



Journal of Structural and Construction Engineering

www.jsce.ir



Out-of-Plane Behaviour of Brick Masonry Infilled Walls with Openings Stiffened with FRP Strips in Reinforced Concrete Frames

Mehrdad Hejazi^{1*}, Siyavash Nazeri²

1- Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering and Transportation, University of Isfahan, Isfahan, Iran

2 -M.Sc. in Structural Engineering, Isfahan, Iran

ABSTRACT

In this paper, the out-of-plane behaviour of 30 models including two types of brick masonry walls with openings of $6000 \times 3000 \times 300$ mm³ and $3000 \times 3000 \times 300$ mm³ in two cases of unstiffened and stiffened with FRP strips under cyclic loading has been studied. The width, height and location of the openings have been the variables. A non-linear behaviour has been assumed for the materials and the finite element code ANSYS has been used for analysis. Obtained results indicate that the existence of the opening causes the 3 m wall to crack earlier than the 6 m wall. In 3 m walls, by approaching the opening to the upper corner of the wall the maximum displacement at cracking decreases and this maximum value increases by stiffening the opening. But in 6 m walls with an opening, the effect of the location and dimensions of the opening on this maximum displacement is less. In 3 m walls, by increasing the dimensions of the opening or decreasing its distance from the wall top corner the dissipated energy decreases. This value increases by stiffening the opening. But in 6 m walls, the dissipated energy is less dependent on the opening, although stiffening by FRP strips increases the dissipated energy with respect to unstiffened walls.

ARTICLE INFO

Receive Date: 06 February 2020

Revise Date: 19 June 2020

Accept Date: 23 June 2020

Keywords:

Brick masonry infilled wall
Opening
FRP strip
Out-of-plane behaviour
Cyclic load

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2020.218844.2072>

*Corresponding author: Mehrdad Hejazi
Email address: m.hejazi@eng.ui.ac.ir

رفتار خارج از صفحه دیوارهای میانقاب آجری دارای بازشو تقویت شده با نوارهای FRP در قاب‌های بتن مسلح تحت بار چرخه‌ای

مهرداد حجازی^{۱*}، سیاوش ناظری^۲

۱- دانشیار مهندسی سازه، گروه عمران، دانشکده مهندسی عمران و حمل و نقل، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

۲- کارشناس ارشد سازه، اصفهان، ایران

چکیده

در این مقاله، رفتار خارج از صفحه دو نمونه دیوار بنایی آجری با بازشو به ابعاد $3000 \times 3000 \times 300 \text{ mm}^3$ و $6000 \times 3000 \times 300 \text{ mm}^3$ بدون تقویت و تقویت شده با نوارهای FRP در ۳۰ حالت مختلف تحت بار چرخه‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. متغیرها عرض، ارتفاع و موقعیت بازشوها بوده‌اند. رفتار مصالح استفاده شده به صورت غیرخطی در نظر گرفته شده است و از نرم افزار المان محدود ANSYS برای تحلیل‌ها استفاده گردیده است. بر اساس نتایج به دست آمده از تحلیل‌ها، وجود بازشو باعث می‌شود ترک خوردگی در دیوارها با طول ۳ متر زودتر از دیوارهای با طول ۶ متر شروع شود. در نمونه‌های ۳ متری هرچه بازشو به گوشه بالایی دیوار نزدیک‌تر باشد حداکثر تغییرمکان در لحظه ترک خوردگی کمتر می‌باشد و با تقویت کنار بازشوها مقدار این حداکثر تغییرمکان افزایش می‌یابد. ولی در نمونه‌های ۶ متری بازشودار تاثیر محل و ابعاد بازشو بر این تغییرمکان کم‌تر است. در نمونه‌های ۳ متری هرچه بازشو کوچک‌تر و از گوشه بالایی دیوار دورتر باشد مقدار انرژی مستهلک شده بیشتر می‌باشد. همچنین با تقویت کنار بازشوها انرژی مستهلک شده افزایش می‌یابد. ولی در نمونه‌های ۶ متری تاثیر بازشو بر مقدار انرژی مستهلک شده کمتر است، هر چند با تقویت توسط نوارهای FRP انرژی مستهلک شده نسبت به حالت تقویت نشده افزایش می‌یابد.

کلمات کلیدی: دیوار میانقاب آجری، بازشو، نوار FRP، رفتار خارج از صفحه، بار چرخه‌ای

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:			
دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ	https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2020.218844.2072
۱۳۹۸/۱۱/۱۷	۱۳۹۹/۰۳/۳۰	۱۳۹۹/۰۴/۰۳	۱۳۹۹/۰۴/۰۳	۱۴۰۰/۰۶/۳۱	doi: 10.22065/jsce.2020.218844.2072
*نویسنده مسئول:		مهرداد حجازی			
پست الکترونیکی:		m.hejazi@eng.ui.ac.ir			

* نویسنده مسئول: m.hejazi@eng.ui.ac.ir

۱- مقدمه

ساختمان‌ها در ایران برخلاف آنچه کنترل‌های نسبتاً خوبی در زمینه طراحی و کنترل مضاعف سازه‌ها انجام می‌گیرد، در خصوص تیغه چینی‌ها که در اینجا به آن‌ها میانقاب گفته می‌شود، در زمینه طراحی میانقاب‌ها توسط بیشتر مهندسان طراح، ناظر و مجریان مورد کم توجهی قرار گرفته است. در نشریه شماره ۵۵ [۱] که در بسیاری از موارد اجرایی به آن‌ها رجوع می‌شود، از نحوه اتصال دیوار میانقاب به سازه بتنی با اتصالات فلزی نظیر نبشی و صفحه سخن به میان آمده است. بررسی‌ها نشان داده است که به دلیل اندرکنش قاب و میانقاب، در هنگام انتقال نیرو از یک طبقه به طبقه دیگر، اتصال نامناسب میانقاب‌ها باعث می‌شود که در نواحی اتصالات تیر و ستون نیروی برشی زیادی به قاب وارد شود که ممکن است باعث ایجاد آسیب‌هایی در این نواحی گردد [۲]. در آیین‌نامه ۲۸۰۰ زلزله [۳] نیز تنها توصیه آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله کاهش پیروید سازه به میزان ۲۰٪ می‌باشد و برای قاب‌های خمشی به این صورت بیان شده که میانقاب‌ها طوری اجرا شوند که تا حد امکان مانعی برای حرکت اعضای سازه‌ای در زمان زلزله ایجاد نکنند، در غیر اینصورت اثر اندرکنش این اجزا با سیستم سازه باید در تحلیل سازه‌ها در نظر گرفته شود و در قاب‌های ساختمانی ساده با مهاربندی، اثر میانقابی دیوارهای بنایی به صورت ویژه باید بررسی شود زیرا ضربه دینامیکی ناشی از پروسه شکست ناگهانی، فروپاشی و ریزش دیوارهای مصالح بنایی که به صورت همزمان با توزیع سختی مجدد در کل سازه اتفاق می‌افتد، می‌تواند عملکرد مهاربندها را مختل کند و در نهایت منجر به تخریب ساختمان گردد. بدیهی است که با توجه به تعداد قاب‌های میان‌پر، نوع میانقاب و نحوه آرایش آن‌ها، این توصیه برای همه حالت‌های گوناگون درست نمی‌باشد، بلکه باید با در نظر گرفتن عملکرد واقعی قاب‌های میان‌پر در هر حالت ضوابط خاص خود را ارائه نمود. رحمانیان و همکاران [۵] به بررسی نیروهای خارج از صفحه وارد بر میانقاب‌ها و بررسی کفایت روابط آیین‌نامه‌هایی نظیر استاندارد ۲۸۰۰ و آیین‌نامه UBC پرداختند. در این تحقیق، با مدل سازی میانقاب در نرم افزار SAP نیروی خارج از صفحه وارد بر اجزا در تحلیل‌های استاتیکی، طیفی و تاریخچه زمانی بدست آمده است. مستوفی نژاد و همکاران [۶] با مدل سازی یک دیوار به ابعاد $1000 \times 1000 \text{ mm}^2$ با مصالح بنایی تحت بار متمرکز خارج از صفحه و مقاوم‌سازی آن با نوارهای FRP به این نتیجه رسیدند که با تقویت دیوار به وسیله نوارهای FRP ظرفیت باربری خارج از صفحه دیوار بصورت قابل توجهی افزایش می‌یابد. گیل استراپ و همکاران [۷] بر روی رفتار خارج از صفحه‌ی دیوارهای بنایی تقویت شده با FRP تحقیق کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند علاوه بر اینکه استفاده از ورق‌های FRP باعث افزایش قابل توجهی در مقاومت داخل صفحه و خارج از صفحه پانل‌ها می‌شود. هنگامی که پانل‌ها مسلح شده باشند، تئوری خمش بتن مسلح یا مصالح بنایی مسلح می‌تواند برای پیش‌بینی مقاومت دیوار مورد استفاده قرار گیرد. دیماس و همکاران [۸] دیوارهای مصالح بنایی غیر مسلح تقویت شده با نوارهای FRP را تحت بار خارج صفحه مورد بررسی قرار دادند. روش‌های مختلف برای بررسی رفتار دیوارهای غیر مسلح تقویت شده با نوارهای FRP که در معرض بار سیکلی بودند بررسی شد. و رفتار دیوار در سه مرحله اساسی بیان شده است که عبارتند از: شکل‌گیری اولین ترک قابل مشاهده در درز بستر، اولین جدادگی بین FRP و دیوار و مود شکست. داپورتو و همکاران [۹] به بررسی آزمایشگاهی دیوارهای بلند مسلح تحت اثر نیروهای خارج از صفحه پرداختند و دیوارهای بنایی به دو صورت میلگرد در ارتفاع دیوار یکی بصورت تکی و دیگری به صورت ۴ تایی (مانند ستون) تقویت شده بود، میزان تغییر مکان ماکزیمم در وسط ارتفاع دیوار در حالت اول بیشتر از حالت دوم بود. بهشتی اول و همکاران [۱۰] به بررسی رفتار قاب‌های فولادی با میانقاب تحت تحریک زلزله در دو جهت پرداختند و ۶ مدل المان محدود قاب فلزی یک طبقه و یک دهانه پر شده با مصالح بنایی در نرم افزار ABAQUS مدل سازی گردید و به این نتیجه رسیدند که در حالات بارگذاری در دو جهت به طور همزمان نحوه ترک خوردگی میانقاب و مکانیسم شکست سازه در واقع ترکیب مانند زمانی است که هریک از بارها به تنهایی به سازه اعمال می‌شوند. مهیدین و همکاران [۱۱] به بررسی مدل سازی اجزاء محدود دیوارهای بنایی توپر در قاب‌های بتن مسلح تحت اثر بارهای داخل از صفحه و خارج از صفحه پرداختند. در این تحقیق برای یک تغییر مکان نسبی مشخص برای قاب‌های تو خالی نیروی کمتری لازم است ولی در مطالعات آزمایشگاهی و مدل اجزاء محدود نیروی چند برابری برای رسیدن به همان جابجایی نسبی لازم است. آگنیپوتری و همکاران [۱۲] به اثر خسارت داخل از صفحه و خارج از صفحه‌ی دیوارهای غیر مسلح بنایی و به بررسی ظرفیت خارج از صفحه‌ی دیوارهای بنایی غیر مسلح که دارای خسارت قبلی ناشی از نیروهای خارج از صفحه داشته‌اند با روش اجزاء محدود پرداختند. آنچه مشخص گردید این است که مدل اجزاء محدود توانسته بود مدل درستی از رفتار دیوارهای مذکور را تحت بارگذاری

