

اثر میانقاب‌های ساندویچی بتنی دارای بازشو بر رفتار درون صفحه‌های فولادی

سیدجعفر هاشمی

دانشجوی دکتری سازه، دانشگاه گیلان، رشت

جواد رزاقی لنگرودی *

استادیار گروه عمران، دانشکده‌ی فنی دانشگاه گیلان، رشت

عبدالرضا سروقدمقدم

دانشیار پژوهشکده‌ی مهندسی سازه، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران

چکیده

در سالهای اخیر با گسترش فناوری‌های نوین در صنعت ساختمان، پانل‌های ساندویچی بتنی به تدریج جایگزین میانقاب‌های بنایی در ساختمان‌ها شده است. نادیده گرفتن اثر پانل‌های مذکور به عنوان میانقاب در رفتار ساختمان‌ها در فرآیند تحلیل و طراحی سازه، به خصوص در مناطق لرزه‌خیز، در جهت اطمینان نخواهد بود. در مطالعه‌ی حاضر، با مدل‌سازی عددی به روش اجزای محدود غیرخطی، اثر وجود میانقاب‌های ساندویچی بتنی دارای بازشو بر رفتار درون صفحه‌ی قاب‌های فولادی بررسی می‌شود. برای این منظور ابتدا مدل پیشنهادی با استفاده از نتایج آزمایشگاهی موجود، اعتبارسنجی شده و سپس با انجام مطالعه‌ی پارامتری اثر عواملی نظیر ابعاد بازشو و موقعیت آن و نیز نوع بازشو - درب یا پنجره - مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. نتایج نشان می‌دهد وجود بازشو در پانل میانقاب با تغییر در نحوه‌ی توزیع تنش و تشکیل دستک‌های قطری فشاری در سطح پانل، رفتار جانبی قاب را تحت تأثیر قرار داده و منجر به تغییر قابل ملاحظه در سختی و مقاومت جانبی قاب‌های میان‌پر می‌شود.

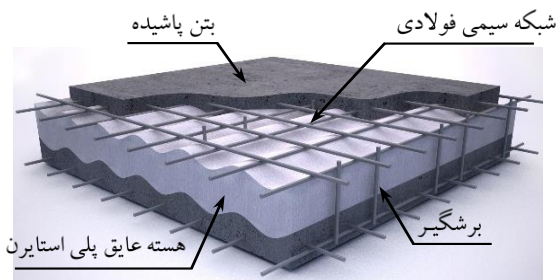
واژه‌های کلیدی: رفتار درون صفحه، پانل ساندویچی بتنی، اجزای محدود غیرخطی، مدل‌سازی عددی.

۱- مقدمه

(۱) نصب راحت و اجرای سریع با هزینه کم نیروی انسانی، (۲) پایداری و عملکرد مناسب در جهت خارج از صفحه به سبب وجود شبکه‌ی سیمی فولادی در دو طرف پانل و کاهش خطر ریزش آوار در هنگام زلزله، (۳) بازدهی بالا به‌عنوان عایق حرارتی و صوتی، و (۴) امکان استفاده از قطعات پیش‌ساخته و جلوگیری از پرت مصالح که اقتصادی شدن اجرای پروژه‌های ساختمانی بلند مرتبه را به دنبال خواهد داشت، اشاره نمود [۹].



شکل ۱- نمونه‌ای از سیستم ساختمانی مورد مطالعه، تهران ۱۳۹۲



شکل ۲- جزئیات پانل ساندویچی بتنی

تحقیقات اولیه در زمینه عملکرد سازه‌ای پانل‌های ساندویچی به مطالعات امین اینیا در سال ۱۹۹۲ بازمی‌گردد [۱۰] و تا پیش از آن، این نوع پانل‌ها بیشتر از نظر معماری و فیزیکی مورد توجه محققین قرار گرفته بودند [۱۱، ۱۲]. مرور تحقیقات گذشته نشان می‌دهد، اکثر مطالعات انجام شده در زمینه‌ی پانل‌های ساندویچی، به رفتار سازه‌های تمام پانلی معطوف گردیده است. رضایی‌فر و همکاران با آزمایش یک ساختمان یک طبقه با سیستم دیوارهای باربر پانل ساندویچی در مقیاس کامل بر روی میز لرزان، رفتار دینامیکی این سیستم سازه‌ای را مطالعه کردند [۱۳]. نتایج این تحقیق نشان داد این سیستم سازه‌ای در ارتعاش لرزه‌ای سطوح بالا می‌تواند مقاومت قابل قبولی داشته باشد.

قاب‌های میان‌پُر یکی از سیستم‌های ساختمانی متداول در اکثر کشورهای جهان از جمله ایران به‌شمار می‌روند. این سیستم سازه‌ای که در بعضی موارد از آن به‌عنوان قاب مرکب نیز یاد می‌شود، از قاب بتنی یا فولادی همراه با دیوارهای پرکننده تشکیل شده است. اگر چه استفاده از میان‌قاب در سازه‌ها دارای قدمت طولانی است، اما تا اواخر دهه ۱۹۵۰ میلادی، این اعضا به‌عنوان عناصری غیرسازه‌ای تلقی می‌شدند. در آن سال‌ها محققین به برخی اثرات میان‌قاب در رفتار سازه پی بردند [۱-۳] و در حقیقت فصل جدیدی در پژوهش‌های مربوط به رفتار سازه‌ها گشوده شد که تا به امروز نیز ادامه دارد.

میان‌قاب‌ها نقش مهمی در ساختمان‌ها ایفا می‌کنند. از جمله اثرات آن‌ها می‌توان به افزایش سختی و مقاومت و نیز کاهش تغییر مکان سازه اشاره نمود. گزارش زمین‌لرزه‌ی ۳۱ خرداد ۱۳۶۹ رودبار و منجیل بیانگر آن است که عملکرد مناسب میان‌قاب‌ها در بسیاری از موارد شدت خسارات ساختمان‌های بلندمرتبه و میان‌مرتبه در استان گیلان را کاهش داده است [۴]. نادیده گرفتن اثر میان‌قاب در تحلیل سازه، البته، منجر به بروز برخی پدیده‌های نامطلوب سازه‌ای از جمله: ایجاد نامنظمی سختی در ارتفاع (طبقه‌ی نرم)، نامنظمی سختی در پلان (پیچش)، نامنظمی مقاومت در ارتفاع (طبقه‌ی ضعیف) و پدیده‌ی ستون کوتاه می‌شود که در زمین لرزه‌های گذشته خساراتی را به دنبال داشته است.

از عمومی‌ترین مصالحی که به‌عنوان دیوارهای جداکننده در قاب‌های بتنی و فولادی استفاده می‌شود، مصالح بنایی است. به همین دلیل بیشتر تحقیقات موجود در ادبیات فنی، به این نوع میان‌قاب پرداخته‌اند [۵-۸]. متداول‌ترین عناصر بنایی مورد استفاده در این سیستم سازه‌ای عبارتند از: آجر فشاری، آجر سفالی مجوف، بلوک سفالی، بلوک سیمانی و بلوک‌های بتن سبک.

