

Experimental Investigation and Comparison of Out-of-Plane Behavior of AAC Masonry Infill Walls Reinforced with Geogrid and Steel Frames under Cyclic Loading

Rezgar Bookani¹, Masoud Farzam², Kaveh Nezamisavojbolaghi^{3*}, Alaedin Behravesh⁴

1- Ph.D. Candidate, Faculty of Engineering, Mah.C, Islamic Azad University, Mahabad, Iran.

2- Associate Professor, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

3- Assistant Professor, Faculty of Engineering, Mah.C, Islamic Azad University, Mahabad, Iran.

4- Professor, Faculty of Engineering, Mah.C, Islamic Azad University, Mahabad, Iran.

ABSTRACT

Masonry structures are among the most common systems in civil engineering, and in recent years, their retrofitting using modern techniques has received significant attention. This study investigated the out-of-plane performance of infill masonry walls constructed with autoclaved aerated concrete (AAC) blocks. Two strengthening methods were evaluated: vertical steel Frame and geogrid layers. For this purpose, four wall specimens with a span length of 3 meters, a height of 2.65 meters, and a thickness of 20 cm were constructed. The first wall was a control specimen, while the remaining three were strengthened using different techniques. In the second specimen, steel angle profiles were installed at the corners of the wall. In the third and fourth specimens, 60 cm wide geogrid strips were applied at both ends of the wall span. In the fourth specimen, steel straps were used to connect the AAC blocks along horizontal courses. Out-of-plane cyclic loading was applied at the top and mid-span of each wall, and the crack propagation patterns and load-displacement responses were recorded. Micro-modeling was conducted in ABAQUS to assess each strengthening technique's effectiveness numerically. The results showed that vertical steel ties increased the out-of-plane strength up to four times and improved energy dissipation. In contrast, geogrid layers enhanced ductility and energy absorption, with a relatively minor effect on strength.

ARTICLE INFO

Receive Date: 04 July 2025

Revise Date: 12 October 2025

Accept Date: 17 December 2025

Keywords:

AAC infill wall,
out-of-plane behavior,
vertical steel frame,
geogrid,
crack propagation pattern,
load-displacement curve.

All rights reserved to the Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2025.526315.3749>

*Corresponding author: Kaveh Nezamisavojbolaghi
Email address: Kaveh.Nezamisavojbolaghi@iau.ac.ir

بررسی و مقایسه آزمایشگاهی رفتار خارج از صفحه دیوارهای بنایی میان قاب AAC مقاوم سازی شده با ژئوگرید و کلاف فولادی تحت بارگذاری چرخه‌ای

رزگار بوکانی^۱، مسعود فرزام^۲، کاوه نظامی ساوجبلاغی^{۳*}، علالدین بهروش^۴

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مهاباد، مهاباد، ایران

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

۳- استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مهاباد، مهاباد، ایران

۴- پروفسور، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مهاباد، مهاباد، ایران

چکیده

سازه‌های بنایی از جمله سیستم‌های رایج در مهندسی عمران هستند که در سال‌های اخیر مقاوم‌سازی آن‌ها با روش‌های نوین مورد توجه قرار گرفته است. در این پژوهش، عملکرد خارج از صفحه دیوارهای بنایی میان قاب ساخته شده از بلوک هوا دار اتوکلاو شده (AAC) مورد بررسی قرار گرفت. در این راستا دو روش مقاوم‌سازی با استفاده از کلاف فولادی قائم و لایه‌های ژئوگرید ارزیابی شدند. بدین منظور چهار نمونه دیوار با ابعاد طول دهانه ۳ متر، ارتفاع ۲/۶۵ و ضخامت ۰/۲ ساخته شد؛ دیوار اول به عنوان نمونه شاهد و سه نمونه دیگر به روش‌های مختلف مقاوم‌سازی شدند. برای مقاوم‌سازی در نمونه دوم از پروفیل‌های نبشی فولادی در محل گوشه‌های دیوار استفاده شد و در نمونه‌های سوم و چهارم، لایه‌های ژئوگرید به عرض ۶۰ سانتی‌متر در ابتدا و انتهای دهانه دیوار نصب گردید. در نمونه چهارم، علاوه بر نصب لایه‌های ژئوگرید، بلوک‌ها با استفاده از تسمه‌های فولادی در رج‌های افقی به یکدیگر متصل شدند. در ادامه، بارگذاری چرخه‌ای خارج از صفحه در بالای دیوار و در میانه دهانه اعمال شد و الگوی ترک‌خوردگی و نمودار بار-جابجایی هر یک از نمونه‌ها بدست آمد. به منظور بررسی عددی هر یک از روش‌های مقاوم‌سازی، شبیه‌سازی عددی به روش میکرو در نرم‌افزار ABAQUS انجام شد. نتایج نشان داد استفاده از کلاف فولادی قائم مقاومت خارج از صفحه دیوار را تا ۴ برابر افزایش داده و جذب انرژی را نیز بهبود می‌بخشد، در حالی که ژئوگرید بیشتر موجب افزایش شکل‌پذیری و جذب انرژی شده و تأثیر کمتری بر افزایش مقاومت دارد.

کلمات کلیدی: دیوار میان قاب AAC، حرکت خارج از صفحه، قاب فولادی قائم، ژئوگرید، الگوی رشد ترک، نمودار بار-جابجایی.

سابقه مقاله:					شناسه دیجیتال:	
دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ	doi:	
۱۴۰۴/۰۴/۱۳	۱۴۰۴/۰۷/۲۰	۱۴۰۴/۰۹/۲۶	۱۴۰۴/۰۹/۲۶	۱۴۰۵/۰۵/۳۱		
*نویسنده مسئول:					کاوه نظامی ساوجبلاغی	
پست الکترونیکی:					Kaveh.Nezamisavojbolaghi@iau.ac.ir	

۱- مقدمه

دیوارهای بنایی به دلیل صرفه اقتصادی، دسترسی به مصالح پایدار و سهولت اجرا، همواره جایگاه ویژه‌ای در صنعت ساخت‌وساز داشته‌اند. در سال‌های اخیر، با ظهور تکنولوژی‌های نوین در تولید مصالح بنایی، این اجزا بیش از گذشته مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته‌اند [۱]. رفتار دیوارهای میان‌قاب بنایی در سازه‌ها به دلیل تأثیر مستقیم بر عملکرد لرزه‌ای قاب‌ها، یکی از موضوعات مهم و مورد بحث در مهندسی سازه است [۲]. از آنجا که میزان سختی و مقاومت جانبی قاب‌های بتن‌آرمه یا فولادی به‌طور مستقیم از خواص ذاتی و نحوه اتصال میان‌قاب به قاب اصلی تأثیر می‌پذیرد [۳]، ارائه روش‌های بهسازی مناسب برای این دیوارها جهت بهبود کیفیت رفتار لرزه‌ای سازه‌ها امری ضروری است. متغیرهایی همچون ناهمگنی ذاتی دیوارهای بنایی (ترکیب واحدهای بنایی و ملات) و وجود بازشوها [۴ و ۵] اهمیت این موضوع را دوچندان می‌کند. افزون بر این، نوع واحد بنایی، نوع ملات و قدمت ساخت نیز در رفتار لرزه‌ای میان‌قاب‌ها تأثیرگذار هستند [۶]. رفتار جانبی خارج از صفحه، که به شدت تحت تأثیر این عوامل قرار دارد، همچنان یکی از مسائل چالش‌برانگیز است و با وجود ضوابط آیین‌نامه‌ای موجود، نیازمند بررسی و ارزیابی دقیق‌تری در راستای رویکردهای نوین مقاوم‌سازی می‌باشد.

ارزیابی لرزه‌ای سازه‌های بنایی به صورت آزمایشگاهی و عددی، اطلاعات دقیقی را در خصوص شکست و خرابی این سازه‌ها فراهم کرده است. نتایج این ارزیابی‌ها به‌طور خلاصه شامل مواردی چون ترک‌خوردگی در بین دیوارها و کف، در گوشه‌ها و تقاطع دیوارها، شکست خارج از صفحه دیوارهای پیرامونی، ترک در کلاف‌ها، ترک‌های مایل در دیوارها و فرو ریختن دیوارهای باربر می‌باشد [۷]. در این میان، موضوع شکست خارج از صفحه دیوارهای غیرمسلح یکی از مسائل بسیار مهم در حوزه بارگذاری لرزه‌ای است که توجه زیادی را در پژوهش‌ها به خود جلب کرده است. در پژوهش‌های مختلف، راه‌حل‌های متعددی برای پیشگیری از خرابی این نوع سازه‌ها پیشنهاد شد. به عنوان مثال، استفاده از ملات‌های مسلح به تکستایل^۱ [۸، ۹، و ۱۰]، کامپوزیت‌های مسلح به الیاف^۲ [۱۱ و ۱۲]، پانل‌های چوبی با تراشه‌های جهت‌دار^۳ [۱۳ و ۱۴]، و روش‌های مقاوم‌سازی با ژئوسنتیک^۴ [۱۵] از جمله پیشنهادات مطرح شده هستند. رویکرد هر یک از این پژوهش‌ها به کارگیری مصالح نوین در راستای مقاوم‌سازی خارج از صفحه دیوارهای بنایی بود. علاوه بر این، در برخی از تحقیقات دیگر، ایجاد پیکربندی جدید در ساخت دیوارهای بنایی نیز مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. بر اساس مطالعات انجام شده، پارامترهایی چون ضخامت، ارتفاع و اندازه دهانه می‌توانند بر رفتار دیوارهای بنایی تأثیرگذار باشند. همچنین، شرایط مرزی دیوارها نیز به عنوان یک عامل مهم در پیکربندی دیوار مورد توجه قرار گرفته است. به عنوان مثال، یاورتنو و همکاران [۱۶] نشان دادند که دیوارهای بنایی با دهانه‌های بزرگ‌تر در حضور بار محوری، رفتار بهتری از خود نشان می‌دهند.

پژوهش‌ها نشان داده‌اند که مهار دیوارهای بنایی در برابر بارگذاری جانبی خارج از صفحه، نیازمند رویکردهای ترکیبی است که شامل افزایش مقاومت مصالح، بهبود اتصالات بین واحدهای بنایی و استفاده از مصالح نوین می‌باشد. به عنوان مثال، استفاده از بلوک‌های بنایی در هم قفل‌شونده، نمونه‌ای از رویکردهای تغییر هندسه مصالح است که توسط بانسی و دهقان [۱۷] مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این پژوهش نشان داد که ایجاد حالت قفل و بست بین بلوک‌های بنایی، موجب افزایش یکپارچگی و بهبود مقاومت درون صفحه و خارج از صفحه دیوار بنایی می‌گردد. همچنین، استفاده از مصالح نوین مانند پلیمرهای تقویت شده با الیاف^۵ از دیگر رویکردهایی است که در راستای مقاوم‌سازی دیوارهای بنایی مورد توجه قرار گرفته است. در مطالعه عددی که توسط حجازی و ناظری [۱۸] انجام شد، دو نمونه دیوار بنایی با بازشو در حالت بدون مقاوم‌سازی و ۳۰ حالت مختلف مقاوم‌سازی با نوارهای FRP مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این بررسی نشان داد که استفاده از الیاف FRP موجب افزایش انرژی مستهلک شده و تغییر مکان حداکثر در نمونه‌ها می‌شود. در پژوهش دیگری که توسط دهقان و همکاران [۱۹] انجام شد، مشخصات هندسی و مکانیکی واحدهای بنایی و ملات، از جمله مقاومت فشاری، مقاومت کششی قطری و مشخصات

¹ Textile-Reinforced Mortar (TRM)

² Fiber-Reinforced Cementitious Composites (FRCC)

³ Oriented strand boards

⁴ Geosynthetic

⁵ Fiber-Reinforced Polymer (FRP)

چسبندگی اتصال آجر و ملات به عنوان عوامل مؤثر در رفتار دیوارهای بنایی بررسی گردید. نتایج این پژوهش نشان داد که نمونه‌های بنایی با آجرهای سوراخدار و ملات قوی، عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهند.

در مقاوم‌سازی دیوارهای بنایی، بررسی حالات مختلف خرابی تحت اثر بارگذاری‌های مختلف، مسئله‌ای بسیار مهم است که در تعیین رویکردهای افزایش مقاومت سازه تاثیر زیادی دارد. این ارزیابی از طریق بررسی سطوح تغییر مکان‌های مختلف در روند بارگذاری انجام می‌شود و بر اساس آن می‌توان مقادیر پارامترهای بهینه برای طراحی یک طرح مقاوم‌سازی مناسب را به دست آورد [۲۰]. علاوه بر این، وضعیت موجود دیوار بنایی نیز بر ارزیابی رفتار آن و در نتیجه انتخاب روش صحیح مقاوم‌سازی تأثیرگذار است. به عنوان مثال، کاهش کیفیت ملات در طول زمان بهره‌برداری سازه می‌تواند بر عملکرد آن تأثیر گذاشته و رفتار لرزه‌ای سازه را تحت اثر بارگذاری جانبی تغییر دهد [۲۱]. با توجه به اینکه دیوارهای بنایی سازه‌هایی ترد و شکننده هستند، مقاوم‌سازی این سازه‌ها با استفاده از روش‌های مختلف موجب می‌شود که در محدوده‌های رفتاری غیرخطی نیز از خود شکل‌پذیری و مقاومت قابل توجهی نشان دهند [۲۲]. بر این اساس، طرح مقاوم‌سازی مطلوب باید به گونه‌ای باشد که اولاً بتواند جذب انرژی قابل قبولی در طول بارگذاری در دیوار بنایی ایجاد کند، ثانیاً بر نسبت میرایی سازه اثر مثبتی داشته باشد [۲۳] و ثالثاً پایداری سازه را در تغییر مکان‌های بزرگ حفظ کند [۲۴].

۱-۱- دامنه و اهداف پژوهش

دیوارهای بنایی میان‌قاب ساخته شده از بلوک‌های بتن هوادار اتوکلاو شده^۶ به دلیل سبکی و مزایای اجرایی، به طور گسترده در ساختمان‌های شهری استفاده می‌شوند. با این حال، بررسی‌ها نشان داده است که این نوع دیوارها در برابر بارهای جانبی و به ویژه رفتار خارج از صفحه تحت بارگذاری چرخه‌ای، از آسیب‌پذیری قابل توجهی برخوردارند. روش‌های سنتی مقاوم‌سازی مانند تغییر در هندسه بلوک‌های بنایی (ایجاد حالت قفل و بست) یا نوارهای پلیمری هرچند بهبودهایی ایجاد می‌کنند، اما مشکلاتی نظیر دشواری در اجرا و هزینه‌های زیاد، ضرورت به کارگیری روش‌های نوین مقاوم‌سازی را آشکار می‌سازد. در این راستا، چهار نمونه آزمایشگاهی شامل دیوار غیرمسلح (نمونه شاهد)، دیوار مقاوم شده با کلاف فولادی و دو حالت مختلف از دیوار مقاوم شده با ژئوگرید ساخته شده و تحت بارگذاری چرخه‌ای خارج از صفحه قرار گرفتند. بارگذاری به صورت تغییر مکان کنترل اعمال شد و رفتار نمونه‌ها در سطوح مختلف دررفت ارزیابی گردید. شاخص‌هایی همچون شروع ترک خوردگی، روند پیشرفت خرابی و نمودارهای بار-جابجایی برای تحلیل عملکرد نمونه‌ها مورد استفاده قرار گرفتند.