داخل از صفحه و خارج از صفحه با هم داشته باشد. آنانیا و همکاران [۱۳] به بررسی آزمایشگاهی دیوارهای بنایی سنگی تحت اثر نیروهای خارج از صفحه تقویت شده با نوارهای FRP پرداختند. به این نتیجه رسیدن که در نمونه‌های تقویت نشده دارای خرابی پیشرونده در وسط نمونه و در امتداد محور طولی دیوار می‌باشد، همچنین نمونه‌های تقویت شده تغییر شکل آن‌ها قابل کنترل و خیلی کوچکتر است. بویی و همکاران [۱۴] به بررسی آزمایشگاهی رفتار دیوارهای بلوک سیمانی تو خالی تحت اثر نیروهای خارج از صفحه در حالت بدون تقویت و حالت تقویت شده با نوارهای FRP پرداختند. بتیخواه و همکاران [۱۵] دیوارهای بنایی در قاب‌های بتن مسلح با نوارهای FRP که در یک طرف تقویت شده بود را تحت بار چرخه‌ای عرضی مدل‌سازی کردند. در این تحقیق مشاهده گردید میزان ترک و تغییر مکان دیوار در حالت تقویت با نوار FRP کاهش پیدا کرده است. فورتادو و همکاران [۱۶] به میزان مشارکت دیوارهای توپر بنایی در رفتار لرزه‌ای ساختمان‌های بتن مسلح چهار طبقه و هشت طبقه تحت بار چرخه‌ای در سه حالت قاب بدون دیوار، قاب پر و قاب نیم پر با بازشو پرداختند. به این نتیجه رسیده‌اند که ماکزیمم تغییر مکان نسبی در حالت قاب نیم پر از دو مدل دیگر بیشتر و ماکزیمم برش پایه قاب پر از دو مدل دیگر بیشتر می‌باشد. فورتادو و همکاران [۱۷] به بررسی آزمایشگاهی ظرفیت خارج صفحه‌ی دیوارهای بنایی داخل قاب‌های بتن مسلح تحت بار چرخه‌ای پرداختند. چن و همکاران [۱۸] به بررسی آزمایشگاهی میانقاب‌های آجری مدرسه‌ای ۲ طبقه تحت بار خارج از صفحه‌ی چرخه‌ای در حالت‌های تقویت نشده و تقویت شده با الیاف‌های FRP می‌باشد پرداختند. آخوندی و همکاران [۱۹] رفتار خارج از صفحه دیوارهای بنایی در داخل یک قاب بتن مسلح تحت اثر بار شبه استاتیکی را در آزمایشگاه مورد مطالعه قرار دادند و نشان دادند که اتصال قسمت بالای دیوار به دلیل مشکلات اجرای آن ضعیف‌ترین قسمت سازه است. الهانون و همکاران [۲۰] یک روش جایگزین مناسب با استفاده از مدل‌سازی ماکرو برای پیش‌بینی رفتار داخل و خارج از صفحه دیوارهای بنایی داخل قاب‌های بین مسلح را پیشنهاد کردند. پانتو و همکاران [۲۱] روش عددی جدیدی را برای مدل‌سازی عددی رفتار خارج از صفحه قاب‌های بتن مسلح با دیوار بنایی با استفاده از المان‌های تیر-ستون با رفتار پلاستیک برای قاب و المان‌های سه بعدی گسسته با رفتار غیرخطی برای دیوار ارائه کردند. صادقی و پور امینیان [۲۲] از نرم افزار ANSYS برای مدل‌سازی و تحلیل دینامیکی غیرخطی ارگ تبریز که بنایی آجری است، استفاده کردند. پور امینیان و همکاران [۲۳] با استفاده از سیستم طراحی احتمالی نرم افزار ANSYS به تحلیل ایمنی احتمالی پل‌های قوسی آجری و تعیین شاخص اعتمادپذیری آنها پرداختند. با آگاهی از این که در اکثر دیوارهای ساختمان‌های بنایی بازشو وجود دارد و ایجاد بازشو باعث کاهش مقاومت دیوار می‌گردد. بنابراین لازم است که تاثیر موقعیت، ابعاد بازشوها و تقویت کنار بازشوها با نوارهای FRP بر ظرفیت خارج صفحه‌ی این دیوارها مورد بررسی قرار گیرد.

۲-۲- مدل سازی در نرم افزار

۲-۱- روش‌های مدل سازی

برای مدل سازی از روش ماکرو استفاده شده است در این روش دیوار آجری به عنوان یک ماده همگن همسانگرد، با خواص مکانیکی معادل فرض می‌شود. محدودیت‌هایی که در مدل‌سازی ماکرو وجود دارد این است که آجر و ملات به عنوان یک مجموعه پیوسته در نظر گرفته می‌شوند و فرض می‌گردد که بارگذاری و شرایط مرزی به صورتی هستند که انفصال و گسستگی بین ملات و واحدها رخ نخواهد داد. نکته مهم این است که یک مکانیزم شکست قابل قبول برای این مجموعه ترکیبی (ترکیب آجر و ملات) ارائه می‌شود [۲۴].

۲-۲- خصوصیات مکانیکی مصالح به کار رفته

با توجه به اینکه اندازه واحدها در مقایسه با اعضای سازه‌ای کوچک می‌باشند، فرضیه یک جسم پیوسته به جای حالت گسسته قابل قبول به نظر می‌رسد. در این حالت مصالح به صورت مصالح ترکیبی ایزوتروپیک با یک رابطه تنش- کرنش معادل رفتار می‌کنند. این خصوصیات با توجه به آزمایشاتی که توسط کلالی و کبیر بر روی پانل‌های بنایی آجری صورت گرفته است به دست آمده است که در جدول ۱ ارائه شده است [۲۵].

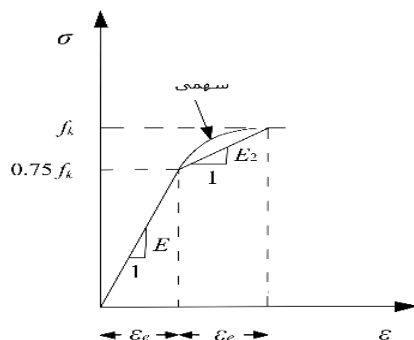
جدول ۱: مشخصات مصالح بنایی [۲۵].

ضریب پواسون	مدول الاستیسیته (MPa)	وزن مخصوص (kg/m ³)
۰/۲	۲۷۳۰	۱۸۵۰

نتایج تجربی روابط تنش-کرنش برای مصالح ترکیبی که شامل آجر و ملات می‌باشد به صورت نمودار دو خطی- سهمی شکل ۱ نشان داده شده است. که قسمت اول این نمودار پیشنهادی به صورت خطی و با شیب E می‌باشد و قسمت دوم آن از معادله (۱) به دست می‌آید [۲۶].

$$\sigma = \left(\frac{f_k}{4} \right) \left[7 \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_e} \right) - 2 \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_e} \right)^2 - 2 \right], \quad \varepsilon_e \leq \varepsilon \leq 2\varepsilon_e \quad (1)$$

با توجه به جدول ۱، شکل ۱ و رابطه (۱)، رابطه تنش-کرنش به صورت روابط (۲) و (۳) بیان شده است [۲۱]، که در آن σ تنش، ε کرنش، f_k مقاومت فشاری و E مدول الاستیسیته مصالح ترکیبی آجر و ملات می‌باشند.

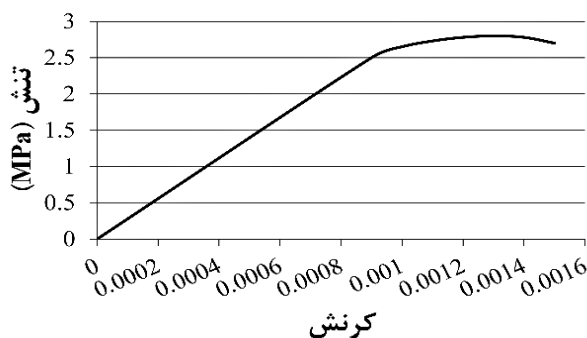


شکل ۱: نمودار مربوط به رابطه پیشنهادی تنش-کرنش برای مصالح ترکیبی آجر و ملات [۲۶].

$$\varepsilon_e = \frac{0.75 f_k}{E} = \frac{0.75 \times 2.73}{2730} = 7.5 \times 10^{-4} \quad (2)$$

$$7.5 \times 10^{-4} \leq \varepsilon \leq 15 \times 10^{-4}, \quad \sigma = \frac{f_k}{4} \left[7 \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_e} \right) - 2 \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_e} \right)^2 - 2 \right] = \frac{2.73}{4} \left[7 \left(\frac{\varepsilon}{7.5 \times 10^{-4}} \right) - 2 \left(\frac{\varepsilon}{7.5 \times 10^{-4}} \right)^2 - 2 \right] \quad (3)$$

در شکل ۲ نمودار تنش-کرنش مطابق روابط (۲) و (۳) ترسیم شده است.



شکل ۲: نمودار تنش - کرنش مصالح بنایی [۲۱].

بیشتر پژوهش‌ها و کاربردهای نوارهای FRP در مهندسی عمران طی بیست سال گذشته محدود به تقویت و تعمیر سازه‌های بتنی یا بنایی بوده و با توجه به عمر کوتاه آن، مطالعات بر روی دوام و عملکرد دراز مدت سیستم‌های تقویت شده با FRP در جریان است. در این پژوهش از نوارهای FRP با الیاف کربن که مقاومت بالایی نسبت به سایر الیاف دارد استفاده شده است. مقاومت کششی و فشاری عضو بتنی با آزمایش‌های مخرب و غیر مخرب استاندارد تعیین می‌شود. در رفتار کششی، نوارهای FRP در هنگام بارگذاری کششی رفتاری کاملاً کشسان دارند و گسیختگی آن‌ها ناگهانی است. مقاومت مصالح FRP بستگی به نسبت حجمی الیاف در آن‌ها دارد. از آنجایی که مقاومت کششی الیاف بسیار بالاتر از مقاومت پلیمرها است با افزایش درصد الیاف، مقاومت FRP افزایش چشمگیری خواهد داشت. ضریب کشسانی مصالح FRP به صورت وتری تعیین شده و در تعیین مقاومت مجاز احتمال شکست ۳۱٪ ملاک است [۲۷]. در رفتار فشاری نوارهای FRP که از خارج به سطوح بتنی چسبانده می‌شود، قابلیت تحمل نیروی فشاری را ندارد. ضریب کشسانی مصالح FRP در فشار بین ۸۰٪ تا ۱۰۰٪ مصالح در کشش می‌باشد، در این پژوهش از نوارهای FRP با الیاف کربن که مقاومت بالایی نسبت به سایر الیاف دارد استفاده شده است.

مشخصات بتن استفاده شده در این پژوهش مطابق جدول ۲ می‌باشد.

جدول ۲: مشخصات بتن [۲۸].

وزن مخصوص بتن (kg/m ³)	مدول الاستیسیته (MPa)	ضریب پواسون
۲۴۰۰	۲۰۰۰۰	۰/۲۵

۲-۳- معیار شکست

معیار شکستی که در نرم افزار ANSYS برای تحلیل مصالح بنایی ترد و شکننده استفاده می‌شود معیار شکست ویلام-وارنک [۲۹] می‌باشد. این معیار شکست به واسطه حالت چند محوری از تنش، به شکل رابطه (۴) بیان می‌شود و روابط (۵) تا (۷) برای محاسبه برخی از پارامترهای مورد نیاز مورد استفاده قرار می‌گیرند [۲۸].

$$\frac{F}{f_c} - S \geq 0 \quad (4)$$

$$f_{cb} = 1.2f_c \quad (5)$$

$$f_1 = 1.45f_c \quad (6)$$

$$f_2 = 1.725f_c \quad (7)$$

مقادیر تخمینی قبل برای حالتی معتبر است که تنش‌های هیدرواستاتیک کم اعمال می‌شود و در رابطه (۸) ارضا می‌گردد [۲۸].

$$|\sigma_h^a| \leq \sqrt{3}f_c \quad (8)$$

$$\sigma_h^a = \frac{1}{3}(\sigma_{xp} + \sigma_{yp} + \sigma_{zp}) \quad (9)$$

پارامترهای روابط (۴) تا (۹) عبارتند از:

F : تابعی از حالت تنش‌های اصلی

k : سطح شکست بر حسب تنش‌های اصلی در جهت‌های اصلی و خصوصیات مصالح f_1 ، f_2 ، f_c ، f_{cb} و σ_h^a می‌باشد.

f_i : مقاومت کششی تک محوری

f_c : مقاومت فشاری تک محوری

f_{cb} : مقاومت فشاری دو محوری

f_t : مقاومت فشاری برای حالتی از فشار دو محوری که بر روی تنش هیدرواستاتیک قرار داده می شود.
 f_2 : مقاومت فشاری برای حالتی از فشار تک محوری که بر روی تنش هیدرواستاتیک قرار داده می شود.
 σ_h^a : تنش هیدرواستاتیک
 σ_{yp} و σ_{zp} : تنش های اصلی در جهات اصلی

علاوه بر پارامترهای روابط (۳) تا (۹)، سه ضریب در این معیار مورد نیاز است:

TCF : ضریب افزایش سختی ترک در حالت کشش

اگر $f_t = 1 \text{ MPa}$ ← باید محاسبه گردد $TCF =$

اگر $f_t \neq 1 \text{ MPa}$ ← $TCF = 0.16$

β_t : ضریب جابجایی برشی ترک باز [۳۰] $\beta_t = 0.15$

β_c : ضریب جابجایی برشی ترک بسته [۳۱] $\beta_c = 0.75$

جدول ۳: پارامترهای معیار شکست ویلام-وارنک جهت تحلیل ترک برای ترکیب مصالح ملات و آجر.