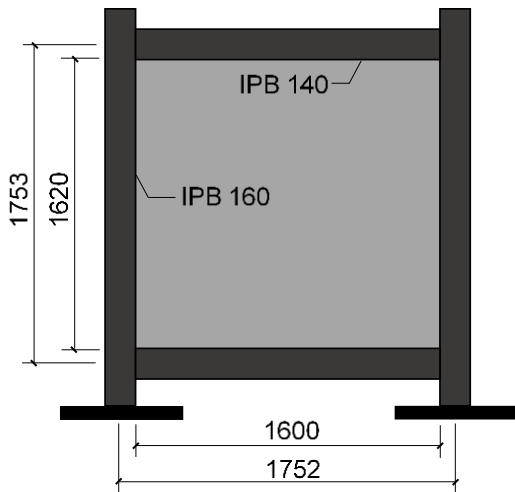
در سال‌های اخیر با ظهور و گسترش فناوری‌های نوین در صنعت ساختمان، به تدریج مصالح دیگری مانند پانل‌های ساندویچی بتنی، به دلیل فوایدشان، جای‌گزین میان‌قاب‌های بنایی در ساختمان‌ها شده است (شکل ۱). پانل‌های ساندویچی بتنی تشکیل شده‌اند از یک لایه‌ی پلی‌استایرن که شبکه‌ی سیمی فولادی در دو طرف آن قرار گرفته است و دو لایه‌ی بتنی که به‌صورت پاشیده، طرفین پانل را می‌پوشاند (شکل ۲). از جمله مزیت‌های این پانل‌ها می‌توان به

ابعاد بازشو و موقعیت آن و نیز شکل بازشو، درب یا پنجره، مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

۲- مدل‌سازی اجزای محدود

۲-۱- مشخصات نمونه‌ی آزمایشگاهی

در این بخش از نتایج یک مطالعه آزمایشگاهی بر روی سیستم قاب میان‌پر با پانل‌های ساندویچی که توسط مؤلفان مقاله پیش رو انجام شده است، استفاده می‌شود [۹]. در پژوهش مذکور سه قاب فولادی یک دهانه و یک طبقه با مقیاس ۲/۳ در پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله تحت بارگذاری جانبی درون صفحه، که در تراز تیر فوقانی به صورت رفت و برگشتی به نمونه‌ها اعمال می‌شد، قرار گرفتند.



شکل ۳- نمونه‌ی آزمایشگاهی انتخاب شده برای انجام مطالعه‌ی عددی در این تحقیق (ابعاد به میلی‌متر) [۹].

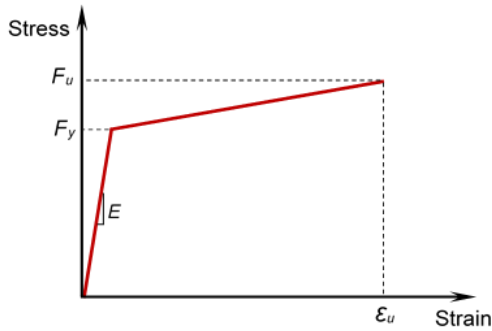
نمونه‌ها شامل دو قاب میان‌پر همراه با یک قاب خالی با نسبت بُعدی ۱/۰ بودند. اتصالات تیر به ستون و هم‌چنین اتصال پای ستون‌ها به صفحه ستون به صورت کاملاً گیردار اجرا شد. دیوارهای پرکننده همانند جزئیات ارائه شده در شکل ۲ به دو صورت کاملاً متصل به قاب و جدا از قاب (وجود فاصله‌ی اجرایی بین قاب و میان‌قاب) در قاب‌های میان‌پر اجرا شدند. با توجه به نوع ساخت این سیستم سازه‌ای در ایران که در آن‌ها اتصال کامل بین قاب و پانل وجود دارد، بنابراین این نوع قاب به عنوان مدل اصلی تحقیق حاضر انتخاب شد. هندسه و ابعاد قاب مورد نظر در شکل ۳ آمده است. سایر اطلاعات مورد نیاز از قبیل نحوه ساخت نمونه‌ها، مشخصات مصالح، الگوی بارگذاری جانبی و چگونگی اعمال آن، جزئیات برپایش آزمایشگاهی و نیز نتایج کامل آزمایش‌ها در مرجع [۹] قابل حصول است.

رضایی فر و همکاران در مطالعه‌ی دیگر رفتار لرزه‌ای ساختمان چهار طبقه در مقیاس ۱:۲/۳۵ را با استفاده از آزمایش بر روی میز لرزان بررسی نمودند [۱۴]. در این سیستم سازه‌ای، شبکه‌ی قابی با عناصر تیر و ستون وجود نداشت و دیوارهای باربر پانل ساندویچی بتنی نقش عناصر باربر قائم جانبی را بر عهده داشتند. نتایج تحقیق نشان داد سازه‌ی مذکور در محدوده‌ی خطی (تحریک لرزه‌ای خفیف)، کاملاً مقاومت خود را حفظ می‌کند و در برابر تحریک لرزه‌ای با شدت متوسط هم از مقاومت کافی برخوردار است. تیون و همکاران با مطالعه تحلیلی و تجربی بر روی سیستم مرکب قاب فولادی با میان‌قاب ساندویچی بتنی دریافتند وجود پانل‌های ساندویچی به عنوان میان‌قاب می‌تواند منجر به افزایش قابل ملاحظه‌ی سختی و مقاومت جانبی قاب شود [۱۵]. پوز و بورناس در یک مطالعه جامع تجربی، رفتار پانل‌های ساندویچی بتنی را تحت بارهای لرزه‌ای بررسی کردند [۱۶]. جزئیات اجرایی پانل‌های ساندویچی به کار رفته در این تحقیق همانند دیوارهای پیش‌ساخته‌ی ساندویچی بود که در ایران نیز کاربرد دارد. آن‌ها از طریق آزمایش ۴ نمونه دیوار تنها در حالت‌های دارای بازشو و بدون بازشو با مقیاس کامل و نیز یک نمونه سازه‌ی دو طبقه‌ی بزرگ مقیاس با پلان H شکل، مقاومت جانبی دیوارهای ساندویچی را تعیین کردند.

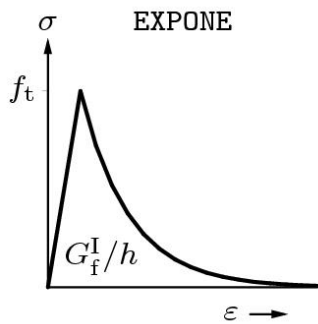
مؤلفین مقاله حاضر با انجام مطالعه آزمایشگاهی بر روی نمونه‌های بزرگ مقیاس تحت بارگذاری چرخه‌ای، رفتار درون صفحه‌ی قاب‌های فولادی میان‌پر با پانل‌های ساندویچی بتنی را بررسی نمودند [۹]. آن‌ها در تحقیق خود اثر شرایط مرزی اتصال پانل میان‌قاب به قاب پیرامونی را مورد توجه قرار دادند. نتایج تحقیق نشان داد با جداسازی میان‌قاب از قاب، رفتار درون صفحه‌ی قاب میان‌پر از نظر سختی و مقاومت جانبی تا حدودی شبیه قاب خالی خواهد بود، با این تفاوت که با استفاده از این شیوه‌ی ساخت - وجود فاصله‌ی اجرایی بین قاب و میان‌قاب - می‌توان به ظرفیت استهلاک انرژی بیشتری نسبت به قاب خالی دست یافت.

در مطالعه پیش‌رو، به بررسی اثر وجود میان‌قاب‌های ساندویچی بتنی دارای بازشو بر رفتار درون صفحه‌ی قاب‌های فولادی پرداخته می‌شود. برای این منظور مدل‌سازی عددی به روش اجزای محدود غیرخطی با استفاده از نرم‌افزار DIANA 9.6 [۱۷] انجام شده است. پس از اعتبارسنجی صحت مدل‌سازی به کمک نتایج آزمایشگاهی موجود، با انجام مطالعه‌ی پارامتری اثر عواملی نظیر

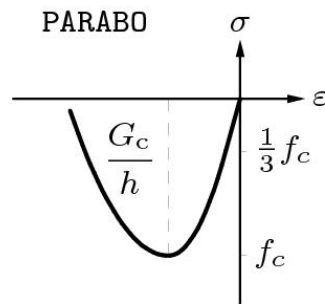
۲-۲- نحوه مدل سازی



شکل ۴- منحنی تنش - کرنش دوخطی تعریف شده برای رفتار غیرخطی فولاد.



(الف)



(ب)

شکل ۵- روابط تنش - کرنش تعریف شده به منظور شبیه سازی رفتار بتن پاشیده؛ الف) در کشش، ب) در فشار [۱۷].

