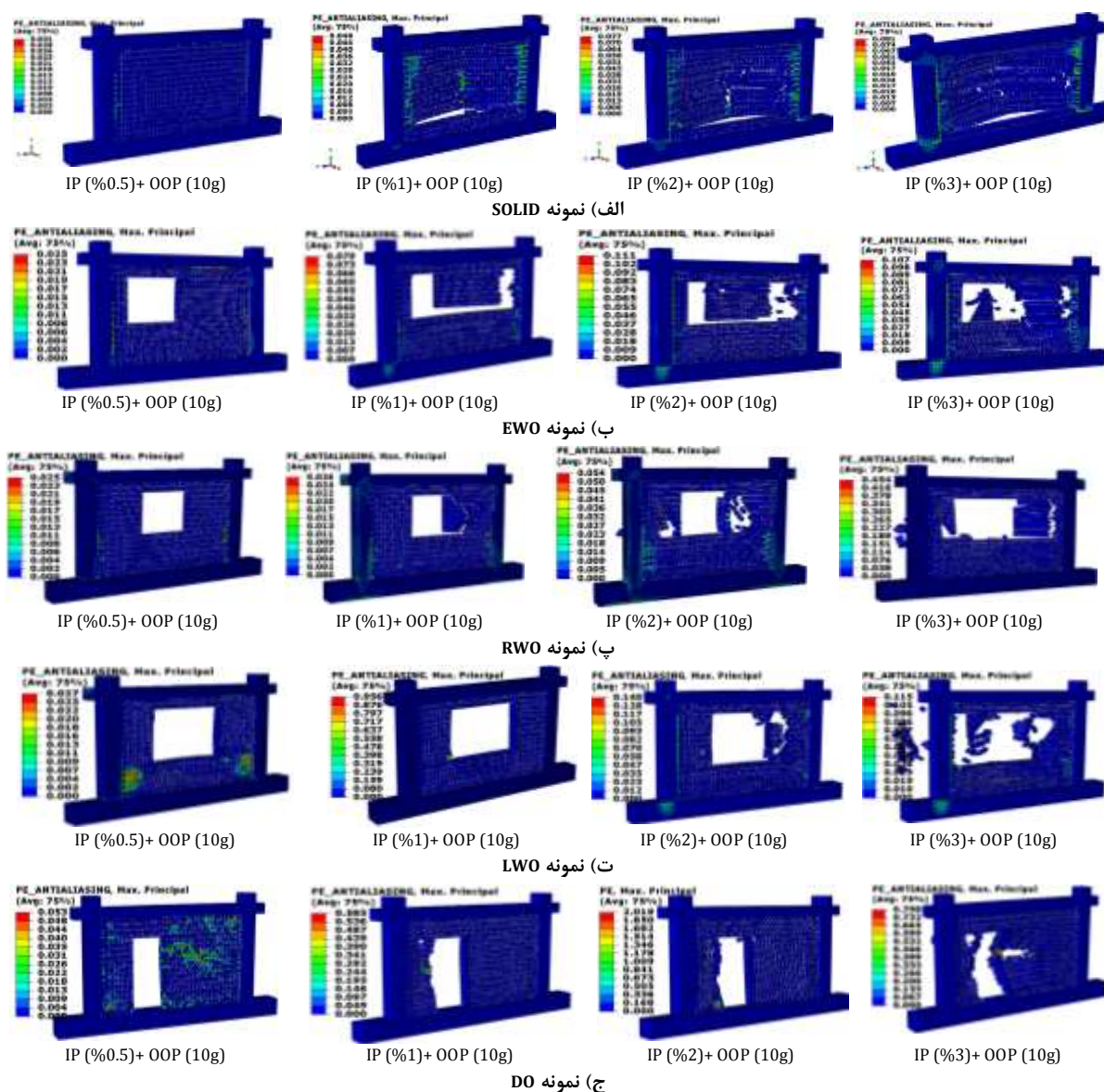
شکل ۱۸- تأثیر آسیب داخل صفحه روی رفتار خارج از صفحه



جدول ۱۰- نتایج دو خطی نمونه DO

| نمونه DO | مقاومت نهایی (kN) | سختی مؤثر (kN/mm) |
|-----------------------|-------------------|-------------------|
| Oop (10g) | ۲۵ | ۰/۶ |
| Ip (%0.5) + Oop (10g) | ۲۵ | ۲ |
| Ip (%1) + Oop (10g) | ۲۲ | ۱/۶۴ |
| Ip (%2) + Oop (10g) | ۱۳ | ۰/۸۶ |
| Ip (%3) + Oop (10g) | ۱۰ | ۰/۴۵ |

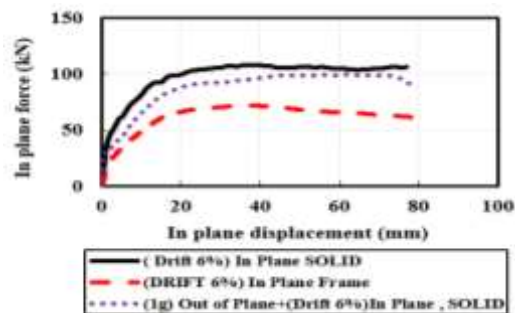
شکل ۲۰- تأثیر آسیب داخل صفحه روی رفتار خارج از صفحه



شکل ۲۱- تغییر شکل پلاستیک و آسیب نمونه‌های تحلیلی

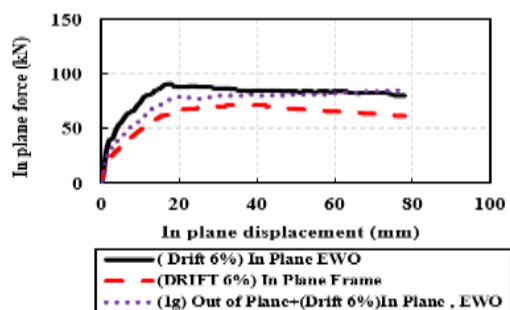
(۲۱-ج) نشان داده شده است، اولین تغییر شکل‌های پلاستیکی در قسمت‌های میان قاب مصالح بنایی در مقادیر کوچکی از رانش رخ می‌دهد. در نتیجه، عمل قوسی فعال می‌شود. در رانش ۱٪، گوشه سمت چپ در فروریخت. در رانش ۲٪ تا ۳٪، علاوه بر

با توجه به این که رانش بیشتر می‌شود، در دریافت‌های ۱٪، ۲٪ و ۳٪ به ترتیب، مقاومت نهایی حدود ۱۲٪، ۴۸٪، ۶۰٪ و سختی مؤثر حدود ۸۳٪، ۹۱٪ و ۹۵٪ است. در مقایسه با نمونه بدون آسیب در صفحه کاهش می‌یابد. همان‌طور که در شکل



شکل ۲۲- تأثیر آسیب خارج از صفحه روی رفتار داخل صفحه

نمونه با بازشو غیرمرکزی (EWO)، مقاومت نهایی و سختی مؤثر و شکل پذیری به ترتیب حدود ۱۸٪، ۲۰٪ و ۱۰٪ در مقایسه با نمونه‌ای که در خارج از صفحه آسیب ندیده است کاهش می‌یابد، در شکل (۲۳) نشان داده شده است. تغییر شکل پلاستیک و آسیب نمونه EWO در شکل (۲۷-الف) نشان داده شده است. با توجه به آسیب‌های خارج از صفحه، برخی ترک‌ها در قسمت پایین میان‌قاب مصالح بنایی ظاهر شد. ترک‌های از پیش موجود، به‌ویژه در قسمت پایینی میان‌قاب گسترده‌تر شدند. ترک‌های مورب در سمت راست بازشو ظاهر شد. مشاهده می‌شود که ترک خوردگی نمونه در گوشه بازشو با تشکیل چند ترک مورب آغاز می‌شود.