کاربرد لایه‌های ژئوگرید به عنوان روشی سبک، اقتصادی و اجرایی در مقاوم‌سازی دیوارهای بنایی میان‌قاب AAC در برابر بارگذاری خارج از صفحه، یک رویکرد نوین محسوب می‌شود. با این حال، ارزیابی و مقایسه عملکرد لرزه‌ای این دیوارها در پژوهش‌های پیشین با ابهاماتی همراه بوده و کمتر به طور جامع مورد بررسی قرار گرفته است. از این رو، نقطه عطف نوآوری در پژوهش حاضر بر پایه مقایسه رفتار لرزه‌ای سه حالت مختلف، شامل: دیوار مقاوم‌سازی شده با لایه‌های ژئوگرید، دیوار مقاوم شده با کلاف فولادی و دیوار غیرمسلح بنا شده است. چنین رویکرد مقایسه‌ای تاکنون در مطالعات گذشته کمتر مورد توجه قرار گرفته و می‌تواند مبنایی ارزشمند برای انتخاب راهکارهای بهینه مقاوم‌سازی در پروژه‌های عملی فراهم سازد.

۲- پیکربندی آزمایش و برنامه آزمایشگاهی

انتخاب روش‌های مقاوم‌سازی در این پژوهش بر پایه ترکیبی از مطالعات پیشین و ملاحظات اجرایی در پروژه‌های واقعی صورت گرفت. استفاده از نبشی‌های فولادی قائم در چهار گوشه دیوار با هدف افزایش سختی خارج از صفحه و کنترل تغییر شکل‌ها، مبتنی بر مطالعات موفق پیشین در زمینه تقویت دیوارهای بنایی با اجزای فولادی بوده است [۲۵]. از سوی دیگر، بهره‌گیری از نوارهای ژئوگرید با عرض ۶۰ سانتی‌متر در راستای نتایج مطالعات مشابه در خصوص کارایی ژئوستنتیک‌ها در بهبود عملکرد خارج از صفحه دیوارهای بنایی [۲۶] و با توجه به ظرفیت اجرایی در پروژه‌های متداول کشور انتخاب شد. مرور پژوهش‌های اخیر [۲۷، ۲۸ و ۲۹] نیز نشان می‌دهد که مقایسه مستقیم

⁶ Autoclaved Aerated Concrete (AAC)

میان تقویت‌های فولادی و ژئوگریدی در دیوارهای AAC کمتر مورد توجه قرار گرفته است و از این رو، نوآوری پژوهش حاضر در اتخاذ رویکرد مقایسه‌ای میان این دو روش نهفته است.

آزمایش‌های تجربی به‌منظور بررسی رفتار دیوار میان‌قاب بنایی ساخته شده از بلوک AAC در حالت مقاوم‌سازی شده با کلاف فولادی قائم و ژئوگرید تحت اثر بارگذاری چرخه‌ای خارج از صفحه طراحی شد. پیکربندی آزمایش به گونه‌ای تنظیم شد که بارگذاری چرخه‌ای خارج از صفحه توسط یک جک بارگذاری به نمونه‌های مورد بررسی اعمال شده و تغییر مکان خارج از صفحه جک با استفاده از یک خط‌کش مغناطیسی سنجیده شود. با توجه به این که دیوارهای بنایی جزو سازه‌های تردشکن می‌باشند، بنابراین ترک‌های ایجاد شده تحت اثر بارگذاری اعمال شده از اهمیت بالایی در بررسی رفتار آن‌ها دارد. بنابراین موقعیت ترک‌های ایجاد شده در نمونه‌ها در طول آزمایش ثبت شده و مورد بررسی قرار گرفت. در بخش‌های زیر جزئیات مربوط به چیدمان آزمایش، نمونه‌ها و مشخصات مصالح مصرفی ذکر شده است.

۲-۱- جزئیات پیکربندی آزمایش

ساختمان‌ها ممکن است در طول عمر بهره‌برداری چندین بار تحت تأثیر بارهای لرزه‌ای قرار گیرند. در چنین شرایطی، برای کاهش خسارات جانی و مالی، عملکرد دیوارهای میان‌قاب بنایی در برابر بار جانبی خارج از صفحه اهمیت ویژه‌ای دارد. در این پژوهش، هدف مقاوم‌سازی و افزایش شکل‌پذیری نمونه‌های دیوارهای میان‌قاب بنایی در راستای خارج از صفحه تحت اثر بار جانبی ناشی از زلزله بوده است. به همین منظور، شرایط مرزی نمونه‌ها به گونه‌ای طراحی شد که مشابه رفتار دیوار در ساختمان‌های واقعی باشد؛ بدین صورت که در تراز تحتانی دیوار، گیرداری کامل ایجاد شد و در تراز فوقانی بار جانبی شبه‌استاتیکی در دریافت‌های مختلف اعمال گردید. پیکربندی آزمایش در دو مرحله انجام گرفت: در گام نخست، برای ایجاد گیرداری مناسب در تراز کف، مطابق شکل ۱-الف دو نبشی نمره ۱۰ به طول ۳ متر به کف صلب آزمایشگاه متصل گردید. فاصله داخلی این نبشی‌ها برابر با ۲۰ سانتی‌متر، معادل ضخامت بلوک‌های AAC، تنظیم شد. سپس مطابق شکل ۱-ب، هر یک از نمونه‌ها بر روی این بستر صلب اجرا شدند.



(ج)



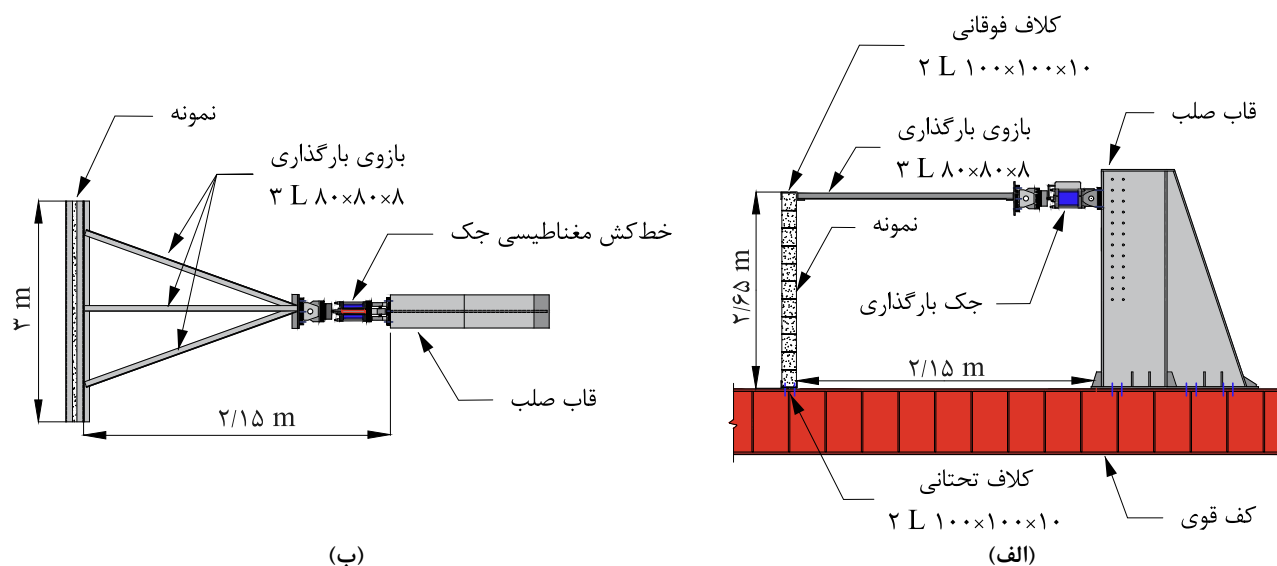
(ب)



(الف)

شکل ۱: الف) کلاف صلب تحتانی، ب) نمونه اجرا شده بر روی کلاف فولادی و ج) نمونه مورد بررسی تحت بارگذاری جک.

در گام بعدی، ساختار بارگذاری برای اعمال نیروی خارج از صفحه شامل کلاف فوقانی، بازوی بارگذاری، جک و قاب صلب مطابق شکل ۲ مونتاز شد. به‌منظور اعمال بار یکنواخت در تراز فوقانی دیوار، مشابه با کلاف تحتانی، از دو نبشی نمره ۱۰ به طول ۳ متر برای ساخت کلاف فوقانی استفاده گردید. برای جلوگیری از چرخش دیوار در حین بارگذاری و تضمین انتقال یکنواخت نیرو، بازوی بارگذاری مطابق شکل ۲-ب از سه نبشی نمره ۸ ساخته شد. این بازو بار وارد شده از جک را در وسط دیوار و همچنین در دو نقطه طرفین، به فاصله یک متر از نبشی میانی، به‌طور یکنواخت به کلاف فوقانی منتقل می‌کند. لازم به ذکر است که جک بارگذاری بر روی قاب صلب نصب شده و تمهیدات لازم برای جلوگیری از هرگونه جابه‌جایی ناخواسته آن در خارج از فرآیند بارگذاری پیش‌بینی شد. در نهایت، شکل ۱-ج پیکربندی نهایی آزمایش را نشان می‌دهد.



شکل ۲: جزئیات شماتیک دو بُعدی پیکربندی آزمایش برای بررسی عملکرد خارج از صفحه نمونه‌ها در حالت الف) برش، ب) پلان.

برای سنجش رفتار نمونه‌ها در این پژوهش از دو شاخص اصلی استفاده شد: نمودار بار-جابجایی و ترک‌های مشاهده شده بر سطح دیوارها. این دو شاخص می‌توانند به صورت جامع رفتار سازه‌ای نمونه‌ها را در شرایط بارگذاری اعمال شده نشان دهند. مطابق شکل ۲-ب، برای ثبت تغییر مکان در هر مرحله بارگذاری (مطابق با پروتکل بارگذاری)، خط کش مغناطیسی متصل به جک در محل اعمال بار نصب گردید. این حسگر به طور پیوسته تغییر مکان‌ها را در طول فرآیند بارگذاری ثبت می‌کرد. ثبت دقیق تغییر مکان در هر مرحله اهمیت ویژه‌ای داشت، زیرا نمودار بار-جابجایی به طور مستقیم مبنای ارزیابی پاسخ سازه و میزان انرژی جذب شده در برابر تغییرات بار اعمالی قرار می‌گیرد.

مطابق شکل ۱-ب، سطح هر یک از نمونه‌ها پیش از بارگذاری با گچ سفید پوشانده شد تا زمینه‌ای با وضوح کافی برای مشاهده و ثبت ترک‌ها و آسیب‌های سطحی فراهم گردد. این اقدام در پژوهش‌هایی که به بررسی رفتار المان‌های بنایی تحت بارگذاری خارج از صفحه می‌پردازند، اهمیت ویژه‌ای دارد، زیرا ترک‌های ایجاد شده بر سطح نمونه می‌توانند اطلاعات ارزشمندی درباره نقاط ضعف و نحوه توزیع تنش‌ها ارائه دهند. در ادامه، به منظور تحلیل صحیح نمودار بار-جابجایی، تغییر مکان‌های ثبت شده توسط خط کش مغناطیسی با داده‌های نیروی اندازه‌گیری شده توسط لودسل تطبیق داده شد. از آنجا که تغییر مکان‌ها در پاسخ به نیروهای اعمالی ثبت می‌شوند، هم‌خوانی داده‌های دو دستگاه امکان ترسیم نمودار بار-جابجایی با دقت و صحت بالاتر را فراهم نمود.

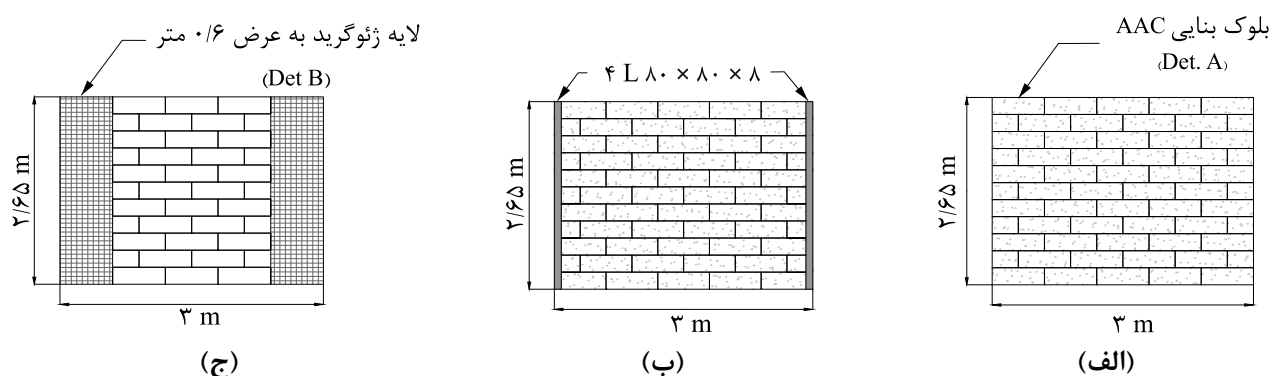
۲-۲- نمونه‌های مورد بررسی

مطابق جدول ۱، در این مطالعه چهار نمونه دیوار بنایی AAC با مشخصات هندسی یکسان و روش‌های مقاوم‌سازی متفاوت مورد بررسی قرار گرفتند. نمونه اول با عنوان URM به عنوان نمونه شاهد و بدون هیچ گونه مقاوم‌سازی در نظر گرفته شد. این دیوار با ضخامت ۰/۲ متر، طول دهانه ۳ متر و ارتفاع ۲/۶۵ متر ساخته شد و مبنای مقایسه عملکرد سایر نمونه‌ها قرار گرفت. انتخاب این نمونه صرفاً برای تحلیل رفتار دیوار بنایی بدون هر گونه تقویت سازه‌ای انجام شد. مشخصات هندسی نمونه شاهد در شکل ۳-الف ملاحظه می‌شود. نمونه دوم با عنوان SFRMW با استفاده از کلاف‌های فولادی قائم مقاوم‌سازی شد. برای این منظور، دو نبشی نمره ۱۰ به عنوان فونداسیون در کف صلب آزمایشگاه متصل گردید و در تراز فوقانی نیز کلافی فولادی شامل دو نبشی نمره ۱۰ قرار داده شد. چهار نبشی نمره ۸ به عنوان کلاف‌های قائم پس از اجرای گچ و خاک در چهار گوشه دیوار نصب و از طریق جوشکاری به فونداسیون تحتانی و کلاف فوقانی متصل شدند تا پیوستگی و انتقال بار میان اجزای دیوار و سیستم کلاف فولادی تضمین گردد. ابعاد این نمونه نیز مشابه نمونه شاهد بوده و در شکل ۳-ب نمایش داده شده است.

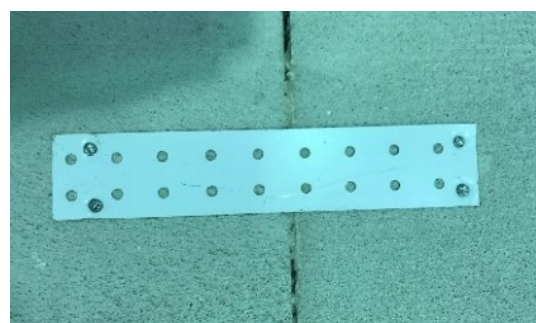
جدول ۱: مشخصات هندسی و جزئیات مقاوم سازی نمونه ها.