β_t	β_c	f_t (MPa)	f_c (MPa)	f_{cb} (MPa)	σ_h^a (MPa)	f_1 (MPa)	f_2 (MPa)	TCF
۰/۱۵	۰/۷۵	۰/۲۷	۲/۷۴	۲/۲۷	۴/۷۳	۳/۹۶	۴/۷۱	۰/۱۶

معیارهای متعددی برای خرابی نوارها FRP تدوین شده است، ولی در بیشتر این معیارها هیچ گونه اندرکنشی بین تنش ها و کرنش ها در جهات مختلف وجود ندارد ولی به سادگی می توان تصور کرد که چنانچه در جهت الیاف، نوارهای FRP را کشیده شود و در همان حالت در جهت عمود بر الیاف نیز تحت فشار قرار بگیرند زودتر خراب می شوند تا این که در جهت عمودی آن ها را کشیده شوند. برای رفع این اشکال از تئوری تسای - وو استفاده می شود. این معیار به صورت رابطه (۱۰) بیان می شود [۳۲]:

$$F_i \sigma_i + F_{ij} \sigma_i \sigma_j \leq I \quad (10)$$

که در این رابطه σ_i مولفه تانسور تنش و F_i و F_{ij} مولفه های تانسور استحکام سازه هستند.

برای تعریف رفتار غیر خطی بتن از معیار شکست دراکر - پراگر [۳۳] استفاده شده است. در ابتدا این معیار برای بررسی تغییر شکل پلاستیک در خاک به وجود آمد. امروزه برای مواد مختلفی از جمله سنگ، آجر، بتن و پلیمر به کار برده می شود. پارامترهای معیار شکست دراکر - پراگر که در این پژوهش استفاده شده اند، در جدول ۴ نمایش داده شده است.

جدول ۴: پارامترهای معیار شکست دراکر - پراگر مورد استفاده در این پژوهش [۲۸].

زاویه اصطکاک ($^\circ$)	زاویه اتساع ($^\circ$)	ضریب چسبندگی (MPa)
۲۷/۳۸	صفر	۱۷/۶۳

۲-۴- مدل سازی

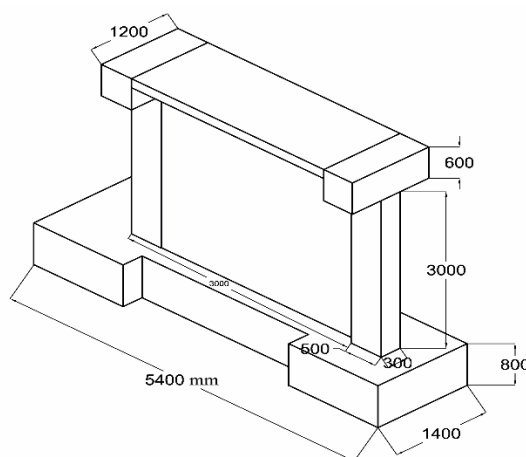
برای مدل سازی دیوار بنایی در نرم افزار ANSYS ابتدا المان های مورد نظر شامل المان Solid65 [۴] و Solid185 [۴] برای دیوار انتخاب گردید و برای نوارهای FRP که مصالح مرکبی می باشند المان Shell181 [۴] که یک المان لایه ای می باشد، انتخاب شد. بعد از معرفی المان ها، مشخصات مصالح که در این فصل برای هر یک از مصالح تعریف شد در نرم افزار وارد گردید. برای مدل سازی ابتدا دیوار آجری، پی، ستون ها و تیر بتنی بالای دیوار به صورت حجمی مدل شدند سپس نوارهای FRP به صورت سطحی روی دیوار قرار گرفتند بعد از مدل سازی نوارهای FRP مشخصات هر یک از لایه ها شامل ضخامت، جهت (نسبت به محور X)، جنس لایه و تعداد نقاط انتگرال گیری

هر لایه وارد می‌شود. جهت برقراری اتصال صفحات FRP به سطح دیوار از المان Contact173 [۴] و Target170 [۴] که المان‌های سطح به سطح هستند استفاده شده است. در این نوع تماس نیازی به تطابق گره‌های متقابل در دو سطح نیست، سرعت تحلیل در این نوع تماس بیش از سایر حالت‌ها می‌باشد در این حالت چون دیوار صلب و دارای سطح صافی می‌باشد به عنوان سطح Target و سطح FRP که انعطاف پذیر است به عنوان Contact در نظر گرفته شده است. در انتها قسمت پایین دیوار در برابر حرکت در تمام جهت‌ها بسته شد و سپس بارگذاری چرخه‌ای مطابق پروتکل بارگذاری اعمال می‌گردد. به منظور حصول اطمینان از صحت نتایج به دست آمده از تحلیل‌های نرم‌افزاری، در کلیه تحلیل‌های مربوط به صحت‌سنجی و مدل‌های مورد مطالعه، تست همگرایی از طریق افزایش تعداد المان‌ها تا همگرا شدن نتایج انجام شده است.

۳- صحت سنجی

۳-۱- مدل آزمایشگاهی و شرایط مرزی

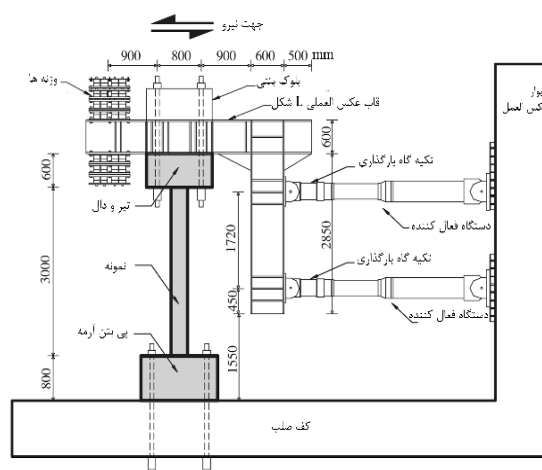
برای صحت سنجی از نمونه آزمایشگاهی چن و همکاران [۱۸]، استفاده شده است. در این آزمایش دیوار بنایی به طول mm ۲۶۰۰ و ارتفاع mm ۳۰۰۰ و ضخامت mm ۲۲۰، داخل یک قاب بتنی مطابق شکل ۳ با حالت بدون تقویت و تقویت شده با نوارهای FRP مورد بررسی قرار گرفته است. قسمت پایین نمونه در تمام جهات گیردار و تیر بالایی و ستون‌ها در تمام جهات کاملاً آزاد در نظر گرفته شده است. بعد از تحلیل نمونه توسط نرم افزار نسبت به گرفتن خروجی تغییر مکان وسط بالای دیوار و عکس العمل تکیه‌گاهی گوشه سمت راست زیر فونداسیون اقدام شده است. مقاومت فشاری آجر استفاده شده در دیوار براساس استاندارد ASTM C67 [۳۴] برابر $27/5 \text{ MPa}$ و مقاومت فشاری بتن استفاده شده در کلیه المان‌های سازه شامل پی، تیر و ستون $27/5 \text{ MPa}$ که براساس استاندارد ACI [۳۵] می‌باشد. مقاومت کششی نوارهای CFRP که براساس استاندارد ASTM C469 [۳۶] استفاده شده برابر $4/1 \text{ GPa}$ و مدول الاستیسیته آن 230 GPa می‌باشد.



شکل ۳: مشخصات پی تیر و ستون نمونه آزمایشگاهی [۱۸].

۳-۱- بارگذاری

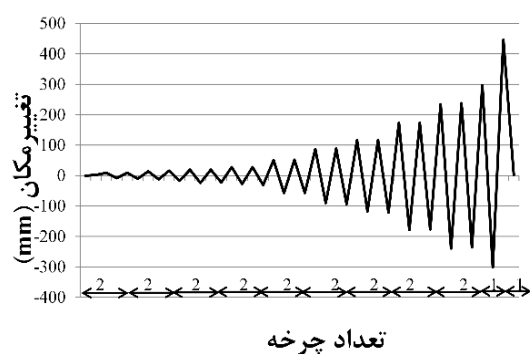
بار جانبی به صورت خارج صفحه و عمود بر صفحه دیوار به یک قاب فلزی L شکل، با استفاده از چهار جک هیدرولیکی با ظرفیت 490 kN که بصورت افقی و به صورت فشار و کشش وارد می‌شود. که در واقع با این عمل بار به تیر بالایی بصورت خارج صفحه مطابق شکل ۴ اعمال می‌شود. بارگذاری جانبی اعمالی بر اساس پروتکلی که در شکل ۵ و جدول ۵ نشان داده شده است، وارد شده است. بار قائم 255 kN که در واقع بار ثقیل دو طبقه بالای سازه می‌باشد، بر تیر بالا اعمال می‌شود. این بار با وزنه‌های بتنی به نمونه وارد شده است.



شکل ۴: بار جانبی خارج صفحه به صورت چرخه‌ای [۱۸].

جدول ۵: نتایج پروتکل بارگذاری آزمایش [۱۸].

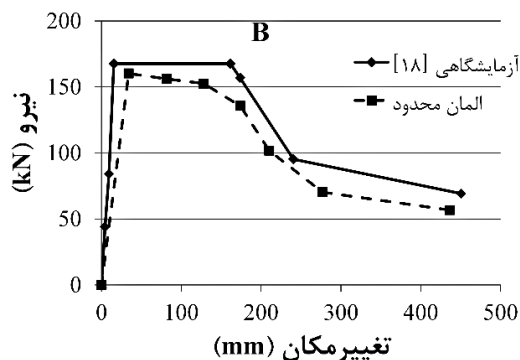
تعداد چرخه	تغییر مکان (mm)
۲	۲/۱
۲	۹
۲	۱۹/۴
۲	۲۸/۱
۲	۵۰/۷
۲	۸۷/۲
۲	۱۱۶/۷
۲	۱۷۴
۲	۲۳۴/۷
۱	۲۹۷/۲
۱	۴۴۶/۵



شکل ۵: پروتکل بارگذاری آزمایش [۱۸].

۳-۲- مقایسه نتایج المان محدود و آزمایشگاهی

با مقایسه منحنی پوش حاصل از نمونه آزمایشگاهی و المان محدود حالت تقویت نشده در شکل ۶ و جدول ۶ خروجی‌هایی حاصل شده است که بیانگر کم بودن اختلاف حداکثر تغییر مکان به ۳/۳٪ و کم بودن حداکثر نیروی وارده به ۴/۴٪ و صحت استفاده از روش المان محدود برای تحلیل نمونه‌ها دارد.



شکل ۶: مقایسه نمودار پوش آزمایشگاهی [۱۸] و تحلیل المان محدود نمونه تقویت نشده.

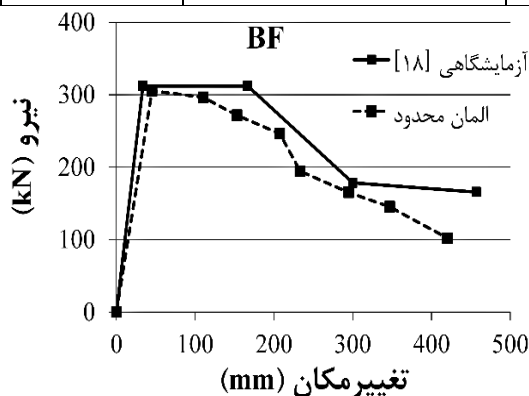
جدول ۶: مقایسه مقادیر حداکثر نیروی وارده و حداکثر تغییر مکان ایجاد شده نمونه آزمایشگاهی [۱۸] و تحلیل المان محدود در حالت تقویت نشده

نمونه	حداکثر نیروی وارده (kN)	درصد تغییرات حداکثر نیرو نسبت به مدل آزمایشگاهی	حداکثر تغییر مکان (mm)	درصد تغییرات حداکثر تغییر مکان نسبت به مدل آزمایشگاهی
آزمایشگاهی	۱۶۷/۶	۰	۴۵۰/۷	۰
تحلیل المان محدود	۱۶۰/۲	-۴/۴	۴۳۶/۱	-۳/۳

همچنین با مقایسه منحنی پوش حاصل از نمونه آزمایشگاهی و المان محدود حالت تقویت شده در شکل ۷ و جدول ۷ خروجی‌هایی حاصل شده است که بیانگر کم بودن اختلاف حداکثر تغییر مکان به ۸٪ و کم بودن حداکثر نیروی وارده به ۲/۳٪ و صحت استفاده از روش المان محدود برای تحلیل نمونه‌ها دارد.

جدول ۷: مقایسه مقادیر حداکثر نیروی وارده و حداکثر تغییر مکان ایجاد شده نمونه آزمایشگاهی [۱۸] و تحلیل المان محدود در حالت تقویت شده.