شکل ۲۳- تأثیر آسیب خارج از صفحه بر رفتار داخل صفحه

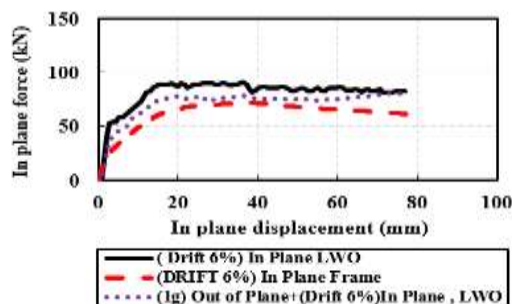
نمونه با بازشو معمولی پنجره مرکزی (RWO)، مقاومت نهایی و سختی مؤثر و شکل‌پذیری به ترتیب حدود ۱۵٪، ۲۰٪ و ۱۱٪ در مقایسه با نمونه‌ای که در خارج از صفحه آسیب ندیده کاهش می‌یابد، در شکل (۲۴) نشان داده شده است. تغییر شکل پلاستیک و آسیب نمونه RWO در شکل (۲۷-ب) نشان داده شده است. با افزایش بیشتر در جابه‌جایی جانبی، تغییر شکل‌های پلاستیکی ابتدا در پایین میان‌قاب بنایی و سپس در پایین سمت چپ ستون متمرکز می‌شوند. ترک‌های پلکانی در گوشه‌های بازشو مشاهده شد.

له‌شدن گوشه سمت چپ بازشو در سمت راست، برخی از بلوک‌های بنایی که قبلاً در داخل صفحه آسیب دیده بودند، جدا شده و سقوط کردند. تجزیه و تحلیل خارج از صفحه بر روی نمونه‌هایی که قبلاً در داخل صفحه آسیب دیده‌اند انجام شده است تا امکان ارزیابی کاهش مقاومت خارج از صفحه مربوطه را فراهم کند. پس از شرح مختصری از نتایج نمونه‌های تحلیلی، اندرکنش داخل صفحه و خارج از صفحه میان‌قاب مصالح بنایی تأثیر بیشتری بر سختی دارد و تأثیر قابل توجهی بر مقاومت سازه ندارد. با این حال، با افزایش جابه‌جایی داخل صفحه، سختی میان‌قاب مصالح بنایی در جهت خارج از صفحه کاهش می‌یابد. این نکته نشان می‌دهد که با افزایش آسیب وارده به داخل صفحه، سختی و مقاومت خارج از صفحه میان‌قاب مصالح بنایی کاهش می‌یابد. تغییرات در سختی بسیار مهم‌تر از تغییرات در مقاومت است. بازشو در بیشترین کاهش سختی مؤثر را در مقایسه با نمونه‌های میان‌قاب مصالح بنایی داشت. به‌طوری که نسبت به نمونه میان‌قاب مصالح بنایی، سختی و مقاومت بیشتر کاهش یافته است.

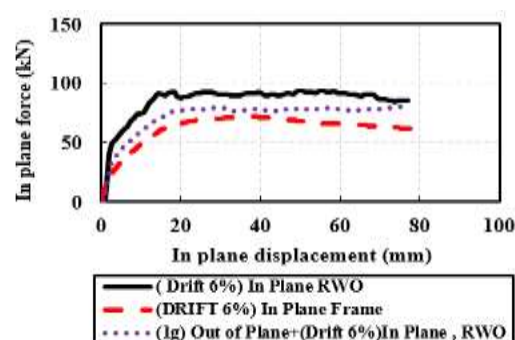
۳-۶- بارگذاری داخل صفحه پس از بارگذاری خارج از صفحه

در این بخش، نمونه‌ها تحت بارگذاری خارج از صفحه و سپس تحت بارگذاری داخل صفحه مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. در طول مرحله خارج از صفحه، مدل تحت فشار یکنواخت خارج از صفحه تا ۱g تحلیل شد. در مرحله داخل صفحه، قاب با سطح رانش ۶٪ اعمال و تحلیل شد. در هر دو مرحله، تیر پایین قاب به‌طور کامل مهار شد تا یک تیر پی صلب را شبیه‌سازی کند. هیچ بار محوری در هر دو مرحله بارگذاری در نظر گرفته نشد. میزان کاهش مقاومت و اثربخشی با ظرفیت بارگذاری داخل صفحه اندازه‌گیری شد. پس از آن، تأثیر آسیب‌های خارج از صفحه بر رفتار داخل صفحه با مقایسه منحنی‌های نیرو- جابه‌جایی بررسی می‌شود. نتایج ایده آل‌سازی دوخطی منحنی‌های نیرو- جابه‌جایی در جدول (۱۱) آورده شده است. میان‌قاب مصالح بنایی در جهت خارج از صفحه آسیب می‌بیند و داخل صفحه افت شدیدی در مقاومت و سختی را تجربه می‌کند.

نمونه قاب میان‌پر مصالح بنایی (Solid)، مقاومت نهایی و سختی مؤثر و شکل‌پذیری نسبت به نمونه‌ای که در خارج از صفحه آسیب ندیده است به ترتیب حدود ۲۵٪، ۲۰٪ و ۲۰٪ کاهش می‌یابد، در شکل (۲۲) نشان داده شده است.

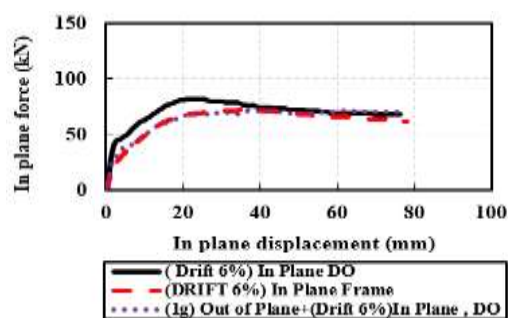


شکل ۲۵- تأثیر آسیب خارج از صفحه بر رفتار داخل صفحه



شکل ۲۴- تأثیر آسیب خارج از صفحه بر رفتار داخل صفحه

نمونه با بازشو درب غیرمرکزی (DO)، مقاومت نهایی و سختی مؤثر و شکل پذیری به ترتیب حدود ۱۲٪، ۲۷٪ و ۲٪ در مقایسه با نمونه‌ای که در خارج از صفحه آسیب ندیده کاهش می‌یابد، در شکل (۲۶) نشان داده شده است. تغییر شکل پلاستیک و آسیب نمونه DO در شکل (۲۷-ت) نشان داده شده است.

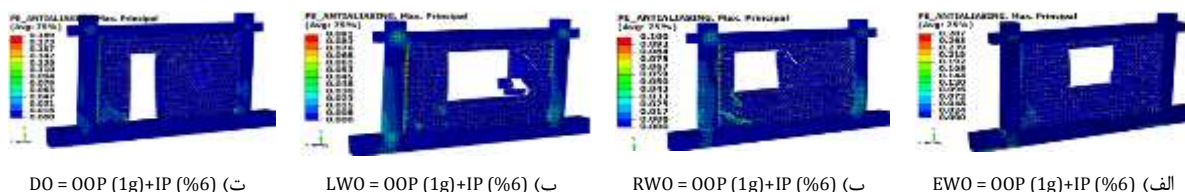


شکل ۲۶- تأثیر آسیب خارج از صفحه بر رفتار داخل صفحه

نمونه با بازشوی بزرگ پنجره مرکز (LWO)، مقاومت نهایی و سختی مؤثر و شکل پذیری به ترتیب حدود ۱۵٪، ۲۳٪ و ۱۱٪ در مقایسه با نمونه‌ای که در خارج از صفحه آسیب ندیده است، کاهش می‌یابد، در شکل (۲۵) نشان داده شده است. تغییر شکل پلاستیک و آسیب نمونه LWO در شکل (۲۷-پ) نشان داده شده است تغییر شکل پلاستیک و آسیب نمونه LWO در شکل (۳۰-پ) نشان داده شده است. ترک‌های کششی مورب یا ترک‌های پلکانی در گوشه‌های بازشو مشاهده شد. ترک و الگوی پلکانی مورب به گوشه‌های بازشو، به‌ویژه در سمت راست میان قاب مصالح بنایی، آسیب‌های فراوانی در میان قاب وارد شده است. شکست چندین بلوک بنایی مشاهده شد و لغزش قابل توجهی از بلوک‌های بنایی در امتداد ترک مورب پس از آزمایش باقی‌ماند. با این وجود، در پایین سمت چپ میان قاب، ترک خوردگی کمتر مشخص بود. با افزایش بیشتر در جابه‌جایی جانبی، تغییر شکل‌های پلاستیکی ابتدا در برخی از انتهای تیرها و سپس در پایین ستون‌ها متمرکز می‌شوند.