ردیف	عنوان نمونه	ابعاد (m)	جزئیات مقاوم سازی
۱	URM	۳×۲/۶۵×۰/۲	بدون مقاوم سازی (نمونه شاهد)
۲	SFRMW	۳×۲/۶۵×۰/۲	مقاوم سازی با استفاده از نبشی نمره ۸ در چهار وجه دیوار به عنوان کلاف قائم
۳	GRMW 1	۳×۲/۶۵×۰/۲	مقاوم سازی با استفاده از دو لایه ژئوگرید و ایجاد محصورشدگی در ابتدا و انتهای دیوار
۴	GRMW 2	۳×۲/۶۵×۰/۲	مقاوم سازی با استفاده از دو لایه ژئوگرید و ایجاد محصورشدگی در ابتدا و انتهای دیوار و ایجاد قفل و بست بین رجهای افقی دیوار با استفاده از تسمه های فولادی

نمونه سوم و چهارم با عناوین به ترتیب GRMW 1 و GRMW 2، با استفاده از دو لایه ژئوگرید به عرض ۵۵ سانتی متر و ایجاد محصورشدگی در ابتدا و انتهای دیوار مقاوم سازی گردیدند. در فرآیند اجرا، لایه های ژئوگرید ابتدا بر روی بستر فونداسیون قرار داده شده و دیوار بنایی بر روی آن ها ساخته شد. سپس این لایه ها به ابتدا و انتهای دهانه دیوار دورپیچ شدند و در نهایت با اجرای لایه گچ و خاک بر سطح دیوار تثبیت گردیدند. تفاوت اجرای دو نمونه در این بود که مطابق با شکل ۴، در نمونه چهارم به منظور ایجاد قفل و بست میان بلوک های AAC در رجهای افقی، از تسمه های فولادی و پیچ و رول پلاگ استفاده شد. هدف از این پیکربندی، بررسی رفتار جانبی خارج از صفحه دیوار تحت تأثیر عملکرد یکپارچه بلوک ها در کنار مقاوم سازی با لایه های ژئوگرید بود. در هر دو حالت، انتظار می رفت که این روش موجب افزایش پایداری دیوار در برابر نیروهای خمشی و برشی در شرایط بارگذاری جانبی خارج از صفحه گردد. ابعاد این نمونه ها نیز مطابق شکل ۳. پ همانند سایر نمونه ها با ضخامت ۰/۲ متر، طول دهانه ۳ متر و ارتفاع ۲/۶۵ متر در نظر گرفته شد. شکل ۵ نمای کلی از وضعیت نهایی هر یک از نمونه ها پس از اجرا بر روی بستر صلب را ارائه می دهد.



شکل ۳: نمونه الف (URM)، ب (SFRMW)، ج (GRMW 1 و GRMW 2).



شکل ۴: تسمه های فولادی نصب شده بین بلوک های AAC در رجهای افقی دیوار.



(ج)



(ب)

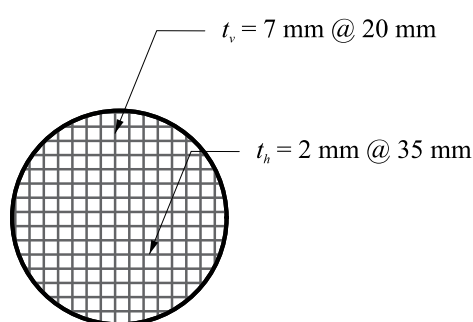


(الف)

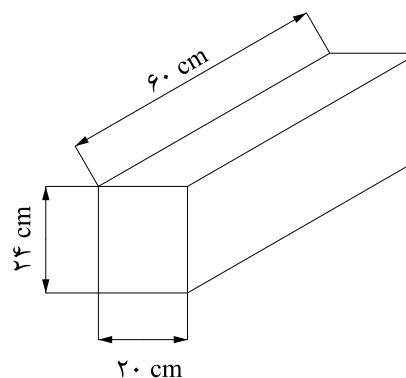
شکل ۵: نمونه (الف) شاهد، (ب) مقاوم سازی شده با کلاف قائم، و (ج) مقاوم سازی شده با ژئوگرید پس از اجرا بر روی بستر صلب.

۲-۳- مشخصات مصالح مصرفی

همان طور که در شکل ۳ مشاهده می شود، تمامی نمونه های مورد بررسی متشکل از ۱۱ رج می باشند که در هر رج، پنج عدد بلوک AAC قرار گرفته است. بلوک های مورد استفاده از نوع استاندارد بوده و مشخصات هندسی آن ها در شکل ۶ الف ارائه گردید. بر اساس نتایج حاصل از آزمون های تجربی مقاومت مصالح مطابق با استاندارد ملی ایران شماره ۷۷۸۲ و ASTM C۴۹۵، حداقل مقاومت فشاری این بلوک ها برابر با ۳/۱ مگاپاسکال و مدول الاستیسیته آن ها نیز در حدود ۲۲۵ مگاپاسکال اندازه گیری گردید. وزن مخصوص خشک متوسط بلوک ها برابر با ۵۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب بوده که با مقادیر رایج برای بلوک های سبک وزن سازگار می باشد. برای تأمین پیوستگی مناسب بین بلوک ها در پیکربندی دیوار، از چسب مخصوص AAC استفاده شد. ویژگی های مکانیکی این چسب، بر اساس استاندارد ASTM C۱۰۹ و ASTM C۴۳۸ مطابق نتایج آزمایشگاهی، به صورت زیر به دست آمد: مقاومت کششی برابر با ۰/۳ مگاپاسکال، مقاومت فشاری برابر با ۵ مگاپاسکال، مقاومت خمشی برابر با ۱/۲ مگاپاسکال، و وزن مخصوص برابر با ۱۵۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب. ضخامت لایه چسب مورد استفاده بین رج های مختلف دیوار، به صورت یکنواخت و با دقت یک میلی متر اجرا گردید تا از ایجاد ناپیوستگی های احتمالی و کاهش عملکرد مکانیکی در اتصالات جلوگیری شود.



(ب)



(الف)

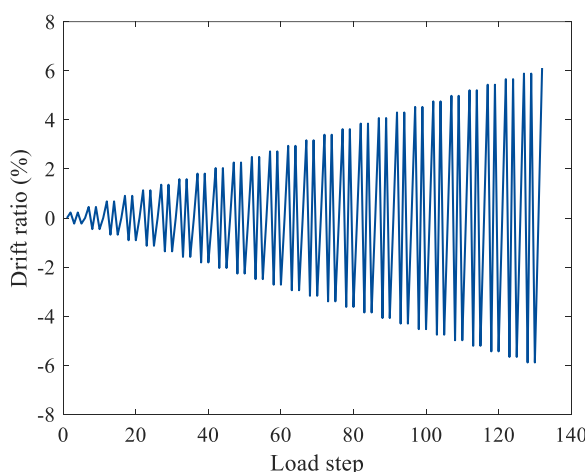
شکل ۶: مشخصات هندسی (الف) بلوک های AAC (Det A در شکل ۳. الف) و (ب) ژئوگرید مورد استفاده در این پژوهش (Det B در شکل ۳. ج).

مشخصات مکانیکی فولاد پروفیل های نبشی به کار رفته در نمونه مقاوم سازی شده با کلاف فولادی قائم مطابق با استاندارد A۳۶/ISIRI۳۷۶۵ می باشد که مقاومت کششی نهایی، حداقل مقاومت تسلیم، و مدول الاستیسیته آن به ترتیب برابر با ۳۷۰، ۲۴۰ مگاپاسکال، و ۲۰۷ گیگاپاسکال می باشد. مطابق شکل ۶. ب طول و عرض چشمه مش در ژئوگرید مورد استفاده در نمونه سوم به ترتیب برابر با ۳۵ و ۲۰ میلی متر است. به منظور ایجاد محصورشدگی در ابتدا و انتهای دهانه دیوار نوار ژئوگرید در هر بخش به عرض ۵۵ سانتی متر و طول ۵/۷ متر نصب گردید. بر اساس آزمایش های مقاومت مصالح انجام شده بر اساس استاندارد ASTM D۶۶۳۷، مقاومت کششی ژئوگرید در جهت MD

(جهت ماشین) برابر با 6×10^4 نیوتن بر متر و در جهت CD (جهت عرضی) برابر با 2×10^4 نیوتن بر متر است. همچنین، کرنش معادل مقاومت در این ژئوگرید ۰/۱۲ است که نشان دهنده‌ی عملکرد مناسب آن در شرایط کششی و فشاری مختلف می‌باشد.

۴-۲- بارگذاری نمونه‌ها

در بررسی رفتار خارج از صفحه دیوارهای بنایی تحت اثر بارگذاری جانبی، عوامل متعددی نقش تعیین کننده‌ای دارند که می‌توان به شرایط مرزی، موقعیت و راستای اعمال بار، نوع بارگذاری، ملات مورد استفاده و روش‌های مقاوم سازی اشاره کرد. برای تحلیل دقیق این رفتار، ابتدا نمونه‌های دیوار بنایی ساخته شده و چیدمان آزمایش مطابق با استانداردهای مرتبط تنظیم گردید. سپس، پروتکل بارگذاری بر اساس دستورالعمل‌های استاندارد ATC^۷ برای ارزیابی رفتار لرزه‌ای این نمونه‌ها تنظیم شد. مطابق شکل ۷ در این آزمایش، بارگذاری به صورت چرخه‌ای و با کنترل تغییر مکان اعمال گردید. بارگذاری بر اساس پروتکل تعیین شده، تا رسیدن به جابجایی نسبی ۶ درصد با سرعت ۰/۱ کیلونیوتن بر دقیقه در ۵۰ چرخه به تمامی نمونه‌های دیوار در تراز فوقانی آن‌ها اعمال شد. این فرایند به گونه‌ای طراحی شده بود که اثرات بارگذاری جانبی و رفتار غیرخطی دیوارها در شرایط مختلف به دقت ارزیابی گردد.



شکل ۷: پروتکل بارگذاری مطابق با استاندارد ATC.

۴- نتایج آزمایش و بحث

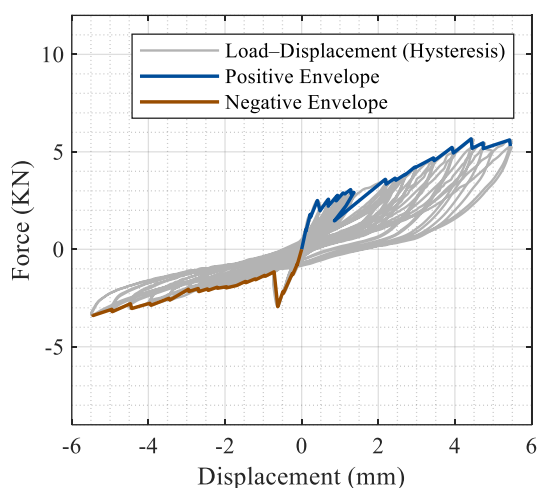
در این بخش نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها در قالب نمودارهای بار-جابجایی، منحنی پوش، الگوهای رشد ترک و پارامترهای سختی اولیه، شکل پذیری، مقاومت نهایی و انرژی جذب شده در نمونه‌ها ارائه می‌گردد. نمودارهای بار-جابجایی هر نمونه بیانگر ویژگی‌های متفاوتی هستند که به روشنی اثر مقاوم سازی انجام شده بر عملکرد دیوارها را نشان می‌دهند. برای تحلیل دقیق تر، رفتار نمونه‌ها در چند نقطه کلیدی از نمودار بار-جابجایی مورد بررسی قرار گرفت؛ از جمله پایان ناحیه خطی (شروع رفتار غیرخطی و ترک اولیه)، نقطه بار حداکثر، و آغاز افت بار پس از رسیدن به ظرفیت نهایی. مقایسه نمونه‌ها در این نقاط، امکان ارزیابی جامع سختی اولیه، شکل پذیری و میزان جذب انرژی آن‌ها را فراهم می‌آورد. بر این اساس، نتایج مربوط به طرح‌های مقاوم سازی پیشنهاد شده در بخش‌های ذیل استخراج و مقایسه گردید.

۴-۱- بررسی رفتار نمونه‌ها بر اساس نمودار بار-جابجایی

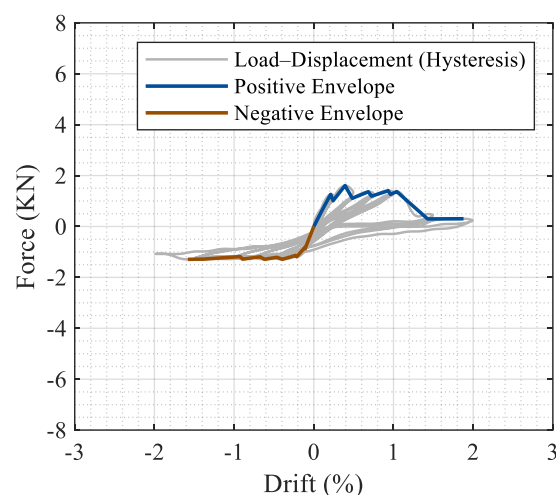
نمودار بار-جابجایی و منحنی پوش، شاخص‌های کلیدی برای ارزیابی رفتار نمونه‌ها تحت بارگذاری چرخه‌ای محسوب می‌شوند. در شکل ۸ نمودارهای بار-جابجایی چهار نمونه مورد بررسی ارائه شده‌اند که در آن، شاخه پوش مثبت با رنگ آبی و شاخه پوش منفی با رنگ قرمز نمایش داده شده است. در شکل ۸، الف نمودار بار-جابجایی حاصل از بارگذاری نمونه URM ملاحظه می‌گردد که مطابق پروتکل

⁷ Applied Technology Council

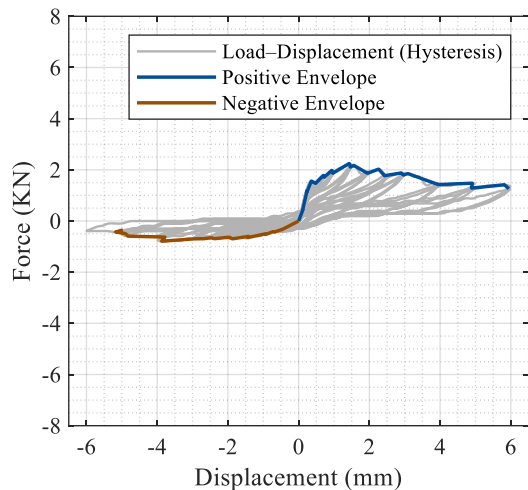
بارگذاری تا تغییر مکان نسبی ۲ درصد بارگذاری گردید. دلیل این موضوع پیشگیری از شکست و فروریزش دیوار که موجب آسیب رسانی به تجهیزات آزمایشگاهی می‌شد، بود. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، نمودار بار-جابجایی به دست آمده از نمونه URM، فاقد تقارن نسبت به مبدأ مختصات است. این عدم تقارن ناشی لغزش رج دوم روی رج اول دیوار پس از ایجاد ترک اولیه می‌باشد که بلافاصله پس از پایان رفتار خطی در دریفت ۰/۲۱ درصد و مقاومت ۱/۲۵ کیلونیوتن رخ داد. مقاومت حداکثر در نمونه URM برابر با ۱/۶۰ کیلونیوتن بود که در دریفت ۰/۴ درصد در شاخه مثبت بارگذاری ثبت گردید. پس از دریفت ۰/۴ درصد با گسترش ترک‌ها و کاهش چسبندگی در لایه ملات افت مقاومت رخ داده و در نهایت در دریفت ۲ درصد میزان مقاومت خارج از صفحه دیوار به ۰/۳ کیلونیوتن کاهش یافت.



