

## مطالعه عددی رفتار خارج از صفحه دیوارهای پرکننده بنایی در قاب‌های بتن مسلح

فرهاد آخوندی\*<sup>۱</sup> و سیدجعفر هاشمی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> استادیار سازه، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه هنر اسلامی تبریز  
<sup>۲</sup> استادیار سازه، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک

(دریافت: ۹۷/۳/۲۱، پذیرش: ۹۸/۲/۴، نشر آنلاین: ۹۸/۲/۴)

### چکیده

به منظور شناخت رفتار لرزه‌ای و ارزیابی آسیب‌پذیری قاب‌های بتن مسلح با در نظر گرفتن رفتار خارج از صفحه میان‌قاب‌های مصالح بنایی، تحقیق پیش‌رو انجام شد. بر این اساس ابتدا یک مدل اجزاء محدود غیرخطی به کمک نرم‌افزار DIANA 9.6 توسعه داده شد. پس از صحت‌سنجی مدل پیشنهادی با اطلاعات آزمایشگاهی موجود، اثر عواملی مانند وجود بازشوی مرکزی با ابعاد مختلف، مقاومت فشاری، مقاومت کششی مصالح بنایی و ضخامت میان‌قاب بررسی شد. نتایج نشان داد وجود بازشو، عملکرد خارج از صفحه میان‌قاب در ابتدا افزایش می‌یابد. پس از آن با فراتر رفتن ابعاد بازشو، بیشینه مقاومت به شدت کاهش پیدا می‌کند. با افزایش مقاومت فشاری مصالح بنایی، بیشینه مقاومت خارج از صفحه میان‌قاب به میزان قابل‌توجهی افزایش می‌یابد. همچنین مشخص گردید با افزایش مقاومت کششی مصالح بنایی، بیشینه مقاومت برون صفحه میان‌قاب تغییر چندانی نمی‌کند؛ این در حالی است که سختی مؤثر خارج از صفحه دیوار مصالح بنایی با افزایش مقاومت کششی آن، بهبود می‌یابد.

**کلیدواژه‌ها:** رفتار خارج از صفحه، میان‌قاب مصالح بنایی، قاب بتن مسلح، روش اجزاء محدود غیرخطی.

### ۱- مقدمه

قاب‌های میان‌پر یا مرکب، سهم عمده‌ای از ساختمان‌های موجود و یا در حال ساخت مناطق لرزه‌خیز دنیا را تشکیل می‌دهند. تجربه‌های مربوط به زمین‌لرزه‌های گذشته حاکی از آن است که پر شدن دهانه‌های قاب ساختمانی به طور چشمگیری رفتار سازه را تحت تأثیر قرار داده و عملکردی متفاوت نسبت به قاب خالی از خود نشان می‌دهد. بنابراین طراحی ساختمان‌ها بدون لحاظ نمودن تأثیر میان‌قاب، خسارات مالی و جانی جبران‌ناپذیری را در هنگام زلزله به دنبال خواهد داشت.

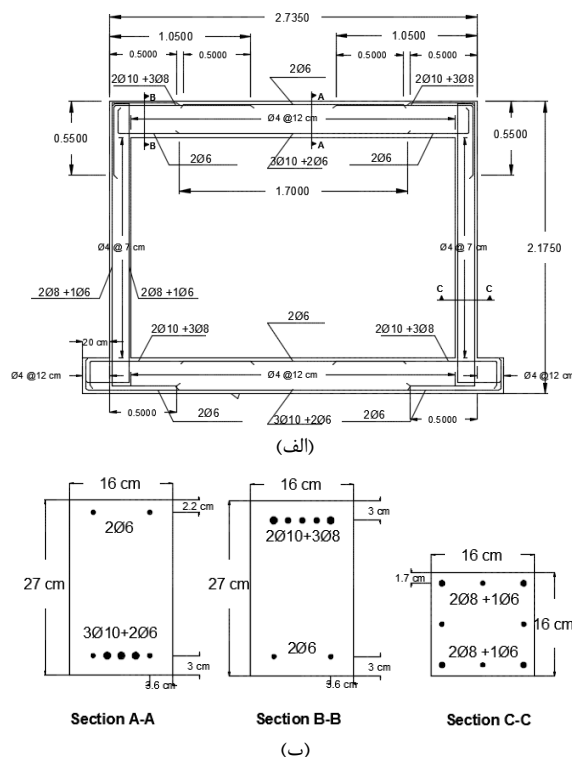
با لحاظ نمودن نقش میان‌قاب‌ها در عملکرد سازه‌ها، دو نوع رفتار برای این اجزا قابل پیش‌بینی خواهد بود: رفتار درون صفحه و رفتار خارج از صفحه که محققین در مطالعات خود بدان تأکید کرده‌اند. هرچند در سال‌های اخیر محققان رفتار خارج از صفحه میان‌قاب‌های بنایی را بیشتر از گذشته مورد توجه قرار داده‌اند، لیکن تحقیقات انجام شده در این زمینه در مقایسه با مطالعات صورت گرفته درباره رفتار درون صفحه میان‌قاب‌ها بسیار اندک است. مهم‌ترین دلایل آن را می‌توان پیچیدگی رفتار خارج از

صفحه دیوار و نیز هزینه بالای انجام مطالعات تجربی در این زمینه دانست.

Drysdale و Essawy (۱۹۸۸) با آزمایش بر روی ۲۱ نمونه دیوار بنایی در مقیاس واقعی تحت بارگذاری خارج از صفحه، عواملی نظیر شرایط مرزی دیوار و وجود بار قائم را بر رفتار خارج از صفحه آن‌ها بررسی نمودند و نشان دادند نحوه شکست پانل‌های بنایی دقیقاً منطبق بر مفهوم تئوری خطوط تسلیم در دال‌هاست. نتایج تحقیقات تجربی Seah و Dawe (۱۹۸۹) بر روی ۹ نمونه قاب فولادی میان‌پر با دیوار مصالح بنایی، حاکی از آن بود که عواملی نظیر مقاومت فشاری پانل میان‌قاب، ابعاد پانل، شرایط مرزی و صلبیت قاب پیرامونی تأثیر چشمگیری بر مقاومت نهایی نمونه دارند. Bashandy و همکاران (۱۹۹۵) بر اساس آزمایش‌های دینامیکی بر روی هشت نمونه قاب مرکب با مقیاس ۱:۲، یک روش تحلیلی به منظور تخمین مقاومت خارج از صفحه نمونه‌های آزمایش‌شده ارائه نمودند. Calvi و Bolognini (۲۰۰۱) با مسلح کردن ملات‌های دیوار بنایی، مقاومت خارج از صفحه میان‌قاب بنایی را بهبود بخشیدند.

\* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۴۱-۳۵۴۱۲۱۳۵

آدرس ایمیل: farhad\_akhundi@yahoo.com (ف. آخوندی)، j-hashemi@araku.ac.ir (س. ج. هاشمی).



شکل ۱- مشخصات نمونه آزمایشگاهی مورد مطالعه: (الف) ابعاد و هندسه قاب میان پر، (ب) ابعاد و نحوه آرماتورگذاری تیر و ستون (Akhoundi, ۲۰۱۶)

مدول الاستیسیته<sup>۳</sup> بتن برابر ۳۱۵۰۰ نیوتن بر میلی متر مربع و مقاومت فشاری و کششی آن به ترتیب معادل ۲۵ و ۲/۳۵ نیوتن بر میلی متر مربع. هم چنین مدول الاستیسیته منشور بنایی، یعنی ترکیب بلوک بنایی و ملات، معادل ۲۳۰۰ نیوتن بر میلی متر مربع و مقاومت فشاری و کششی آن به ترتیب برابر ۱/۷ و ۰/۱ نیوتن بر میلی متر مربع از طریق آزمایش به دست آمد. ضریب ارتجاعی میلگردهای فولادی استفاده شده در قاب بتنی و تنش تسلیم آنها نیز به ترتیب برابر  $2 \times 10^5$  و ۵۰۰ نیوتن بر میلی متر مربع بود.