برای تحقق شرایط مرزی بین قاب و میان قاب از یک المان تماسی^۵ ۲+۲ گرهی به نام L8IF با ضخامت صفر استفاده شد (شکل ۶). این المان بر اساس درون یابی خطی عمل می کند و به راحتی به المان تنش مسطح مورد استفاده در این تحقیق، 8QMEM، متصل می شود که در شکل ۷ قابل مشاهده است. رفتار المان تماسی، بر اساس مدل پیشنهادی لورنسو و روتز [۱۸] انتخاب شد. این مدل که

قاب فولادی به کمک المان تنش مسطح شبیه سازی شد. برای این منظور از المان ایزوپارامتریک چهار گرهی و چهار وجهی Q8MEM استفاده شد. مشخصات غیرخطی مصالح قاب فولادی بر اساس تئوری پلاستیسیته ی فون میزس^۱ در نظر گرفته شد و منحنی ایده آل دوخطی تنش - کرنش همراه با سخت شدگی کرنشی^۲ به صورت شکل ۴ لحاظ گردید. مقادیر ورودی به نرم افزار برای مصالح فولاد عبارت بودند از: ضریب ارتجاعی N/mm^2 2×10^5 ، مقاومت حد تسلیم و مقاومت حد نهایی به ترتیب برابر ۴۲۰ و ۵۰۰ نیوتن بر میلی متر مربع و کرنش نهایی معادل ۰/۲۵.

از آنجا که هسته میانی پانل ساندویچی یعنی لایه پلی استایرن در رفتار سازه ای درون صفحه ی قاب های میان پر نقشی را ایفا نمی کند، لذا در مدل سازی پانل میان قاب، تنها دو لایه بتن پاشیده به علاوه شبکه سیمی فولادی مد نظر قرار گرفتند. بر این اساس، بتن پاشیده به کمک المان تنش مسطح مدل سازی شد و شبکه ی سیمی هم به صورت کاملاً مدفون^۳ در بتن پاشیده در مدل تعریف گردید. المان تنش مسطح به کار رفته برای مدل سازی قاب فولادی، برای میان قاب نیز مورد استفاده قرار گرفت. برای شبیه سازی رفتار غیرخطی بتن پاشیده از مدل ترک کرنش مجموع^۴ (کلی) که بر پایه مفهوم ترک پخشی چرخشی^۵ در نرم افزار موجود بود، استفاده شد. بر این اساس مدل های رفتاری نمایی^۶ و سهمی وار^۷ که نمودار آن ها در شکل ۵ آمده است، به ترتیب برای شبیه سازی رفتار بتن در کشش و فشار به کار برده شد. علت استفاده از این مدل های رفتاری برای میان قاب، دقت قابل قبول آن ها در مطالعات مشابه نظیر مرجع [۸] بود. برای بتن پاشیده ضریب ارتجاعی برابر 4×10^3 نیوتن بر میلی متر مربع، مقاومت کششی (f_t) و فشاری (f_c) به ترتیب برابر ۰/۵ و ۷ نیوتن بر میلی متر مربع و مقادیر انرژی شکست مود (G_f^I) و انرژی شکست فشاری (G_c) به ترتیب معادل ۰/۰۵ و ۲/۱ بر حسب نیوتن بر میلی متر در نظر گرفته شد. هم چنین رفتار شبکه سیمی فولادی به صورت ایده آل دوخطی بدون سخت شدگی کرنشی با ضریب ارتجاعی N/mm^2 $1/9 \times 10^5$ و مقاومت حد تسلیم برابر ۴۰۰ نیوتن بر میلی متر مربع به نرم افزار اعمال شد.

⁵ Rotating smeared crack concept

⁶ Exponential

⁷ Parabolic

⁸ Interface element

¹ Von Mises plasticity

² Strain hardening

³ Embedded grid reinforcement

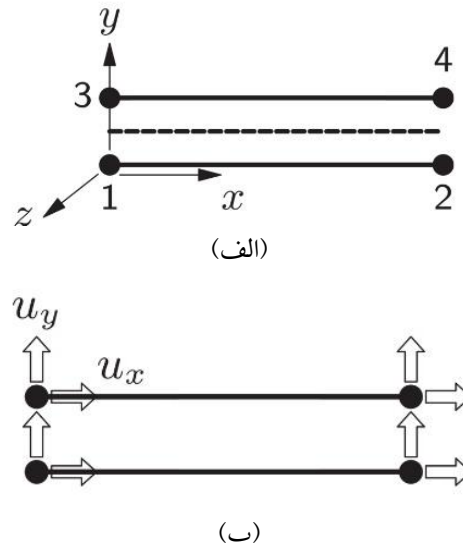
⁴ Total Strain Crack Model

جدول ۱- مشخصات مربوط به المان تماسی	
مشخصه‌ی مصالح	مقدار ورودی به نرم‌افزار
سختی عمودی	$\nu \text{ N/mm}^3$
سختی برشی یا مماسی	4 N/mm^3
مقاومت کششی	0.01 N/mm^2
انرژی شکست مود I	0.05 N/mm
چسبندگی	0.007 N/mm^2
تانژانت زاویه اصطکاک داخلی	0.6
انرژی شکست مود II	5 N/mm
مقاومت فشاری	$\nu \text{ N/mm}^2$

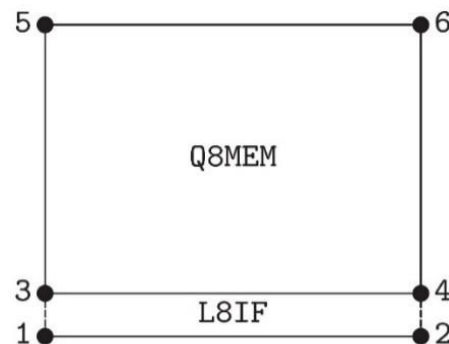
۲-۳- اعتبارسنجی صحت مدل سازی

مدل ایجاد شده تحت بارگذاری یکنوا^۳ تحلیل شد. بارگذاری مطابق آنچه که در آزمایش‌ها انجام شده بود، به صورت کنترل شده توسط تغییر مکان^۴ اعمال شد. برای صحت‌سنجی مدل دو معیار در نظر گرفته شد: اول، تطابق نمودار بار- تغییر مکان که بیانگر رفتار کلی قاب میان‌پر است و دوم، الگوی ترک خوردگی و توزیع تنش در میان‌قاب. همان گونه که در شکل ۹ ملاحظه می‌شود نمودار نیرو - تغییر مکان برای مدل ایجاد شده، هم از لحاظ سختی اولیه و هم از نظر مقاومت نهایی نمونه، مطابقت خوبی را نشان می‌دهد. یادآور می‌شود نمودارهای Test(-) و Test(+) مربوط به جهت‌های بارگذاری رفت و برگشتی است. عدم تطابق نمودارها در قسمتی که زوال مقاومت اتفاق می‌افتد را می‌توان به برخی ساده‌سازی‌ها در مدل و همچنین رفتار کاملاً غیرخطی نمونه قاب میان‌پر پس از رسیدن بار به حد نهایی و ترک خوردن پانل میان‌قاب که منجر به پیچیدگی رفتار آن می‌شود، نسبت داد. همچنین الگوی ترک خوردگی و تنش ایجاد شده در میان‌قاب، هم‌خوانی مناسبی با نمونه‌ی آزمایشگاهی دارد (شکل ۱۰). در شکل (الف) تغییر شکل شبکه‌های اجزای محدود در گوشه‌های ناحیه فشاری پانل میان‌قاب به وضوح دیده می‌شود. هم‌چنین عملکرد صحیح المان تماسی که باعث جدایی پانل از قاب پیرامونی در قطر کششی پانل شده است، به وضوح قابل رؤیت است. وضعیت نمونه‌ی

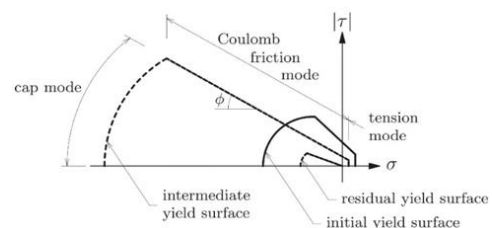
بر پایه‌ی تئوری پلاستیسیته‌ی چند سطحی^۱ متکی است، توانایی مدل‌سازی ترکیبی ترک خوردگی، اصطکاک لغزشی و خردشدگی^۲ در امتداد المان را دارد (شکل ۸). مشخصات مصالح معرفی شده به نرم‌افزار برای المان تماسی مدل قاب میان‌پر در جدول ۱ آمده است.



شکل ۶- المان تماسی L8IF به کار رفته برای شرایط مرزی قاب - پانل؛ (الف) پیکربندی، (ب) تغییر مکان‌های المان [۱۷].