جدول ۱۱- نتایج تحلیل دو خطی نمودارهای تحلیلی نیرو- تغییر مکان بارگذاری داخل صفحه با تأثیر آسیب در خارج از صفحه

| نام نمونه | δ_y | δ_U | P_U | مقاومت نهایی (kN) | سختی مؤثر (kN/mm) | شکل پذیری |
|-----------|------------|------------|-------|-------------------|-------------------|-----------|
| FRAME | ۱۶ | ۷۸ | ۶۷ | ۶۷ | ۴/۲۵ | ۴/۶۸ |
| SOLID | ۱۱/۵ | ۷۷ | ۹۵ | ۹۵ | ۶/۵۷ | ۵/۳۴ |
| RWO | ۱۳ | ۷۷ | ۷۷ | ۷۷ | ۵/۵ | ۵/۲۸ |
| LWO | ۱۳ | ۷۶ | ۸۸ | ۷۵ | ۵/۱۷ | ۵/۱۷ |
| EWO | ۱۴ | ۷۷ | ۸۸ | ۷۲ | ۵ | ۵/۰۵ |
| DO | ۱۲/۵ | ۶۰ | ۷۷ | ۶۸ | ۴/۵ | ۴/۷ |



شکل ۲۷- تغییر شکل‌های پلاستیک میان قاب دارای بازشو در بارگذاری داخل صفحه و تأثیر آسیب خارج از صفحه

Sea و Dawe) یک رویکرد ساده شده را براساس کار (NZSEE) (۱۹۸۹) توصیه می‌کند. ضریب کاهش ارائه شده بیانگر این است که اگر بازشو از دو سوم عرض دهانه تجاوز کند، ممکن است فرض شود که میان‌قاب هیچ تأثیری بر عملکرد سیستم ندارد و اثر ارتفاع بازشو را در ضریب کاهش نظر نمی‌گیرد (Giaretton و همکاران، ۲۰۱۱).

Mondal و Jain یک ضریب کاهش را برای عرض مؤثر یک پایه مورب بر روی قاب پر شده RC جامد پیشنهاد کردند تا سختی جانبی اولیه آن را هنگامی که یک بازشوی مرکزی وجود دارد محاسبه کند؛ سهم سختی میان‌قاب باید نادیده گرفته شود که سطح بازشو بیشتر از ۴۰٪ سطح میان‌قاب شود (Mondal و Jain، ۲۰۰۸). با این حال، نسبت سطح بازشو به سطح میان‌قاب (AO/AP) پارامتر اساسی در ضرایب کاهش پیشنهاد شده توسط (Al-Chaar و همکاران، ۲۰۰۳؛ Mondal و Jain، ۲۰۰۸؛ Tasnimi و Mohebkah، ۲۰۱۱؛ Asteris و همکاران، ۲۰۱۱؛ Giaretton و همکاران، ۲۰۱۶)، ضرایب کاهش پیشنهادی هم برای سختی و هم برای مقاومت نهایی ارائه کردند.

Kakaltesis و Karayanis پیشنهاد کردند که براساس تحقیقات و مطالعات دیگر پارامترهای دیگری مانند شکل، مکان و اندازه بازشو نیز در ضرایب کاهش مقاومت و سختی، مؤثر هستند (Karayanis و Kakaltesis، ۲۰۰۷-۲۰۰۸-۲۰۰۹).

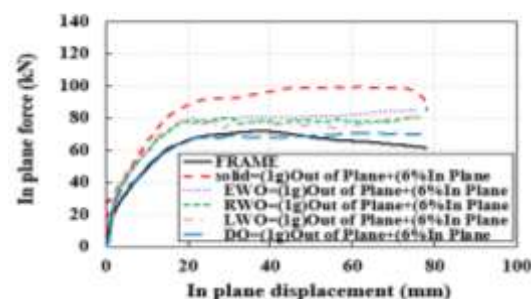
Mansouri ضریب‌های کاهش مقاومت و سختی را به‌طور جداگانه و برای در نظر گرفتن پارامترهای مؤثر مختلف و تأثیر مکان، شکل و اندازه بازشوها بر رفتار داخل صفحه قاب‌های RC دارای میان‌قاب مصالح بنایی مورد بحث قرار داد (Mansouri و همکاران، ۲۰۱۴). رابطه (۴) به‌عنوان ضریب کاهش سختی پیشنهاد شده است:

$$RF_1 = \left(1 - 0.31 \frac{A_0}{A_p}\right) \times \left(2.78 - 1.78 \frac{d_o}{\sqrt{2h_o l_0}}\right) \quad (4)$$

اثر نسبت سطح بازشو به سطح میان‌قاب در فاکتور اول رابطه (۴) در نظر گرفته شده است که با مقایسه نتایج قاب میان‌پر و نمونه‌ها با بازشوهای مرکزی و با انجام تحلیل رگرسیون خطی به دست می‌آید. عامل دوم تأثیر شکل بازشو و نسبت ابعاد آن را در نظر می‌گیرد که با مقایسه نتایج نمونه‌ها با بازشوهای پنجره و درب با مساحت و مکان یکسان اما با نسبت‌های مختلف به دست می‌آید. اثر محل بازشو در رابطه (۴) نادیده گرفته شده است، زیرا تأثیر قابل توجهی بر سختی نداشته است. رابطه (۵) به‌عنوان ضریب کاهش مقاومت نهایی پیشنهاد شده است:

$$RF_1 = \left(1 - 0.31 \frac{A_0}{A_p}\right) \times \left(2.78 - 1.78 \frac{d_o}{\sqrt{2h_o l_0}}\right) \quad (4)$$

ترک‌های از قبل موجود در قسمت پایینی میان‌قاب گسترده‌تر شدند. برخی از ترک‌ها در مرکز میان‌قاب ظاهر شد. شکست یک‌سری بلوک در منطقه در امتداد ستون RC گوشه پایین سمت چپ مشاهده شد. با افزایش تعداد ترک‌ها در نمونه، کاهش مقاومت افزایش می‌یابد. در جابه‌جایی هدف، ترک‌ها در ناحیه تماس بین میان‌قاب و ستون‌ها بیشتر توسعه یافتند. مقایسه تأثیر آسیب خارج از صفحه بر ظرفیت داخل صفحه نمونه‌ها در شکل (۲۸) قابل مشاهده است. میان‌قاب مصالح بنایی با بازشو درب بیشترین کاهش سختی را در بین نمونه‌ها داشته است و سختی آن تقریباً برابر با قاب بتن مسلح (RC) است. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، سختی و مقاومت داخل صفحه را می‌توان با آسیب‌های قبلی خارج از صفحه مرتبط دانست.



شکل ۲۸- مقایسه کلی نمونه‌ها با تأثیر آسیب خارج از صفحه روی رفتار داخل صفحه

۷- ضریب کاهش

روش‌های مختلفی برای پیش‌بینی ضریب کاهش سختی و مقاومت میان‌قاب مصالح بنایی ارائه شده است. Tasnimi و Mohebkah براساس تحلیل رگرسیون نسبت بار جانبی حداکثر H_0/H_1 نسبت سطح میان‌قاب بازشودار به میان‌قاب توپور A_0/A_p ، یک عامل برای ضریب کاهش نمونه‌های بازشودار ارائه کرده‌اند. ضریب همبستگی آنالیز رگرسیون برای نمونه‌های آن‌ها ۰/۹۹ به‌دست آمد. میان‌قاب با $A_0 > 0.4A_p$ مقدار ضریب کاهش را صفر محاسبه کردند. بنابراین، اثر سخت‌کننده و تقویت‌کننده میان‌قاب‌های مصالح بنایی دارای بازشوهای بزرگ نادیده گرفته می‌شود (Tasnimi و Mohebkah، ۲۰۱۱).