علاوه بر بار عمود بر صفحه که به صورت گسترده به پانل میان قاب اعمال شد، دو بار گسترده هم عرض ستون های قاب بتنی به عنوان بار انتقالی از ستون های طبقات فوقانی به ستون ها اعمال شد. طبق آنچه که در آزمایش انجام شده بود، بارهای قائم برابر ۱۶۰ کیلونیوتن، متناظر با ۴۰ درصد ظرفیت محوری ستون ها، بود. برپایش آزمایشگاهی، الگوی بارگذاری خارج از صفحه و نمودار نیرو-جابجایی دو نمونه از قاب های میان پر که از نتایج آن در این تحقیق استفاده شده، در شکل (۲) آمده است. سایر اطلاعات مورد نیاز و نتایج کامل آزمایشگاهی، از مرجع مذکور (Akhoundi, ۲۰۱۶) قابل حصول است.

Hashemi و Mosalam (۲۰۰۷) طی مطالعات جامع تجربی و عددی خود، اثر هم زمان نیروی درون صفحه و برون صفحه بر میان قاب بنایی را بررسی نمودند و دریافتند با افزایش نیروی خارج از صفحه اعمالی به دیوار، ظرفیت درون صفحه قاب میان پر نیز به شدت کاهش می یابد. آنان به منظور تکمیل تحقیقات خود، به ریز مدل سازی<sup>۱</sup> و درشت مدل سازی<sup>۲</sup> میان قاب های بنایی به منظور بررسی تأثیر هم زمانی بارهای درون صفحه و برون صفحه پرداختند. مدل های مذکور، پس از آن، توسط Kadysiewski و Mosalam (۲۰۰۹) توسعه یافت و نواقص آن رفع گردید. رفتار خارج از صفحه میان قاب های بنایی با آزمایش سه نمونه بزرگ مقیاس در حالت های با و بدون خسارت اولیه توسط Furtado و همکاران (۲۰۱۶) بررسی شد. یافته های تحقیق نشان داد ظرفیت تغییر مکان خارج از صفحه میان قاب بنایی بدون خسارت بسیار بالاتر از نمونه دارای خسارت اولیه است. هم چنین حداکثر مقاومت خارج از صفحه نمونه بدون خسارت حدود چهار برابر نمونه با خسارت اولیه به دست آمد.

هدف از انجام تحقیق پیش رو شناخت رفتار لرزه ای و ارزیابی آسیب پذیری قاب های بتن مسلح با در نظر گرفتن رفتار خارج از صفحه میان قاب های مصالح بنایی است. بر این اساس و با انجام مطالعات عددی به روش اجزاء محدود، اثر عوامل مؤثر بر رفتار خارج از صفحه میان قاب های بنایی که کم تر مورد توجه سایر پژوهشگران قرار گرفته، از قبیل وجود باز شو، مقاومت فشاری و کششی المان بنایی و نیز ضخامت پانل میان قاب، بررسی شده است که نتایج آن در ادامه از نظر خواهد گذشت.

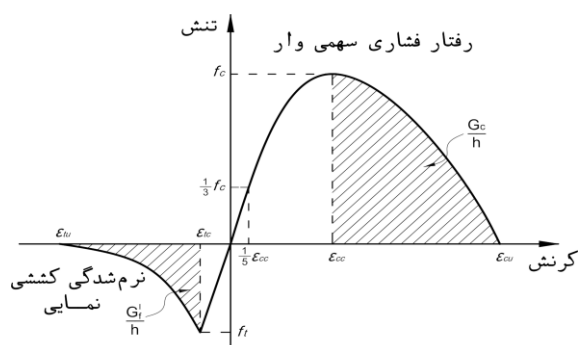
## ۲- نمونه های آزمایشگاهی

برای پیشبرد اهداف تحقیق حاضر، از نتایج یک مطالعه آزمایشگاهی بر روی قاب بتنی با میان قاب مصالح بنایی تحت بارگذاری خارج از صفحه استفاده شد. تحقیق مذکور توسط مؤلف اول در قالب رساله دکتری در دانشگاه Minho پر تغال انجام شده است (Akhoundi, ۲۰۱۶). شش نمونه قاب میان پر بزرگ مقیاس تحت اثر بارگذاری خارج از صفحه که توسط یک کیسه هوا به صورت تغییر مکان کنترل به میان قاب بنایی اعمال می شد، آزمایش شدند. از این شش نمونه، یک نمونه دارای بازشوی مرکزی به میزان ۱۲/۸٪ بود (منظور نسبت سطح باز شو به سطح میان قاب است). مشخصات یکی از نمونه های آزمایشگاهی که قرار است از نتایج آن در این تحقیق استفاده شود، در شکل (۱) آمده است. نسبت بعدی پانل میان قاب، نسبت طول دهانه به ارتفاع، برای نمونه های آزمایشگاهی برابر ۱/۵ بود. مشخصات مصالح به کار رفته در نمونه های آزمایشگاهی به شرح ذیل می باشد:

3. Modulus of Elasticity

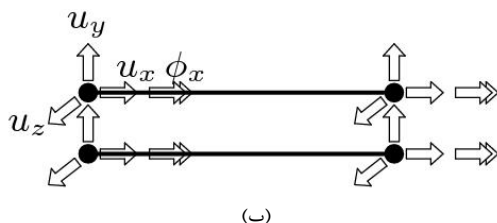
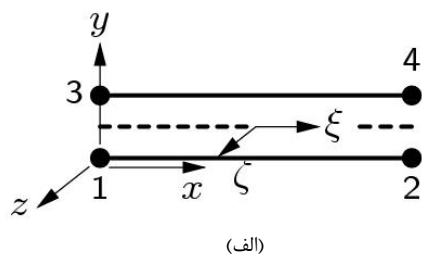
1. Micro modelling  
2. Macro modelling

شبیه‌سازی شدند. برای این منظور از المان ایزوپارامتریک چهار گرهی و چهار وجهی Q20SH استفاده شد. برای شبیه‌سازی رفتار غیرخطی بتن و مصالح بنایی که هر دو از نوع مصالح تُرد هستند، از مدل ترک کرنش مجموع<sup>۲</sup> (کلی) که بر اساس مفهوم ترک پخشی ثابت<sup>۳</sup> در نرم‌افزار موجود بود، استفاده شد. بر این اساس مدل‌های رفتاری نمایی<sup>۴</sup> و سهمی‌وار<sup>۵</sup> که نمودار آن‌ها در شکل (۳) آمده است، به‌ترتیب برای شبیه‌سازی رفتار مصالح تُرد در کشش و فشار استفاده شد.