شکل ۷- نحوه‌ی سرهم بندی المان تنش مسطح Q8MEM و المان تماسی L8IF [۱۷].



شکل ۸- رفتار المان تماسی دو بعدی مورد استفاده در مدل [۱۷].

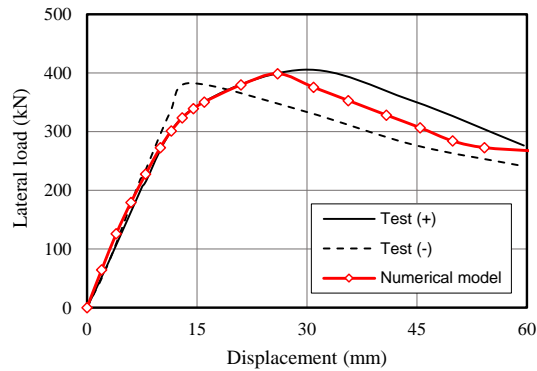
³ Monotonic

⁴ Displacement control

¹ multi-surface plasticity

² Combined Cracking-Shearing-Crushing

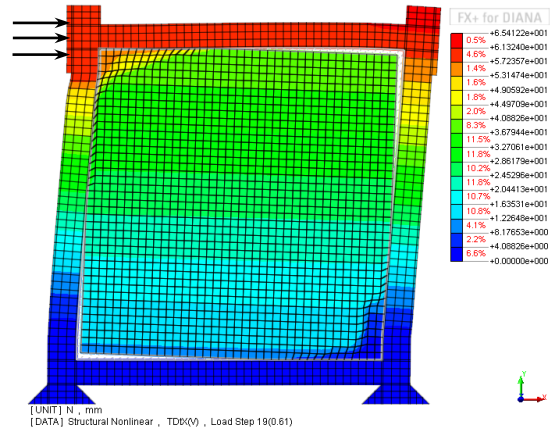
آزمایشگاهی در انتهای آزمایش در شکل (ب) ۱۰ آمده است. در ترک خوردگی در میان قاب که بیانگر ایجاد دستک قطری فشاری^۱ شکل های (ج) و (د) ۱۰ نیز به ترتیب نحوه توزیع تنش و الگوی است، کاملاً قابل مشاهده می باشد.



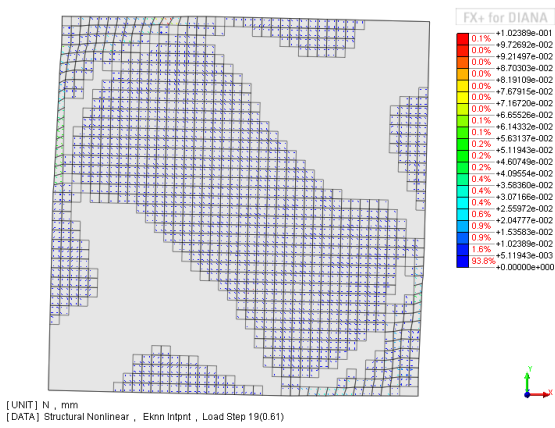
شکل ۹- مقایسه منحنی نیرو - تغییر مکان مدل با نمونه ی آزمایشگاهی.



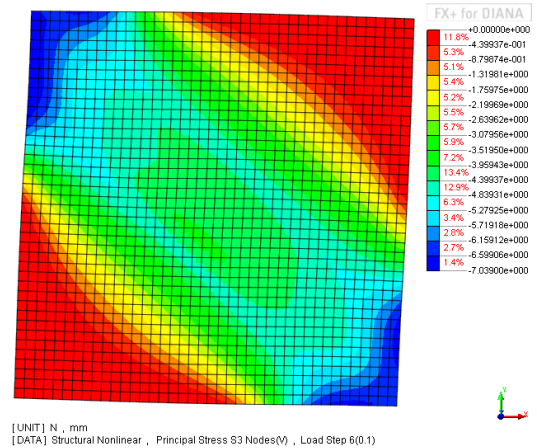
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۱۰- مقایسه ی نتایج مدل سازی عددی با نتایج آزمایش؛ (الف) تغییر شکل مدل، (ب) تغییر شکل نمونه ی آزمایشگاهی، (ج) توزیع تنش، (د) الگوی ترک خوردگی در میان قاب.

¹ Compression diagonal strut

۳- مطالعه پارامتری، نتایج و بحث

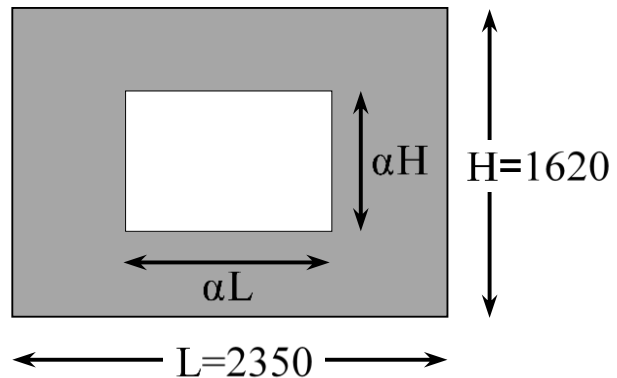
برای انجام مطالعه پارامتری، سه عامل ابعاد بازشوی مرکزی، نوع بازشو (شکل بازشو از نظر درب یا پنجره بودن) و موقعیت بازشو بررسی شده‌اند که نتایج آن در ادامه ارائه می‌شود.

۳-۱- اثر ابعاد بازشوی مرکزی

برای مطالعه اثر بازشوی مرکزی، نسبت مساحت بازشو به سطح پانل مدنظر قرار گرفت. بر این اساس مدلی با نسبت بُعدی (L/H) ۱/۴۵ ایجاد و ابعاد بازشو به صورت ضریبی از ابعاد پانل میانقاب در مدل‌ها تعریف شد (شکل ۱۱). مشخصات مدل‌های مورد مطالعه در این بخش به صورت جدول ۲ خلاصه شده است. برای مدل‌ها پارامتر A به‌عنوان نسبت مساحت بازشو به سطح میانقاب به صورت رابطه‌ی (۱) تعریف می‌شود:

$$A = \frac{A_o}{A_p} = \alpha^2 \quad (1)$$

که در آن A_o مساحت بازشو، A_p مساحت پانل میانقاب و α پارامتر نشان داده شده در شکل ۱۱ می‌باشد.



شکل ۱۱- هندسه‌ی بازشوی مرکزی در میانقاب (ابعاد به میلی‌متر).

شکل ۱۲ منحنی نیرو - تغییر مکان مدل‌های میانقاب با درصد بازشوی مختلف را نشان می‌دهد. با مقایسه منحنی مزبور برای نمونه‌های متفاوت، اثر وجود بازشو بر کاهش سختی و مقاومت جانبی میانقاب‌ها به طور کاملاً آشکار مشاهده می‌شود. با افزایش نسبت مساحت بازشو به مساحت میانقاب، منحنی بار - تغییر مکان میانقاب‌ها به منحنی قاب خالی متمایل می‌شود. به عبارت دقیق‌تر، نمودارهای با مشخصه‌ی A بالاتر از ۲۰٪ برخلاف نمودارهای SIF، IFO(5%) و IFO(10%) دارای یک نقطه‌ی اوج مشخص و سپس نزول مقاومت نیستند و این به دلیل

کاهش اثر مشارکت میانقاب به سبب افزایش سطح بازشو در رفتار درون صفحه‌ی قاب‌های میانقاب است.