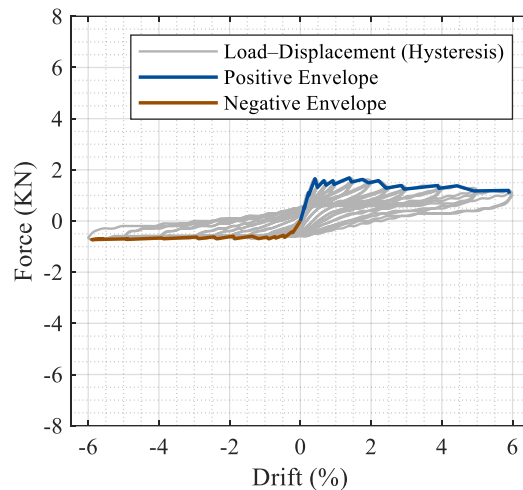
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۸: نمودار بار-جابجایی حاصل از بارگذاری جانبی خارج از صفحه و منحنی پوش آن در نمونه الف (URM، ب) SFRMW، ج) GRMW 1 و د)

GRMW 2

نمونه SFRMW در این پژوهش به عنوان نماینده‌ای از روش‌های متداول مقاوم‌سازی خارج از صفحه دیوارهای میانقاب در ساختمان‌ها مورد بررسی قرار گرفت. بارگذاری این نمونه، به دلیل وجود پروفیل‌های نبشی و نقش آن‌ها در جلوگیری از فروریزش ناگهانی دیوار در دررفت‌های بزرگ‌تر، تا مقدار ۶ درصد ادامه یافت. مطابق شکل ۸، ب، وقوع اولین افت مقاومت در دررفت‌های مختلف شاخه‌های مثبت و منفی منحنی بار-جابجایی، موجب تفاوت رفتار نمونه در دو راستای بارگذاری شد. در شاخه منفی، افت مقاومت به صورت ناگهانی و بلافاصله پس از ناحیه خطی، در دررفت ۰/۶۲ درصد و متناظر با نیروی ۲/۹۶ کیلونیوتن رخ داد، در حالی که در شاخه مثبت، پس از ورود دیوار به

ناحیه غیرخطی، در دریافت ۱/۳۶ درصد کاهش مقاومت به میزان ۵۱ درصد مشاهده گردید. این پدیده متناظر با آغاز و گسترش ترک در لایه ملات بین رج اول و دوم از تراز تحتانی دیوار بود. پس از کاهش چسبندگی ملات در این ناحیه، حضور نبشی‌های قائم سبب شد مقاومت دیوار مجدداً روند افزایشی پیدا کند و مقدار آن تا دریافت ۶ درصد در هر دو راستای بارگذاری به ۵/۵۰ کیلو نیوتن برسد. علاوه بر این، وجود پروفیل‌های نبشی مانع از فروریزش و ناپایداری ناگهانی دیوار پس از زوال کامل چسبندگی ملات در رج‌های مذکور گردید.

نمودار بار-جابجایی نمونه‌های مقاوم‌سازی شده با استفاده از ژئوگرید، که از اهداف اصلی این پژوهش در بررسی رفتار خارج از صفحه محسوب می‌شوند، در شکل‌های ۸. ج و ۸. د ارائه شده است. تفاوت اصلی دو نمونه در نحوه‌ی اتصال رج‌های افقی دیوار است؛ به‌طوری که در نمونه GRMW 2، رج‌های افقی با استفاده از ورق‌های فولادی و رول‌پلاگ مطابق با شکل ۴ به یکدیگر متصل شده‌اند. با مقایسه‌ی نمودارهای ارائه شده در شکل‌های ۸. ج و ۸. د مشخص می‌شود که وجود این ورق‌های فولادی در نمونه GRMW 2 موجب افزایش تدریجی مقاومت پس از ورود نمونه به ناحیه‌ی غیرخطی تا دریافت ۱/۴۴ درصد گردید، به‌طوری که مقاومت آن به مقدار ۲/۲۵ کیلو نیوتن رسید. در مقابل، در نمونه GRMW 1، حداکثر مقاومت در پایان ناحیه‌ی خطی و در دریافت ۰/۴۱ درصد متناظر با نیروی ۱/۶۵ کیلو نیوتن به‌دست آمد. پس از دستیابی به مقاومت حداکثر در هر دو نمونه، روند بارگذاری تا تغییرمکان نسبی ۶ درصد ادامه یافت و با گسترش ترک‌ها در لایه‌های ملات بین رج‌های اول و دوم و نیز دوم و سوم، مقادیر مقاومت کاهش یافته و به‌ترتیب به ۱/۱ و ۱/۲۶ کیلو نیوتن در نمونه‌های GRMW 1 و GRMW 2 رسید. با این حال، وجود لایه‌های ژئوگرید در هر دو نمونه مانع از فروریزش و ناپایداری ناگهانی دیوار پس از کاهش کامل چسبندگی ملات شد.

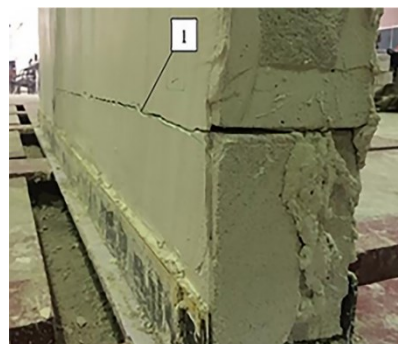
۴-۲- بررسی الگوی رشد ترک‌ها در نمونه‌ها در دریافت‌های مختلف

بررسی الگوی رشد و گسترش ترک‌ها در مراحل مختلف بارگذاری از اهمیت بالایی برخوردار است، زیرا رفتار ترک‌ها در مصالح تردی همچون بنایی نقش تعیین‌کننده‌ای در آغاز ناحیه غیرخطی، کاهش سختی و زوال مقاومت سازه دارد. تحلیل نحوه شکل‌گیری و گسترش ترک‌ها می‌تواند بینش دقیقی از مکانیزم خرابی و عملکرد واقعی دیوار در برابر بارهای جانبی فراهم سازد. در این پژوهش، پایان ناحیه خطی، الگوی ظهور و گسترش ترک‌ها در چهار نمونه مورد بررسی تفاوت‌های قابل‌توجهی نشان داد. در نمونه URM، پایان رفتار خطی در دریافت ۰/۲۱ درصد رخ داد. مطابق شکل ۹. الف در این نمونه، ترک‌های اولیه در ملات بین رج اول و دوم از پایین دیوار و در ناحیه میانی دهانه ظاهر شدند و سپس به سمت کناره‌های دیوار گسترش یافتند. با افزایش تغییرمکان، چسبندگی ملات در این لایه از بین رفت و ترک‌های مذکور به مرز گسیختگی کامل رسیدند.

در نمونه SFRMW، رفتار خطی در دریافت ۰/۶۲ درصد خاتمه یافت. ترک‌های اولیه مشابه نمونه شاهد، از ملات بین رج اول و دوم در میانه دهانه آغاز شدند، اما در ادامه مسیر گسترش آن‌ها متفاوت بود. مطابق شکل ۹. ب در نواحی کناری دیوار، ترک‌ها از لایه ملات به سمت بلوک‌های بالایی امتداد پیدا کردند که نشان از انتقال تمرکز تنش به اطراف نبشی‌های قائم دارد. در نمونه GRMW 1، پایان ناحیه خطی در دریافت ۰/۴۱ درصد مشاهده شد. مطابق شکل ۹. ج ترک‌ها ابتدا در لایه‌های ملات بین رج اول و دوم و سپس در لایه ملات رج‌های سوم و چهارم ظاهر شدند. کاهش چسبندگی در این لایه‌ها موجب شد دیوار در همین محدوده به حداکثر مقاومت خود برسد. با این حال، حضور لایه‌های ژئوگرید سبب شد باز و بسته‌شدن ترک‌ها محدود گردد و پایداری نسبی دیوار نسبت به نمونه شاهد افزایش یابد. در نمونه GRMW 2، رفتار خطی در دریافت ۰/۳۵ درصد خاتمه یافت. استفاده همزمان از تسمه‌های فولادی و ژئوگرید موجب یکپارچگی بیشتر رج‌های افقی دیوار شد، به‌گونه‌ای که مطابق شکل ۹. د ترک‌ها به‌صورت هم‌زمان در لایه‌های ملات رج‌های اول تا چهارم پدیدار شدند. وجود این اجزای تقویتی مانع از بازشدگی بیش‌ازحد ترک‌ها گردید و پایداری دیوار را در دریافت‌های بزرگ‌تر حفظ کرد. در نتیجه، حداکثر مقاومت دیوار در محدوده غیرخطی و در دریافت حدود ۱/۴۴ درصد به‌دست آمد. با مقایسه ترک‌های مشاهده شده در چهار نمونه (شکل ۹)، مشخص می‌شود که روش‌های مقاوم‌سازی به کار رفته تأثیر قابل‌توجهی در کنترل عرض و گسترش ترک‌ها داشته‌اند. به‌طور خاص، استفاده از کلاف فولادی قائم و لایه‌های ژئوگرید موجب تأخیر در بروز ترک‌های اصلی و افزایش دامنه رفتار خطی در دریافت‌های بالاتر شده است، که این امر بیانگر بهبود عملکرد سازه‌ای و افزایش شکل‌پذیری دیوارهای تقویت شده است.



(ب)



(الف)



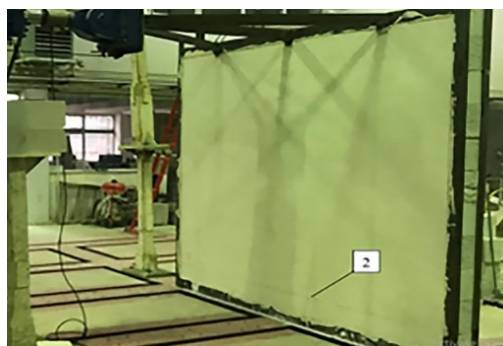
(د)



(ج)

شکل ۹: بروز اولین ترک‌ها (پایان ناحیه رفتار خطی) در نمونه الف) URM با دررفت ۰/۲۱ درصد، ب) SFRMW با دررفت ۰/۶۲ درصد، ج) GRMW 1 با دررفت ۰/۴۱ درصد، و د) GRMW 2 با دررفت ۰/۲۵ درصد

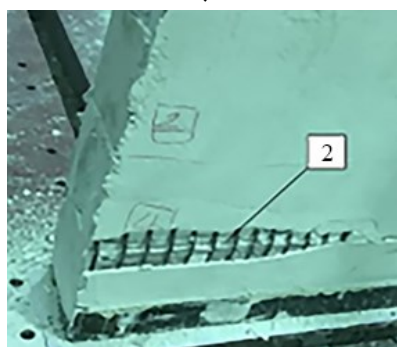
در مرحله متناظر با حداکثر مقاومت، الگوی ترک‌خوردگی دیوارها نسبت به مراحل پیشین تغییرات محسوسی نشان داد و اطلاعات مهمی از رفتار نهایی سازه پیش از افت مقاومت ارائه داد. در نمونه URM، حداکثر مقاومت در ناحیه غیرخطی و در دررفت ۰/۴ درصد ثبت گردید. همان‌طور که در شکل ۱۰ الف مشاهده می‌شود، عرض ترک‌های ایجاد شده در لایه ملات بین رج اول و دوم به‌طور قابل توجهی افزایش یافته و چسبندگی ملات در این ناحیه به‌طور کامل از بین رفته است. در نتیجه، لغزش نسبی در این لایه اتفاق افتاده که علت اصلی رفتار نامتقارن منحنی بار-جابجایی محسوب می‌شود. در نمونه SFRMW، حداکثر مقاومت دیوار در دررفت ۵/۵ درصد و در پایان بارگذاری مشاهده شد. با این حال، برای بررسی دقیق‌تر روند رشد ترک‌ها، وضعیت ترک‌ها در دررفت میانی ۳/۵ درصد مورد تحلیل قرار گرفت. مطابق شکل ۱۰ ب، ترک‌های اولیه که در پایان رفتار خطی شکل گرفته بودند، در طول بارگذاری چرخه‌ای باز و بسته شده‌اند اما عرض آن‌ها نسبت به نمونه شاهد به‌مراتب کمتر است. این رفتار حاکی از آن است که وجود نبشی‌های قائم موجب محدود شدن بازشدگی ترک‌ها و تمرکز تنش در اطراف اعضای فولادی شده و در نتیجه از گسترش ترک و کاهش سریع مقاومت جلوگیری نموده است. در نمونه GRMW 1، حداکثر مقاومت دیوار متناظر با پایان ناحیه خطی و در دررفت ۰/۴ درصد حاصل گردید. وضعیت ترک‌ها در دررفت اندکی پس از مقاومت حداکثر (۰/۴۵ درصد) در شکل ۱۰ ج نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که در این مرحله افت محسوسی در مقاومت وجود ندارد، اما عرض ترک‌ها نسبت به پایان رفتار خطی افزایش یافته است. با این حال، به دلیل حضور لایه‌های ژئوگرید در نواحی ابتدایی و انتهایی دهانه دیوار، باز و بسته شدن ترک‌ها محدود شده که این موضوع بیانگر عملکرد مؤثر ژئوگرید در حفظ پیوستگی میان رج‌ها و افزایش شکل‌پذیری است. در نمونه GRMW 2، حداکثر مقاومت در دررفت ۱/۴۴ درصد ثبت گردید که نشان‌دهنده افزایش قابل توجه ظرفیت تغییرمکانی نسبت به نمونه GRMW 1 است. مطابق شکل ۱۰ د، ترک‌ها در لایه‌های ملات رج‌های اول تا سوم به صورت ناگهانی و سراسری در دهانه دیوار ظاهر شدند. وجود تسمه‌های فولادی علاوه بر لایه‌های ژئوگرید، موجب شد که ترک‌ها پس از پایان رفتار خطی به صورت ناگهانی شکل گیرند. در نتیجه، مقاومت حداکثر دیوار با افزایش تغییرمکان نسبی به‌دست آمد و وقوع آن در دررفت ۱/۴۴ درصد حدود چهار برابر نمونه GRMW 1 بیانگر عملکرد برتر سیستم ترکیبی فولاد و ژئوگرید در افزایش ظرفیت و پایداری دیوار تا مراحل نهایی بارگذاری است.



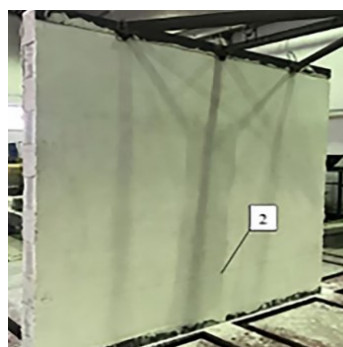
(ب)



(الف)



(د)



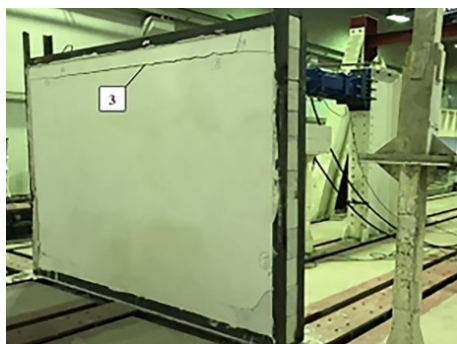
(ج)

شکل ۱۰: وضعیت ترک خوردگی در سطح دیوار متناظر با حداکثر مقاومت در نمونه الف) URM با دررفت ۰/۴ درصد، ب) SFRMW با دررفت ۳/۵ درصد، ج) GRMW 1 با دررفت ۰/۴۵ درصد، و د) GRMW 2 با دررفت ۱/۴۴ درصد

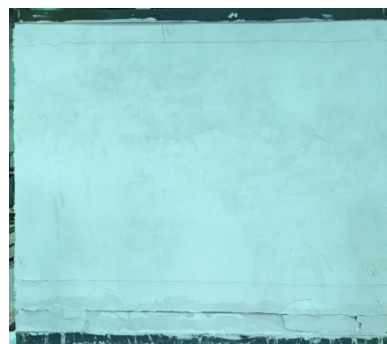
در پایان بارگذاری، الگوی ترک خوردگی دیوارها تغییرات قابل توجهی را نسبت به مراحل پیشین نشان داد. شکل‌های ۱۱. الف تا ۱۱. د به ترتیب وضعیت خرابی نهایی چهار نمونه آزمایش شده را نمایش می‌دهند. در شکل ۱۱. الف، وضعیت خرابی URM در دررفت نهایی ۲ درصد نشان داده شده است. با ادامه رفتار غیرخطی و رسیدن دیوار به دررفت ۰/۶۵ درصد، ترک جدیدی در لایه ملات بین رج‌های دهم و یازدهم ظاهر گردید که با افزایش تغییر مکان تا دررفت ۲ درصد، عمق این ترک افزایش یافته و چسبندگی ملات در این ناحیه نیز از بین رفت. در نتیجه، با تداوم بارگذاری در دررفت‌های بزرگ‌تر، ناپایداری در بدنه دیوار مشاهده شد و بارگذاری در همین مرحله متوقف گردید. در نمونه SFRMW، مطابق شکل ۱۱. ب، بارگذاری تا دررفت ۵/۵ درصد ادامه یافت و مقاومت نهایی دیوار در همین مرحله ثبت شد. مشابه نمونه شاهد، ترک جدیدی در لایه ملات بین رج‌های دهم و یازدهم در دررفت ۲/۱۸ درصد ایجاد شد، با این تفاوت که این ترک برای نخستین بار در این دررفت در نمونه مقاوم‌سازی شده مشاهده گردید. با افزایش دررفت تا ۵/۵ درصد، عرض این ترک به‌طور محسوسه افزایش یافته و چسبندگی ملات در این ناحیه از بین رفت. همچنین، وجود نبشی‌های فولادی موجب شد که ترک‌های جدید در بلوک‌های ابتدایی و انتهایی رج فوقانی به درزهای قائم بین بلوک‌های انتهایی گسترش یابند. به این ترتیب، علاوه بر ترک‌های افقی، ترک‌های قائم نیز در راستای اضلاع قائم بلوک‌ها ظاهر شدند که نشانه‌ی تمرکز تنش در محل اتصالات است.