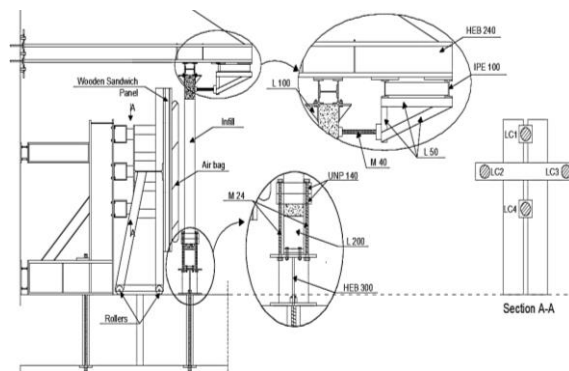


شکل ۳- روابط تنش-کرنش تعریف‌شده به‌منظور شبیه‌سازی رفتار مصالح تُرد

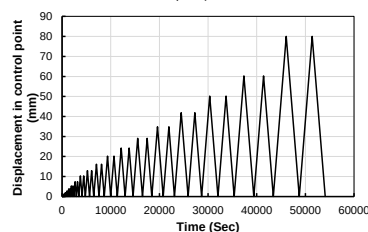
رفتار آرماتور فولادی به صورت منحنی ایده‌آل دوخطی، بدون سخت‌شدگی کرنشی و کاملاً مدفون در بتن تعریف شد. برای تأمین شرایط مرزی بین قاب و میان‌قاب، از یک المان حدفاصل<sup>۶</sup> ۲+۲ گرهی به‌نام L16IF با ضخامت صفر استفاده شد (شکل (۴)).



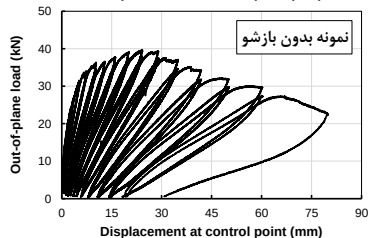
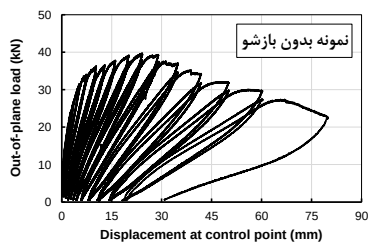
شکل ۴- المان حدفاصل L16IF مورد استفاده برای تحقق شرایط مرزی قاب-پانل: الف) پیکربندی، ب) تغییر مکان‌های گرهی



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۲- الف) برپایش آزمایشگاهی، ب) الگوی بارگذاری خارج از صفحه، ج) نمودار نیرو-جابجایی نمونه‌ها (Akhoundi, ۲۰۱۶)

### ۳- مدل‌سازی اجزاء محدود

#### ۳-۱- نحوه مدل‌سازی

مدل‌سازی عددی به کمک نرم‌افزار اجزاء محدود DIANA 9.6 انجام شد. علت استفاده از نرم‌افزار مذکور، توانایی آن در شبیه‌سازی رفتار غیرخطی مصالح تُرد بود که در مطالعات مشابه توسط محققین مورد تأکید قرار گرفته بود (Al-Chaar و Mehrabi, ۲۰۰۸) و (Hashemi و همکاران, ۲۰۱۸). با توجه به این که بارگذاری به صورت عمود بر صفحه میان‌قاب اعمال می‌شد، لذا قاب بتنی و نیز میان‌قاب بنایی به کمک المان پوسته خمیده<sup>۱</sup>

4. Exponential  
5. Parabolic  
6. Interface element

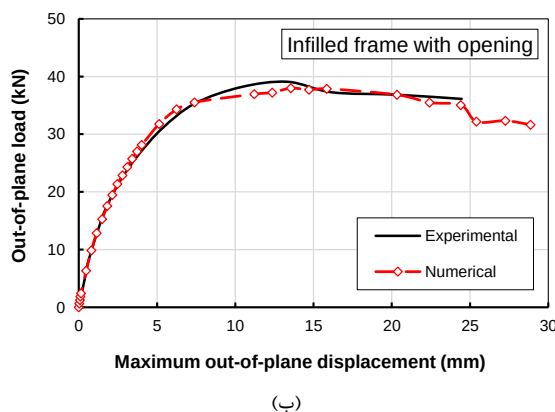
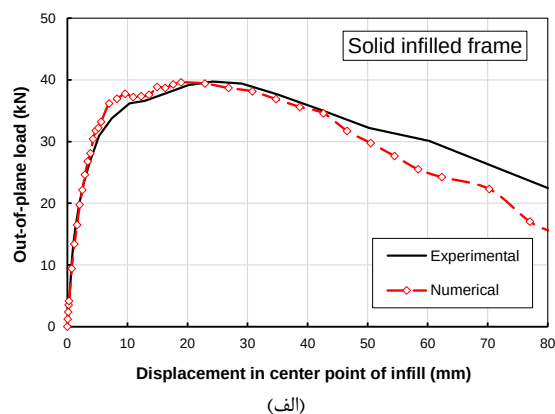
1. Curved shell element  
2. Total strain crack model  
3. Fixed smeared crack concept

شکل (۶) نمای دو بعدی از مدل ایجاد شده را به تصویر کشیده است. اندازه مش‌های ایجاد شده، به طور تقریبی برابر ۵۰ میلی‌متر بود و شرایط تکیه‌گاهی تیر پایینی به صورت کاملاً مقید تعریف شد.

### ۳-۲- اعتبار سنجی صحت مدل‌سازی

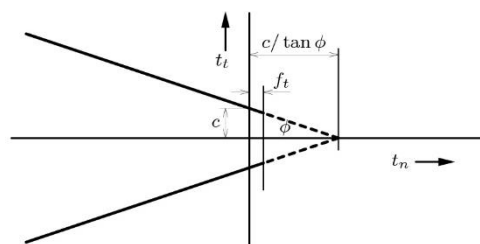
برای بررسی صحت مدل‌سازی، دو مدل ایجاد شد. مدل اول، قاب میان‌پر با پوشش کامل دهانه بود و در مدل دوم، یک بازشوی مرکزی مطابق مشخصات نمونه آزمایشگاهی متناظر، در پانل میان‌قاب تعبیه گردید. مدل‌های ایجاد شده تحت بارگذاری یکنواخت که به صورت بار گسترده به گره‌های المان‌های میان‌قاب و در جهت عمود بر صفحه آن اعمال می‌شد، تحلیل شدند.

مقایسه نمودارهای نیرو-تغییر مکان برای مدل‌های قاب بتنی دارای میان‌قاب با و بدون بازشو در شکل (۷) آمده است. همان‌گونه که در تصاویر مشاهده می‌شود تطابق خوبی، هم از نظر سختی و هم از لحاظ مقاومت نهایی، بین نتایج مدل‌سازی عددی و مطالعه آزمایشگاهی وجود دارد.



شکل ۷- مقایسه منحنی بار- تغییر مکان مدل‌سازی عددی و مطالعه آزمایشگاهی: الف) مدل بدون بازشو، ب) مدل دارای بازشو

این المان که بر اساس درون‌یابی خطی عمل می‌کند، به راحتی به المان پوسته مورد استفاده در این تحقیق، Q20SH، متصل می‌شود. رفتار المان تماسی مطابق شکل (۵) براساس معیار اصطکاک کولمب<sup>۱</sup> در نظر گرفته شد. مشخصات ورودی به نرم‌افزار برای المان تماسی در جدول (۱) آمده است. این مقادیر براساس دو معیار در نظر گرفته شدند: اول؛ تطابق منحنی بار- تغییر مکان مدل با نمونه آزمایشگاهی که بیانگر صحت رفتار کلی مدل ایجاد شده بود. دوم؛ مقایسه تنش‌های توزیع شده در پانل میان‌قاب و الگوی ترک‌خوردگی در آن برای مدل و نمونه واقعی بود که نتایج آن در بخش بعد ارائه خواهد شد.