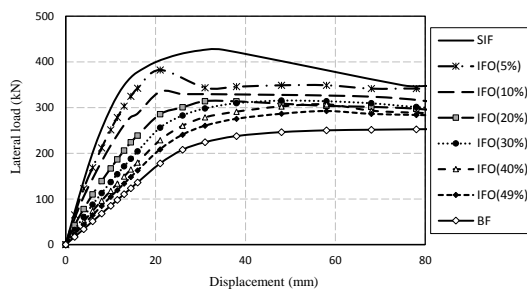
جدول ۲- مشخصات مدل‌های قاب میانقاب دارای بازشوی مرکزی

نام مدل	α	ابعاد بازشو (میلی‌متر)		A (%)
		طول	ارتفاع	
SIF	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
IFO(5%)	۰/۲۲۴	۴۷۰	۴۰۵	۵
IFO(10%)	۰/۳۱۶	۷۸۴	۴۸۶	۱۰
IFO(20%)	۰/۴۴۷	۱۰۵۸	۷۲۹	۲۰
IFO(30%)	۰/۵۴۸	۱۲۹۳	۸۹۱	۳۰
IFO(40%)	۰/۶۳۲	۱۴۹۰	۱۰۱۳	۴۰
IFO(49%)	۰/۷۰	۱۶۴۶	۱۱۳۴	۴۹
BF	۱/۰۰	۲۳۵۰	۱۶۲۰	۱۰۰

SIF: Solid Infilled Frame (قاب میان‌پر بدون بازشو)

IFO: Infilled Frame with Opening (قاب میان‌پر با بازشو)

BF: Bare Frame (قاب خالی)

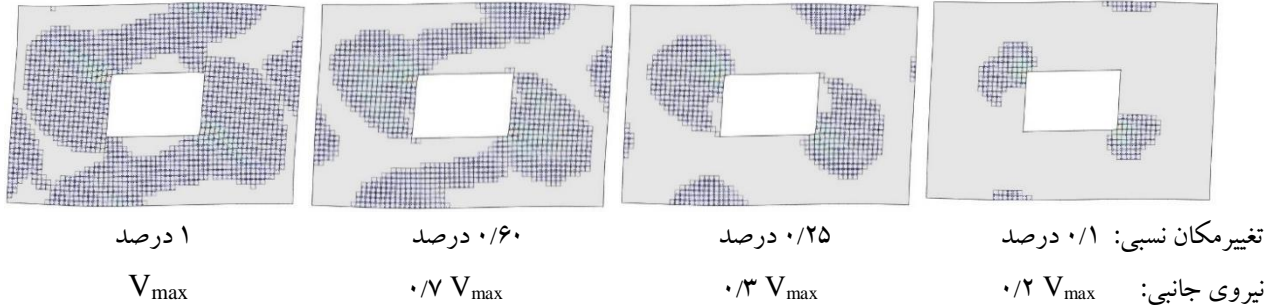


شکل ۱۲- مقایسه‌ی منحنی نیرو-تغییر مکان برای مدل‌های قاب میان‌پر دارای بازشوی مرکزی.

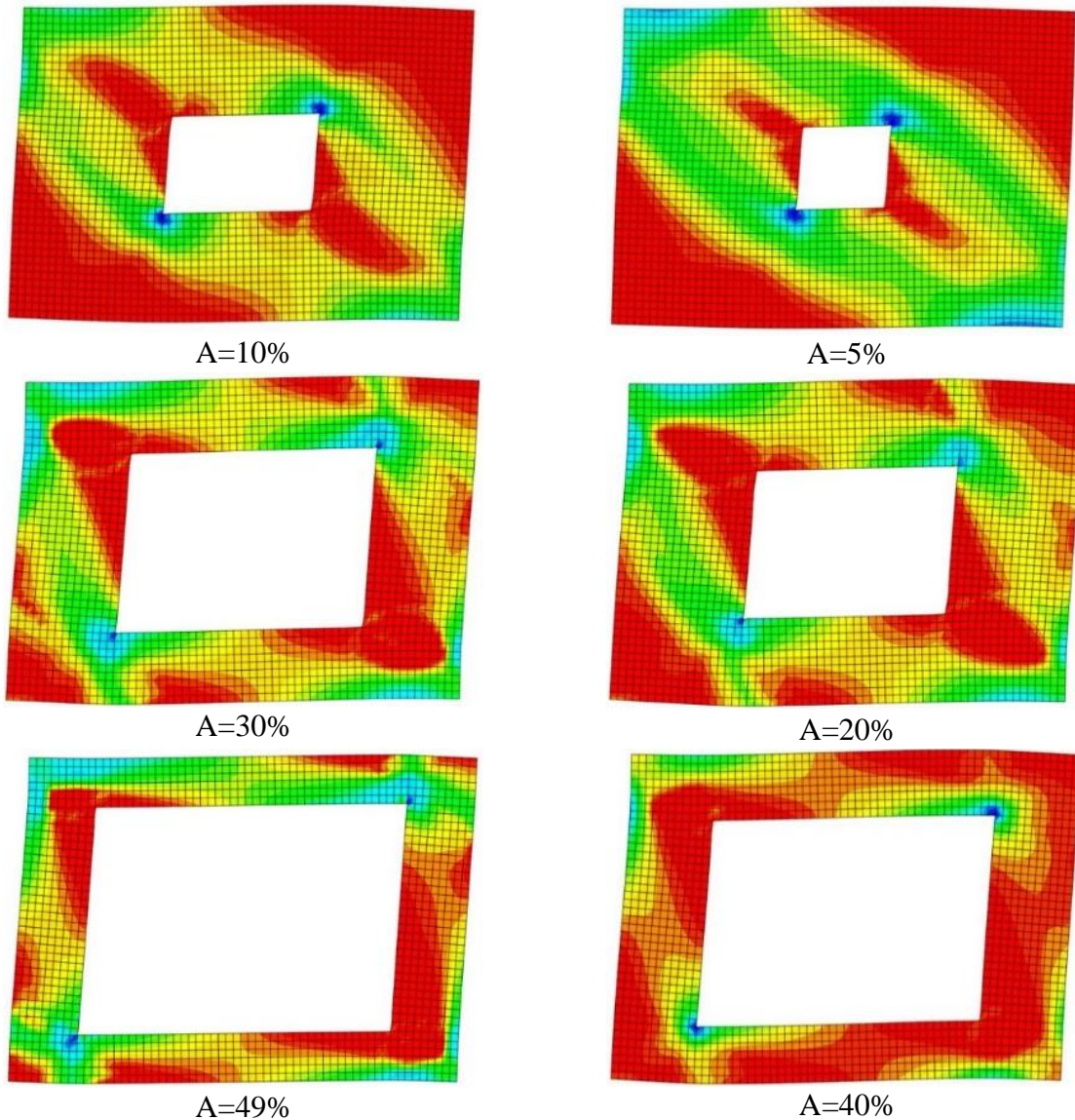
در شکل ۱۳ الگوی پیشرفت ترک خوردگی در میانقاب دارای بازشوی مرکزی در سطوح بارگذاری مشخص برای یکی از مدل‌ها به تصویر کشیده شده است. V_{max} بیانگر مقاومت حداکثر قاب می‌باشد. همچنین نحوه توزیع تنش اصلی (فشاری) برای تمامی قاب‌ها در شکل ۱۴ قابل مشاهده است. همان‌گونه که در شکل ۱۳ ملاحظه می‌شود، در سطوح پایین همان‌گونه که در شکل ۱۳ ملاحظه می‌شود، در سطوح پایین بارگذاری جانبی، ترک خوردگی از نواحی اطراف دو گوشه‌ی بازشو (سمت چپ-بالا و سمت راست-پایین) و هم‌چنین در مجاورت تیرهای فوقانی و تحتانی در قسمت جداشدگی قاب از میانقاب به دلیل ایجاد تنش‌های کششی آغاز می‌شود. در ادامه با گسترش ترک در نواحی قبلی، ترک‌های ناشی از تنش کششی در محل‌های جدا شدگی قاب از میانقاب در مجاورت ستون‌ها نیز به وجود می‌آیند. پس از آن و با بالا رفتن سطح

بارگذاری، ترک‌ها به سایر نواحی که منطبق بر توزیع قطری تنش فشاری (مراجعه به شکل ۱۴) است، می‌رسد که ناشی از تنش‌های فشاری ایجاد شده در این نواحی است. در شکل ۱۴ دستک‌های قطری ایجاد شده در سطح میان‌قاب برای حالت‌های مختلف بازشو