Al-Chaar و همکاران (۲۰۰۳) یک‌سری آزمایش برای تأثیر بازشوهای درب و پنجره بر مقاومت جانبی و سختی در بازشوهای A_0 بیشتر یا مساوی ۶۰٪ از سطح میان‌قاب مصالح بنایی A_p ارائه می‌شود، در این صورت باید اثر میان‌قاب را نادیده گرفت. Mohebkah ضریب کاهش سختی میان‌قاب را ارائه کرد، برای درصد بازشو بیشتر از ۵۰٪، ضریب سختی حدوداً صفر شد (Asteris و همکاران، ۲۰۱۱). انجمن نیوزلند برای مهندسی زلزله

است:

$$RF_M = \left(1 + 0.136 \frac{A_0}{A_p}\right) \times \left(0.94 - 0.162 \frac{d_0}{\sqrt{2h_0 l_0}}\right) \times \left(1 - 0.044 \frac{X}{L}\right) \quad (8)$$

فرمول (۹) برای تخمین مقاومت نهایی میان قاب با بازشو (V_0) با استفاده از قاب میان پر مصالح بنایی مربوطه (V_s) و یک ضریب کاهش مقاومت نهایی RF_M پیشنهاد شده است.

$$V_0 = RF_M \times V_s \quad (9)$$

همان طور که در جدول (۱۳) ارائه شده است، مقایسه تقریبی با نتایج اندازه گیری شده نمونه های با میان قاب دارای بازشو، همبستگی خوبی بین آن ها با حداکثر خطای یک درصد نشان می دهد.

۷-۲- مقایسه ضرایب کاهش با کارهای محققین گذشته

هدف اصلی این مقاله تعیین صحت روابط پیشنهادی است. معادلات اصلاح شده پیشنهادی توسط سایر آزمون های تجربی موجود در ادبیات مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور، مقادیر مقاومت و سختی نمونه ها توسط (Kakaltesis و Karayanis، ۲۰۰۷-۲۰۰۸-۲۰۰۹؛ Tasnimi و Mohebkhah، ۲۰۱۱؛ Mansouri و همکاران، ۲۰۱۴) آزمایش شدند. با روابط اصلاح شده پیشنهادی مقایسه شده است. مشخصات نمونه های آزمایش شده توسط این محققین و نتایج آزمایشات آن ها در جدول (۱۴) ارائه شده است. مقایسه بین مقادیر برآورد شده توسط فرمول های اصلاح شده و مقادیر به دست آمده از آزمایش ها در جدول (۱۴) ارائه شده است RF_1 و RF_2 ضرایب کاهش سختی و مقاومت هستند که توسط Mansouri و همکاران تخمین زده شده است. در این مقاله، ضرایب اصلاح شده کاهش سختی و کاهش مقاومت پیشنهادی به ترتیب با RF_M و RF_S نشان داده شده اند. مقایسه بین مقادیر برآورد شده و مقادیر به دست آمده از آزمایشات در جدول (۱۵) ارائه شده است. درصد اختلاف این ضرایب کاهش نیز محاسبه شد. همان طور که مشاهده می شود میانگین اختلاف کاهش سختی نمونه ها حدود ۳۰ درصد است. با در نظر گرفتن اندرکنش خارج از صفحه و داخل صفحه، کاهش سختی در همه نمونه ها مشاهده شد. همان طور که نشان داده شده است، نوع بازشو (پنجره، درب) نیز تأثیر کمی بر روند تغییرات در ضریب کاهش سختی دارد. در اندرکنش خارج از صفحه و داخل صفحه، در برخی از نمونه ها به جای کاهش باعث افزایش قابل توجه مقاومت می شود. افزایش مقاومت حدود ۴۶٪ است. که متعلق به نمونه Kakaltesis D04 و Karayanis است.

اثر نسبت سطح بازشو به سطح میان قاب در فاکتور اول رابطه (۴) در نظر گرفته شده است که با مقایسه نتایج قاب میان پر و نمونه ها با بازشوهای مرکزی و با انجام تحلیل رگرسیون خطی به دست می آید. عامل دوم، تأثیر شکل بازشو و نسبت ابعاد آن را در نظر می گیرد که با مقایسه نتایج نمونه ها با بازشوهای پنجره و درب با مساحت و مکان یکسان اما با نسبت های مختلف به دست می آید. اثر محل بازشو در رابطه (۴) نادیده گرفته شده است، زیرا تأثیر قابل توجهی بر سختی نداشته است. رابطه (۵) به عنوان ضریب کاهش مقاومت نهایی پیشنهاد شده است:

$$RF_2 = \left(1 - 1.1 \frac{A_0}{A_p}\right) \times \left(1.6 - 0.6 \frac{d_0}{\sqrt{2h_0 l_0}}\right) \times \left(1 - 0.3 \frac{X}{L}\right) \quad (5)$$

مشابه رابطه (۴)، فاکتورهای اول و دوم رابطه (۵) به ترتیب مربوط به نسبت سطح بازشو به سطح میان قاب و شکل بازشو و نسبت ابعاد هستند. فاکتور سوم X/L رابطه (۵) هستند که به ترتیب X فاصله افقی مرکز بازشو و L طول میان قاب است.

۷-۱- ضرایب کاهش با در نظر گرفتن اندرکنش

در این مقاله سعی شده است معادلات ضریب کاهش سختی و مقاومت توسط Mansouri و همکاران اصلاح شود. تأثیر عامل اندرکنش خارج از صفحه بر روی رفتار داخل صفحه میان قاب مصالح بنایی با بازشوهای مختلف در نظر گرفته شده است. معادلات ارائه شده با استفاده از روش حداقل مربعات جزئی (PLS) در زبان برنامه نویسی آماری R برآورد شده است (Hastie و همکاران، ۲۰۰۹). هنگامی که متغیرها با یکدیگر همبستگی دارند، تحلیل رگرسیون ساده کار نمی کند. روش (PLS) می تواند اثرات متغیرها را با دقت بالایی تخمین بزند. در روش (PLS)، بردارهای همبسته با استفاده از الگوریتم متعامدسازی گرام اشمیت به اجزای متعامد برازش داده شده اند. رابطه (۶) به عنوان ضریب کاهش سختی پیشنهاد شده است:

$$RF_S = \left(1 + 0.347 \frac{A_0}{A_p}\right) \times \left(0.75 - 0.21 \frac{d_0}{\sqrt{2h_0 l_0}}\right) \quad (6)$$

فرمول (۷) برای تخمین سختی قاب با میان قاب با بازشو K_0 با استفاده از قاب میان پر مصالح بنایی مربوطه K_S و ضریب کاهش سختی RF_S پیشنهاد شده است:

$$K_0 = RF_S \times K_S \quad (7)$$

همان طور که در جدول (۱۲) ارائه شده است، مقایسه تقریبی با نتایج اندازه گیری شده نمونه های میان قاب دارای بازشو، همبستگی خوبی بین آن ها با حداکثر خطای یک درصد نشان می دهد. فرمول (۸) به عنوان ضریب مقاومت نهایی پیشنهاد شده

ممکن است دلیل آن عملکرد قوسی قاب و میان قاب مصالح بنایی مطالعات تحلیلی بیشتر در مورد آن ضروری است. در نمونه‌های بازشودار این یک موضوع باز است که مطمئناً

جدول ۱۲- مقایسه مقادیر سختی مؤثر نمونه‌های بازشودار تحلیلی و تخمینی

| $\frac{RF_{S1}}{RF_S} \%$ | RF_S | $RF_{S1} = \frac{K_{Opening}}{K_{SOLID}}$ | $K_{Opening}$ | K_{solid} | $\frac{d_o}{\sqrt{2h_o l_o}}$ | $\frac{A_o}{A_p}$ | بازشو | نمونه |
|---------------------------|--------|---|---------------|-------------|-------------------------------|-------------------|-------|-------|
| ۱/۰۴ | ۰/۵۳۵ | ۰/۵۱ | ۵ | ۸/۷۸ | ۱/۱۶ | ۰/۱۶۵ | درب | DO |
| ۱/۱ | ۰/۵۶۸ | ۰/۶۳ | ۶/۵۷ | ۸/۷۸ | ۱/۰۱ | ۰/۱۶۵ | پنجره | RWO |
| ۱/۳ | ۰/۵۸۷ | ۰/۷۶ | ۵/۵ | ۸/۷۸ | ۱/۰۲ | ۰/۲۷۵ | پنجره | LWO |
| ۰/۷۴ | ۰/۵۶۸ | ۰/۵۷ | ۵/۱۷ | ۸/۷۸ | ۱/۰۱ | ۰/۱۶۵ | پنجره | EWO |