نمونه	حداکثر نیروی وارده (kN)	درصد تغییرات حداکثر نیرو نسبت به مدل آزمایشگاهی	حداکثر تغییر مکان (mm)	درصد تغییرات حداکثر تغییر مکان نسبت به مدل آزمایشگاهی
آزمایشگاهی	۳۱۲/۶	۰	۴۵۶/۷	۰
تحلیل المان محدود	۳۰۵/۶	-۲/۳	۴۲۰/۳	-۸



شکل ۷: مقایسه نمودار پوش آزمایشگاهی [۱۸] و تحلیل المان محدود نمونه تقویت شده.

۴- معرفی نمونه‌ها، بارگذاری، تحلیل المان محدود و مقایسه نتایج

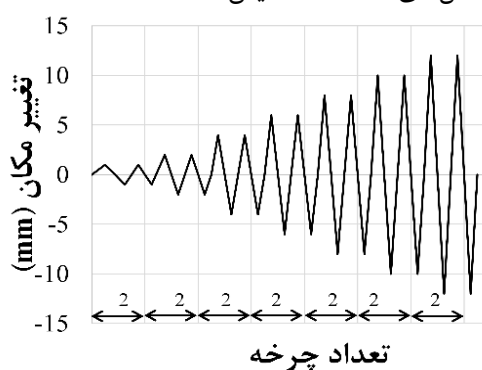
۴-۱- مشخصات نمونه‌ها و بارگذاری و شرایط مرزی

پس از مطالعات انجام شده بر روی نحوه مدل سازی میانقاب بنایی و تطبیق نتایج حاصل از تحلیل نرم افزاری و نتایج آزمایش موجود و اثبات صحت مراحل و فرضیات مدل سازی، به مدل سازی نمونه‌های میانقاب‌های بنایی در حالت‌های مختلف پرداخته می‌شود.

طبق دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌های بنایی [۳۷] وجود بازشو باعث پایین آمدن مقاومت دیوار می‌شود، لذا مجموع سطح بازشو در هر دیوار نباید از نصف سطح دیوار بیشتر باشد. در این قسمت نتایج حاصل از تحلیل بر روی ۳۰ نمونه دیوار بنایی به ابعاد mm^3 $3000 \times 3000 \times 300$ و $6000 \times 3000 \times 300$ (شکل‌های ۸ و ۹) بررسی می‌شوند. این نمونه‌ها از نظر وجود بازشو، نوع بازشو، ابعاد بازشو و محل قرارگیری بازشو، نحوه‌ی چیدمان و تقویت با نوارهای FRP با یکدیگر متمایز شده‌اند. ابعاد مقطع تیر و ستون قاب بتنی mm^2 300×300 و ابعاد مقطع شناژ زیر دیوار mm^2 500×300 و همگی دارای شرایط یکسان مرزی شامل گیردار بودن فونداسیون و آزاد بودن تیر بالا و ستون‌ها در تمام جهات می‌باشند و بار خارج صفحه به صورت چرخه‌ای مطابق پروتکل بارگذاری [۳۸] شکل ۱۰ و جدول ۸ بر تیر بالایی وارد شده است.

۴-۲- تحلیل المان محدود نمونه‌های mm^2 3000×3000

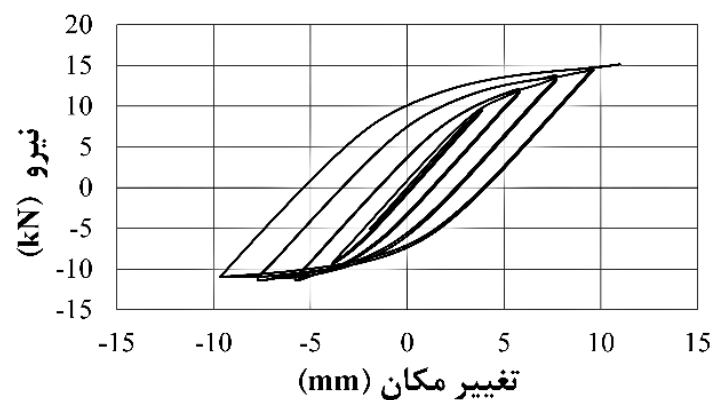
بعد از تحلیل المان محدود نمونه‌ها، نمودار نیرو-تغییر مکان و الگوی ترک خوردگی و تغییر مکان خارج صفحه برخی نمونه‌ها در شکل‌های ۱۱ تا ۱۶ نمایش داده شده‌اند. نتایج حاصل از تحلیل دیوارهای تقویت نشده به ابعاد mm^2 3000×3000 در جدول ۹ آمده است. نتایج به صورت نمودار میله‌ای در شکل‌های ۱۷ تا ۲۰ نمایش داده شده‌اند.



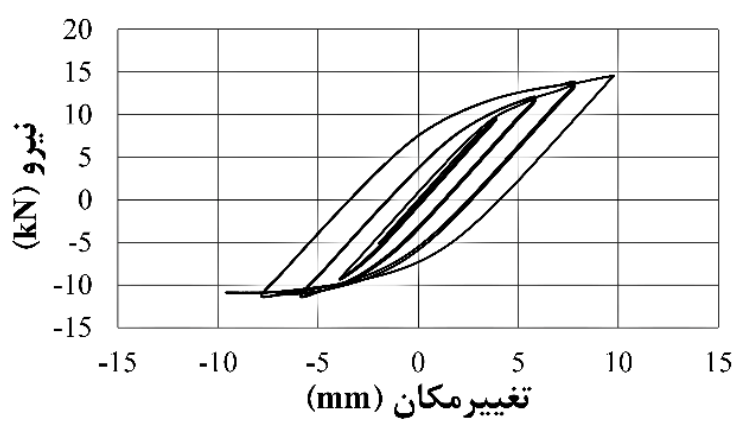
شکل ۱۰: پروتکل بارگذاری [۳۸].

جدول ۸: نتایج پروتکل بارگذاری [۳۸].

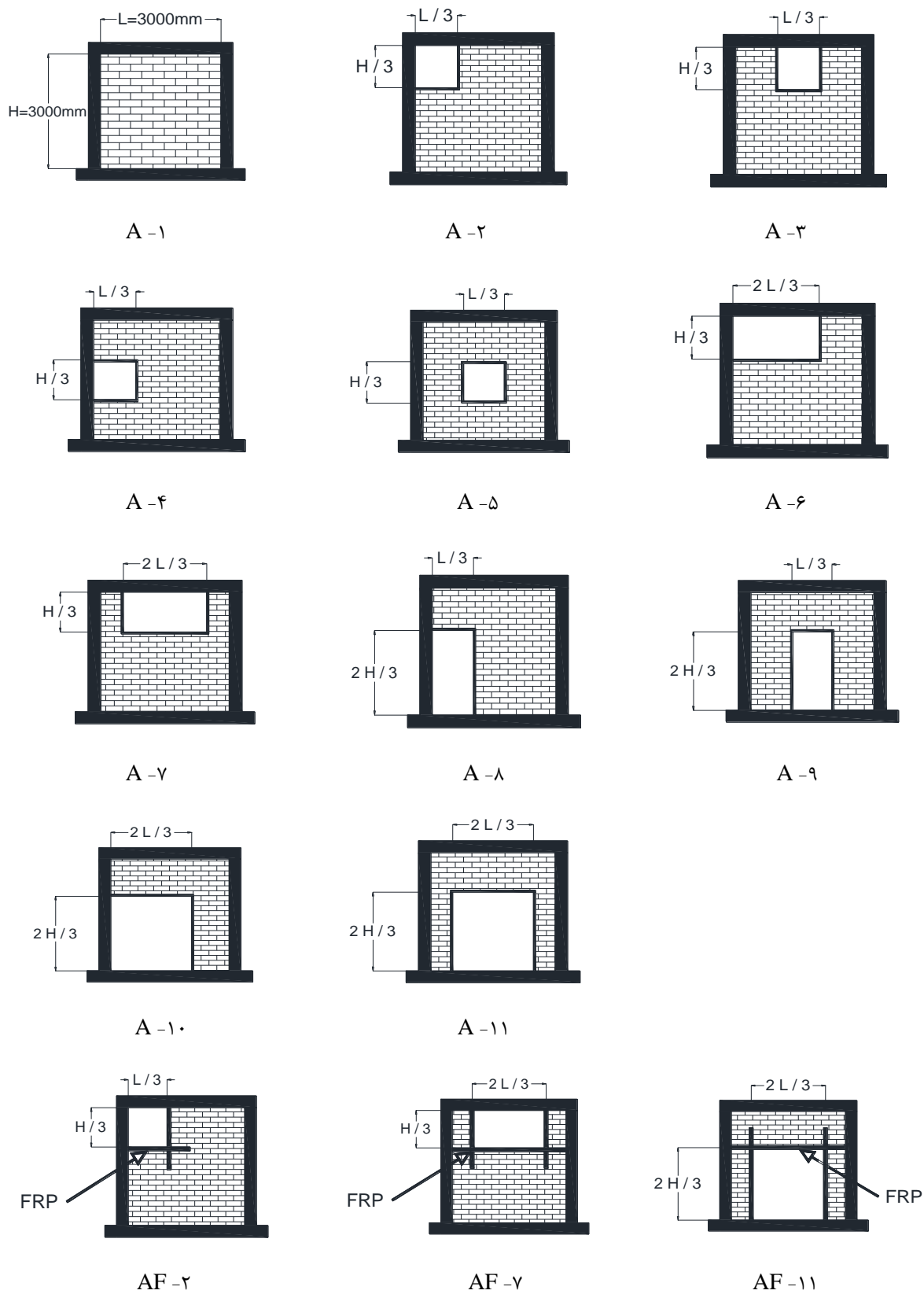
تغییر مکان (mm)	تعداد چرخه	تغییر مکان (mm)	تعداد چرخه
۸	۲	۱	۲
۱۰	۲	۲	۲
۱۲	۲	۴	۲
		۶	۲



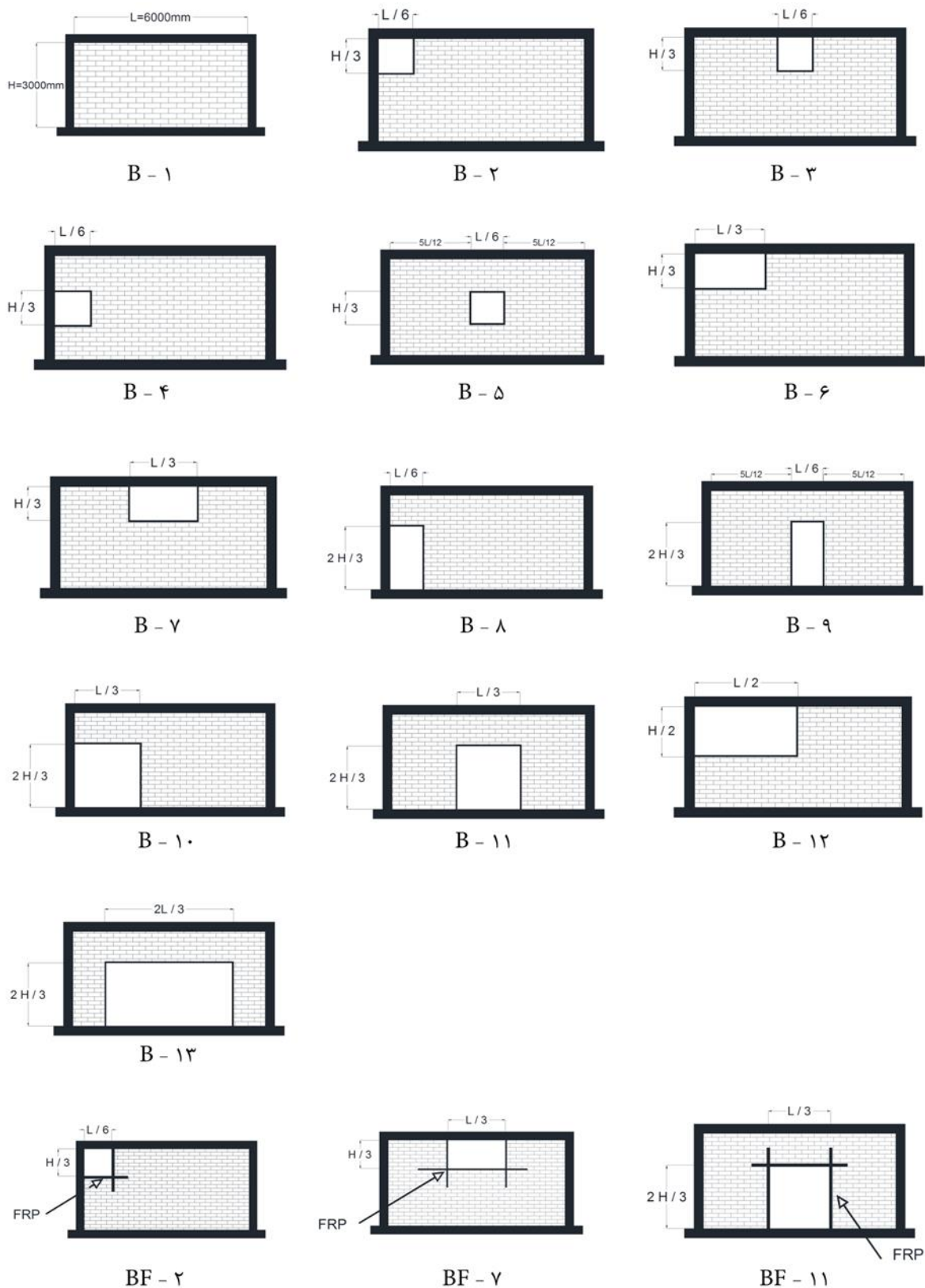
شکل ۱۱: نمودار نیرو-تغییر مکان نمونه بدون بازشو A-۱.