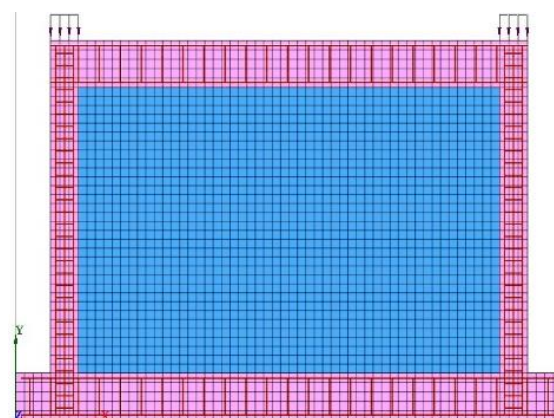


شکل ۵- معیار اصطکاک کولمب تعریف شده به عنوان رفتار المان تماسی

جدول ۱- مشخصات مربوط به المان حدفاصل به منظور تأمین

شرایط مرزی قاب- پانل

| مقدار                 | مشخصه              |
|-----------------------|--------------------|
| 190 N/mm <sup>3</sup> | سختی عمودی         |
| 100 N/mm <sup>3</sup> | سختی برشی          |
| 0.3 N/mm <sup>2</sup> | چسبندگی            |
| 30°                   | زاویه اصطکاک داخلی |
| 0.5 N/mm <sup>2</sup> | مقاومت کششی        |



شکل ۶- نمای دوبعدی از مدل قاب میان‌پر مورد مطالعه

1. Coulomb friction criterion

البته عدم تطابق در بخش‌هایی از نمودارها به خصوص در مراحل پس از مقاومت حداکثر<sup>۱</sup> را می‌توان به برخی ساده‌سازی‌ها در مدل و نیز رفتار کاملاً غیرخطی نمونه‌های آزمایشگاهی پس از زوال مقاومت نسبت داد. همان‌طور که پیش از این ذکر شد برای صحت سنجی مدل، علاوه بر نمودار نیرو- تغییر مکان، نحوه گسترش ترک‌ها در پانل میان‌قاب نیز مورد توجه قرار گرفت. مقایسه الگوی ترک‌خوردگی در مدل و نمونه آزمایشگاهی در شکل (۸) بیانگر عملکرد مناسب مدل ایجاد شده تحت بار خارج از صفحه اعمالی است. بنابراین به دلیل تطابق خوب رفتار مدل پیشنهادی با نمونه آزمایشگاهی، می‌توان مطالعات پارامتری موردنظر را انجام داد.

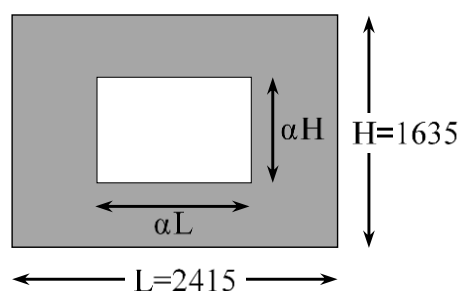
#### ۴- مطالعه پارامتری، نتایج و بحث

##### ۴-۱- وجود بازشوی مرکزی

در این بخش، مدل‌های قاب میان‌پر با وجود بازشوی مرکزی در پانل میان‌قاب با ابعاد مختلف ایجاد و مورد ارزیابی قرار گرفت. برای این منظور ابعاد بازشو، مطابق شکل (۹)، به صورت ضربی از ابعاد پانل میان‌قاب تعریف شد و در مدل‌ها منظور گردید. مشخصات مدل‌های مورد مطالعه در این قسمت به طور خلاصه در جدول (۲) ارائه شده است. در جدول مزبور، پارامتر  $A$  نسبت مساحت بازشو به سطح میان‌قاب، به صورت رابطه (۱) تعریف شده است:

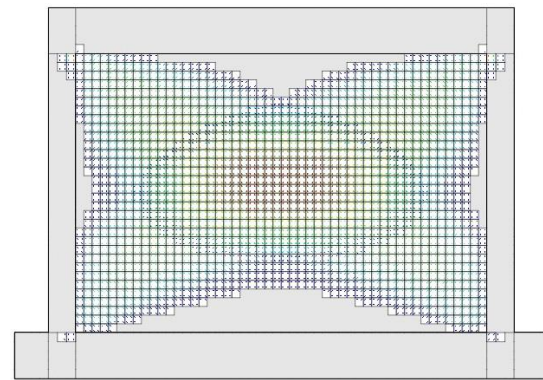
$$A = \frac{A_o}{A_p} \quad (1)$$

که در آن  $A_o$  مساحت بازشو و  $A_p$  سطح پانل میان‌قاب می‌باشد.

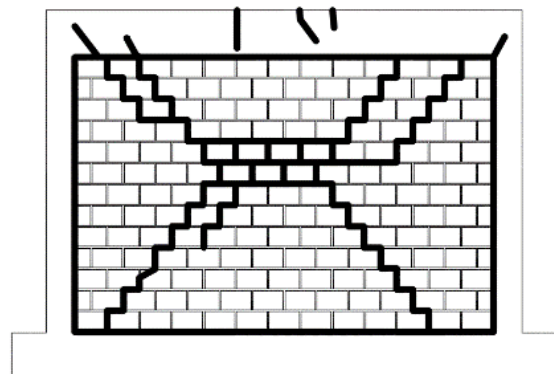


شکل ۹- هندسه بازشوی مرکزی در میان‌قاب (ابعاد به میلی‌متر)

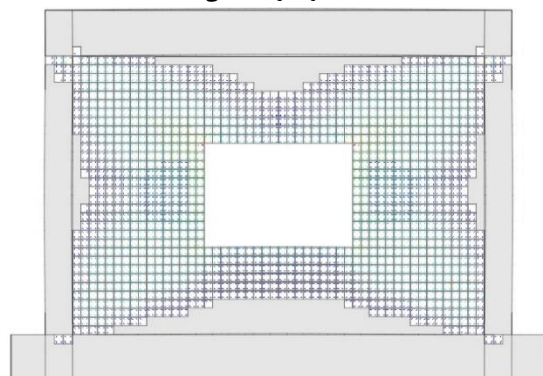
نمودار نیرو- تغییر مکان مدل‌های دارای بازشو در شکل (۱۰) آمده است. همچنین برای مقایسه بهتر، تغییرات نیرو بر واحد سطح میان‌قاب در برابر حداکثر تغییر مکان خارج از صفحه دیوارها در شکل (۱۱) رسم شده است.