جدول ۱۳- مقایسه مقادیر مقاومت نهایی نمونه‌های بازشودار تحلیلی و تخمینی

| $\frac{RF_{V1}}{RF_V} \%$ | RF_V | $RF_{V1} = \frac{V_{Opening}}{V_{SOLID}}$ | V_o | V_{solid} | $\frac{X}{L}$ | $\frac{d_o}{\sqrt{2h_o l_o}}$ | $\frac{A_o}{A_p}$ | بازشو | نمونه |
|---------------------------|--------|---|-------|-------------|---------------|-------------------------------|-------------------|-------|-------|
| ۱/۰۴ | ۰/۷۶ | ۰/۶۷ | ۰/۵۱ | ۱۰۱ | ۰/۲ | ۱/۱۶ | ۰/۱۶۵ | درب | DO |
| ۱/۱ | ۰/۷۹ | ۰/۷۶ | ۰/۶۳ | ۱۰۱ | ۰/۰ | ۱/۰۱ | ۰/۱۶۵ | پنجره | RWO |
| ۱/۳ | ۰/۸ | ۰/۷۴ | ۰/۷۶ | ۱۰۱ | ۰/۰ | ۱/۰۲ | ۰/۲۷۵ | پنجره | LWO |
| ۰/۷۴ | ۰/۷۸ | ۰/۷۱ | ۰/۵۷ | ۱۰۱ | ۰/۲ | ۱/۰۱ | ۰/۱۶۵ | پنجره | EWO |

جدول ۱۴- نتایج و مشخصات کلی کارهای آزمایشگاهی محققین (Mansouri و همکاران، ۲۰۱۴)

| $K(kN/mm)$ | $V(kN)$ | $\frac{X}{L}$ | (mm) l_o | (mm) h_o | (mm) l_{inf} | (mm) h_{inf} | بازشو | نمونه | محققین |
|------------|---------|---------------|------------|------------|----------------|----------------|----------|-------|--|
| ۲۰/۷ | ۸۱/۵ | --- | --- | --- | ۱۲۰۰ | ۸۰۰ | میان قاب | S | Kakaltesis و Karayanis، ۲۰۰۷-۲۰۰۸-۲۰۰۹ |
| ۱۴/۶ | ۶۶/۶ | ۰ | ۳۰۰ | ۳۳۳ | ۱۲۰۰ | ۸۰۰ | پنجره | W02 | |
| ۱۴/۶ | ۶۶/۴ | ۰ | ۴۵۶ | ۳۳۳ | ۱۲۰۰ | ۸۰۰ | پنجره | W03 | |
| ۱۶/۶ | ۶۵/۱ | ۰ | ۶۰۰ | ۳۳۳ | ۱۲۰۰ | ۸۰۰ | پنجره | W04 | |
| ۱۳/۱ | ۶۱/۶ | ۰ | ۳۰۰ | ۶۴۰ | ۱۲۰۰ | ۸۰۰ | درب | D02 | |
| ۱۵ | ۵۷/۱ | ۰ | ۴۵۶ | ۶۴۰ | ۱۲۰۰ | ۸۰۰ | درب | D03 | |
| ۱۵ | ۵۵/۳ | ۰ | ۶۰۰ | ۶۴۰ | ۱۲۰۰ | ۸۰۰ | درب | D04 | |
| ۱۷/۹ | ۶۷/۲ | ۰/۳۳ | ۳۰۰ | ۳۳۳ | ۱۲۰۰ | ۸۰۰ | پنجره | WX1 | |
| ۱۵/۲ | ۶۳ | ۰/۱۷ | ۳۰۰ | ۳۳۳ | ۱۲۰۰ | ۸۰۰ | پنجره | WX2 | |
| ۱۳/۵ | ۴۹ | ۰/۳۳ | ۳۰۰ | ۶۴۰ | ۱۲۰۰ | ۸۰۰ | درب | DX1 | |
| ۱۲/۷ | ۶۱ | ۰/۱۷ | ۳۰۰ | ۶۴۰ | ۱۲۰۰ | ۸۰۰ | درب | DX2 | |
| ۲۱/۹ | ۷۲/۹ | --- | --- | --- | ۱۲۰۰ | ۸۰۰ | میان قاب | IS | |
| ۲۰/۹ | ۶۸/۱ | ۰ | ۳۰۰ | ۳۳۳ | ۱۲۰۰ | ۸۰۰ | پنجره | IWO2 | |
| ۱۴/۵ | ۵۹/۱ | ۰ | ۳۰۰ | ۶۴۰ | ۱۲۰۰ | ۸۰۰ | درب | IDO2 | |
| ۲۰/۸ | ۲۰/۱۵ | --- | --- | --- | ۲۲۶۰ | ۱۸۰۰ | میان قاب | SW | Tasimi و Mohebkah، ۲۰۱۱ |
| ۲۲/۲ | ۱۷۶/۱ | ۰ | ۵۰۰ | ۵۰۰ | ۲۲۶۰ | ۱۸۰۰ | پنجره | PW1 | |
| ۲۱/۹ | ۱۵۱/۹ | ۰ | ۷۰۰ | ۸۰۰ | ۲۲۶۰ | ۱۸۰۰ | پنجره | PW2 | |
| ۱۹/۲ | ۱۳۷ | ۰ | ۱۲۰۰ | ۶۰۰ | ۲۲۶۰ | ۱۸۰۰ | پنجره | PW3 | |
| ۱۷/۴ | ۱۱۶/۵ | ۰ | ۷۰۰ | ۱۴۵۰ | ۲۲۶۰ | ۱۸۰۰ | درب | PW4 | |
| ۷/۶ | ۱۱۵/۴ | --- | --- | --- | ۱۳۰۰ | ۲۱۰۰ | میان قاب | SOLID | Mansouri و همکاران، ۲۰۱۴ |
| ۴/۹ | ۷۷/۲ | ۰/۲ | ۴۵۰ | ۱۰۰۰ | ۱۳۰۰ | ۲۱۰۰ | درب | DO | |
| ۶/۹ | ۹۱/۲ | ۰ | ۷۵۰ | ۶۰۰ | ۱۳۰۰ | ۲۱۰۰ | پنجره | RWO | |
| ۵/۵ | ۸۳/۶ | ۰ | ۱۰۰۰ | ۷۵۰ | ۱۳۰۰ | ۲۱۰۰ | پنجره | LWO | |
| ۶/۳ | ۸۴/۵ | ۰/۲ | ۷۵۰ | ۶۰۰ | ۱۳۰۰ | ۲۱۰۰ | پنجره | EWO | |