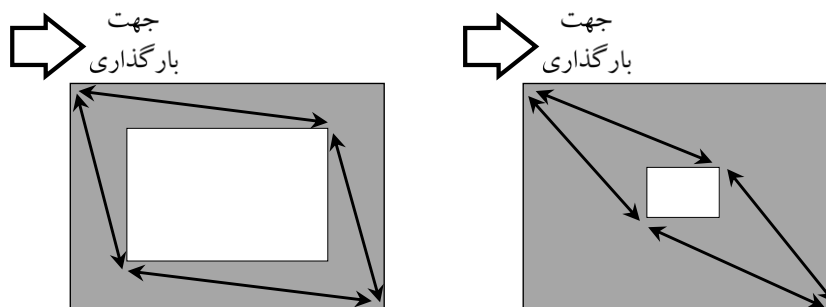
به وضوح دیده می‌شود. بر این اساس می‌توان کاهش سختی و مقاومت جانبی که در نمودارهای شکل ۱۲ قابل رؤیت بود را به کاهش عرض دستک‌های قطری و افزایش طول آن‌ها با افزایش مساحت بازشو، نسبت داد (شکل ۱۵)



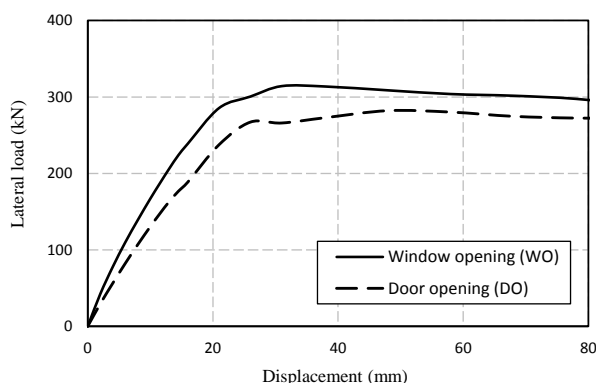
شکل ۱۳- الگوی پیشرفت نواحی ترک خوردگی در پانل میان‌قاب دارای بازشوی مرکزی ($A=10\%$) در سطوح بارگذاری مختلف.



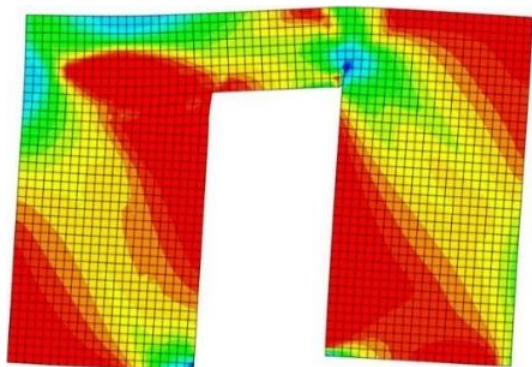
شکل ۱۴- نحوه‌ی توزیع تنش اصلی (فشاری) در پانل‌های میان‌قاب با نسبت سطح بازشوی متفاوت.



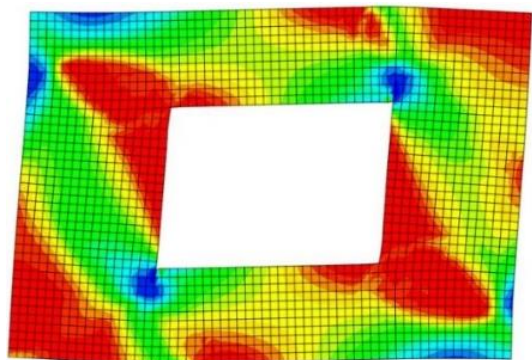
شکل ۱۵- مقایسه‌ی ایجاد دستک‌های قطری در حالت‌های سطح بازشو کم و زیاد.



شکل ۱۷- نمودار نیرو- تغییر مکان برای مدل‌های بازشوی درب و پنجره.



(الف)



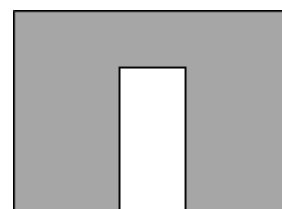
(ب)

شکل ۱۸- نحوه‌ی توزیع تنش اصلی (فشاری) در میانقاب؛

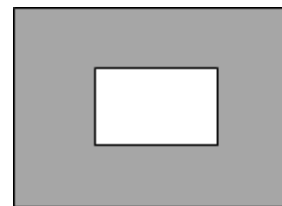
(الف) بازشوی درب، (ب) بازشوی پنجره.

۲-۳- اثر نوع بازشو

برای مطالعه اثر نوع (شکل) بازشو، دو حالت بازشوی درب و پنجره همانند آنچه که در شکل ۱۶ آمده، مدنظر قرار گرفت. مساحت بازشو در هر دو حالت با یکدیگر برابر فرض شده (A=20%) و همچنین سایر مشخصات از قبیل خواص مصالح و بارگذاری برای هر دو مدل کاملاً یکسان تعریف شده است. نتایج تحلیل شامل نمودار نیرو- تغییر مکان و نحوه‌ی توزیع تنش در پانل میانقاب به ترتیب در شکل‌های ۱۷ و ۱۸ آمده است. با مراجعه به شکل‌های مذکور می‌توان دریافت وجود بازشوی درب نسبت به بازشوی پنجره به همان مساحت، اختلال بیشتری در تشکیل دستک‌های قطری فشاری ایجاد کرده و کاهش بیشتر سختی اولیه و حداکثر مقاومت جانبی را به دنبال خواهد داشت. سختی و مقاومت قاب دارای بازشوی پنجره به ترتیب برابر 21 kN/mm و 314 kN/mm^2 می‌باشد که این مقادیر برای مدل دارای بازشوی درب با ۳۳ و ۱۰ درصد کاهش به ترتیب به مقادیر ۱۴ و ۲۸۲ تنزل پیدا کرده‌اند.



بازشوی درب (DO)

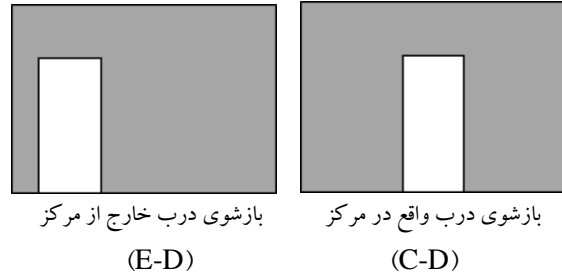


بازشوی پنجره (WO)

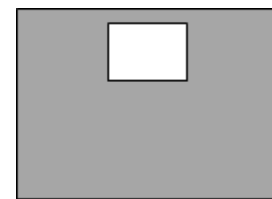
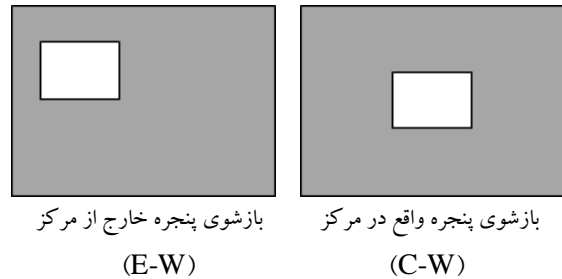
شکل ۱۶- مدل‌های مورد نظر برای مطالعه اثر نوع (شکل) بازشو.

۳-۳- اثر موقعیت بازشو

اثر موقعیت بازشو در دو حالت بررسی شده است. حالت اول وجود بازشوی درب و حالت دوم وجود بازشوی پنجره که موقعیت بازشوها مطابق شکل ۱۹ در نظر گرفته شده است.



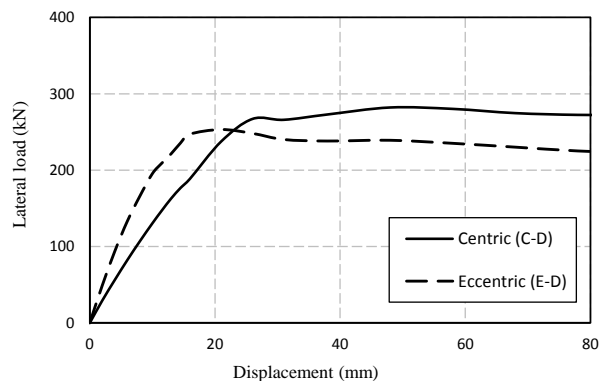
(الف)



بازشوی پنجره واقع در بالا-وسط دهانه (TM-W)

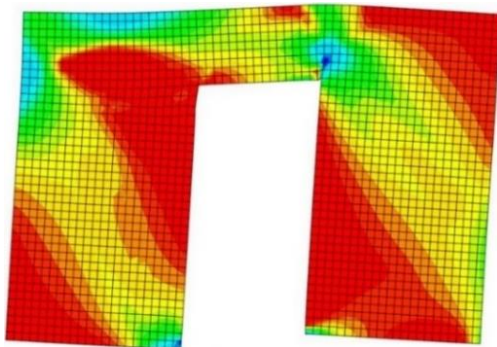
(ب)

شکل ۱۹- مدل‌های مورد نظر برای بررسی اثر موقعیت بازشو؛ (الف) بازشوی درب، (ب) بازشوی پنجره.