شکل ۱۲: نمودار نیرو-تغییر مکان نمونه A-۲.



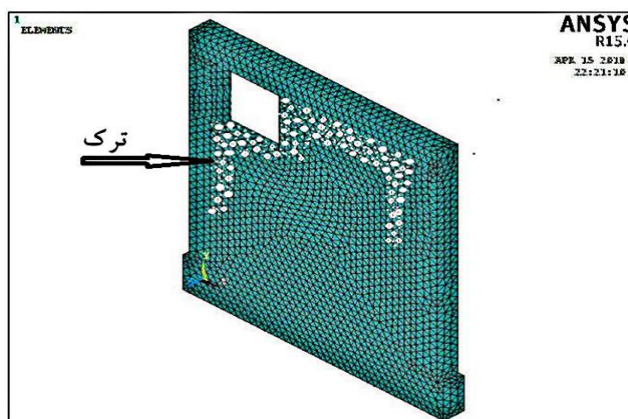
شکل ۸: نمونه‌های $3000 \times 3000 \text{ mm}^2$.



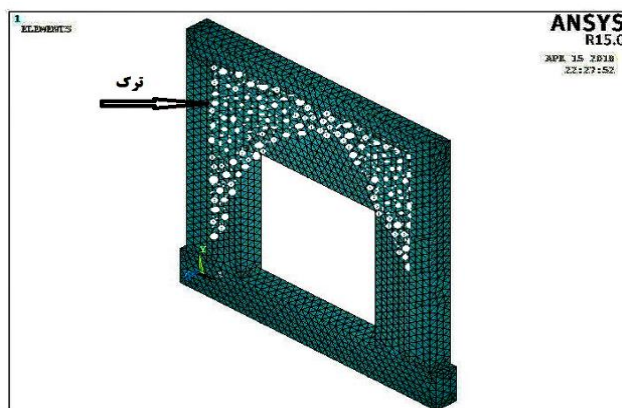
شکل ۹: نمونه‌های $6000 \times 3000 \text{ mm}^2$.

جدول ۹: نتایج تحلیل دیوارهای $3000 \times 3000 \text{ mm}^2$.

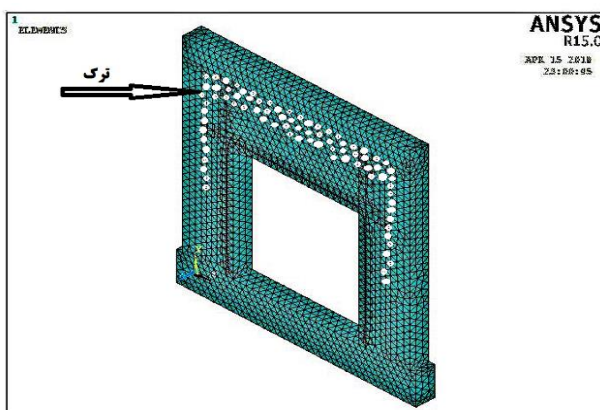
نام مدل	حداکثر تغییر مکان (mm)	تغییرات تغییر مکان نسبت به مدل بدون بازشو (%)	حداکثر بار شکست (kN)	تغییرات بار شکست نسبت به مدل بدون بازشو (%)	میزان انرژی مستهلک شده (kN.mm)	تغییرات انرژی مستهلک شده نسبت به مدل بدون بازشو (%)
A-1	۱۱	۰	۱۵/۱	۰	۸۹۰	۰
A-2	۹/۸	-۱۱	۱۴/۶	-۳	۵۳۹	-۴۰
A-3	۱۱/۶	۵	۱۵/۴	+۲	۹۲۵	+۴
A-4	۱۱/۷	۶	۱۵/۵	+۳	۹۱۴	+۳
A-5	۱۰/۴	-۵	۱۵/۱	۰	۹۸۴	+۱۱
A-6	۱۰	-۹	۱۴/۸	-۲	۵۴۵	-۳۹
A-7	۱۰	-۹	۱۴/۸	-۲	۵۴۵	-۳۹
A-8	۱۱	۰	۱۵/۳	+۱	۹۰۶	+۲
A-9	۱۱	۰	۱۵/۳	+۱	۹۰۶	+۲
A-10	۹/۷۸	-۱۱	۱۵/۲	+۱	۷۴۱	-۱۷
A-11	۷/۹۲	-۲۸	۱۵/۲	+۱	۴۲۹	-۵۲



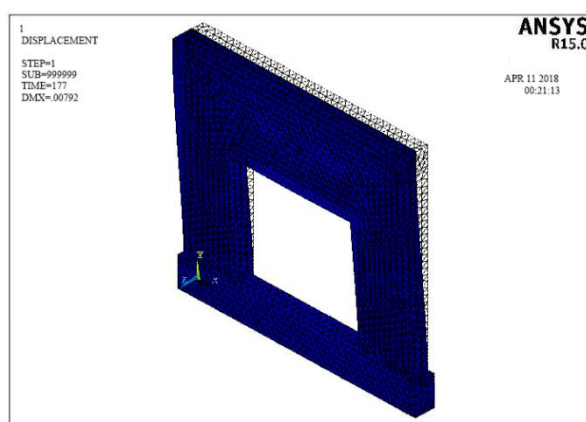
شکل ۱۳: الگوی ترک خوردگی نمونه A-۲ در گام ۱۰۳ از ۱۷۷ گام بارگذاری.



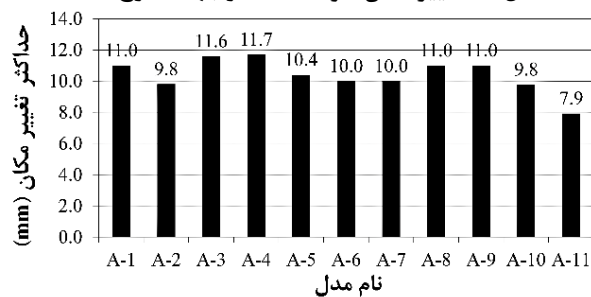
شکل ۱۴: الگوی ترک خوردگی نمونه A-۱۱ در گام ۹۳ از ۱۷۷ گام بارگذاری.



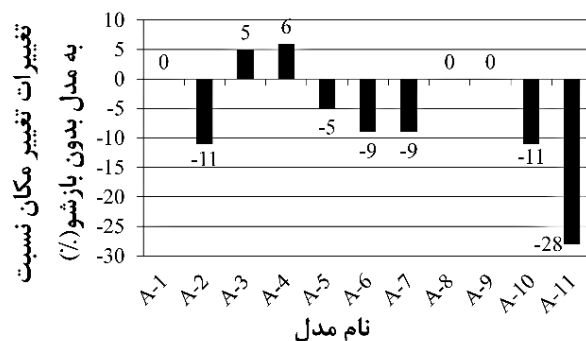
شکل ۱۵: الگوی ترک خوردگی نمونه AF-۱۱ در گام ۱۶۰ از ۱۷۷ گام بارگذاری.



شکل ۱۶: تغییر مکان نمونه A-۱۱ در جهت خارج صفحه.



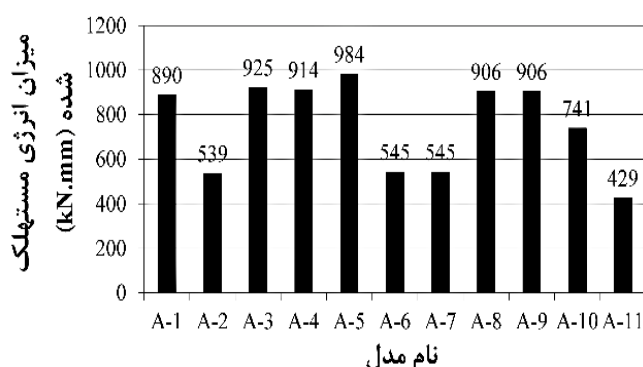
شکل ۱۷: نمودار مقایسه حداکثر تغییر مکان نمونه‌های $3000 \times 3000 \text{ mm}^2$.



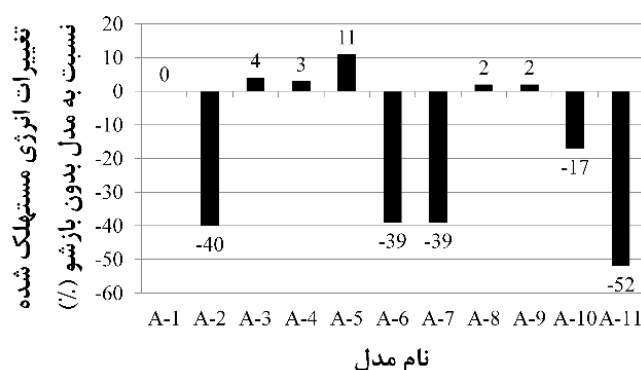
شکل ۱۸: نمودار مقایسه تغییرات تغییر مکان نسبت به مدل بدون بازشو نمونه‌های $3000 \times 3000 \text{ mm}^2$.

با مقایسه نمودار میله‌ای شکل‌های ۱۷ و ۱۸ نتایج زیر بدست می‌آید:

- ۱- نمونه‌های دارای بازشوی پنجره در گوشه بالای ارتفاع دیوار با تغییر مکان خارج صفحه‌ی کمتری ترک‌خوردگی در آن‌ها شروع می‌شود. این موضوع بدلیل نزدیک بودن بازشو به محل چشمه اتصال تیر و ستون می‌باشد.
- ۲- نمونه‌های دارای بازشو پنجره بزرگ و درب بزرگ با اعمال تغییر مکان حدود ۱۱٪ تا ۲۸٪ کمتر از نمونه بدون بازشو ترک خوردگی در آن‌ها شروع می‌شود.
- ۳- نمونه‌های دارای بازشوی پنجره کوچک و درب کوچک بدلیل کم بودن مساحت بازشو نسبت به مساحت دیوار و دور بودن از چشمه اتصال با اعمال تغییر مکان حدود ۰٪ تا ۶٪ بیشتر از نمونه بدون بازشو ترک‌خوردگی در آن‌ها شروع می‌شود.
- ۴- نمونه‌های دارای بازشو درب بزرگ در وسط به دلیل بزرگ بودن مساحت بازشو نسبت به مساحت دیوار و نزدیک بودن به هر دو چشمه اتصال با اعمال تغییر مکان حدود ۲۸٪ کمتر از نمونه بدون بازشو ترک‌خوردگی در آن‌ها شروع می‌شود. بنابراین ایجاد بازشو نزدیک محل چشمه اتصال تیر و ستون و ایجاد بازشو بزرگ سبب کاهش مقاومت خارج صفحه‌ی میانقاب می‌شود.



شکل ۱۹: نمودار مقایسه میزان انرژی مستهلک شده نمونه‌های $3000 \times 3000 \text{ mm}^2$.



شکل ۲۰: نمودار تغییرات انرژی مستهلک شده نسبت به مدل بدون بازشو در نمونه‌های $3000 \times 3000 \text{ mm}^2$.