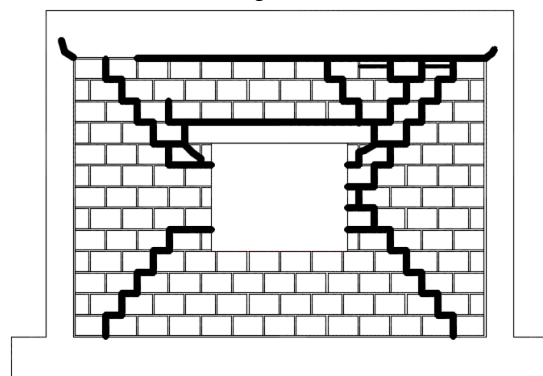
مدل



نمونه آزمایشگاهی



مدل



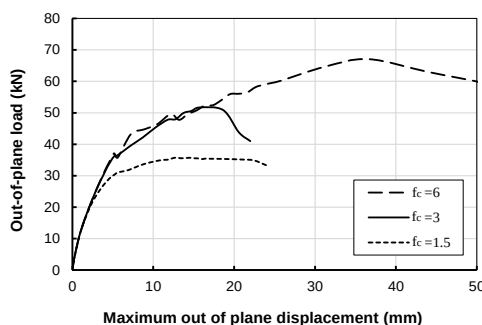
نمونه آزمایشگاهی

شکل ۸- نحوه توزیع ترک در مدل‌ها و مقایسه آن با نمونه‌های آزمایشگاهی

دارای بازشو (مدل‌های با نام IFO) از نمونه بدون بازشو (SIF)<sup>۲</sup> بیشتر است که دلیل آن را می‌توان به کاهش جرم دیوارهای دارای بازشو نسبت به میان‌قاب بدون بازشو نسبت داد. بنابراین می‌توان گفت در هنگام وقوع زمین‌لرزه، احتمال فروریزش دیوارهای دارای بازشو نسبت به میان‌قاب با پوشش کامل دهانه و جزئیات اجرایی یکسان کم‌تر است. روابط مذکور در آیین‌نامه زلزله ایران (استاندارد ۲۸۰۰، ۱۳۹۳) برای محاسبه نیروی جانبی مؤثر بر اجزای غیرسازه‌ای نیز مبنی بر همین مسئله می‌باشد. همچنین از نمودارهای رسم شده در شکل‌های (۱۰) و (۱۱) می‌توان دریافت مدل‌های دارای بازشو با ابعاد بزرگ‌تر نسبت به مدل‌های دارای بازشو کوچک‌تر، سختی اولیه خارج از صفحه بیشتری دارند. علت آن را می‌توان کم شدن فاصله نقطه موردنظر- نقطه‌ای که دارای حداکثر تغییر مکان خارج از صفحه است؛ تا محل اتصال پانل به قاب در نمونه‌های دارای بازشو در مقایسه با نمونه قاب میان‌پر کامل، که موقعیت آن در مرکز پانل است، دانست.

#### ۴-۲- تأثیر مقاومت فشاری مصالح بنایی

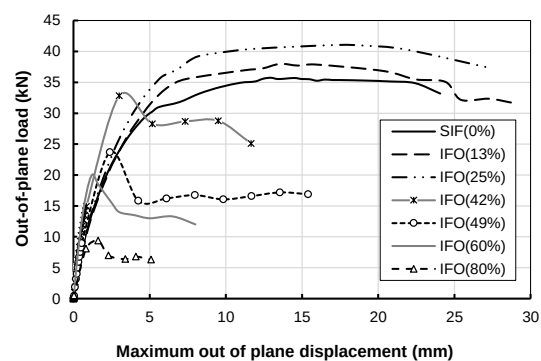
برای مطالعه تأثیر مقاومت فشاری مصالح بنایی میان‌قاب، سه مدل متفاوت با مقاومت‌های فشاری مختلف شامل ۱/۵، ۳ و ۶ نیوتن بر میلی‌متر مربع ایجاد شد که نتایج آن در شکل (۱۲) قابل مشاهده است. همان‌گونه که در شکل (۱۲) ملاحظه می‌شود، با افزایش مقاومت فشاری مصالح بنایی، بیشینه مقاومت خارج از صفحه میان‌قاب به میزان قابل‌توجهی افزایش می‌یابد. با افزایش مقاومت فشاری از ۱/۵ به ۳ و از ۳ به ۶ نیوتن بر میلی‌متر مربع، حداکثر مقاومت خارج از صفحه میان‌قاب به ترتیب ۴۴٪ و ۳۰٪ افزایش داشته است. علاوه بر آن، با افزایش جابه‌جایی متناظر حد نهایی، شکل‌پذیری قاب‌های میان‌پر نیز با افزایش مقاومت فشاری مصالح بنایی، بهبود می‌یابد. همچنین مشاهده می‌شود، تغییر مقاومت فشاری مصالح میان‌قاب، تأثیر چندانی بر سختی اولیه خارج از صفحه قاب‌ها ندارد.



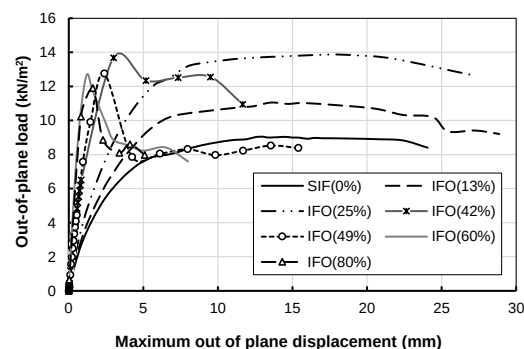
شکل ۱۲- مقایسه منحنی نیرو- تغییر مکان برای مدل‌های قاب میان‌پر با مقاومت فشاری مختلف مصالح بنایی

#### جدول ۲- مشخصات مدل‌های قاب میان‌پر دارای بازشوی مرکزی

| نام مدل   | ابعاد بازشو (میلی‌متر) |        | A (%) |
|-----------|------------------------|--------|-------|
|           | طول                    | ارتفاع |       |
| SIF       | ۰/۰۰                   | ۰/۰۰   | ۰/۰۰  |
| IFO (13%) | ۸۷۱                    | ۵۸۹    | ۱۳    |
| IFO (25%) | ۱۲۰۸                   | ۸۱۸    | ۲۵    |
| IFO (42%) | ۱۵۶۵                   | ۱۰۶۰   | ۴۲    |
| IFO (49%) | ۱۶۹۰                   | ۱۱۴۵   | ۴۹    |
| IFO (60%) | ۱۸۷۰                   | ۱۲۶۷   | ۶۰    |
| IFO (80%) | ۲۱۶۰                   | ۱۴۶۲   | ۸۰    |

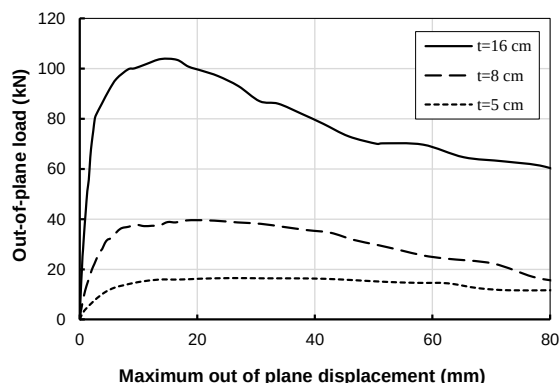


شکل ۱۰- مقایسه منحنی نیرو- تغییر مکان برای مدل‌های قاب میان‌پر دارای بازشو مرکزی

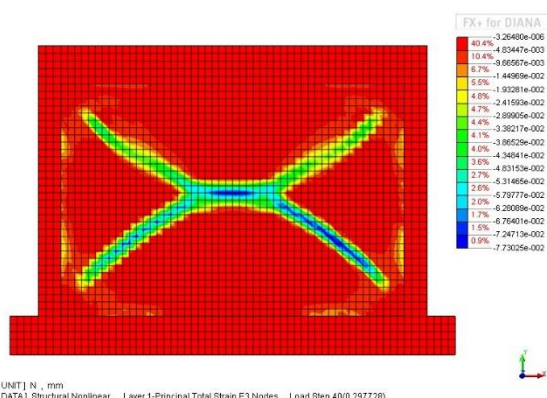


شکل ۱۱- تغییرات نیرو بر واحد سطح میان‌قاب در برابر تغییر مکان خارج از صفحه برای مدل‌های مورد مطالعه