جدول ۱۵- مقایسه سختی و مقاومت با در نظر گرفتن اندرکنش داخل صفحه و خارج از صفحه

| محققین | نمونه | $\frac{A_o}{A_p}$ | $\frac{d_o}{\sqrt{2h_o l_o}}$ | $\frac{X}{L}$ | RF_1 | RF_2 | RF_5 | RF_v | $\frac{RF_s - RF_1}{RF_1}$ | $\frac{RF_v - RF_2}{RF_2}$ |
|--|-------|-------------------|-------------------------------|---------------|--------|--------|--------|--------|----------------------------|----------------------------|
| Kakaltesis و Karayanis ۲۰۰۹-۲۰۰۸-۲۰۰۷ | WO2 | ۰/۱۰۴ | ۱ | ۰ | ۰/۹۶ | ۰/۸۸۶ | ۰/۵۵۹ | ۰/۷۸ | ٪-۴۲ | ٪-۱۰ |
| | WO3 | ۰/۱۵۸ | ۱/۰۲ | ۰ | ۰/۹۱ | ۰/۸۱۶ | ۰/۵۶۵ | ۰/۷۹ | ٪-۳۸ | ٪-۳ |
| | WO4 | ۰/۲۰۸ | ۱/۰۹ | ۰ | ۰/۷۸ | ۰/۷۳۰ | ۰/۵۵۹ | ۰/۷۸ | ٪-۲۸ | ۷٪ |
| | DO2 | ۰/۲۰۰ | ۱/۱۴ | ۰ | ۰/۷۰ | ۰/۷۱۴ | ۰/۵۴۶ | ۰/۷۷ | ٪-۲۲ | ۹٪ |
| | DO3 | ۰/۳۰۴ | ۱/۰۳ | ۰ | ۰/۸۵ | ۰/۶۵ | ۰/۵۸ | ۰/۸۰ | ٪-۳۱ | ۲۳٪ |
| | DO4 | ۰/۴۰۰ | ۱ | ۰ | ۰/۸۷ | ۰/۵۶ | ۰/۶۱ | ۰/۸۲ | ٪-۳۰ | ۴۶٪ |
| | WX1 | ۰/۱۰۴ | ۱ | ۰/۳۳ | ۰/۹۶ | ۰/۷۹ | ۰/۵۵ | ۰/۷۷ | ٪-۴۲ | ٪-۲ |
| | WX2 | ۰/۱۰۴ | ۱ | ۰/۱۷ | ۰/۹۶ | ۰/۸۴ | ۰/۵۵ | ۰/۷۸ | ٪-۴۲ | ٪-۶ |
| | DX1 | ۰/۲۰۰ | ۱/۱۴ | ۰/۳۳ | ۰/۷۰ | ۰/۶۴ | ۰/۵۴ | ۰/۷۶ | ٪-۲۲ | ۱۸٪ |
| | DX2 | ۰/۲۰۰ | ۱/۱۴ | ۰/۱۷ | ۰/۷۰ | ۰/۶۷ | ۰/۵۴ | ۰/۷۷ | ٪-۲۲ | ۱۳٪ |
| | IWO2 | ۰/۱۰۴ | ۱ | ۰ | ۰/۹۶ | ۰/۸۸ | ۰/۵۵ | ۰/۷۸ | ٪-۴۲ | ٪-۱۰ |
| | IDO2 | ۰/۲۰۰ | ۱/۱۴ | ۰ | ۰/۷۰ | ۰/۷۱ | ۰/۵۴ | ۰/۷۷ | ٪-۲۲ | ۸٪ |
| Tasimi و Mohebbkhal ۲۰۱۱ | PW1 | ۰/۰۶۱ | ۱ | ۰ | ۰/۹۸ | ۰/۹۳ | ۰/۵۵ | ۰/۷۸ | ٪-۴۳ | ٪-۱۵ |
| | PW2 | ۰/۱۳۸ | ۱ | ۰ | ۰/۹۵ | ۰/۸۴ | ۰/۵۶ | ۰/۷۹ | ٪-۴۰ | ٪-۶ |
| | PW3 | ۰/۱۷۷ | ۱/۱۲ | ۰ | ۰/۷۴ | ۰/۷۴ | ۰/۵۴ | ۰/۷۷ | ٪-۲۶ | ۴٪ |
| | PW4 | ۱/۲۵۰ | ۱/۱۳ | ۰ | ۰/۷۰ | ۰/۶۶ | ۰/۵۵ | ۰/۷۸ | ٪-۲۱ | ۱۷٪ |
| Mansouri و همکاران ۲۰۱۴ | DO | ۰/۱۶۵ | ۱/۱۶ | ۰/۲ | ۰/۶۷ | ۰/۶۹ | ۰/۵۳ | ۰/۷۶ | ٪-۲۱ | ۹٪ |
| | RWO | ۰/۱۶۵ | ۱/۰۱ | ۰ | ۰/۹۳ | ۰/۸۱ | ۰/۵۶ | ۰/۷۹ | ٪-۳۸ | ٪-۲ |
| | LWO | ۰/۲۷۵ | ۱/۰۲ | ۰ | ۰/۸۸ | ۰/۶۸ | ۰/۵۸ | ۰/۸۰ | ٪-۳۳ | ۱۶٪ |
| | EWO | ۰/۱۶۵ | ۱/۰۱ | ۰/۲ | ۰/۹۳ | ۰/۷۶ | ۰/۵۶ | ۰/۷۸ | ٪-۳۹ | ۳٪ |
| میانگین | | | | | | | | | | |
| ٪-۳۰ | | | | | | | | | | |

۸- نتیجه گیری

در این مقاله با استفاده از نرم افزار اجزای محدود آباکوس، نمونه‌ها با میان قاب دارای بازشو و بدون بازشو با ابعاد مختلف درب و پنجره مدل سازی شده است. نتایج بررسی‌های ارائه شده در این مقاله را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

۱- قاب با میان قاب مصالح بنایی با بارگذاری داخل صفحه با آسیب قبلی خارج از صفحه، کمترین افت مقاومت و سختی مؤثر را در مقایسه با نمونه‌های دارای بازشو دارد.

۲- در بارگذاری خارج از صفحه میان قاب‌های مصالح بنایی با بازشو (پنجره و درب)، بازشوهایی با ابعاد بزرگتر یا دورتر از مرکز میان قاب منجر به کاهش بیشتر مقاومت و سختی مؤثر میان قاب‌های مصالح بنایی می‌شود.

۳- در بارگذاری خارج از صفحه با آسیب قبلی در داخل صفحه، افت سختی مؤثر نمونه‌های دارای بازشو حدود ۹۰٪ بود و نمونه با بازشو درب بیشترین سختی مؤثر را داشت که سختی مؤثر آن برابر با سختی مؤثر قاب بتن مسلح (RC) است.

۴- تغییرات سختی مؤثر در مقایسه با تغییرات مقاومت بسیار قابل توجه است. فعل و انفعالات داخل صفحه (IP) و خارج از صفحه (OoP) تأثیر بیشتری بر سختی مؤثر دارند.

۵- ضریب کاهش سختی مؤثر نمونه‌های دارای بازشو تحت

بارگذاری داخل صفحه با آسیب قبلی خارج از صفحه نسبت به نمونه‌هایی که فقط بارگذاری داخل صفحه دارند به طور متوسط ۳۰٪ کاهش یافته است.

۶- ضریب کاهش مقاومت نمونه‌های دارای بازشو تحت بارگذاری داخل صفحه با آسیب قبلی خارج از صفحه، در برخی از نمونه‌ها به جای کاهش مقاومت در اندرکنش داخل صفحه و خارج از صفحه، باعث افزایش مقاومت نسبت به نمونه‌هایی که فقط بارگذاری داخل صفحه دارد. اعتقاد بر این است که این ممکن است به دلیل ماهیت عملکرد قوسی در اندرکنش بین میان قاب مصالح بنایی و قاب اطراف در نمونه‌های دارای بازشو است. این یک موضوع باز است که مطمئناً مطالعات تحلیلی بیشتر در مورد آن ضروری است.

۹- مراجع

- ACI Committee, "Building code requirements for structural concrete (ACI 318-08) and commentary", American Concrete Institute.
- Akhoundi F, Vasconcelos G, Lourenço P, "Experimental out-of-plane behavior of brick masonry infilled frames", International Journal of Architectural Heritage, 2020, Feb., 7, 14 (2), 221-37.
<https://doi.org/10.1080/15583058.2018.1529207>
- Akhoundi F, Lourenço PB, Vasconcelos G, "Numerically based proposals for the stiffness and