مطابق شکل‌های ۱۱. ج و ۱۱. د، وضعیت خرابی نهایی در نمونه‌های GRMW 1 و GRMW 2 از الگوی مشابهی پیروی می‌کند. در هر دو نمونه، ترک اصلی در ناحیه ملات بین رج‌های دهم و یازدهم در دررفت حدود ۰/۷ درصد شکل گرفت. با این تفاوت که در نمونه GRMW 1، ترک‌ها به‌صورت تدریجی از میانه دهانه آغاز و به سمت کناره‌ها گسترش یافتند، در حالی که در نمونه GRMW 2 به دلیل حضور ورق‌های فولادی بین رج‌ها، ترک‌ها به‌طور ناگهانی و هم‌زمان در طول دهانه ظاهر شدند. با ادامه روند بارگذاری، باز و بسته شدن متوالی ترک‌ها موجب افزایش تدریجی عرض آن‌ها گردید. نکته قابل توجه دیگر، ظهور ترک‌های قائم در رج آخر دیوار است که بیانگر آغاز جدایش بلوک‌های فوقانی از توده اصلی دیوار در مراحل نهایی بارگذاری است. در نمونه GRMW 1، این ترک‌های قائم در کناره دهانه و در دررفت حدود ۰/۷۵ درصد ایجاد شدند، در حالی که در نمونه GRMW 2، این ترک‌ها در میانه دهانه و در دررفت حدود ۰/۹ درصد شکل گرفتند. این پدیده ناشی از جدایش جزئی ورق‌های فولادی بین بلوک‌ها در ناحیه مذکور بوده است. همچنین، در نمونه سوم، وجود لایه‌های ژئوگرید

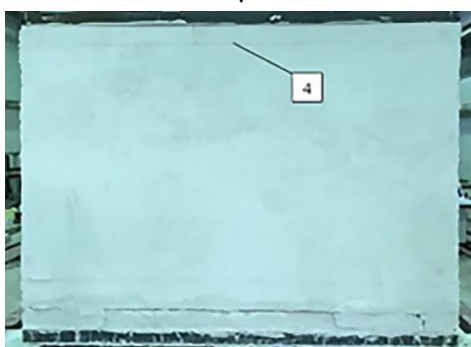
در ابتدا و انتهای دهانه موجب گردید که بلوک‌های درون محدوده ژئوگرید به صورت یکپارچه عمل کرده و ترک‌های قائم عمدتاً در خارج از محدوده محصور شده توسط ژئوگرید تشکیل شوند.



(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۱: وضعیت ترک خوردگی در سطح دیوار متناظر با دریفیت حداکثر در نمونه الف) URM (دریفیت ۲ درصد)، ب) SFRMW (دریفیت ۵/۵ درصد)، ج) GRMW 1 (دریفیت ۶ درصد)، و د) GRMW 2 (دریفیت ۶ درصد)

مطابق جدول ۲، مقادیر مقاومت در سه مرحله کلیدی بارگذاری (پایان ناحیه خطی، مقاومت حداکثر و اولین افت مقاومت) برای چهار نمونه دیوار مورد بررسی ارائه شده است. این مقایسه نشان می‌دهد که نوع سیستم مقاوم‌سازی تأثیر قابل توجهی بر رفتار دیوارها تحت بارگذاری چرخه‌ای داشته است. در نمونه URM، پایان ناحیه خطی در دریفیت ۰/۲ درصد رخ داد و مقاومت حداکثر ۱/۶۰۵ کیلونیوتن در دریفیت ۰/۴ درصد ثبت شد. اولین افت مقاومت در دریفیت ۰/۴۸ درصد و به مقدار ۱/۱۰ کیلونیوتن رخ داد که نشان‌دهنده کاهش سریع چسبندگی ملات و گسترش ترک‌های افقی در لایه‌های تحتانی دیوار است. این نمونه رفتار شکننده و کاهش ناگهانی نیرو پس از مقاومت حداکثر را نشان می‌دهد. نمونه SFRMW با وجود نبشی‌های قائم، رفتار شکل‌پذیرتری از خود نشان داد. مقاومت پایان ناحیه خطی ۲/۹۴۰ کیلونیوتن در دریفیت ۰/۶۲ درصد ثبت شد و مقاومت حداکثر ۵/۶۱۰ کیلونیوتن در دریفیت ۵/۵ درصد رخ داد. اولین افت مقاومت در دریفیت ۰/۷۱ درصد و مقدار ۱/۱۵ کیلونیوتن بود، اما کاهش مقاومت نسبت به نمونه در دریفیت بالاتری صورت گرفت که بیانگر اثر مثبت نبشی‌ها در محدود کردن باز و بسته شدن ترک‌ها و تمرکز تنش در نواحی مقاوم‌سازی است.

در نمونه GRMW 1، پایان ناحیه خطی و مقاومت حداکثر هر دو برابر ۱/۶۵۰ کیلونیوتن و در دریفیت ۰/۴۱ درصد بود. اولین افت مقاومت در دریفیت ۰/۴۸ (مشابه نمونه شاهد) و با مقدار ۱/۳۰ کیلونیوتن با افزایش ۱۸ درصدی نسبت به نمونه شاهد رخ داد. حضور لایه‌های ژئوگرید موجب محدودیت باز و بسته شدن ترک‌ها شد، به طوری که رفتار نمونه نسبت به URM پایدارتر بود. نمونه GRMW 2 که ترکیبی از ژئوگرید و تسمه‌های فولادی داشت، افزایش قابل توجهی در ظرفیت تغییرشکل و مقاومت نشان داد. مقاومت حداکثر ۲/۲۴۶ در دریفیت ۱/۴۴ درصد به دست آمد و اولین افت مقاومت در دریفیت ۱/۹۴ درصد و مقدار ۱/۸۶۰ کیلونیوتن ثبت شد. این نمونه بیشترین پایداری پس از بار اوج را نشان داد و ترک‌ها تحت کنترل ورق‌ها و تسمه‌های فولادی و ژئوگرید به تدریج و بدون فروپاشی ناگهانی گسترش یافتند. به طور کلی، مقایسه داده‌های جدول و مشاهدات ترک‌خوردگی نشان می‌دهد که استفاده از نبشی‌های قائم و لایه‌های ژئوگرید، به ویژه در ترکیب با

ورق‌های فولادی، موجب افزایش ظرفیت مقاومت، بهبود رفتار شکل‌پذیری و محدود کردن باز و بسته شدن ترک‌ها در دیوارهای میانقاب شده است. این نتایج بیانگر تأثیر مثبت رویکردهای مقاوم‌سازی در ارتقای پایداری و تأخیر در زوال مقاومت دیوارها است.

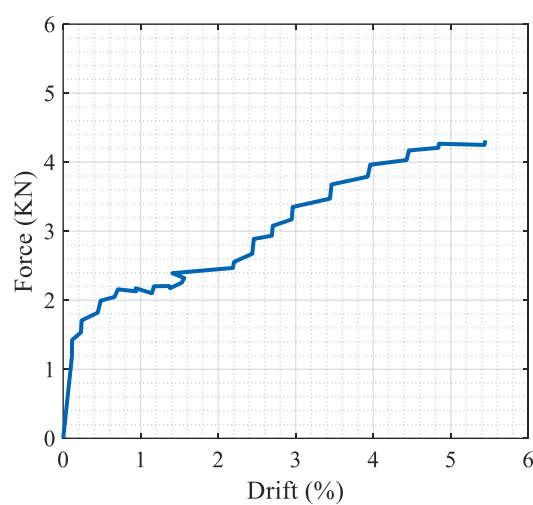
جدول ۲. مقاومت نمونه‌های مورد بررسی در دررفت‌های مختلف

نمونه	پایان رفتار خطی	مقاومت (KN)	دررفت (%)	مقاومت حداکثر	مقاومت (KN)	دررفت (%)	اولین افت مقاومت
	دررفت (%)			دررفت (%)			مقاومت (KN)
URM	۰/۲	۱/۲۵۹	۰/۴۰	۱/۶۰۵	۰/۴۸	۱/۱۰۰	
SFRMW	۰/۶۲	۲/۹۴۰	۵/۵	۵/۶۱۰	۰/۷۱	۱/۱۵۰	
GRMW1	۰/۴۱	۱/۶۵۰	۰/۴۱	۱/۶۵۰	۰/۴۸	۱/۳۱۰	
GRMW2	۰/۳۵	۱/۵۵۹	۱/۴۴	۲/۲۴۶	۱/۹۴	۱/۸۶۰	

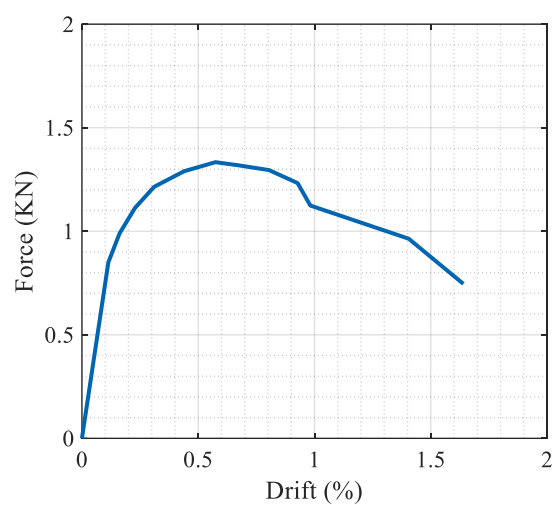
۳-۴- ارزیابی پارامترهای سختی، شکل‌پذیری و انرژی در نمونه‌ها

برای استخراج پارامترهای سختی اولیه، شکل‌پذیری و انرژی تجمعی، میانگین پوش شاخه‌های مثبت و منفی منحنی‌های بار-جابجایی هر نمونه محاسبه شد (شکل ۱۲) و سپس پارامترهای جدول ۳ بر اساس این میانگین‌ها گزارش گردید. دلایل انتخاب میانگین پوش به جای استفاده از فقط یکی از شاخه‌ها چندگانه است: اولاً بسیاری از نمونه‌ها دارای عدم تقارن‌های تجربی ناشی از ترک‌های اولیه یا جابه‌جایی‌های ناشی از لغزش بودند که اگر تنها یک شاخه ملاک قرار می‌گرفت، پارامترهای گزارش شده می‌توانست تحت تأثیر این عوامل قرار گیرد؛ ثانیاً میانگین گرفتن از دو شاخه پوش، نمایانگر رفتار مؤثر و ماکروسکوپی سیستم تحت بارهای رفت و برگشتی است و مقایسه بین نمونه‌ها را واقع‌بینانه‌تر و مقاوم در برابر نویز آزمایش می‌سازد. بنابراین مقادیر جدول ۳ نشان‌دهنده یک معیار یکپارچه و قابل مقایسه برای هر نمونه هستند. مقایسه سختی اولیه نشان می‌دهد که بیشترین سختی اولیه متعلق به نمونه SFRMW بوده و نمونه‌های تقویت شده با ژئوگرید سختی اولیه‌ای کمتر از نمونه URM نشان داده‌اند. این نتیجه نشان می‌دهد که لایه‌های ژئوگرید به صورت مستقیم باعث افزایش سختی الاستیک اولیه دیوار نشده‌اند؛ در واقع ژئوگریدها بیشتر در مراحل پس از تشکیل ترک و در رفتار غیرخطی و توزیع تنش مؤثر واقع می‌شوند. کاهش سختی اولیه در نمونه‌های ژئوگریدی ناشی از فقدان پیوستگی کامل در محدوده الاستیک اولیه بین بلوک و ژئوگرید و ماهیت عملکردی ژئوگرید که عمدتاً در تأمین محصورشدگی و تأخیر در بازشدگی ترک‌ها نقش دارد، می‌باشد.

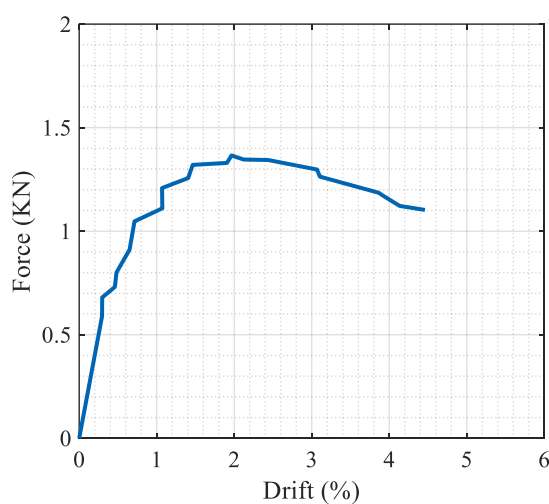
در رابطه با شکل‌پذیری و انرژی تجمعی، SFRMW بیشترین مقدار انرژی تجمعی و بالاترین ضریب شکل‌پذیری را نشان می‌دهد (جدول ۳)، که بیانگر انتقال رفتار از شکست ترد به رفتار شکل‌پذیر و توان عمده در جذب انرژی است. این پدیده ناشی از کنترل گسترش ترک‌ها توسط کلاف فولادی و توزیع مؤثرتر تنش‌ها در میانه و کناره دهانه است. نمونه‌های GRMW1 و GRMW2 نیز نسبت به URM افزایش قابل ملاحظه در شکل‌پذیری و انرژی نشان دادند؛ تفاوت بین GRMW 1 و GRMW 2 حاکی از اثر مثبت اتصال افقی بلوک‌ها با تسمه در GRMW 2 است که موجب افزایش مقاومت حداکثر و تعویق افت‌های بزرگ می‌شود. به‌طور خلاصه، ژئوگرید نقش بارزی در افزایش شکل‌پذیری و کنترل گسترش ترک‌ها دارد و هنگامی که همراه با اتصال مکانیکی افقی (تسمه) استفاده شود، علاوه بر شکل‌پذیری، ظرفیت نهایی نیز به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. از منظر مهندسی، نتیجه‌گیری کاربردی این است که اگر هدف اصلی افزایش ظرفیت نهایی و سختی باشد، تقویت با کلاف فولادی قائم (SFRMW) گزینه مطلوب‌تری است؛ اما اگر هدف افزایش شکل‌پذیری و جذب انرژی و جلوگیری از فروریزش ناگهانی باشد، به‌کارگیری ژئوگرید (مخصوصاً همراه با اتصال افقی بلوک‌ها همانند GRMW2 راه‌حل اقتصادی و مؤثری است. نکته مهم این است که انتخاب بهینه باید بر اساس اولویت عملکردی سازه (ظرفیت باربری در برابر تغییرشکل‌های زیاد در برابر رفتار پس از آسیب) و ملاحظات اجرایی اتخاذ شود.