لازم به توضیح است برای رسم نمودارهای شکل (۱۱)، سطح مؤثر میان‌قاب (مساحت دیوار با کسر مساحت بازشو) مدنظر قرار گرفته است. مقایسه منحنی‌ها نشان می‌دهد با افزایش ابعاد بازشو و رسیدن سطح بازشو به یک سطح بهینه، حدود ۳۰ تا ۴۰ درصد مساحت پانل میان‌قاب، بیشینه مقاومت خارج از صفحه میان‌قاب افزایش می‌یابد. پس از آن، افزایش سطح بازشو با کاهش حداکثر مقاومت خارج از صفحه پانل همراه است. همان‌طور که در شکل (۱۱) قابل مشاهده است، بیشینه مقاومت خارج از صفحه مدل‌های



شکل ۱۴- مقایسه منحنی نیرو- تغییر مکان برای مدل های قاب میان پر با ضخامت مختلف پانل میان قاب



شکل ۱۵- کرنش اصلی ایجاد شده در پانل میان قاب در گام پایانی تحلیل

در مدل های مذکور بیشینه مقاومت خارج از صفحه پانل ها ۱۶/۵، ۳۹/۶ و ۱۰۳/۸ کیلونیوتن به ترتیب برای میان قاب های با ضخامت ۵، ۸ و ۱۶ سانتی متر است. به عبارت دیگر با افزایش ضخامت پانل میان قاب از ۵ به ۸ و ۱۶ سانتی متر، ارتقای ۲/۴ و ۶/۲ برابری در بیشینه مقاومت خارج از صفحه دیوارهای بنایی مشاهده می شود.

در انتها یادآور می شود در همه قاب های میان پر تحت بارگذاری خارج از صفحه، کرنش اصلی ایجاد شده در پانل میان- قاب در مراحل پایانی تحلیل به صورت تصویر نشان داده شده در شکل (۱۵) است. بر اساس آن خطوط سیلان ایجاد شده در میان- قاب و نحوه شکست پانل در گام پایانی تحلیل قابل مشاهده است. متذکر می گردد در صورت تغییر نسبت بُعدی قاب، الگوی مذکور می تواند دستخوش تغییر شود.

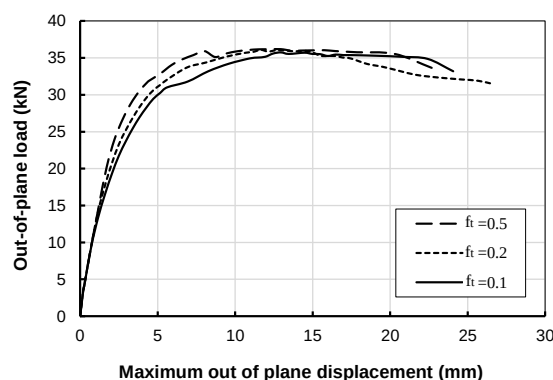
## ۵- نتیجه گیری

در این مطالعه، رفتار خارج از صفحه دیوارهای پرکننده مصالح بنایی در قاب های بتن مسلح مورد ارزیابی قرار گرفت. برای این

لازم به توضیح است در این جا ضریب ارتجاعی مصالح ثابت فرض شده است تا اثر مقاومت فشاری به تنهایی و به طور ملموس مشاهده شود. در مطالعات تجربی مشاهده شده است که افزایش مقاومت فشاری منجر به افزایش مدول الاستیسیته نیز خواهد شد. لذا این افزایش در مدول الاستیسیته مصالح، افزایش سختی مدل- های قاب میان پر را نیز به همراه خواهد داشت.

## ۳-۴- تأثیر مقاومت کششی مصالح بنایی

برای مطالعه تأثیر مقاومت کششی مصالح بنایی میان قاب، سه مقدار ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۵ برحسب نیوتن بر میلی متر مربع به عنوان مقاومت کششی در نظر گرفته شد که نتایج آن در شکل (۱۳) آمده است. بر اساس نتایج تحلیل ها، مشخص گردید با افزایش مقاومت کششی مصالح بنایی، بیشینه مقاومت برون صفحه میان- قاب و سختی اولیه قاب های میان پر تغییر چندانی نمی کند؛ این در حالی که است که سختی مؤثر خارج از صفحه دیوار مصالح بنایی با افزایش مقاومت کششی آن، بهبود می یابد. سختی مؤثر را می توان شیب پاره خط واصل از مبدأ مختصات تا نقطه ای که تسلیم نمونه اتفاق می افتد، بر روی نمودار نیرو- جابه جایی در نظر گرفت (ASCE 41-17، ۲۰۱۷).



شکل ۱۳- مقایسه منحنی نیرو- تغییر مکان برای مدل های قاب میان پر با مقاومت کششی مختلف مصالح بنایی

## ۴-۴- تأثیر ضخامت میان قاب

ضخامت پانل میان قاب از عوامل مؤثر بر رفتار درون صفحه و برون صفحه میان قاب است. برای مطالعه اثر این عامل مهم، مدل- هایی با ضخامت پانل متفاوت ایجاد و تحلیل شد که نتایج آن در نمودار شکل (۱۴) آمده است. همان گونه که دیده می شود، افزایش ضخامت میان قاب، تأثیر چشمگیری در افزایش سختی و مقاومت برون صفحه سیستم مورد مطالعه دارد؛ به طوری که سختی خارج از صفحه قاب های میان پر با ضخامت پانل ۸ و ۱۶ سانتی متر به ترتیب ۳/۴ و ۱۹/۳ برابر سختی خارج از صفحه قاب متناظر با ضخامت پانل ۵ سانتی متر است.



- of Minho, Campus of Azurém, Guimarães, Portugal, 2016.
- Al-Chaar GK, Mehrabi A, "Constitutive models for nonlinear finite element analysis of masonry prisms and infill walls", U.S. Army Engineer Research and Development Center, Washington DC, US, 2008.
- American Society of Civil Engineers (ASCE), "Seismic evaluation and retrofit of existing buildings", ASCE/SEI 41-13, Reston VA, US, 2017.
- Bashandy T, Rubiano N, Klingner R, "Evaluation and analytical verification of infilled frames test data", Army Construction Engineering Research Laboratories, Champaign IL, US, 1995.
- Calvi GM, Bolognini D, "Seismic response of reinforced concrete frames infilled with weakly reinforced masonry panels", Journal of Earthquake Engineering, 2001, 5 (2), 153-185.
- Dawe JL, Seah CK, "Out-of-plane resistance of concrete masonry infilled panels", Canadian Journal of Civil Engineering, 1989, 16 (6), 854-864.
- DIANA Release 9.6, TNO Diana B.V., Delft, the Netherlands, 2014.
- Drysdale RG, Essawy AS, "Out-of-plane bending of concrete block walls", Journal of Structural Engineering, 1988, 114 (1), 121-133.
- Furtado A, Rodrigues H, Arêde A, Varum H, "Experimental evaluation of out-of-plane capacity of masonry infill walls", Engineering Structures, 2016, 111, 48-63.
- Hashemi A, Mosalam KM, "Seismic evaluation of reinforced concrete buildings including effects of masonry infill walls", Pacific Earthquake Engineering Research Center, Berkeley, US, 2007.
- Hashemi SJ, Razzaghi J, Moghadam AS, Lourenço PB, "Cyclic testing of steel frames infilled with concrete sandwich panels", Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2018, 18 (2), 557-572.
- Kadysiewski S, Mosalam KM, "Modeling of unreinforced masonry infill walls considering in-plane and out-of-plane interaction", Pacific Earthquake Engineering Research Center, Berkeley, US, 2009.