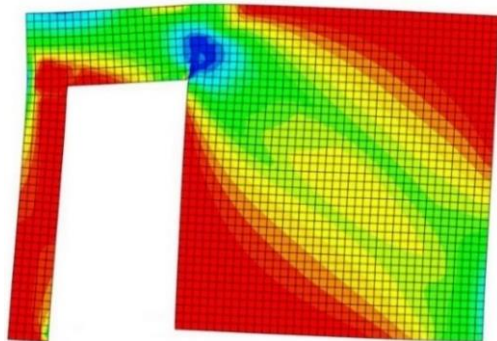


شکل ۲۰- مقایسه‌ی نمودار نیرو-تغییر مکان برای مدل‌های دارای بازشوی درب در دو موقعیت مرکز و خارج از مرکز.

مقایسه نمودار نیرو-تغییر مکان برای مدل‌های دارای بازشوی درب در دو موقعیت مرکز و خارج از مرکز در شکل ۲۰ نشان داده شده است. همچنین نحوه توزیع تنش اصلی در پانل میان‌قاب در دو حالت مذکور در شکل ۲۱ به تصویر کشیده شده است. با توجه به شکل‌های ۲۰ و ۲۱ می‌توان گفت تغییر محل بازشوی درب، نحوه تشکیل دستک‌های قطری را دستخوش تغییر قرار داده و رفتار جانبی قاب میان‌پر را تحت تأثیر قرار می‌دهد به گونه‌ای که بازشوی خارج از مرکز، سختی بیشتر و مقاومت کمتری را نسبت به حالت بازشوی مرکزی به دست می‌دهد. علت سختی بیشتر مدل (E-D) در مقایسه با مدل (C-D) را می‌توان به دستک قطری تشکیل شده در پایه‌ی بزرگ مدل (E-D) نسبت داد که در مقایسه با دستک‌های قطری تشکیل شده در مدل (C-D) دارای عرض بیشتری است.



(C-D)

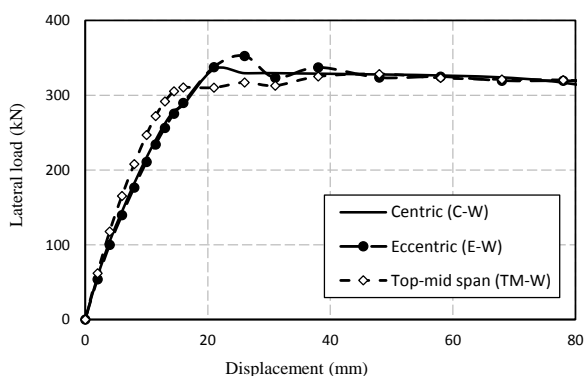


(E-D)

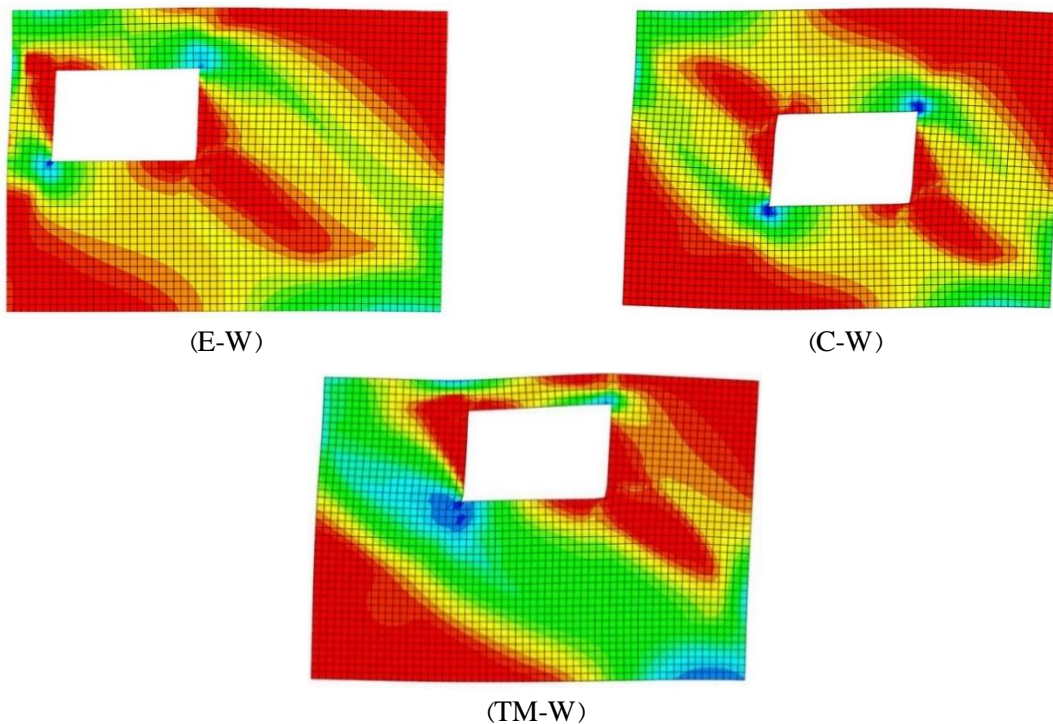
شکل ۲۱- نحوه توزیع تنش اصلی (فشاری) در میان‌قاب دارای بازشوی درب با موقعیت‌های مختلف.

نمودارهای نیرو-تغییر مکان برای مدل‌های دارای بازشوی پنجره در موقعیت‌های مختلف در شکل ۲۲ و نیز نحوه توزیع تنش اصلی در پانل میان‌قاب در این حالت‌ها در شکل ۲۳ ارائه شده است. با مراجعه به شکل ۲۲ می‌توان دریافت سختی جانبی دو مدل (E-W) و (C-W) کاملاً شبیه به یکدیگر است؛ در حالی

حداکثر نمونه‌ای بیشتر است که تعداد دستک‌های قطری بیشتری در سطح پانل تشکیل شده باشد. این ادعا را می‌توان با مقایسه‌ی مدل (C-D) که دارای دو دستک فشاری است با مدل (E-D) که در آن تنها یک دستک تشکیل شده، در مدل‌های دارای بازشوی درب اعتبار سنجی کرد. به همین ترتیب در مدل‌های با بازشوی پنجره، مدل‌های (C-W) و (E-W) که دارای دو دستک در طرفین بازشو هستند نسبت به مدل (TM-W) که در آن تنها یک دستک تشکیل شده است، دارای مقاومت حداکثر بیشتری هستند. این موضوع با نتایج آزمایشگاهی گزارش شده توسط منصوری و همکاران [۷] و سایموند و پناوا [۱۹] نیز مطابقت دارد.



شکل ۲۲- مقایسه‌ی نمودار نیرو-تغییر مکان برای مدل‌های دارای بازشوی پنجره در موقعیت‌های مختلف.



شکل ۲۳- نحوه‌ی توزیع تنش اصلی (فشاری) در میانقاب دارای بازشوی پنجره با موقعیت‌های مختلف.

که سختی مدل (TM-W) کمی بیشتر از دو مدل دیگر است. در واقع در مدل (TM-W) با خارج شدن بازشوی پنجره از قطر اصلی پانل میانقاب، دستک قطری تشکیل شده، با اختلال کمتری نسبت به حالت بدون بازشو مواجه شده است و به همین دلیل سختی جانبی آن در مقایسه با دو مدل دیگر بیشتر است. بنابراین می‌توان گفت بهترین محل برای تعبیه بازشوی پنجره می‌تواند مطابق مدل (TM-W) انتخاب شود.