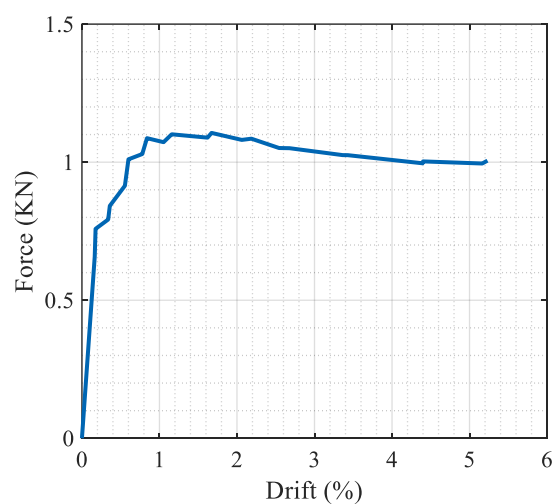
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۱۲: میانگین شاخه مثبت و منفی منحنی پوش نمودار بار - جابجایی در نمونه الف (URM، ب) SFRMW، ج) GRMW 1 و د) GRMW 2

جدول ۳: سختی اولیه، شکل پذیری، و جذب انرژی هر یک از نمونه‌های مورد بررسی

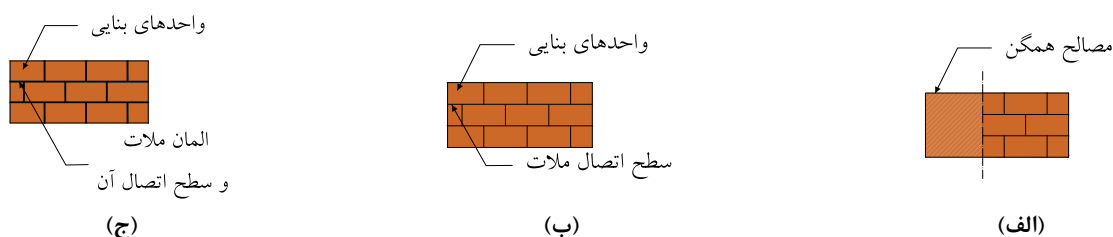
ردیف	عنوان نمونه	مقاومت حداکثر (kN)	دریفت متناظر با مقاومت حداکثر (%)	سختی اولیه (kN/mm)	ضریب شکل پذیری	انرژی تجمعی (kN.mm)
۱	URM	۱/۶۰۵	۰/۴۴	۲۸۱/۰۳۲	۱/۹۱۹	۴۶/۰۶
۲	SFRMW	۵/۶۱۰	۵/۵	۴۷۰/۰۴۳	۲۳/۸۰۰	۴۳۹/۲۵
۳	GRMW 1	۱/۶۵۰	۰/۴۱	۸۶/۶۹۰	۴/۷۸۷	۱۳۸/۹۸
۴	GRMW 2	۲/۲۴۶	۱/۴۴	۶۶/۴۲	۲/۱۳۶	۱۳۴/۴۳

۵- مطالعه عددی

۵-۱- جزئیات مدل اجزا محدود

نحوه تحلیل نتایج عددی و آزمایشگاهی در پژوهش حاضر مشابه رویکردهای پیشنهاد شده در مطالعات اخیر بر روی اعضای بتن مسلح است که بر پایه مقایسه نظام‌مند نمودارها و شاخص‌های رفتاری مکانیکی بنا شده‌اند [۳۰، ۳۱، ۳۲ و ۳۳]. این مقایسه‌ها به درک بهتر از هم‌خوانی و ناهم‌خوانی رفتار مدل عددی و آزمایشگاهی کمک کرده و امکان استخراج چارچوبی کلی برای تحلیل عملکرد میانقاب‌های بنایی را فراهم می‌سازد. با توجه به این که مصالح بنایی به عنوان مصالح ترد و شکننده تعریف می‌شوند، در مدل‌های اجزا محدود جهت بررسی رفتار آن‌ها نیازمند رویه‌های مختلفی همچون مدل CDP^8 یا بررسی ترک با روش اجزا محدود گسترش‌یافته^۹ می‌باشند [۳۴ و ۳۵]. با این حال، انتخاب مدل مناسب تابعی از هدف شبیه‌سازی و ماهیت آزمایش است. این انتخاب از یک سو موجب ساده‌سازی محاسباتی و کاهش زمان تحلیل می‌شود و از سوی دیگر، امکان مقایسه مستقیم شاخص‌های کلیدی مانند سختی اولیه، مقاومت نهایی، ضریب شکل‌پذیری و انرژی جذب شده را فراهم آورد [۳۶].

در این پژوهش، برای توسعه مدل عددی دیوارهای بنایی AAC مقاوم‌سازی شده با ژئوگرید و کلاف فولادی، از رویکرد اجزای محدود در مطالعات عددی اخیر استفاده شد [۳۷]. مطابق شکل ۱۳، روش‌های تحلیل عددی اجزا محدود برای عناصر بنایی به دو روش مدل‌سازی ماکرو^{۱۰} و میکرو^{۱۱} تقسیم می‌شود [۳۸ و ۳۹]. در شبیه‌سازی ماکرو، مطابق شکل ۱۳. الف؛ واحدهای بنایی و ملات به عنوان یک پیکر واحد در نظر گرفته شده و به صورت یک مصالح همگن تحلیل می‌گردد. این رویکرد بسیار ساده بوده و برای بررسی دیوارها با ابعاد بسیار بزرگ در مدل‌های بنایی سازه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد. در حالت مدل‌سازی میکرو واحدهای بنایی و ملات به صورت مجزا شبیه‌سازی می‌شوند. این حالت خود به دو روش مدل‌سازی میکرو ساده و با جزئیات تقسیم می‌شود. در هر دو روش واحدهای بنایی به عنوان المان‌های سه بعدی مدل می‌شوند اما در مدل‌سازی به روش میکرو ساده، مطابق شکل ۱۳. ب؛ ضخامت ملات به عنوان یک المان صفحه‌ای صفر در نظر گرفته می‌شود. در حالی که مطابق شکل ۱۳. ج در روش مدل‌سازی میکرو با جزئیات لایه ملات به عنوان یک المان سه بعدی با رعایت میزان ضخامت ملات به مجموعه مدل اضافه می‌گردد. در مدل‌سازی میکرو ساده معمولاً میزان ضخامت ملات را بر ارتفاع واحدهای بنایی اضافه می‌کنند تا ارتفاع کلی سازه بنایی رعایت گردد.



شکل ۱۳: شبیه‌سازی اجزا محدود دیوار بنایی به روش الف (مدل‌سازی ماکرو، ب) مدل‌سازی ساده شده میکرو، و ج) مدل‌سازی با جزئیات میکرو.

با وجود این که روش مدل‌سازی ماکرو مزایایی همچون سادگی روند شبیه‌سازی و نیاز کم به زمان را در مقایسه با سایر روش‌ها دارد، روش‌های مدل‌سازی میکرو نتایج دقیق‌تری را به خصوص برای عناصری مانند دیوارهای بنایی ارائه می‌دهند [۴۰]. مدل‌سازی میکرو همچنین می‌تواند برای سازه‌های بزرگتر مانند دیوارهای برشی بنایی، در حالتی که نیاز به زمان بیشتری برای تحلیل می‌باشد (با وجود زمان‌بر بودن)، مورد استفاده قرار بگیرد. به عنوان مثال، عارف و دولت‌شاهی از روش‌های مدل‌سازی میکرو برای شبیه‌سازی دیوارهای برشی بنایی و مطالعه انتشار ترک در دیوارهای برشی بنایی استفاده کردند. در این پژوهش یافته‌های عددی با نتایج تجربی مقایسه شد [۴۱]. در پژوهش حاضر، با توجه به غالب بودن شروع خرابی از فصل مشترک واحد-ملات، رویکرد میکرو ساده برگزیده شد؛ بدین معنا که واحدهای AAC

⁸ Concrete Damage Plasticity

⁹ Extended Finite Element Method (XFEM)

¹⁰ Macro modeling

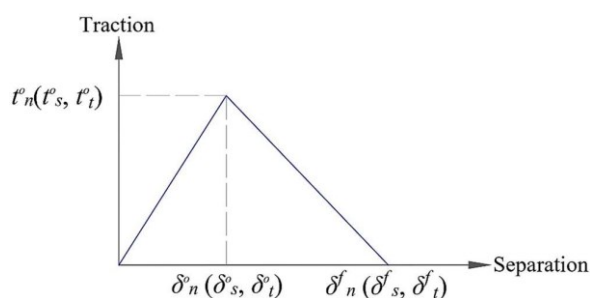
¹¹ Micro modeling

به صورت الاستیک مدل شدند و رفتار غیرخطی (خسارت) صرفاً از طریق رابط‌های ملات-بلوک با مدل چسبندگی-گسیختگی^{۱۲} در نرم‌افزار اجزای محدود ABAQUS پیاده‌سازی گردید. در این مدل، آغاز خرابی بر اساس مقاومت کششی و برشی ملات مشخص گردید و تکامل خرابی با استفاده از انرژی شکست مود اول و دوم که مطابق با جدول ۵ از نتایج آزمایشگاهی بدست آمد، اعمال گردید. بدین وسیله کاهش تدریجی سختی رابط و گسترش ترک‌ها در سطح ملات بازتولید شده و صحت‌سنجی پارامترها در بخش بعدی ارائه شده است.

به منظور مدل‌سازی عددی، بلوک‌های AAC مطابق ابعاد نشان داده شده در شکل ۶. الف به صورت عناصر سه بعدی با المان‌های C3D8R (المان سه بعدی ۸ گرهی) در نرم‌افزار ABAQUS مدل شدند. تمامی پارامترهای هندسی دیوار از قبیل ابعاد بلوک‌ها، ضخامت ملات، و ابعاد اجزای مقاوم‌سازی مطابق با آنچه که در آزمایش در نظر گرفته شده بودند، در مدل عددی نیز اعمال شد. با توجه به این که سازه‌های بنایی به عنوان سازه‌های تردشکن محسوب می‌شوند و شکست در آن‌ها به صورت ناگهانی و از سطح بلوک-ملات اتفاق می‌افتد، بلوک‌های AAC به صورت الاستیک تعریف شدند. بنابراین تنها پارامترهای وزن مخصوص، مدول الاستیسیته تنظیم شده (E_{adj})، و ضریب پواسون در نرم‌افزار ABAQUS تعریف شد. مدول الاستیسیته تنظیم شده برای بلوک‌ها مطابق رابطه ۱ محاسبه گردید.

$$E_{adj} = \frac{h E_b E_{mc}}{n h_b E_{mc} + (n-1) h_{mc} E_b} \quad (1)$$

در این رابطه n و h به ترتیب بیانگر تعداد رج‌ها و ارتفاع دیوار، E_b و E_{mc} به ترتیب نشان دهنده مدول الاستیسیته بلوک و ملات می‌باشد. همچنین h_b و h_{mc} به ترتیب به عنوان ارتفاع (ضخامت) بلوک‌ها و ملات بر میزان مدول الاستیسیته تنظیم شده بلوک‌ها موثر خواهند بود.



شکل ۱۴: مدل چسبندگی-گسیختگی در نرم‌افزار اجزای محدود ABAQUS.

برای شبیه‌سازی رفتار ملات (پیوند بین بلوک‌های AAC) در شبیه‌سازی اجزای محدود از مدل چسبندگی-گسیختگی در نرم‌افزار ABAQUS استفاده شد [۴۲]. در این روش اندرکنش رفتار چسبندگی بین بلوک‌ها مطابق شکل ۱۴ مدل‌سازی گردید. اندرکنش در ABAQUS با استفاده از سه پارامتر تعریف می‌شود: ضرایب سختی نرمال و برشی در دو راستا (K_{tt} و K_{ss} ، K_{nn})، شروع آسیب و انرژی شکست در لحظه آسیب. شیب محدوده الاستیک در شکل ۱۴ همان بیانگر ضرایب سختی مدل می‌باشد که این مقادیر مطابق روابط ۲ و ۳ بدست آمد. معیار آغاز خرابی بر اساس مقاومت کششی و برشی ملات تعیین شد، در حالی که تکامل خرابی بر اساس انرژی شکست (مساحت زیر منحنی تنش-بازشدگی) تعریف گردید تا کاهش تدریجی سختی رابط در حین گسترش ترک‌ها بازتولید شود. بدین ترتیب، مدل امکان شبیه‌سازی تدریجی ترک‌خوردگی و افت ظرفیت پیوند ملات-بلوک را فراهم نمود.

$$K_{nn} = \frac{E_b E_{mc}}{h_{mc} (E_b - E_{mc})} \quad (2)$$

¹² traction-separation

$$K_{ss} = K_{tt} = \frac{G_b G_{mc}}{h_{mc}(G_b - G_{mc})} \quad (3)$$

در این روابط G_b و G_{mc} به ترتیب بیانگر مدول برشی بلوک و ملات می‌باشد. برای تعیین شروع آسیب در نرم‌افزار باید حداکثر نیروی کششی نمونه تعیین گردد و معادل مقاومت کششی محاسبه شده برای دیوار اعمال شود. انرژی شکست آسیب همان مساحت زیر نمودار در شکل ۱۴ می‌باشد. با توجه به این که مصالح تردشکن هیچ رفتار پلاستیکی از خود نشان نمی‌دهند، می‌توان مساحت نمودار را از حداکثر جابجایی کششی در حداکثر نیروی کششی بدست آورد.

جدول ۴: مشخصات مکانیکی بلوک‌های AAC و چسبندگی بین آن‌ها.

ملات چسب			بلوک‌های AAC			
K_{tt} (N/mm ³)	K_{ss} (N/mm ³)	K_{mn} (N/mm ³)	E_{adj} (MPa)	E_m (MPa)	ν	E_b (MPa)
۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۶	۹۳/۷۳۲	۱/۲	۰/۲۲	۲۲۵

در مدل‌های عددی، مطابق با مشخصات ذکر شده در جدول ۴، بلوک‌ها به‌صورت الاستیک تعریف شدند و مشخصات چسبندگی آن‌ها نسبت به یکدیگر بر اساس روابط (۲) و (۳) محاسبه گردید. بر مبنای این مقادیر، شرایط تماس در نرم‌افزار ABAQUS تعریف شد و پارامترهای مربوط به پیوند ملات-بلوک مطابق جدول ۵ در مدل اعمال گردید. شرایط مرزی پژوهش مطابق شکل ۲ در نظر گرفته شد و پروتکل بارگذاری در تراز فوقانی دیوار نیز بر اساس شکل ۷ تعریف گردید. در مدل‌سازی نمونه دوم، پروفیل‌های نبشی و در نمونه‌های سوم و چهارم، ورق‌های ژئوگريد با استفاده از قید tie به دیوار متصل شدند. مشخصات مصالح نبشی‌ها و لایه‌های ژئوگريد نیز به‌صورت الاستیک و مطابق با مقادیر ارائه شده در بخش ۲-۳ لحاظ گردید. اندازه مش در تمامی نمونه‌ها برابر با ۱۰ سانتی‌متر انتخاب شد تا ضمن حفظ دقت نتایج، از افزایش غیرضروری هزینه محاسباتی جلوگیری شود. این تنظیمات امکان مقایسه مستقیم و معتبر بین نتایج عددی و داده‌های آزمایشگاهی را فراهم ساخت. همچنین به‌منظور تکمیل مدل‌سازی، علاوه بر رفتار کششی و برشی، پارامتر فشاری ملات نیز مطابق با جدول ۵ در نرم‌افزار تعریف شد، هرچند که مکانیزم غالب خرابی در نمونه‌های آزمایشگاهی از نوع کششی و برشی بود. تعریف این پارامتر امکان بازنمایی رفتار فشاری محدود ملات را در شرایط بارگذاری متناوب فراهم ساخت. همچنین، ترکیب معیار آغاز خرابی و تکامل خرابی در مدل چسبندگی-گسیختگی منجر به بازتولید تدریجی افت سختی و گسترش ترک‌ها در سطح ملات گردید.

جدول ۵: مشخصات غیرخطی چسبندگی بین بلوک‌های AAC.