- the openings in the out-of-plane behaviour of masonry infill walls", *Engineering Structures*, 2021, Oct., 1, 244, 112793.
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112793>
- Giaretton M, Dizhur D, da Porto F, Ingham JM, "Seismic assessment and improvement of unreinforced stone masonry buildings: literature review and application to New Zealand", *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 2016, Jun., 30, 49 (2), 148-174.
<https://doi.org/10.5459/bnzsee.49.2.148-174>
- Griffith MC, Vaculik J, "Out-of-plane flexural strength of unreinforced clay brick masonry walls", *TMS Journal*, 2007, Sep., 25 (1), 53-68.
- Hak S, Morandi P, Magenes G, "Out-of-plane experimental response of strong masonry infills", *In2nd European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, 2014, Aug., 25, 1.
- Hastie T, Tibshirani R, Friedman JH, Friedman JH, "The elements of statistical learning: data mining, inference, and prediction", New York: Springer; 2009, Aug.
- Kakaletsis D, Karayannis C, "Experimental investigation of infilled R/C frames with eccentric openings", *Structural Engineering and Mechanics*, 2007, Jan., 1, 26 (3), 231-50.
- Kakaletsis D, Karayannis C, "Influence of masonry strength and openings on infilled R/C frames under cycling loading", *Journal of Earthquake Engineering*, 2008, Feb., 13, 12 (2), 197-221.
<https://doi.org/10.1080/13632460701299138>
- Kurmi PL, Haldar P, "Modeling of opening for realistic assessment of infilled RC frame buildings", *InStructures*, 2022, Jul., 1, 41, 1700-1709.
<https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.05.110>
- Laurencio PB, Rots JG, Blaauwendraad J, "Two approaches for the analysis of masonry structures: micro and macro-modeling", *HERON*, 1995, 40 (4).
- Mansouri A, Marefat MS, Khanmohammadi M, "Experimental evaluation of seismic performance of low-shear strength masonry infills with openings in reinforced concrete frames with deficient seismic details", *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 2014, Oct., 25, 23 (15), 1190-210.
<https://doi.org/10.1002/tal.1115>
- Mays GC, Hetherington JG, Rose TA, "Resistance-deflection functions for concrete wall panels with openings", *Journal of Structural Engineering*, 1998, May, 124 (5), 579-87.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)07339445\(1998\)124:5\(579\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)07339445(1998)124:5(579))
- McDowell EL, McKee K, Sevin E, "Arching action theory of masonry walls", *Journal of the Structural Division*, 1956, Mar., 82 (2), 915-1.
<https://doi.org/10.1061/JSDEAG.000001>
- Mondal G, Jain SK, "Lateral stiffness of masonry infilled reinforced concrete (RC) frames with central opening", *Earthquake spectra*, 2008, Aug., 24 (3), 701-23.
<https://doi.org/10.1193/1.2942376>
- Mosalam KM, White RN, Gergely P, "Static response of infilled frames using quasi-static experimentation", *Journal of Structural Engineering*, 1997, Nov., 123 (11), 1462-4169.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)07339445\(1997\)123:11\(1462\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)07339445(1997)123:11(1462))
- strength of masonry infills with openings in reinforced concrete frames", *Earthquake Engineering Structural Dynamics*, 2016, 45 (6), 869-891.
<https://doi.org/10.1002/eqe.2688>
- Akhoundi F, Vasconcelos G, Lourenço PB, Silva L, "Out-of-plane response of masonry infilled RC frames: Effect of workmanship and opening", 2016.
- Anić F, Penava D, Abrahamczyk L, Sarhosis V, "A review of experimental and analytical studies on the out-of-plane behaviour of masonry infilled frames. *Bulletin of Earthquake Engineering*", 2020, Mar., 18 (5), 2191-246.
<https://doi.org/10.1007/s10518-019-00771-5>
- Aref AJ, Dolatshahi KM, "A three-dimensional cyclic meso-scale numerical procedure for simulation of unreinforced masonry structures", *Computers and Structures*, 2013, 120, 9-23.
<https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2013.01.012>
- Asteris PG, Cavaleri L, Di Trapani F, Tsaris AK, "Numerical modelling of out-of-plane response of infilled frames: State of the art and future challenges for the equivalent strut macromodels", *Engineering Structures*, 2017, Feb., 1, 132, 110-22.
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.10.012>
- Asteris PG, "Lateral stiffness of brick masonry infilled plane frames", *Journal of Structural Engineering*, 2003, Aug., 129 (8), 1071-9.
[http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2003\)129:8\(1071\)](http://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2003)129:8(1071))
- Asteris PG, Chrysostomou CZ, Giannopoulos IP, Smyrou E, "Masonry infilled reinforced concrete frames with openings", *InIII ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering*, 2011, May., 25, 28.
- Budiwati IA, Sukrawa M, "Development of diagonal strut width formula for infill wall with reinforced opening in modeling seismic behavior of RC infilled frame structures", *InAIP Conference Proceedings*, 2018, Jun 26, 1977, 1, 020062, AIP PublishingLLC.
<https://doi.org/10.1063/1.5042918>
- Di Domenico M, De Risi MT, Ricci P, Verderame GM, Manfredi G, "Empirical prediction of the in-plane/out-of-plane interaction effects in clay brick unreinforced masonry infill walls", *Engineering Structures*, 2021, Jan., 15, 227, 111438.
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111438>
- Dolatshahi KM, Aref AJ, Yekrangnia M, "Bidirectional behavior of unreinforced masonry walls", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2014, Dec., 43 (15), 2377-2397.
<https://doi.org/10.1002/eqe.2455>
- Furtado A, Rodrigues H, Arêde A, Varum H, "Experimental characterization of the in-plane and out-of-plane behaviour of infill masonry walls", *Procedia Engineering*, 2015 Jan., 1, 114, 862-869.
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.041>
- Furtado A, Rodrigues H, Arêde A, Varum H, "Out-of-plane behavior of masonry infilled RC frames based on the experimental tests available: A systematic review", *Construction and Building Materials*, 2018, Apr., 20, 168, 831-848.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.129>
- Furtado A, Arêde A, Rodrigues H, Varum H, "The role of

- 123:11(1462)
- Nie Y, Sheikh A, Griffith M, Visintin P, "A damage-plasticity based interface model for simulating in-plane/out-of-plane response of masonry structural panels", *Computers and Structures*, 2022, Feb., 1, 260, 106721.
<https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2021.106721>
- Ozturkoglu O, Ucar T, Yesilce Y, "Effect of masonry infill walls with openings on nonlinear response of reinforced concrete frames", *Earthquakes and Structures*, 2017, Mar., 1, 12 (3), 333-47.
<https://doi.org/10.12989/eas.2017.12.3.333>
- Pantò B, Calì I, Lourenço PB, "A 3D discrete macro-element for modelling the out-of-plane behaviour of infilled frame structures", *Engineering Structures*, 2018, Nov., 15, 175, 371-85.
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.08.022>
- Preti M, Migliorati L, Giuriani E, "Experimental testing of engineered masonry infill walls for post-earthquake structural damage control", *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2015, Jul., 13 (7), 2029-49.
<https://doi.org/10.1007/s10518-014-9701-2>
- Sepasdar R, "Experimental investigation on the out-of-plane behaviour of concrete masonry infilled rc frames", 2017.
- Shafaei J, Hosseini A, Marefat MS, "Seismic retrofit of external RC beam-column joints by joint enlargement using prestressed steel angles", *Engineering Structures*, 2014, Dec., 15, 81, 265-88.
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.10.006>
- Tasnimi AA, Mohebkhah A, "Investigation on the behavior of brick-infilled steel frames with openings, experimental and analytical approaches", *Engineering Structures*, 2011, Mar., 1, 33 (3), 968-80.
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2010.12.018>
- Verderame GM, Ricci P, De Risi MT, Del Gaudio C, "Experimental assessment and numerical modelling of conforming and non-conforming RC frames with and without infills", *Journal of Earthquake Engineering*, 2022, Jan., 25, 26 (2), 573-614.
<https://doi.org/10.1080/13632469.2019.1692098>
- Verlato N, Guidi G, Da Porto F, Modena C, "Innovative systems for masonry infill walls based on the use of deformable joints: combined in-plane/out-of-plane tests", In *Proceedings of the 16th international brick and block masonry conference*, 2016, Jun., 26-30. Boca Raton, FL, USA: CRC Press.
- Wang C, "Experimental investigation on the out-of-plane behaviour of concrete masonry infilled frames", 2017.
- Zhai C, Kong J, Wang X, Chen Z, "Experimental and finite element analytical investigation of seismic behavior of full-scale masonry infilled RC frames", *Journal of Earthquake Engineering*, 2016, Oct., 2, 20 (7), 1171-98.
<https://doi.org/10.1080/13632469.2016.1138171>

EXTENDED ABSTRACT

Investigating the Seismic Performance of Masonry Infills with Opening and Non-Opening by Considering the Interaction of Behavior in Plane and Out of the Plane and Providing the Reduction Factor of Effective Stiffness and Ultimate Strength

Delaram Ostad, Jalil Shafaei*

Faculty of Civil Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

Received: 31 October 2022; Review: 15 April 2023; Accepted: 16 April 2023

Keywords:

Masonry infill, Opening, Out of plane loading, In plane loading, Finite element method.

1. Introduction

Masonry infills are an unavoidable member of any building. The presence of openings in a masonry infill alters its behaviour and reduces the load strength and stiffness of the infilled frame. Considering the reality of the masonry infill, the capacity of masonry infill is defined in two separate modes of in-plane (IP) force and out-plane (OOP) force (Asteris et al., 2017). In this paper, the main goal is to investigate masonry infills with different window and door openings with different dimensions and locations under three types of loading, which are: 1-Out-of-plane Loading of masonry infill under different accelerations. 2-Out-of-plane loading after in-plane loading at relative displacements (drift) of 0.5%, 1%, 2%, and 3% and check for Out-of-plane damage. 3-In-plane loading up to 6% relative displacement (drift) after out-of-plane loading and checking for in-plane damage. The numerical models are generated in finite element ABAQUS soft. Nonlinear pushover analyses have been conducted for each of the three loading. At the end, reduction factors of effective stiffness and ultimate strength are suggested. By using these suggested reduction factors, the design engineer can model the interaction effects in-plane and out-of-plane using the compression diagonal struts method. The average reduction of the infill stiffness was calculated by considering the interaction in-plane and out-of-plane 30%.