مقاومت جانبی قاب میان‌پرز از مجموع مقاومت‌های قاب خالی و پانل میان‌قاب حاصل می‌شود [۶]. مقاومت برشی میان‌قاب با سطح مقطع عرضی پانل در طول دهانه، ارتباط مستقیم دارد. در قاب میان‌پرز با بازشوی درب یا پنجره که فقط موقعیت بازشوها تغییر می‌کند، انتظار می‌رود با برابر بودن مجموع طول پایه‌ها (طول میان‌قاب در طرفین بازشو)، حداکثر مقاومت جانبی قاب میان‌پرز در مدل‌های (E-D) و (C-D) نیز به طور جداگانه در مدل‌های (C-W) و (E-W) و (TM-W) با هم برابر باشند. لیکن با مراجعه به شکل‌های ۲۰ و ۲۲، اختلافی بین مدل‌های بازشوی مرکزی و بازشوی خارج از مرکز در هر دو حالت بازشوی درب و پنجره مشاهده می‌شود. این نتیجه را شاید بتوان به تعداد دستک‌های قطری تشکیل شده در پانل میان‌قاب مرتبط دانست. به عبارت دیگر در دو پانل میان‌قاب با مجموع طول پایه‌های مساوی، مقاومت جانبی

Stroitel'stvu i Arkhitekture (in Russian), Moscow, 1956.

[1] Benjamin J.R. and Williams H.A., "The behavior of one-story shear walls" Journal of the Structural Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, 84(ST4), 1958.

[2] Polyakov S.V., "On the interactions between masonry filler walls and enclosing frame when loaded in the plane of the wall" Translation in Earthquake Engineering, pp. 36-42, 1960.

[3] Jafarzadeh F., "Civil engineering features of damage on June 20, 1990 Manjil-Rudbar earthquake, Iran" 10th World Conference on Earthquake Engineering, Madrid, Spain, 1992.

[4] Moghadam H.A., Mohammadi M.G., and Ghaemian M., "Experimental and analytical investigation into crack strength determination of infilled steel frames" Journal of Constructional Steel Research, 62(12), pp. 1341-1352, 2006.

[5] Tasnimi A.A. and Mohebkah A., "Investigation on the behavior of brick-infilled steel frames with openings, experimental and analytical approaches" Engineering Structures, 33(3), pp. 968-980, 2011.

[6] Mansouri A., Marefat M.S., 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, 23(15), pp. 1190-1210, 2013.

[7] Akhouni F., Lourenço P.B. and Vasconcelos G., "Numerically Based Proposals for the Stiffness and Strength of Masonry Infills with Openings in Reinforced Concrete Frames" Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 45(6), pp. 869-891, 2016.

[8] Hashemi S.J., Razzaghi J. and Moghadam A.S., "Behaviour of sandwich panel infilled steel frames with different interface conditions" Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings, 2017. DOI: 10.1680/jstbu.16.00149.

[9] Einea A., Structural and thermal efficiency of precast concrete sandwich panel systems, University of Nebraska-Lincoln, USA, 1992.

[10] Jokela J. and Sarja A., Development of reinforcement of sandwich facade element, in

۴- نتیجه گیری

در این تحقیق با استفاده از مدل سازی به روش اجزای محدود غیرخطی اثر میان قاب پانل های ساندویچی بتنی دارای باز شو در حالت های مختلف بر رفتار درون صفحه ای قاب های فولادی بررسی شد. نتایج به دست آمده از تحلیل ها را می توان به طور خلاصه در قالب بندهای ذیل بیان نمود:

- وجود میان قاب پانل ساندویچی بتنی، تأثیر قابل ملاحظه ای بر رفتار درون صفحه ای قاب های فولادی دارد و منجر به افزایش چشمگیر سختی و مقاومت جانبی سازه می شود.
- وجود باز شو در میان قاب پانل ساندویچی بتنی، کاهش سختی و مقاومت جانبی قاب میان پر را به دنبال خواهد داشت. با افزایش ابعاد باز شو، این روند کاهش در سختی و مقاومت بیشتر شده و رفتار قاب میان پر به قاب خالی متمایل می شود.
- وجود باز شوی درب در میان قاب، سختی و مقاومت جانبی کمتری نسبت به باز شوی پنجره با همان مساحت در قاب های میان پر را به دست می دهد.
- بررسی اثر موقعیت باز شوی درب در میان قاب پانل ساندویچی بتنی نشان داد متمایل شدن باز شو از وسط دهانه به طرفین، نحوه تشکیل دستک های قطری فشاری در میان قاب را تحت تأثیر قرار می دهد به طوری که باز شوی خارج از مرکز، سختی بیشتر و مقاومت کمتری نسبت به حالت باز شوی مرکزی دارد.
- با تغییر موقعیت باز شوی پنجره در پانل میان قاب، مکانیزم تشکیل دستک های قطری تغییر کرده و رفتار جانبی قاب میان پر از نظر سختی و مقاومت را تا حدودی تحت تأثیر قرار می دهد. در این حالت بهترین مکان برای تعبیه باز شوی پنجره خارج از قطر اصلی پانل میان قاب می باشد به گونه ای که کمترین اختلال را در تشکیل دستک های قطری فشاری ایجاد کند.

۵- مراجع

Polyakov S.V., "Masonry in framed buildings : an investigation into the strength and stiffness of masonry infilling" Gosudarstvennoe Izdatel'stvo Literaturny po

Research Note No. 19, VTT-Technical Research Center of Finland, Espoo, 1981.

[11] Olin J., Ratvio J. and Jokela J., Development of heat economy and construction of facade elements, in Research Note No. 28, VTT-Technical Research Center of Finland, Espoo, 1984.

[12] Rezaifar O., Kabir M.Z., Taribakhsh M. and Tehranian A., "Dynamic behaviour of 3D-panel single-storey system using shaking table testing" *Engineering Structures*, 30(2), pp. 318-337, 2008.

[13] Rezaifar O., Kabir M.Z., and Bakhshi A., "Shaking table test of a 1:2.35 scale 4-story building constructed with a 3D panel system" *Scientia Iranica*, 16(3), pp. 199-215, 2009.

[14] Teeuwen P.A., Kleinman C.S., Snijder H.H. and Hofmeyer H. "Experimental and numerical investigations into the composite behaviour of steel frames and precast concrete infill panels with window openings" *Steel and Composite Structures*, 10(1), pp. 1-21, 2010.

[15] Pavese A. and Bournas D.A., "Experimental assessment of the seismic performance of a prefabricated concrete structural wall system" *Engineering Structures*, 33(6), pp. 2049-2062, 2011.

[16] DIANA (2014), DIANA users manual - release 9.6, TNO Diana B.V., Delft, The Netherlands.

[17] Lourenço P.B. and Rots J.G., "A multi-surface interface model for the analysis of masonry structures" *Journal of Structural Engineering (ASCE)*, 123(7), pp. 660-668, 1997.

[18] Sigmund V. and Penava D., "Influence of openings, with and without confinement, on cyclic response of infilled R-C frames: An experimental study" *Journal of Earthquake Engineering*, 18(1), pp. 113-146, 2014.

Effect of Concrete Sandwich Infill Panels with Opening on In-plane Behaviour of Steel Frames

Seyed Jafar Hashemi

PhD student, Department of Civil Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran

Javad Razzaghi *

Assistant Professor, Department of Civil Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran

Abdolreza S. Moghadam

Associate Professor, Structural Engineering Research Center, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES), Tehran, Iran

Abstract

With the advent and expansion of new technologies in recent years, masonry infill walls are gradually being replaced by other materials such as sandwich composite panels. Ignoring the effect of concrete sandwich panel (CSP) as infill on the behaviour of framed buildings in the analysis and design process, especially in seismic regions, is not always on the safe side. In the present study, the effect of presence of CSP, as infill, with opening on the in-plane behaviour of steel frames is numerically investigated by using finite element modelling. First, the proposed model is validated by existing experimental data. Next, a parametric study is conducted to evaluate the influence of effective factors e.g. size, type (window and door) and location of the openings (eccentric and central). The results show that the presence of openings within an infill panel modifies the lateral behaviour of the infilled frame by changing the distribution of stresses and formation of compression diagonal struts and leads to a considerable change in the lateral stiffness and strength of the infilled frames.

Keywords: In-plane behaviour, Concrete sandwich panel, Nonlinear finite element, Numerical modelling.

* Corresponding Author: javadr@guilan.ac.ir