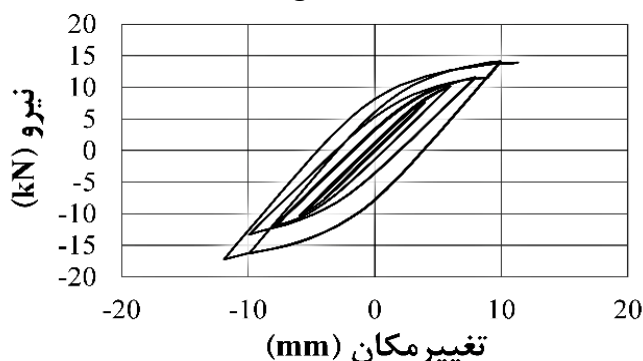
با مقایسه نمودار شکل‌های ۱۹ و ۲۰ نتایج زیر بدست می‌آید:

- ۱- بیشترین انرژی در نمونه‌ی بازشو پنجره کوچک که بازشو آن در مرکز دیوار می‌باشد، مستهلک شده است. دلیل این امر به خاطر دور بودن بازشو از محل چشمه اتصال می‌باشد. که انرژی بیشتری جهت ترک‌خوردگی این نمونه لازم می‌باشد.
- ۲- کمترین انرژی مستهلک شده در نمونه‌ی بازشوی درب بزرگ در وسط می‌باشد که کمتر از حدود ۵۲٪ از انرژی لازم جهت ترک‌خوردگی نمونه بدون بازشو می‌باشد. این موضوع می‌تواند به دلیل نزدیک بودن گوشه‌های بازشو به محل چشمه اتصال و مستعد بودن جهت ترک‌خوردگی در دیوار باشد. همچنین نمونه‌های پنجره کوچک در گوشه‌ی بالا و نمونه‌های پنجره بزرگ با استهلاک انرژی کمتر از حدود ۴۰٪ نسبت به نمونه بدون بازشو، ترک می‌خورند.

۳- نمونه‌هایی که دارای بازشوی پنجره کوچک و درب کوچک و از محل چشمه اتصال دور می‌باشند فقط حدود ۲٪ تا ۴٪ انرژی بیشتر از نمونه بدون بازشو هنگام ترک خوردگی مستهلک می‌شود. بنابراین نمونه‌ای که دارای بازشو با مساحت بزرگ‌تر و نزدیک‌تر به چشمه اتصال باشد با انرژی کمتری ترک می‌خورد. با مقایسه نمودارهای میله‌ای شکل‌های ۱۷ تا ۲۰ و با توجه به مشابه بودن رفتار نمونه‌ها به تقویت یکی از نمونه‌های مشابه پرداخته خواهد شد.

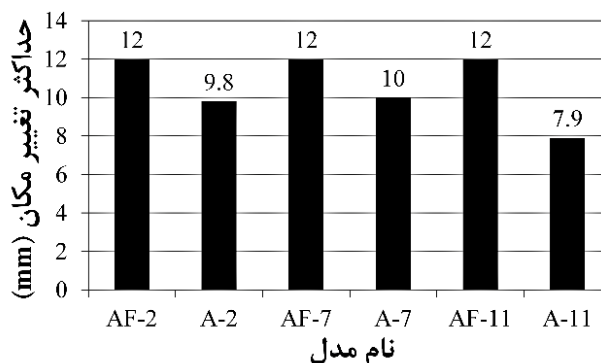
۳-۴- تحلیل المان محدود نمونه‌های تقویت شده $3000 \times 3000 \text{ mm}^2$

بعد از تحلیل المان محدود نمونه AF-۲ که کنار بازشو آن با نوارهای FRP تقویت شده است، تغییر مکان حداکثر نمونه mm ۱۲، بار شکست ایجاد شده $17/2 \text{ kN}$ و مقدار انرژی مستهلک شده 731 kN.mm محاسبه شده است که با حالت مشابه تقویت نشده حدود ۲۲٪ تغییر مکان، ۱۸٪ بار شکست و ۳۶٪ انرژی افزایش یافته است. نتایج در شکل ۲۱ نشان داده شده است.

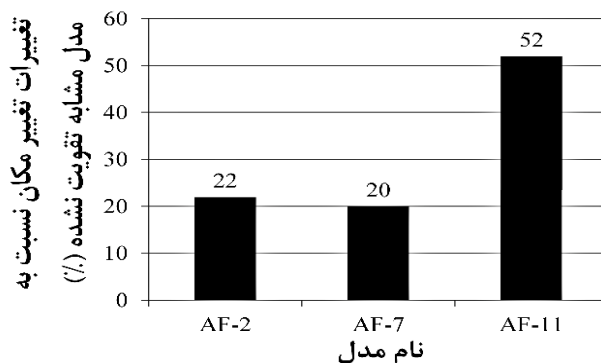


شکل ۲۱: نمودار نیرو-تغییر مکان نمونه با بازشو پنجره کوچک در بالا سمت چپ AF-۲.

بعد از تحلیل سایر نمونه‌ها نتایج حاصل از تحلیل دیوارهای تقویت شده به ابعاد $3000 \times 3000 \text{ mm}^2$ در جدول ۱۰ و نتایج حاصل از تحلیل این دیوارها به صورت نمودار میله‌ای با نمونه مشابه تقویت نشده در شکل‌های ۲۲ تا ۲۵ آمده است.



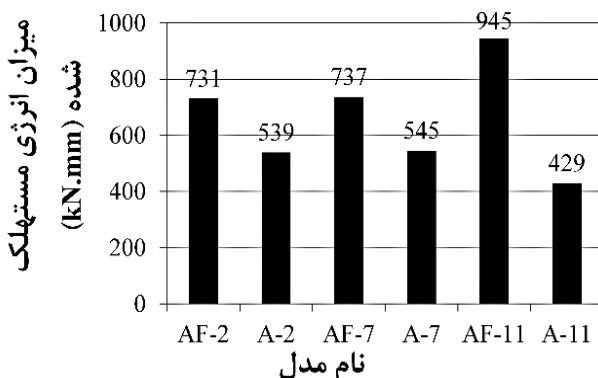
شکل ۲۲: نمودار مقایسه حداکثر تغییر مکان نمونه‌های $3000 \times 3000 \text{ mm}^2$.



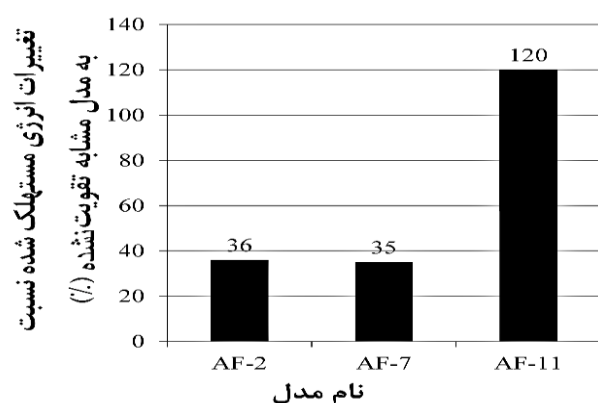
شکل ۲۳: نمودار مقایسه تغییرات تغییر مکان نسبت به مدل مشابه تقویت نشده‌ی نمونه‌های $3000 \times 3000 \text{ mm}^2$.

با مقایسه شکل‌های ۲۲ و ۲۳ نتایج زیر حاصل می‌شود:

- ۱- تغییر مکانی که منجر به ایجاد ترک در هر نمونه تقویت شده می‌شود با تغییر مکانی که در نمونه تقویت نشده متناظر ایجاد ترک می‌کند، بیشتر است.
- ۲- با تقویت کنار بازشوها در نمونه‌های بازشو پنجره مقدار تغییر مکان خارج صفحه که منجر به ترک خوردگی می‌شود حدود ۲۰٪ و در نمونه‌های درب بازشو حدود ۵۲٪ افزایش می‌یابد.
- ۳- با تقویت کنار بازشوها تراکم ترک‌ها از کنار بازشو کمتر شده و به سمت بالای دیوار متمرکز شده است. بنابراین تقویت کنار بازشوها موجب افزایش شکل‌پذیری و افزایش مقاومت نمونه‌ها می‌شود.



شکل ۲۴: نمودار مقایسه میزان انرژی مستهلک شده در نمونه‌های $3000 \times 3000 \text{ mm}^2$.



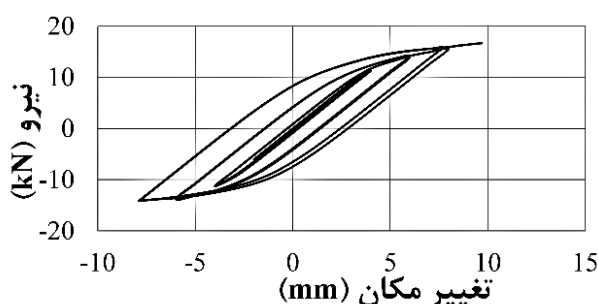
شکل ۲۵: نمودار مقایسه تغییرات انرژی مستهلک شده نسبت به مدل مشابه تقویت نشده‌ی نمونه‌های $3000 \times 3000 \text{ mm}^2$.

با مقایسه شکل‌های ۲۴ و ۲۵ نتایج زیر حاصل می‌شود:

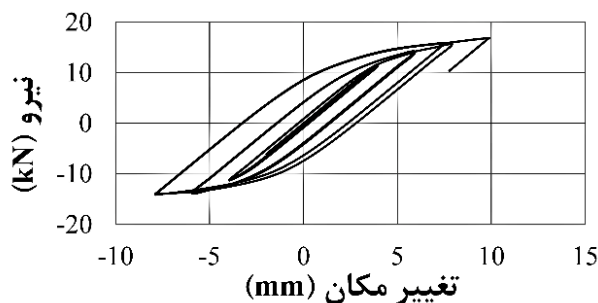
۱- انرژی مستهلک شده جهت ایجاد ترک در هر نمونه تقویت شده با نمونه تقویت نشده متناظر بیشتر می‌باشد.
 ۲- با تقویت کنار بازشوها در نمونه‌های بازشو پنجره مقدار انرژی مستهلک شده که منجر به ترک خوردگی می‌شود حدود ۳۵٪ و در نمونه‌های درب بازشو حدود ۱۲۰٪ افزایش می‌یابد.
 بنابراین با تقویت کنار بازشوها به دلیل افزایش شکل پذیری و کاهش سختی میانقاب مقدار انرژی بیشتری جهت ترک خوردگی مستهلک می‌شود.

۳-۴- تحلیل المان محدود نمونه‌های تقویت نشده $6000 \times 3000 \text{ mm}^2$

بعد از تحلیل نمونه‌های B-۱ و B-۲، نمودار نیرو-تغییر مکان این دو نمونه در شکل‌های ۲۶ و ۲۷ نمایش داده شده‌اند. بعد از تحلیل سایر نمونه‌ها، نتایج حاصل از تحلیل دیوارهای تقویت شده به ابعاد $6000 \times 3000 \text{ mm}^2$ در جدول ۱۱ و به صورت نمودار میله‌ای در شکل‌های ۲۸ تا ۳۱ آمده است.



شکل ۲۶: نمودار نیرو-تغییر مکان نمونه بدون بازشو B-۱



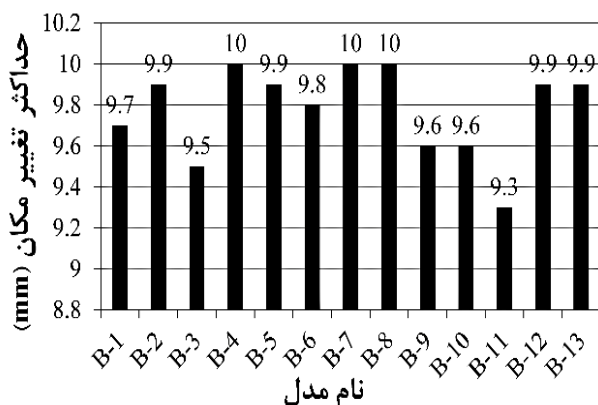
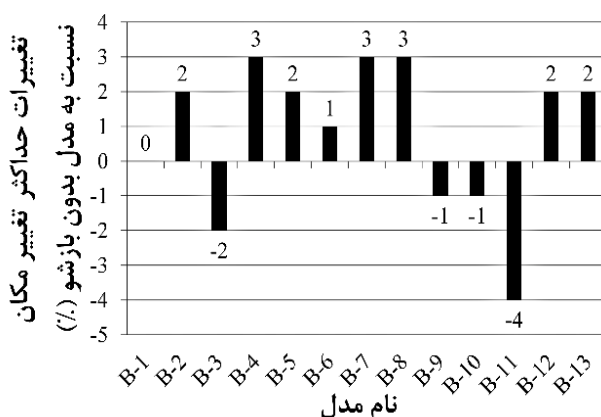
شکل ۲۷: نمودار نیرو-تغییر مکان نمونه B-۲

جدول ۱۰: نتایج تحلیل دیوارهای $3000 \times 3000 \text{ mm}^2$ تقویت شده و مقایسه با حالت تقویت نشده مشابه.