2. Methodology

2.1. Numerical study

In this article, the laboratory models of Mansouri et al. (2014) (Mansouri et al., 2014) have been used for analytical models. Analytical specimens, as shown in Fig. 1, consist of a one-story single-story of reinforced concrete frame, a reinforced concrete frame with solid masonry infill, a reinforced concrete frames with masonry infill with a non-central door opening, and three reinforced concrete frame with a window opening with different dimensions and location with a scale of 1:2. The geometric characteristics of the non-seismic reinforced concrete frame are shown in Fig. 2. The dimensions of the brick are 31×49×106 respectively (thickness×height×length) in millimeters. The material properties of masonry infill, are shown in Table 1. These results of tests have been used in numerical modeling.

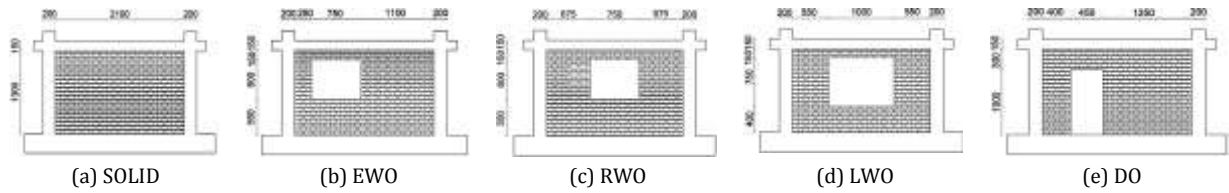


Fig. 1. Dimensions (mm) of experimental specimens (Mansouri et al., 2014)

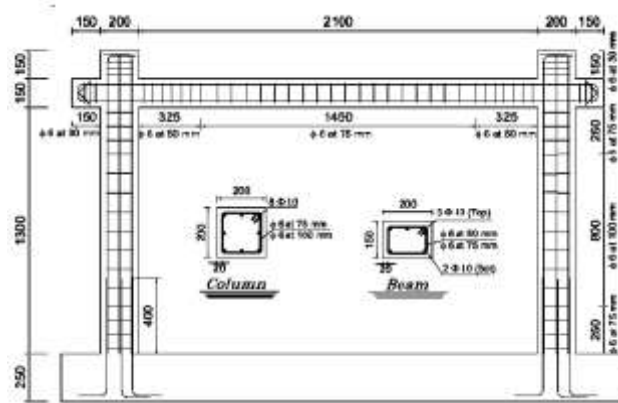


Fig. 2. Geometry and reinforcing details of reinforced concrete frame (millimeter) (Mansouri et al., 2014)

Table 1. Test results of materials (MPa) (Mansouri et al., 2014)

| Material | Property | Value |
|-----------------------------------|----------------------|-------|
| concrete | Compressive strength | 21.9 |
| Brick units | Compressive strength | 9.16 |
| mortar | Compressive strength | 8.33 |
| longitudinal steel reinforcements | Yield strength | 438.3 |
| | Ultimate strength | 645 |
| Transverse steel reinforcements | Yield strength | 396.3 |
| | Ultimate strength | 509.3 |

2.2. FE modeling

In this paper, configurations have been evaluated by using the general finite element software ABAQUS, which offers comprehensive material constitutive laws and capable interaction features for the simulation of masonry infills. The Eight-node three-dimensional reduced integration elements with a Gaussian integration point in the elements (C3D8R) are used for simulation of reinforced concrete frames, and solid bricks and element (TRUSS T3D2) are used for simulation of longitudinal and transverse rebars, and steel bars are “embedded” to the concrete element.

Numerical modeling of brittle materials such as concrete and masonry in the past few decades are mainly categorized into three groups namely: micro, macro, and meso scale. Due to the numerical methods, meso scale analysis can be categorized mainly into the implicit and explicit analysis. In this paper, Meso-scale modeling and the explicit solution procedure has been used. Analysis is performed to evaluate the masonry infilled frames, and quasi-static analysis for in-plane and out-of-plane directions.

3. Results and discussion

3.1. Out of plane behavior

First, for each specimen, the model with 0% drift (undamaged) is also included for comparison. In the step, the out-of-plane pressure is applied on the entire surface of masonry infills equal to the ground acceleration from (g1) to (g10). No axial load was considered in the loading step. The bottom beam of the frame was fully restrained to simulate a rigid foundation beam.

3.2. Out-of-plane behaviour with in-plane damage

Specimens were analyzed under in-plane loading and then under out-of-plane loading. During the in-plane step, the frame was applied and analyzed with the level of drift of (0.5%, 1%, 2%, and 3% respectively). During the out-of-plane step, the damaged model was analyzed under monotonic out-of-plane pressure to 10g. During the out-of-plane step, the RC frame was restrained for out-of-plane displacement. No axial load was considered during either loading step. In both steps, the bottom beam of the frame was fully restrained to simulate a rigid foundation beam. Afterward, the influence of IP damages on OP behavior is investigated by comparing the force-displacement curves.

3.3. Out-of-plane behaviour with in-plane damage

Specimens were analyzed under out-of-plane loading and then under in-plane loading. During the out-of-plane step, the damaged model was analyzed under monotonic out-of-plane pressure to 1g. During the in-plane step, the frame was applied and analyzed with a level of drift of 6%. No axial load was considered during either loading step. Analytical specimens then were loaded at different levels of ground accelerations in the out-of-plane direction and the amount of a reduction of strength and effectiveness was measured with in-plane loading capacity. Afterward, the influence of out-of-plane damages on in-plane behavior is investigated by comparing the force-displacement curves.

3.4. Reduction factor

In this paper, it has been tried to modify the stiffness and strength reduction factor equations by Mansouri et al. (2014) (Mansouri et al., 2014) with factor the interaction out-of-plane on the in-plane masonry infill with different opening. The factors of the presented equations have been estimated using the partial least square (PLS) method in the statistical programming language R (Hastie et al., 2014). Considering the interaction out-of-plane on the in plane, stiffness reduction was observed in all specimens. The opening type (window, door) also has little effect on the trend in variation in the stiffness-reduction factor concerning opening ratio.

4. Conclusions

The masonry infill-frame with in-plane loading with previous out-of-plane damage has the lowest loss of strength and effective stiffness compared to the opening specimens. In out-of-plane loading of masonry infills with an opening (windows and door), openings with larger dimensions or farther from the center of the infill lead to a further reduction in the strength and effective stiffness of the masonry infills. In out-of-plane loading with previous in-plane damage, the effective stiffness degradation of the opening specimens was about 90%, and the specimen with the door opening had the highest effective stiffness, whose effective stiffness is equal to the effective stiffness of the reinforced concrete (RC) frame. Effective stiffness variations are very significant compared to strength variations, interactions in-plane (IP) and out-of-plane (OoP) have a greater effect on effective stiffness. The effective stiffness reduction factor of opening specimens under in-plane loading with previous out-of-plane damage has decreased by an average of 30% compared to specimens with only in-plane loading. The strength reduction factor of opening specimens under in-plane loading with previous out-of-plane damage, in some specimens, instead of reducing the strength in the interaction in-plane and out of plane, has increased the strength compared to specimens with only in-plane loading. It is believed that this may be due to the nature of the arching action in the interaction of between the masonry infill and the surrounding frame in the opening specimens. This is an open issue, on which further analytical studies are certainly necessary.

5. References

- Asteris PG, Cavaleri L, Di Trapani F, Tsaris AK, "Numerical modelling of out-of-plane response of infilled frames: State of the art and future challenges for the equivalent strut macromodels", *Engineering Structures*, 2017 Feb. 1,132, 110-22. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.10.012>
- Hastie T, Tibshirani R, Friedman JH, Friedman JH, "The elements of statistical learning: data mining, inference, and prediction", New York: Springer; 2009 Aug.
- Mansouri A, Marefat MS, Khanmohammadi M, "Experimental evaluation of seismic performance of low-shear strength masonry infills with openings in reinforced concrete frames with deficient seismic details", *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 2014, Oct. 25, 23 (15), 1190-210. <https://doi.org/10.1002/tal.1115>