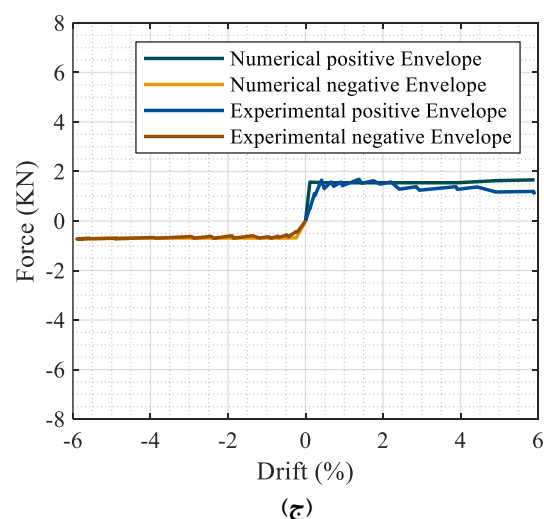
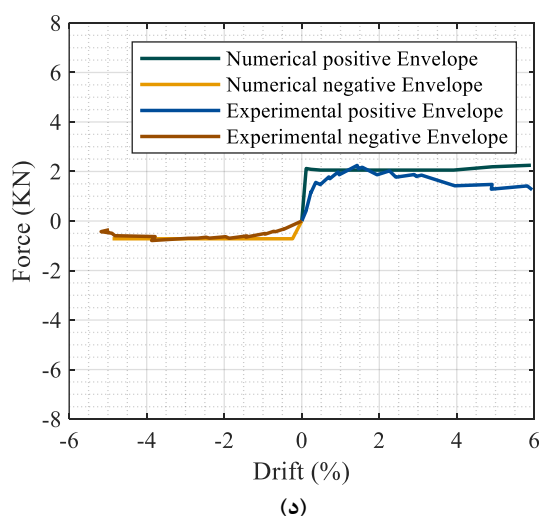
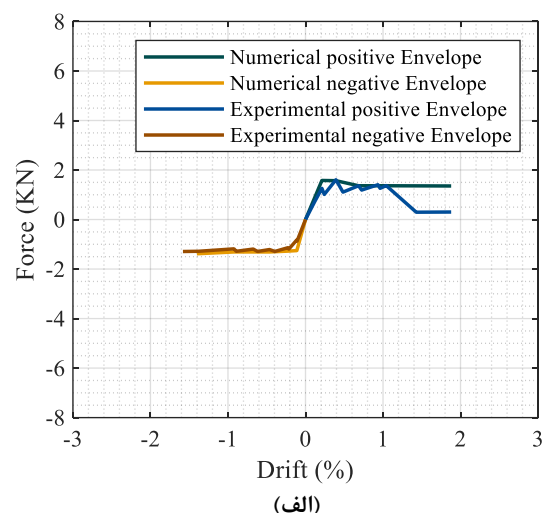
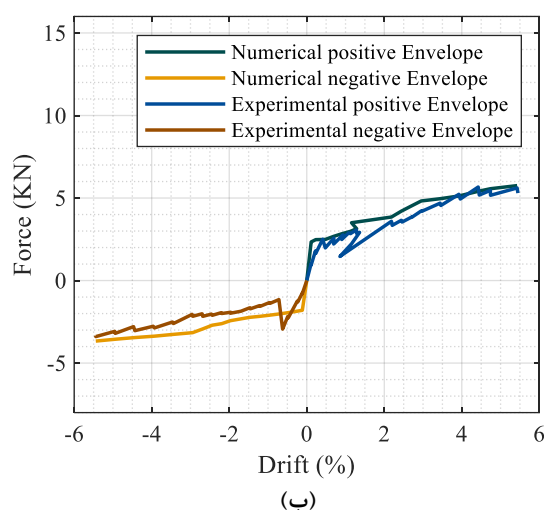
کشش			برش		
تنش حداکثر (MPa)	G_{ic} (N/mm)	تنش حداکثر (MPa)	ضریب اصطکاک	G_{nc} (N/mm)	تنش فشاری (MPa)
۰/۳	۰/۰۱۲	۰/۳۵	۰/۷۵	۰/۰۴	۵

۵-۲- بررسی نتایج بدست آمده از مدل اجزا محدود

به منظور مقایسه رفتار عددی و آزمایشگاهی نمونه‌ها، منحنی‌های پوش حاصل از مدل اجزای محدود در شاخه‌های مثبت و منفی با نتایج آزمایشگاهی در شکل ۱۵ ارائه شده‌اند. از آنجا که هدف از تحلیل عددی در این مرحله، ارزیابی ظرفیت کلی دیوارها، محدوده رفتار خطی و غیرخطی، و صحت پیش‌بینی مقاومت نهایی بوده است، از مقایسه چرخه‌ای کامل صرف نظر شده و تنها منحنی‌های پوش مورد بررسی قرار گرفته‌اند. این انتخاب از آن جهت قابل توجیه است که منحنی پوش نمایانگر رفتار میانگین سازه در بارگذاری‌های رفت و برگشتی بوده و معمولاً برای اعتبارسنجی کلی مدل عددی (شامل پیش‌بینی مقاومت، سختی و شکل‌پذیری) کفایت دارد. همچنین در تحلیل‌های عددی، بازتولید دقیق پدیده‌های محلی مانند اصطکاک بین بلوک‌ها یا لغزش‌های جزئی در هر سیکل نیازمند کالیبراسیون پارامترهای متعدد

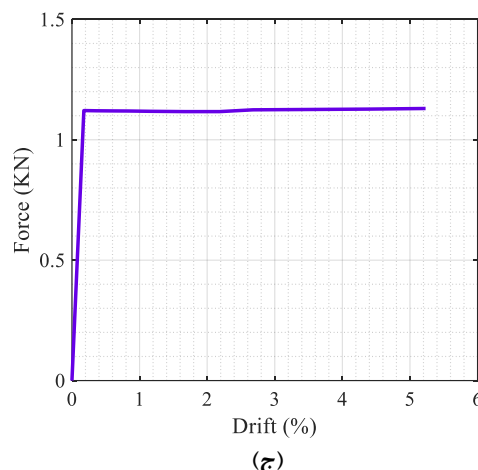
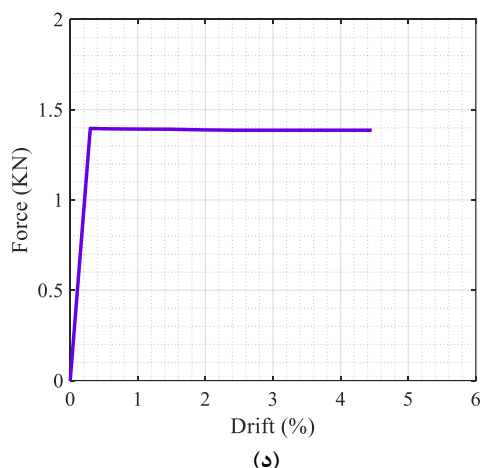
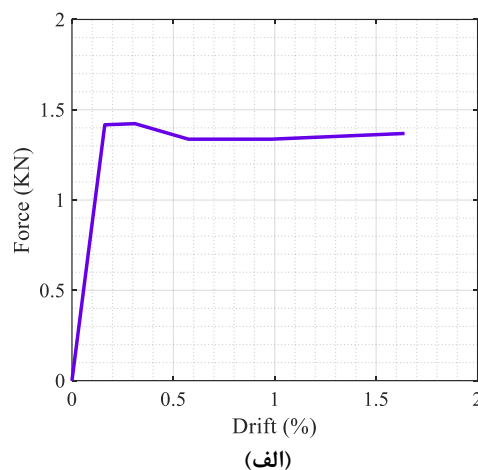
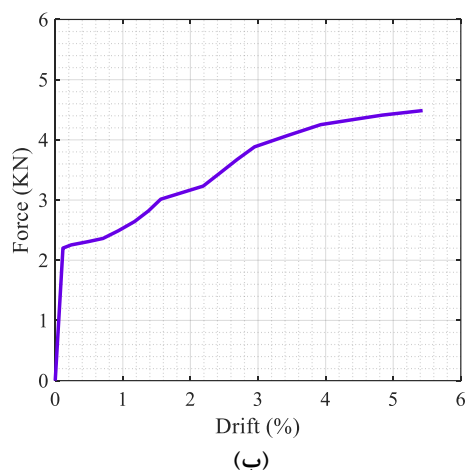
است که از هدف این پژوهش خارج بوده است؛ بنابراین استفاده از منحنی پوش، راهکاری مناسب و متعارف برای مقایسه نتایج کلی و روند رفتار سازه‌ای محسوب می‌شود.

در شکل ۱۵، منحنی پوش شاخه مثبت آزمایشگاهی با رنگ آبی و مدل عددی با رنگ سبز، و منحنی پوش شاخه منفی آزمایشگاهی با رنگ قرمز و مدل عددی با رنگ نارنجی نمایش داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، انطباق قابل قبولی بین منحنی‌های عددی و آزمایشگاهی وجود دارد و مدل عددی توانسته است رفتار کلی دیوارها را به‌ویژه در محدوده خطی و آغاز ناحیه غیرخطی با دقت قابل قبولی بازتولید کند. بررسی منحنی‌های مدل نشان می‌دهد که محدوده رفتار خطی در مدل عددی برای نمونه URM تا دررفت حدود ۰/۲۱ درصد، برای نمونه SFRMW تا ۰/۱۱ درصد و برای نمونه‌های GRMW 1 و GRMW 2 تا حدود ۰/۲۳ درصد ادامه داشته است. این مقادیر با نتایج آزمایشگاهی که به ترتیب برابر ۰/۲، ۰/۶۲، ۰/۴۱ و ۰/۳۵ درصد گزارش شده‌اند، هم‌خوانی نسبی دارند. اختلاف مقادیر مشاهده شده عمدتاً به دلیل فرضیات مدل در خصوص رفتار مصالح (به‌ویژه مدل چسبندگی ملات و تماس بین بلوک‌ها) و نبود اثرات ریز مقیاس در مدل عددی است. با این حال، محدوده کلی رفتار خطی و شکل کلی منحنی‌ها در مدل عددی و آزمایشگاهی مشابه بوده و روند افزایش سختی اولیه، نقطه آغاز رفتار غیرخطی و محدوده مقاومت نهایی در مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی تطابق قابل قبولی دارد. در ادامه، برای هر نمونه، جزئیات رفتار مدل عددی و مقایسه آن با نتایج تجربی مورد تحلیل قرار گرفته است.



شکل ۱۵: منحنی پوش بدست آمده از نمودار بار-جابجایی آزمایشگاهی و مدل عددی برای نمونه الف (URM، ب) SFRMW، ج) GRMW 1 و د) GRMW 2

در جدول ۶ مقادیر پارامترهای مکانیکی استخراج شده از داده‌های آزمایشگاهی و میانگین پوش مدل عددی برای هر چهار نمونه مطابق شکل ۱۶ ارائه شده است. ابتدا یک قاعده کلی مشاهده می‌شود، مدل عددی گرایش به بازتولید روند کلی رفتار (جهت تغییر پارامترها تحت تأثیر مقاومت‌سازی) دارد، اما خطاهای کمی در برخی پارامترها وجود دارد که باید در تحلیل نتایج لحاظ شود. برای نمونه URM، مدل عددی سختی اولیه را حدود $255/4$ کیلونیوتن بر میلیمتر در برابر مقدار تجربی $281/0.32$ کیلونیوتن بر میلیمتر پیش‌بینی کرده است (به طور تقریبی اختلاف ۹ درصد)، یعنی مدل کمی محافظه‌کارتر برآورد کرده است. در SFRMW انطباق بسیار مطلوب است ($470/6$ کیلونیوتن بر میلیمتر عددی در برابر 470 کیلونیوتن بر میلیمتر تجربی که خطایی کمتر از 0.1 درصد دارد) که نشان می‌دهد مدلسازی کلاف فولادی و انتقال بار اولیه در مدل نسبتاً مناسب انجام شده است. در GRMW 1 مدل سختی را بالاتر از تجربی پیش‌بینی کرده ($115/9$ کیلونیوتن بر میلیمتر در برابر $86/7$ کیلونیوتن بر میلیمتر؛ حدود ۳۴ درصد اختلاف)، اما در GRMW 2 مدل سختی پایین‌تر از آزمایش گزارش شده (49 کیلونیوتن بر میلیمتر در برابر $66/4$ کیلونیوتن بر میلیمتر؛ حدود ۲۶ درصد اختلاف). این پراکندگی در پیش‌بینی سختی اولیه برای نمونه‌های ژئوگرید نشان‌دهنده حساسیت مدل به نحوه مدل‌سازی تعامل ژئوگرید-ملات (تیه یا مشخصات تماس و نیز به جزئیات اجرایی نصب ژئوگرید و پوشش گچ و خاک روی آن است؛ به عبارت دیگر، ژئوگریدها عموماً در محدوده‌های پس از تشکیل ترک‌ها اثر تقویتی بیشتری دارند و سختی الاستیک اولیه آنها تابعی از پیوستگی اجرایی است که در مدل ممکن است کامل یا ساده‌سازی شده فرض شده باشد.



شکل ۱۶: میانگین شاخه مثبت و منفی منحنی پوش بدست آمده از نمودار بار-جابجایی در مدل عددی برای نمونه الف (URM، ب) SFRMW، ج) GRMW 1 و د) GRMW 2

مدل عددی در بازتولید مقدار مقاومت نهایی عملکرد متغیری داشت. برای نمونه URM مقدار عددی $1/416$ کیلونیوتن در برابر $1/605$ کیلونیوتن (در حدود 12 درصد اختلاف) تجربی بوده است و برای SFRMW نیز مدل مقدار $4/486$ کیلونیوتن را در برابر $5/610$ کیلونیوتن تجربی (خطا در حدود 20 درصد) گزارش کرده است. خطای بزرگ‌تری در نمونه‌های ژئوگریدی مشاهده می‌شود، در GRMW 1 مدل $1/121$ کیلونیوتن را در برابر $1/650$ کیلونیوتن تجربی با خطای حدود 32 درصد و در GRMW 2 مدل $1/396$ کیلونیوتن در برابر $2/246$ کیلونیوتن تجربی با خطای در حدود 38 درصد گزارش نموده است. همچنین دریافت متناظر با مقاومت نهایی در مدل به‌طور معمول کمتر از مقدار تجربی برآورد شده است؛ مثلاً در نمونه URM، $0/31$ درصد در مدل عددی در برابر $0/44$ درصد تجربی؛ در نمونه SFRMW، $5/43$ درصد در مدل عددی در برابر $5/5$ درصد در نمونه تجربی و در نمونه GRMW 2 $0/296$ درصد در مدل عددی در برابر $1/44$ درصد تجربی بدست آمد. کاهش عددی در مقدار دریافت‌های اوج به‌ویژه برای نمونه‌های ژئوگریدی نشان می‌دهد که مدل رفتار غیرخطی پس از آغاز ترک را متفاوت شبیه‌سازی کرده است؛ این می‌تواند ناشی از پارامترهای آغاز و تکامل خرابی در قانون traction-separation، یا از چگونگی اعمال شرایط مرزی و قیدها در مدل باشد.

ضریب شکل‌پذیری نیز در بعضی نمونه‌ها اختلاف معناداری نشان می‌دهد. برای URM مدل ضریب را در حدود $1/43$ در برابر $1/919$ تجربی با اختلاف 26 درصدی برآورد کرده، در حالی که برای SFRMW و GRMW 1 اختلافات کوچک‌تر هستند. اما در مدل ضریب شکل‌پذیری بزرگ‌تر از تجربی گزارش شده که نشان‌دهنده تفاوت در نحوه توزیع تغییرمکان‌های بزرگ و باز-بسته شدن ترک‌ها در مدل است. رفتار ناسازگار شکل‌پذیری برای GRMW 2 به نحوه مدل‌سازی اتصال افقی (تسمه) و تعامل پیچیده میان ژئوگرید و بلوک‌ها مربوط است؛ در عمل این اتصالات می‌توانند باعث تاخیر در فروپاشی موضعی و افزایش شکل‌پذیری واقعی شوند، اما مدل ساده شده یا پارامترهای چسبندگی ناصحیح می‌تواند این اثر را به صورت نامتناسب بازتولید کند.