نام مدل	حداکثر تغییر مکان (mm)	تغییرات تغییر مکان نسبت به مدل مشابه تقویت نشده (%)	حداکثر بار شکست (kN)	تغییرات بار شکست نسبت به مدل مشابه تقویت نشده (%)	میزان انرژی مستهلک شده (kN.mm)	تغییرات انرژی مستهلک شده نسبت به مدل مشابه تقویت نشده (%)
AF-2	۱۲	۲۲	۱۷/۲	۱۸	۷۳۱	۳۶
A-2	۹/۸	۰	۱۴/۶	۰	۵۳۹	۰
AF-7	۱۲	۲۰	۱۷/۴	۱۷	۷۳۷	۳۵
A-7	۱۰	۰	۱۴/۸	۰	۵۴۵	۰
AF-11	۱۲	۵۲	۱۸/۲	۲۸	۹۴۵	۱۲۰
A-11	۷/۹۲	۰	۱۴/۲	۰	۴۲۹	۰

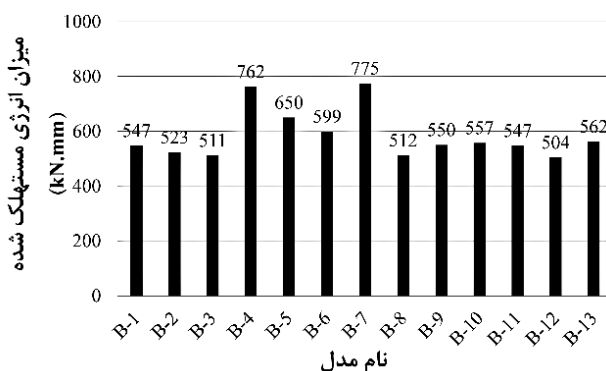
جدول ۱۱: نتایج تحلیل دیوارهای $6000 \times 3000 \text{ mm}^2$

نام مدل	حداکثر تغییر مکان (mm)	تغییرات حداکثر تغییر مکان نسبت به مدل بدون بازشو (%)	حداکثر بار شکست (kN)	تغییرات بار شکست نسبت به مدل بدون بازشو (%)	میزان انرژی مستهلک شده (kN.mm)	تغییرات انرژی مستهلک شده نسبت به مدل بدون بازشو (%)
B-1	۹/۷	۰	۱۶/۷	۰	۵۴۷	۰
B-2	۹/۹	۲	۱۶/۹	۱	۵۲۳	-۴
B-3	۹/۵	-۲	۱۶/۷	۰	۵۱۱	-۷
B-4	۱۰	۳	۱۶/۹	۱	۷۶۲	۳۹
B-5	۹/۹	۲	۱۶/۸	۰/۵	۶۵۰	۱۹
B-6	۹/۸	۱	۱۷/۱	۲/۴	۵۹۹	۱۰
B-7	۱۰	۳	۱۶/۹	۱	۷۷۵	۴۲
B-8	۱۰	۳	۱۶/۹	۱	۵۱۲	-۶
B-9	۹/۶	-۱	۱۶/۶	-۰/۵	۵۵۰	۰/۵
B-10	۹/۶	-۱	۱۶/۹	۱	۵۵۷	۱
B-11	۹/۳	-۴	۱۶/۴	-۱/۸	۵۴۷	۰
B-12	۹/۹	۲	۱۷	۱/۸	۵۰۴	-۸
B-13	۹/۹	۲	۱۶/۶	-۰/۵	۵۶۲	۳

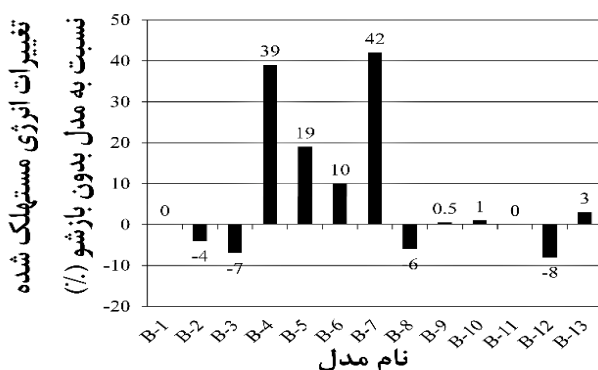
شکل ۲۸: نمودار مقایسه حداکثر تغییر مکان نمونه‌های $6000 \times 3000 \text{ mm}^2$ شکل ۲۹: نمودار مقایسه تغییرات تغییر مکان نسبت به مدل بدون بازشو نمونه‌های $6000 \times 3000 \text{ mm}^2$

با مقایسه نمودارهای شکل ۲۸ و ۲۹ نتایج به این صورت بدست می‌آید:

- ۱- اختلاف ۴٪ تا ۳٪ حداکثر تغییر مکان نمونه‌ها با نمونه بدون بازشو بیانگر رفتار مشابه نمونه‌ها و تاثیر ناچیز محل و ابعاد بازشوها بر رفتار نمونه‌ها با ابعاد $6000 \times 3000 \text{ mm}^2$ می‌باشد.
- ۲- در نمونه درب بزرگ‌تر، با وجود اینکه ابعاد بازشو حدود ۴۵٪ درصد از مساحت قاب بتنی می‌باشد بازهم حداکثر تغییر مکان حدود ۲٪ بیشتر از نمونه بدون بازشو می‌باشد که بیانگر تاثیر ناچیز ابعاد و جانمایی بازشو در این قاب‌ها با دهانه‌های بزرگ می‌باشد.



شکل ۳۰: نمودار مقایسه میزان انرژی مستهلک شده نمونه‌های $6000 \times 3000 \text{ mm}^2$.



شکل ۳۱: نمودار مقایسه تغییرات انرژی مستهلک شده نسبت به مدل بدون بازشو نمونه‌های $6000 \times 3000 \text{ mm}^2$.

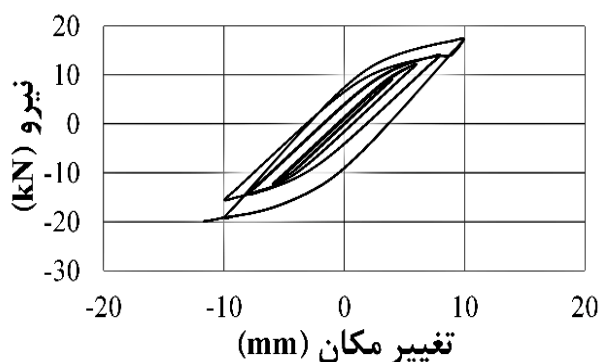
با مقایسه انرژی مستهلک شده‌ی نمونه‌ها در شکل‌های ۳۰ و ۳۱ نتایج زیر بدست می‌آید:

- ۱- اختلاف ۸٪ تا ۱۰٪ انرژی مستهلک شده نمونه‌های دارای بازشو در بالا و پایین ارتفاع میانقاب با نمونه بدون بازشو، ناشی از عدم تاثیر ابعاد بازشو و جانمایی بازشو در قاب‌های بتنی با دهانه بلند می‌باشد.
- ۲- نمونه‌هایی که دارای بازشو در مرکز میانقاب می‌باشند به دلیل دور بودن بازشو از محل برخورد تیر و ستون، انرژی بیشتری جهت ترک‌خوردگی نیاز دارند.

۴-۵- تحلیل المان محدود نمونه‌های تقویت شده $6000 \times 3000 \text{ mm}^2$

پس از تقویت کنار بازشوی نمونه B-۲ نمونه BF-۲ حاصل شده است که پس از تحلیل نمونه، تغییر مکان حداکثر $11/7 \text{ mm}$ ، بار شکست ایجاد شده $19/9 \text{ kN}$ و مقدار انرژی مستهلک شده 746 kN.mm محاسبه شده است که با حالت مشابه تقویت نشده حدود ۱۸٪ تغییر مکان، ۱۸٪ بار شکست و ۴۳٪ انرژی افزایش یافته است. این نشان دهنده بالارفتن شکل‌پذیری و افزایش مقاومت میانقاب شده است. نتایج در شکل ۳۲ نشان داده شده است.

بعد از تحلیل سایر نمونه‌ها نتایج حاصل از تحلیل دیوارهای تقویت شده به ابعاد $6000 \times 3000 \text{ mm}^2$ در جدول ۱۲ و نتایج حاصل از تحلیل این دیوارها به صورت نمودار میله‌ای با نمونه مشابه تقویت نشده در شکل‌های ۳۳ تا ۳۶ آمده است.

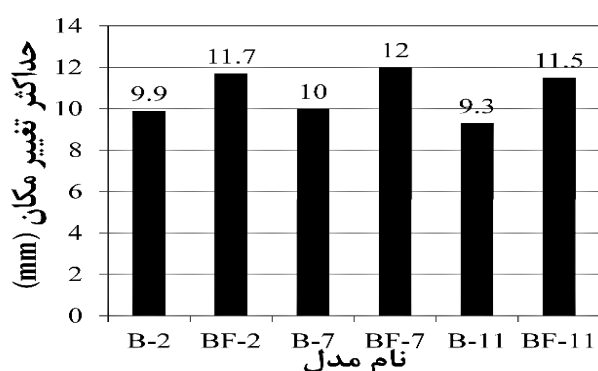


شکل ۳۲: نمودار نیرو-تغییر مکان نمونه BF-۲.

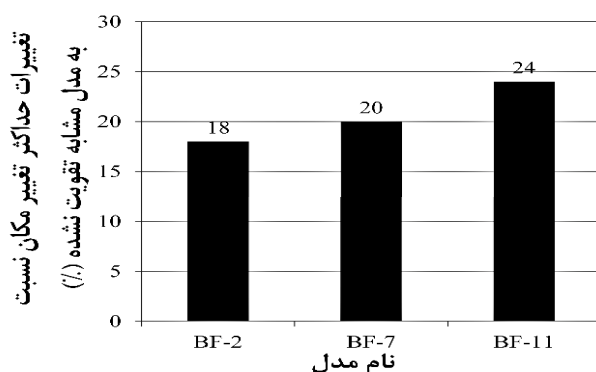
جدول ۱۲: نتایج تحلیل دیوارهای $6000 \times 3000 \text{ mm}^2$ تقویت شده و مقایسه با حالت تقویت نشده مشابه.

نام مدل	حداکثر تغییر مکان (mm)	تغییرات حداکثر تغییر مکان نسبت به مدل مشابه تقویت نشده (%)	حداکثر بار شکست (kN)	تغییرات بار شکست نسبت به مدل مشابه تقویت نشده (%)	میزان انرژی مستهلک شده (kN.mm)	تغییرات انرژی مستهلک شده نسبت به مدل مشابه تقویت نشده (%)
B-2	۹/۹	۰	۱۶/۹	۰	۵۲۳	۰
BF-2	۱۱/۷	۱۸	۱۹/۹	۱۸	۷۴۶	۴۳
B-7	۱۰	۰	۱۶/۹	۰	۷۷۵	۰
BF-7	۱۲	۲۰	۲۰/۱	۱۹	۹۵۵	۲۳
B-11	۹/۳	۰	۱۶/۴	۰	۵۴۷	۰
BF-11	۱۱/۵	۲۴	۱۹/۵	۱۹	۷۴۳	۳۶

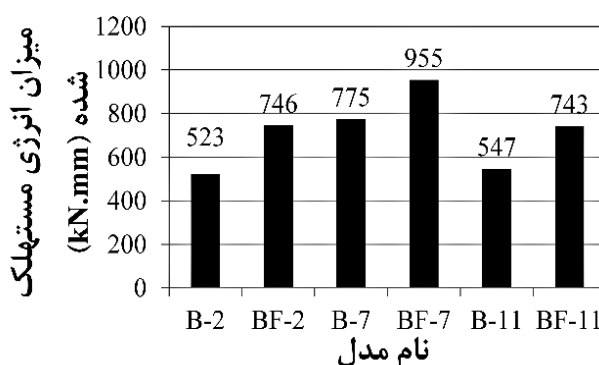
با مقایسه شکل‌های ۳۳ و ۳۴ می‌توان نتیجه گرفت با تقویت کنار بازشوها تغییر مکان هر نمونه‌ی تقویت شده با نمونه‌ی تقویت نشده متناظر تقریباً ۱۸٪ تا ۲۴٪ افزایش یافته و باعث افزایش شکل پذیری و مقاومت میانقاب شده است.



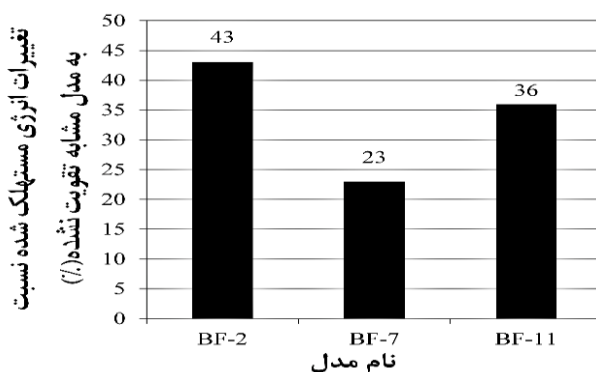
شکل ۳۳: نمودار مقایسه حداکثر تغییر مکان نمونه‌های $6000 \times 3000 \text{ mm}^2$.