منظور، ابتدا اطلاعات آزمایشگاهی دو نمونه قاب میان پر با و بدون بازشو تحت بارگذاری خارج از صفحه ارائه شد. سپس یک مدل اجزای محدود غیرخطی به کمک نرم افزار DIANA 9.6 (۲۰۱۴) توسعه داده شد. پس از اعتبارسنجی صحت مدل سازی، مطالعه پارامتری برای بررسی تأثیر عواملی نظیر ابعاد بازشوی مرکزی، مقاومت فشاری و کششی مصالح بنایی و نیز ضخامت میان قاب بر رفتار برون صفحه قاب های میان پر انجام شد. نتایج کلی به دست آمده را می توان به صورت زیر خلاصه کرد:

(۱) در بررسی اثر وجود بازشو در میان قاب با ابعاد مختلف مشخص شد با افزایش ابعاد بازشو و رسیدن سطح بازشو به یک سطح بهینه، حدود ۳۰ تا ۴۰ درصد مساحت پانل میان قاب، بیشینه مقاومت خارج از صفحه میان قاب افزایش می یابد. پس از آن، افزایش سطح بازشو با کاهش حداکثر مقاومت خارج از صفحه پانل همراه است.

(۲) با توجه به کاهش جرم میان قاب های دارای بازشو نسبت به میان قاب با پوشش کامل دهانه، بیشینه مقاومت خارج از صفحه مدل های دارای بازشو از نمونه بدون بازشو بیشتر به دست آمد و این بدان معناست که در هنگام وقوع زمین لرزه، احتمال فروریزش دیوارهای دارای بازشو نسبت به میان قاب با پوشش کامل دهانه کم تر است. نتایج تحلیل ها هم چنین نشان داد مدل های دارای بازشو با ابعاد بزرگ تر نسبت به مدل های دارای بازشوی کوچک تر، دارای سختی اولیه خارج از صفحه بیشتری هستند.

(۳) افزایش مقاومت فشاری مصالح بنایی، علاوه بر بهبود شکل پذیری میان قاب ها، بیشینه مقاومت خارج از صفحه پانل ها را نیز به میزان قابل توجهی افزایش می دهد.

(۴) سختی مؤثر خارج از صفحه دیوارهای مصالح بنایی با افزایش مقاومت کششی آن، بهبود می یابد.

(۵) افزایش ضخامت میان قاب، سختی و مقاومت برون صفحه آن را به میزان قابل توجهی بهبود می بخشد.

## ۶- قدرتدانی

این تحقیق در قالب طرح پژوهشی شماره ۲۴۲۳ مورخ ۱۳۹۶/۳/۹ (کد طرح: ۱۳۳) مصوب دانشگاه هنر اسلامی تبریز انجام شده است. مؤلف اول مراتب تقدیر و تشکر خود از آن دانشگاه، به جهت حمایت مالی پروژه ابراز می دارد.

## ۷- مراجع

- مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، "آیین نامه طراحی ساختمان ها در برابر زلزله (استاندارد ۲۸۰۰)"، نشریه شماره ض-۲۵۳، ویرایش چهارم، ۱۳۹۳.
- Akhoundi F, "Strategies for seismic strengthening of masonry infilled RC frames", PhD thesis, University



## EXTENDED ABSTRACT

# Parametric Analysis of Out-of-Plane Behavior of Masonry Infilled RC Frames

Farhad Akhouni<sup>a,\*</sup>, Seyed Jafar Hashemi<sup>b</sup>

<sup>a</sup> *Architecture and Urbanism Department, Tabriz Islamic Art University, Tabriz, Iran*

<sup>b</sup> *Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Arak University, Arak, Iran*

**Received:** 12 June 2018; **Accepted:** 25 April 2019

### Keywords:

Masonry infill, Non-linear finite element method, Out-of-plane behavior, RC frame.

## 1. Introduction

Masonry Infills are assumed as non-structural elements and are not considered in the design process of the infilled frames while their presence can affect the local or global behavior of infilled frames. In the present study, the out-of-plane behavior of masonry infilled frames was studied numerically in the finite element software of DIANA. To have an accurate numerical model, an experimental test was performed and the numerical model was validated based on the experimental results. The influence of different parameters such as the presence of central opening and Infill's mechanical and geometrical properties were thoroughly investigated. The results showed that the presence of a central opening can have a major influence on the out-of-plane response of the infilled frames. It is also concluded that infills with higher compressive strength and larger thickness present better out-of-plane response in terms of strength and stiffness. Finally, it is obtained that using infills with higher tensile strength does not increase their out-of-plane strength.

## 2. Methodology

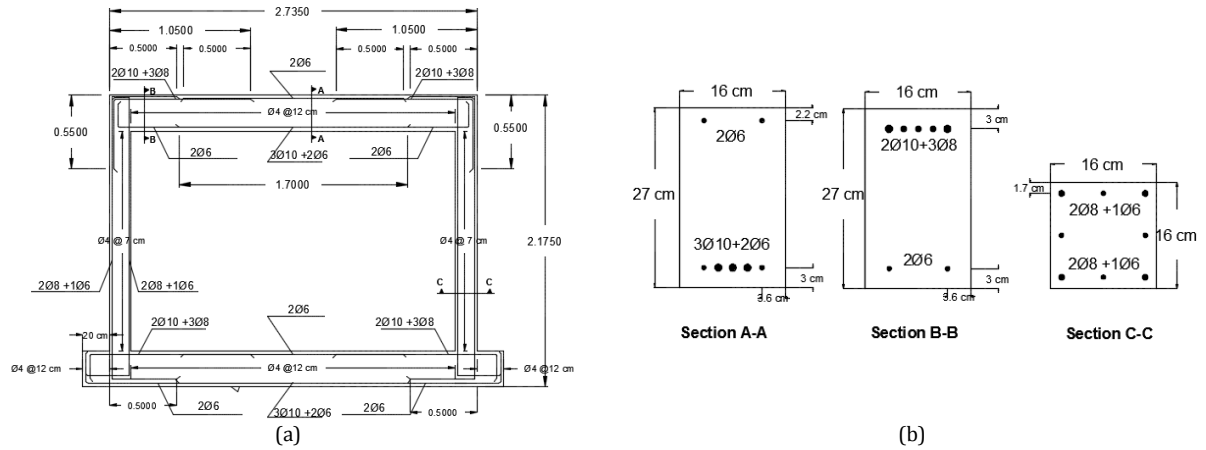
### 2.1. Experimental tests

Numerical and parametric analysis are based on the experimental results obtained in (Akhouni, 2016). In the experimental campaign six reduced scale specimens were tested under uniform out-of-plane loading applied by an airbag. The geometry of the specimens is shown in Fig. 1.