شکل ۳۴: نمودار مقایسه تغییرات حداکثر تغییر مکان نسبت به مدل مشابه تقویت نشده‌ی نمونه‌های $6000 \times 3000 \text{ mm}^2$.



شکل ۳۵: نمودار مقایسه میزان انرژی مستهلک شده در نمونه‌های $6000 \times 3000 \text{ mm}^2$.



شکل ۳۶: نمودار مقایسه تغییرات انرژی مستهلک شده نسبت به مدل مشابه تقویت شده در نمونه‌های $6000 \times 3000 \text{ mm}^2$.

با مقایسه شکل‌های ۳۵ و ۳۶ نتایج زیر حاصل می‌شود:

انرژی مستهلک شده هر نمونه تقویت شده با نمونه تقویت نشده متناظر بیشتر می‌باشد. این بدان معنا است که با تقویت کنار بازشوها انرژی بیشتری جهت ایجاد ترک خوردگی نمونه لازم است.

با تقویت نمونه‌ها انرژی مستهلک شده نمونه پنجره کوچک که بازشوی آن در بالای سمت چپ واقع شده، ۴۳٪، نمونه پنجره بزرگ که دارای بازشوی وسط به ابعاد $(H/3 \times L/3)$ حدود ۲۳٪ و نمونه درب بزرگ در وسط به ابعاد $(2H/3 \times L/3)$ نسبت به نمونه متناظر آن ۳۶٪ افزایش پیدا کرده است.

۵- نتیجه گیری

- ۱- تاثیر محل بازشو در شروع ترک خوردگی دیوارها با طول ۳ متر نسبت به دیوارهای با طول ۶ متر به مراتب بیشتر می باشد.
- ۲- در نمونه های ۶ متری تمامی نمونه ها تقریباً زمان شروع ترک خوردگی یکسانی دارند.
- ۳- در نمونه های ۳ متری ایجاد بازشو نزدیک محل چشمه اتصال تیر و ستون و ایجاد بازشو بزرگ، سبب کاهش مقاومت خارج صفحه ای میانقاب می شود.
- ۴- نمونه های ۳ متری دارای بازشوی پنجره در گوشه بالای ارتفاع دیوار با تغییر مکان خارج صفحه ای کمتری ترک خوردگی در آنها شروع می شود.
- ۵- نمونه های ۳ متری دارای بازشو پنجره بزرگ و درب بزرگ با اعمال تغییر مکان حدود ۱۱٪ تا ۲۸٪ کمتر از نمونه بدون بازشو ترک خوردگی در آنها شروع می شود.
- ۶- نمونه های ۳ متری دارای بازشو درب بزرگ در وسط به دلیل بزرگ بودن مساحت بازشو نسبت به مساحت دیوار و نزدیک بودن به هردو چشمه اتصال با اعمال تغییر مکان حدود ۲۸٪ کمتر از نمونه بدون بازشو ترک خوردگی در آنها شروع می شود.
- ۷- در نمونه های ۳ متری با تقویت کنار بازشوها در نمونه های بازشو پنجره مقدار تغییر مکان خارج صفحه که منجر به ترک خوردگی می شود حدود ۲۰٪ و در نمونه های درب بازشو حدود ۵۲٪ افزایش می یابد.
- ۸- در نمونه های ۳ متری با تقویت کنار بازشوها تراکم ترکها از کنار بازشو کمتر شده و به سمت بالای دیوار متمرکز شده است.
- ۹- در نمونه های ۳ متری بیشترین انرژی در نمونه ی بازشو پنجره کوچک که بازشو آن در مرکز دیوار می باشد، مستهلک شده است. دلیل این امر به خاطر دور بودن بازشو از محل چشمه اتصال می باشد.
- ۱۰- در نمونه های ۳ متری کمترین انرژی مستهلک شده در نمونه ی بازشوی درب بزرگ در وسط می باشد که کمتر از حدود ۵۲٪ از انرژی لازم جهت ترک خوردگی نمونه بدون بازشو می باشد.
- ۱۱- در نمونه های ۶ متری اختلاف ۴٪ تا ۳٪ حداکثر تغییر مکان نمونه ها با نمونه بدون بازشو بیانگر رفتار مشابه نمونه ها و تاثیر ناچیز محل و ابعاد بازشوها می باشد.
- ۱۲- اختلاف ۸٪ تا ۱۰٪ انرژی مستهلک شده نمونه های دارای بازشو در بالا و پایین ارتفاع میانقاب با نمونه بدون بازشو، ناشی از عدم تاثیر ابعاد بازشو و جانمایی بازشو در قاب های بتنی با دهانه بلند می باشد.
- ۱۳- با تقویت کنار بازشوها میزان انرژی مستهلک شده از ۳۶٪ تا ۱۲۰٪ در نمونه های ۳ متری و در نمونه های ۶ متری از ۲۳٪ تا ۴۳٪ افزایش می یابد.

مراجع

- [۱] مشخصات فنی عمومی کارهای ساختمانی، معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی رئیس جمهور، دفتر نظام فنی اجرایی، نشریه شماره ۵۵، تهران، ۱۳۸۸.
- [۲] شوشتری، الف.، سمیعی، الف.، "تاملی بر تاثیر میانقاب های آجری در عملکرد لرزه ای سازه های بتنی"، فنی و مهندسی مدرس، پاییز ۱۳۸۶، شماره ۲۹، صص ۳۱-۵۰.
- [۳] آیین نامه طراحی ساختمان ها در برابر زلزله، استاندارد ۲۸۰۰، ویرایش چهارم، مرکز تحقیقات راه مسکن و شهرسازی، ۱۳۹۴.
- [4] Basic Analysis Guide for ANSYS 14, SAS IP Inc., New York, 2011.
- [۵] رحمانیان، ف.، بارانی، الف.، "نیروی خارج صفحه وارد بر میانقاب ها و بررسی کفایت روابط آیین نامه"، چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه تهران، ۱۳۸۷.
- [۶] مستوفی نژاد، د.، مهینی، س.، کریمی، الف.، "مدل سازی پانل مصالح بنایی تحت بار خارج از صفحه و مقاوم سازی آن به وسیله کامپوزیت های FRP"، پنجمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد، ۱۳۸۹.

- [7] Gilstrap, J.M., Dolan, C.W., "Out-of-plane bending of FRP-reinforced masonry walls", *Composites Science and Technology* 58 (1998): 57-63.
- [8] Velazquez-Dimas, J.I., Ehsani, M.R., "Modeling out-of-plane behavior of URM walls retrofitted with fiber composites science", *Composites for Construction* 34 (2000): 24-32.
- [9] Da-Porto, F., Mosele, F., Modena, C., "Experimental testing of tall reinforced masonry walls under out-of-plane actions", *Construction and Building Materials* 24 (2010): 2559-2571.
- [۱۰] بهشتی اول، ب.، محمدزاده، م.، "رفتار قاب‌های فولادی با میانقاب تحت تحریک زلزله در دو جهت"، ششمین کنفرانس بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، ۱۳۹۰.
- [11] Mohyeddin, A., Goldsworthy, H.M. Gad, E.F., "FE modelling of RC frame with masonry infill panels under in-plane and out-of-plane loading", *Engineering Structures* 51 (2013): 73-87.
- [12] Agnihotri, P., Singhal, V., Rai, D., "Effect of in-plane damage on out-of-plane strength of unreinforced masonry walls", *Engineering Structures* 57 (2013): 1-11.
- [13] Anania, L., D'Agata, G., Giaquinta, C., Badala, A., "Out-of-plane behavior of calcareous masonry panels strengthened by CFRP", *APCDBEE Procedia* 9 (2014): 401-406.
- [14] Bui, T.T., Limam, A., "Out-of-plane behavior of hollow concrete block masonry wall unstrengthened and strengthened with CFRP composite", *Composites: Part B* 67 (2014): 527-542.
- [15] Batikha, M., Alkham, F., "The effect of mechanical properties of masonry on the behavior of FRP-strengthened masonry-in-filled RC frame under cyclic load", *Composite Structures* 134 (2015): 513-522.
- [16] Furtado, A., Rodrigues, H., Arede, A., "Modelling of masonry infill walls participation in the seismic behavior of RC buildings using OpenSees", *Advanced Structure Engineering* 7 (2015): 117-127.
- [17] Furtado, A., Rodrigues, H., "Experimental evaluation of out-of-plane capacity of masonry", *Engineering Structures* 111 (2018): 48-63.
- [18] Chen, W.W., Yeh, Y.K., Hwang, S.J., Lu, C.L., Chen, C.C., "Out-of-plane seismic behavior and CFRP retrofitting of RC frames infilled with brick walls", *Engineering Structures* 34 (2012): 213-224.
- [19] Akhoundi, F., G. Vasconcelos, and P. B. Lourenço. "Out-of-plane behavior of masonry infill walls." *Journal of Seismology and Earthquake Engineering* 19.2 (2017): 113.
- [20] Al Hanoun, M. H., Abrahamczyk, L. and Schwarz, J. "Macromodeling of in-and out-of-plane behavior of unreinforced masonry infill walls." *Bulletin of earthquake engineering* 17.1 (2019): 519-535.
- [21] Pantò, B., L. Silva, G. Vasconcelos, and P. B. Lourenço. "Macro-modelling approach for assessment of out-of-plane behavior of brick masonry infill walls." *Engineering Structures* 181 (2019): 529-549.
- [22] Sadeghi, A., and M. Pouraminian. "An investigation of the vulnerability of Arge Tabriz (Tabriz Citadel)." *8th International Masonry Conference in Dresden, July. 2010.*
- [23] Pouraminian, M., Pourbakhshian, S. and Hosseini, M.M.. "Reliability analysis of Pole Kheshti historical arch bridge under service loads using SFEM." *Journal of Building Pathology and Rehabilitation* 4.1 (2019): 21.
- [24] Lourenco, P., Rots, J., Blaauwendraad, J., "Two approaches for the analysis of the masonry structures: Micro and Macro-Modeling", *Heron* 40 (1995): 313-40.
- [25] Kalali, A., Kabir, M.Z., "Cyclic behavior of perforated masonry walls strengthened with glass fiber reinforced polymers", *Scientia Iranica* 19.2 (2012): 151-65.
- [26] Binda, L., Fontana, A., Frigerio, G., "Mechanical behaviour of brick masonry derived from unit and mortar characteristics", *8th International Brick and Block Masonry Conference, London: Elsevier Applied Science*, (1988): 205-16.
- [27] Radyab Engineered Solution, "Seismic retrofitting with FRP", Available online: Oct. 25, 2019, www.radyab.co/fa/frp.
- [28] Chen, W. F., Han, D. J., "Plasticity for structural engineers," Springer, New York, 1988.
- [29] Willam, K.J. and E.P. Warnke, "Constitutive model for the triaxial behaviour of concrete", *Project International Association Bridge Structural Engineers*, Report 19, Section III, Zurich, (1975): 30-36.
- [30] Betti, M., Orlando, M., and Vignoli, A., "Static behavior of an Italian medieval castle: damage assessment by numerical modelling," *Computers and Structures*, Vol. 89, No. 21-22, PP. 1956-1970, 2011.
- [31] Pineda, P., Roberdor, M., and Gil-Marti, M., "Seismic damage propagation prediction in ancient masonry structures: an application in the non-linear range via numerical models," *The Open Construction Building Technology Journal*, Vol. 5, pp. 71-79, 2011.
- [32] Goldenblat, I., Kopnov, V.A., "Strength of reinforced plastic in the complex stress state", *Polymer Mechanics*, 1(1966): 54-60, 1966.
- [33] Leandro, R.A., Antonio, B., "Drucker-Prager criterion", *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2012, Vol. 45, pp. 995-999.
- [34] ASTM C67 / C67M-18, Standard Test Methods for Sampling and Testing Brick and Structural Clay Tile, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018.

- [35] ACI Committee 440, Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars, ACI 440.1R-06, American Concrete Institute, Farmington Hills 2006.
- [36] ASTM C469 / C469M-14, Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014.
- [37] سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور، معاونت امور فنی، دفتر امور فنی، "دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌های بنایی غیر مسلح موجود"، شماره ۳۷۶، ۱۳۸۶.
- [38] NTCM, "Complementary technical norm for the design and construction of masonry structures", Gaceta Oficial del Distrito Federal, Mexico, 2004.