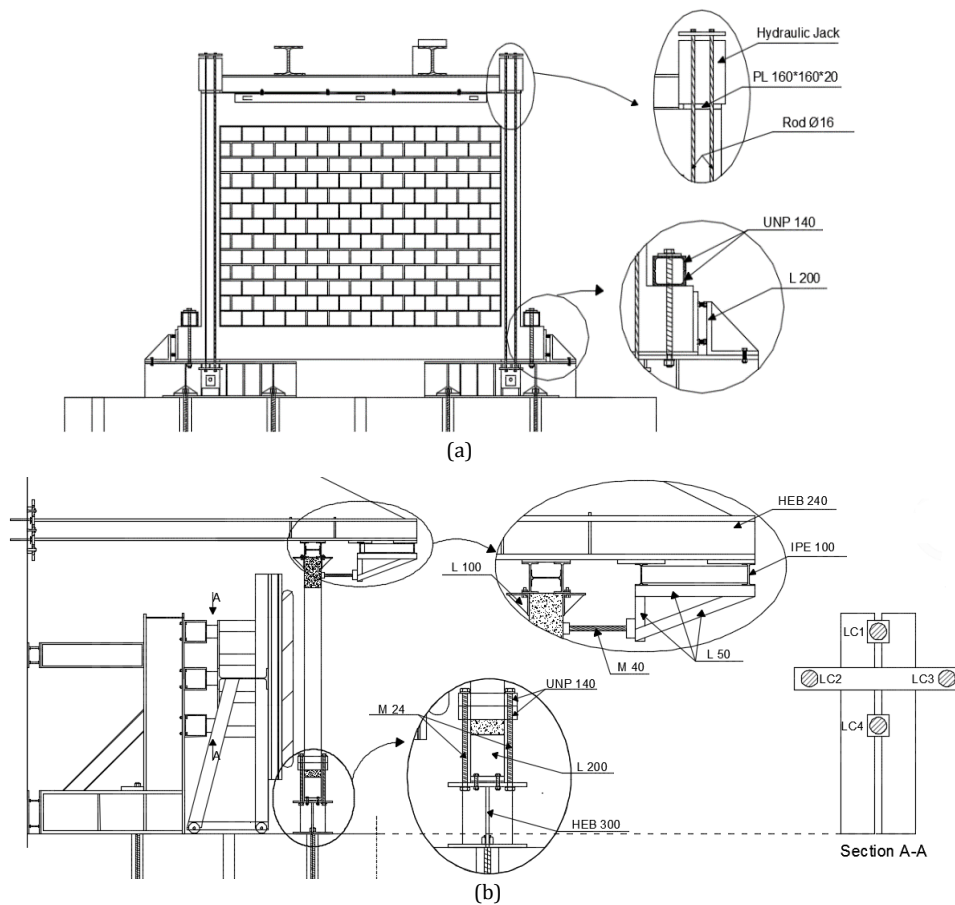
The test setup designed for out-of-plane tests is shown in Fig. 2. As it is clear from the figures, two vertical jacks were placed at top of the columns to apply a vertical load of 160 kN, corresponding to 40% of the column's axial force capacity. The out-of-plane loading was applied by means of an airbag installed between the masonry infill and a stiff wooden sandwich panel that was attached to a L-shaped reaction steel structure composed of HEB360 steel profiles.

\* Corresponding Author

E-mail addresses: f.akhouni@tabriziau.ac.ir (Farhad Akhouni), sjhashemi@outlook.com (Seyed Jafar Hashemi).



**Fig. 1.** Test specimen: a) Geometry of the specimen, b) Cross-section of RC frame



**Fig. 2.** Test setup for out-of-plane testing: a) Front view, b) Side view

## 2.2. Numerical Modeling

The numerical modeling of the specimens was carried out in DIANA software (2014) by using four-node shell elements for RC frame and masonry infill and 2+2 node interface elements for the interface between infill and RC frame. The non-linear behavior of the concrete and masonry was represented by a Total Strain Crack Model based on the fixed stress-strain law concept available in DIANA. Exponential and parabolic constitutive laws were used to describe the tensile and compressive behavior of concrete and masonry infill, respectively.

The Coulomb Friction Law was also used to describe the nonlinear behavior of the interface connecting the RC frame to masonry infill. The final representation of the numerical model is shown in Fig. 3.

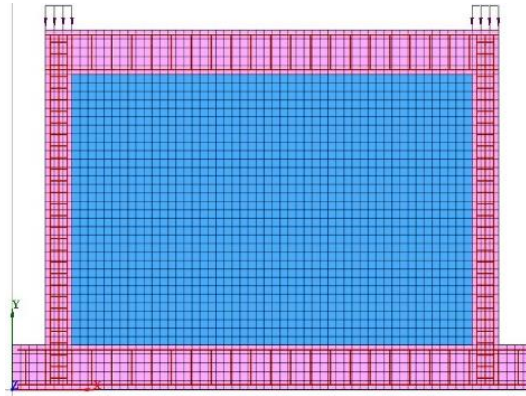


Fig. 3. Numerical model of the specimen

### 2.3. Validation of the Numerical Model

The numerical model was validated by considering the force-displacement diagrams of the experimental tests along with the propagation of the cracks due to out-of-plane loading. In the first step, the non-linear parameters of the interface were obtained to have a similar response with the experimental test as shown in Fig. (4-a). Then the validated model was analyzed to investigate how it could predict the out-of-plane response of the solid infilled frame. In this case, as shown in (4-b), it can satisfactorily predict the out-of-plane response of the solid infilled frame.

After the numerical model was validated, the parametric analysis was performed to deeply investigate the influence of parameters such as mechanical properties of the infill, its thickness, and presence of opening on the out-of-plane response of the specimens.

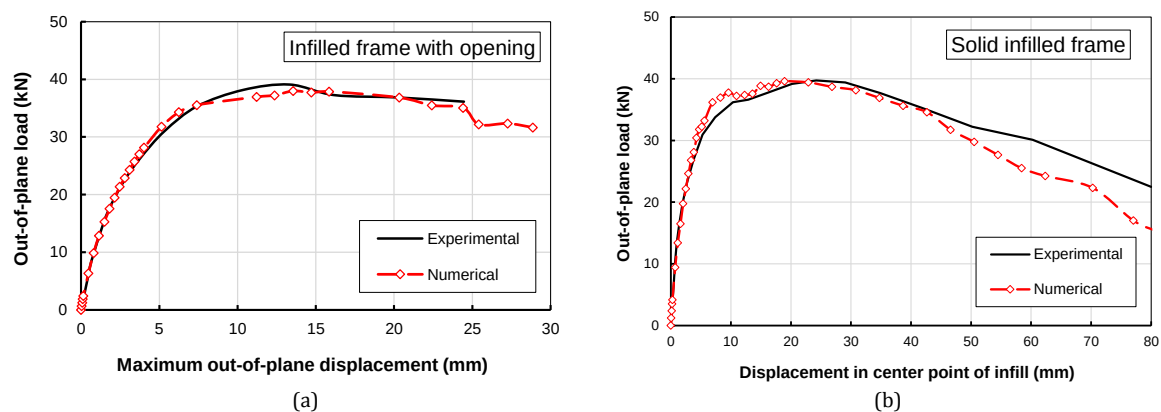


Fig. 4. Comparative analysis of the numerical model with experimental tests: a) Specimen with central opening, b) Solid infilled frame

### 3. Conclusions

An extensive parametric analysis was carried out on the validated numerical model and the influence of infill's compressive strength, infill's tensile strength, infill's thickness and presence of central opening on the out-of-plane response of the infilled frames was studied. The results show that;

- 1) Infills with opening areas of less than 30% (opening area/infill area) demonstrated higher out-of-plane strength while by increasing the opening area the out-of-plane strength decreased dramatically.
- 2) Higher opening areas resulted in higher out-of-plane stiffness.
- 3) Models with higher compressive strength and larger thickness demonstrated better out-of-plane response in terms of strength and stiffness.
- 4) Increasing the tensile strength of the numerical models resulted in higher effective stiffness of the specimens while their out-of-plane strength remained constant.

### 4. Acknowledgements

The present study was supported by the funds of the Tabriz Islamic Art University (Research Project No. 133). The first author appreciates their financial support.

## **5. References**

- Akhoundi F, "Strategies for seismic strengthening of masonry infilled RC frames", PhD thesis, University of Minho, Campus of Azurém, Guimarães, Portugal, 2016.
- DIANA Release 9.6, TNO Diana B.V., Delft, the Netherlands, 2014.