در همه نمونه‌ها انرژی تجمعی مدل عددی از مقدار تجربی کمی بالاتر برآورد شده است. این گرایش به مقدار بالاتر انرژی در مدل می‌تواند ناشی از چند عامل باشد؛ صاف‌سازی منحنی پوش عددی که نوسانات محلی را کاهش می‌دهد و مساحت مثبت زیر منحنی را بزرگ‌تر نشان می‌دهد، پارامترهای تکامل خسارت در مدل که منجر به افت تدریجی ترسختی و در نتیجه مساحت بیشتر می‌شود، و نیز عدم در نظر گرفتن برخی مکانیزم‌های اتلاف انرژی واقعی (مثلاً خردشدگی موضعی ملات یا اصطکاک بین بلوک‌ها) که در داده آزمایشگاهی ممکن است به شیوه‌ای متفاوت عمل کرده باشند. به عبارت دیگر، مدل در بازتولید روند کلی جذب انرژی موفق بوده اما مقادیر مطلق اندکی محافظه‌کارانه یا افزایشی برآورد شده‌اند.

دلایل عمده اختلاف‌های کمی را می‌توان در سه عامل اصلی خلاصه کرد، الف) انتخاب و کالیبراسیون قانون traction-separation و تابع تکامل خسارت که تعیین‌کننده آغاز ترک و روند افت سختی است؛ ب) ساده‌سازی در مدل‌سازی اجزاء مقاوم‌سازی مانند استفاده از قید tie برای ژئوگرید یا اتصالات فولادی به صورت صلب که می‌تواند انتقال بار و لغزش موضعی را متفاوت از رفتار واقعی نشان دهد؛ و ج) اندازه‌مش، شرایط مرزی آزمایشی و عدم مدل‌سازی کامل عدم‌قطعیت‌های اجرایی (نحوه نصب ژئوگرید، کیفیت ملات، لقی اتصالات) که روی سختی اولیه و نقطه آغاز غیرخطی تأثیر می‌گذارد. به‌طور کلی، مدل عددی ارائه شده روندهای کلی و اثرات نسبی روش‌های مقاوم‌سازی را به‌خوبی بازتولید کرده است. مدل نشان می‌دهد که SFRMW سختی اولیه بالاتری دارد و سیستم‌های ژئوگریدی موجب افزایش شکل‌پذیری و انرژی جذب شده می‌شوند. با این حال خطاهای کمی ویژه در پیش‌بینی مقاومت اوج و دریافت متناظر در نمونه‌های مقاوم‌سازی شده با ژئوگرید وجود دارد که باید با کالیبراسیون دقیق‌تر رابط‌ها و بهبود نحوه مدلسازی اتصالات اصلاح گردد. بنابراین مدل برای تحلیل‌های ماکروسکوپی و مقایسه‌ای و استخراج روندها قابل اتکا است، اما برای پیش‌بینی‌های کمی دقیق و استفاده در طراحی اجرا (مثلاً پیش‌بینی دقیق مقاومت حداکثر) نیاز به بهبود و کالیبراسیون‌های بیشتر دارد.

جدول ۶: نتایج بدست آمده از آزمایش و مدل عددی

نمونه	سختی اولیه (KN/mm)		مقاومت نهایی (KN)		دریافت متناظر با مقاومت نهایی (%)		ضریب شکل پذیری		انرژی تجمعی (KN.mm)	
	تجربی	عددی	تجربی	عددی	تجربی	عددی	تجربی	عددی	تجربی	عددی
URM	۲۸۱/۰۳۲	۲۵۵/۴۰۳	۱/۶۰۵	۱/۴۱۶	۰/۴۴	۰/۳۱	۱/۹۱۹	۱/۴۲۵	۴۶/۰۶	۵۶/۳۲
SFRMW	۴۷۰/۰۴۳	۴۷۰/۶۴۹	۵/۶۱۰	۴/۴۸۶	۵/۵	۵/۴۳	۲۳/۸۰۰	۲۲/۹۲۳	۴۳۹/۲۵	۵۰۶/۷۶۵
GRMW 1	۸۶/۶۹۰	۱۱۵/۸۵۱	۱/۶۵۰	۱/۱۲۱	۰/۴۱	۰/۱۷۵	۴/۷۸۷	۵/۰۸۴	۱۳۸/۹۸	۱۵۲/۹۰۳
GRMW 2	۶۶/۴۲	۴۹/۰۴۳	۲/۲۴۶	۱/۳۹۶	۱/۴۴	۰/۲۹۶	۲/۱۳۶	۴/۷۶۹	۱۳۴/۴۳	۱۵۸/۷۰۶

۶- محدودیت‌ها و پیشنهادها

با وجود آنکه نتایج این پژوهش توانست تصویر روشنی از رفتار خارج از صفحه دیوارهای بنایی میان قاب و تأثیر روش‌های مقاوم‌سازی ارائه دهد، برخی محدودیت‌ها نیز وجود داشت که می‌تواند در پژوهش‌های آتی برطرف شود. در بخش آزمایشگاهی به دلیل محدودیت تجهیزات و پیکربندی آزمایش، تنها جابجایی‌ها با ابزارهای متعارف اندازه‌گیری شد و امکان استفاده از ابزارهای دقیق‌تر مانند LVDT¹³ و کرنش‌سنج فراهم نبود. همچنین ثبت و تحلیل الگوی ترک‌ها به صورت دستی و بر پایه مشاهدات انجام گرفت و روش‌های پیشرفته‌تری همچون پردازش از تصویر که می‌تواند روند گسترش ترک‌ها را به صورت کمی و پیوسته مشخص کند به کار برده نشد. در بخش عددی نیز شبیه‌سازی‌ها تنها برای تعداد محدودی نمونه و تحت شرایط بارگذاری خاص انجام شد که این امر دامنه تعمیم‌پذیری نتایج را محدود می‌کند. از این رو در تحقیقات آینده می‌توان با به کارگیری ابزارهای دقیق‌تر برای سنجش تغییر مکان و کرنش، استفاده از روش‌های پردازش از تصویر برای تحلیل جزئیات ترک‌خوردگی و توسعه شبیه‌سازی‌های عددی به نمونه‌ها و شرایط بارگذاری متنوع‌تر، دقت و جامعیت نتایج را به میزان قابل توجهی ارتقا داد و مسیر روشن‌تری برای بهبود روش‌های مقاوم‌سازی دیوارهای بنایی فراهم کرد.

۷- نتیجه گیری

در این پژوهش، رفتار خارج از صفحه‌ی دیوارهای بنایی میان قاب AAC تحت بارگذاری چرخه‌ای به صورت آزمایشگاهی و عددی مورد بررسی قرار گرفت. چهار نمونه شامل دیوار بدون مقاوم‌سازی، دیوار مقاوم‌سازی شده با کلاف فولادی قائم و دو دیوار تقویت شده با ژئوگرید، ساخته و آزمایش شدند. بارگذاری تا دریافت نهایی ۶ درصد ادامه یافت و نتایج آزمایشگاهی با مدل اجزای محدود مقایسه گردید. بر اساس یافته‌ها، جمع‌بندی نتایج به شرح زیر است:

- تغییر الگوی ترک‌خوردگی: مقاوم‌سازی موجب تغییر ماهیت ترک‌ها از گسیختگی ترد در ملات رج تحتانی به الگوی ترک‌های پیشرونده و کنترل شده شد. در نمونه URM، لغزش ملات بین رج اول و دوم در دریافت حدود ۲۰ درصد آغاز و منجر به رفتار نامتقارن شد. در مقابل، در نمونه SFRMW به واسطه حضور نبشی‌های قائم، ترک‌ها به صورت تدریجی رشد کرده و از لغزش اولیه جلوگیری شد. در نمونه‌های GRMW نیز وجود لایه‌های ژئوگرید باعث کنترل بازشدگی ترک‌ها و پایداری بهتر دیوار گردید.
- افزایش ظرفیت باربری: بیشترین افزایش ظرفیت باربری در نمونه SFRMW مشاهده شد، به طوری که مقاومت نهایی از ۱/۶۱ کیلونیوتن در نمونه URM به حدود ۵/۶۱ کیلونیوتن افزایش یافت (بیش از ۳/۴ برابر). در نمونه‌های GRMW 1 و GRMW 2 نیز مقاومت نهایی به ترتیب به ۱/۶۵ و ۲/۲۵ کیلونیوتن رسید که بیانگر افزایش به میزان ۱ تا ۱/۴ برابر نسبت به نمونه شاهد است. این نتایج نشان می‌دهد که نبشی‌های قائم در انتقال نیرو نقش مؤثرتری نسبت به ژئوگریدها داشته‌اند، اما ژئوگریدها در کنترل خرابی پس از ترک عملکرد پایداری‌تری نشان دادند.

¹³ Linear Variable Differential Transformer

- بهبود سختی و رفتار چرخه‌ای: سختی اولیه در نمونه مقاوم‌سازی شده با فولاد حدود ۶۷ درصد بیشتر از نمونه شاهد بوده است، در حالی که در نمونه‌های ژئوگریدی تغییر قابل توجهی در سختی اولیه مشاهده نشد. با این حال، منحنی‌های بار-جابجایی در هر دو گروه مقاوم‌سازی شده، رفتار متقارن‌تر و بدون افت ناگهانی مقاومت را نشان دادند. این موضوع به‌ویژه در نمونه SFRMW به دلیل محدود شدن لغزش ملات و تشکیل رفتار شبه سخت‌شوندگی در شاخه‌های بارگذاری مشهود است.
 - افزایش شکل‌پذیری و انرژی جذب شده: بر اساس نتایج جدول (۳)، ضریب شکل‌پذیری از ۱/۹۲ کیلونیوتن در نمونه URM به ۲۳/۸ در نمونه SFRMW و حدود ۴/۸ در GRMW 1 افزایش یافته است، یعنی به‌ترتیب بیش از ۱۱ و ۲/۵ برابر بهبود ملاحظه شد. انرژی تجمعی جذب شده نیز از ۴۶ کیلونیوتن میلیمتر در نمونه URM به ۴۳۹ کیلونیوتن میلیمتر در نمونه SFRMW و حدود ۱۳۴-۱۳۸ کیلونیوتن میلی‌متر در نمونه‌های ژئوگریدی افزایش یافت (به‌ترتیب حدود ۹/۵ و ۳ برابر افزایش). بنابراین، استفاده از نبشی‌های قائم بیشترین سهم را در افزایش شکل‌پذیری و توان جذب انرژی داشته است.
 - مقایسه آزمایش و مدل عددی: منحنی‌های پوش عددی با داده‌های آزمایشگاهی انطباق مناسبی دارند و رفتار خطی، مقاومت اوج و روند کاهش سختی به‌خوبی بازتولید شده‌اند. در مدل، محدوده رفتار خطی برای نمونه‌های URM، SFRMW، GRMW 1 و GRMW 2 به‌ترتیب تا دریفتهای ۰/۲۱، ۰/۱۱، ۰/۲۳ و ۰/۲۳ درصد پیش‌بینی شد که متناظر با مقادیر تجربی است. اختلاف‌های کمی مشاهده شده (در حدود ۱۰ تا ۳۰ درصد) عمدتاً ناشی از ساده‌سازی در مدل تماس ملات-بلوک و مشخصات مصالح است. با این حال، مدل توانست روند واقعی رفتار غیرخطی و تأثیر روش‌های مقاوم‌سازی را با دقت مناسب شبیه‌سازی کند.
- در پژوهش‌های آتی پیشنهاد می‌شود که ضمن بررسی پیکربندی‌های متنوع لایه‌های ژئوگرید، سایر عوامل مؤثر بر عملکرد دیوارهای AAC نیز مورد توجه قرار گیرد. به‌عنوان مثال، استفاده پیوسته از لایه‌های ژئوگرید در سطح دیوار، اما با شبکه‌هایی که چشمه‌های بزرگ‌تری دارند، می‌تواند به‌عنوان یک راهکار جایگزین مطالعه شود. از سوی دیگر، نوع و ساختار الیاف و شبکه‌های نساجی مانند تکستایل‌ها می‌تواند نقش مهمی در چسبندگی، شکل‌پذیری و ظرفیت جذب انرژی سیستم مقاوم‌سازی ایفا کند. همچنین، تغییر در نوع بلوک‌های بنایی یا ملات‌های مورد استفاده ممکن است بر نحوه توزیع ترک‌ها، ظرفیت باربری و رفتار لرزه‌ای دیوار تأثیرگذار باشد. علاوه بر این، پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آینده اثر همزمان بار ثقلی و جانبی بر رفتار خارج از صفحه دیوارها بررسی شود تا شبیه‌سازی آزمایشگاهی به شرایط واقعی سازه‌ها نزدیک‌تر گردد.

مراجع

- [1] Bolhassani, M. Hamid, AA. Moon, FL. (2016). Enhancement of lateral in-plane capacity of partially grouted concrete masonry shear walls. *Engineering Structures*. 108. 59-76.
- [2] Kazerounian, Ali Reza. Kazemi, M. (2021). The high modes of structure effect on the seismic demands of hollow brick partitions. *Journal of Structural and Construction Engineering*. 8(1). 286-306.
- [3] Shiravand, M. Seifi Boushehri, S. (2018). Numerical Study on Seismic Behavior of Moment-Resistant Steel Frames with Hybrid Masonry Infill. *Journal of Structural and Construction Engineering*. 7(1). 31-52.
- [4] Khalilzadeh Vahidi, E. Chavoshani, P. (2021). The effect of increasing span length and storey height on the progressive failure of reinforced concrete frames with different percentages of openings in the masonry infilled wall. *Journal of Structural and Construction Engineering*. 8(1). 431-447.
- [5] TahamouliRoudsari, M. Kahrizi, M. Torkaman, M. Asvar, K. Rezaee, M. Azizpour, A. Dolatiari, B. Gholami, A. (2021). Experimental study of parameters affecting the behavior of moment-Resisting steel frames including masonry infill walls. *Journal of Structural and Construction Engineering*. 8(1). 152-173.

- [6] ACI-530. (2013). *Building Code Requirements and Specification for Masonry Structures and Companion Commentaries*. American Concrete Institute.
- [7] Yavartanoo, F. H.-K. Kang, T. (2022). Retrofitting of unreinforced masonry structures and considerations for heritage-sensitive constructions. *Journal of Building Engineering*. 49. 103993.
- [8] De Santis, S. De Canio, G. De Felice, G. Meriggi, P. Roselli, I. (2019). Out-of-plane seismic retrofitting of masonry walls with Textile Reinforced Mortar composites. *Bulletin of Earthquake Engineering*. 17. 6265-6300.
- [9] Teresa De Risia, Maria. Furtadob, A. Rodriguesc H. Melob J. Mario Verderamea, G. Antóniob, A. Varumb, H. Manfredia, G. (2020). Experimental analysis of strengthening solutions for the out-of-plane collapse of masonry infills in RC structures through textile reinforced mortars. *Engineering Structures*. 207. 110203
- [10] Cem Yılmaz, M. Abdalla Ebrahim Finner, A. Mercimek, O. (2024). Experimental investigation of out-of-plane behaviour of unreinforced masonry panels strengthened with TRM. *Structures*. 65. 106665.
- [11] Kumar Venkat Rao Padalu, P. Singh, Y. Das, S. (2020). Cyclic two-way out-of-plane testing of unreinforced masonry walls retrofitted using composite materials. *Construction and Building Materials*. 238. 117784.
- [12] Kim, S. H. Park, S. H. Pham, H. H. Lee, S. J. Dinh, N. H. & Choi, K. K. (2024). Seismic Performance of Unreinforced Masonry Walls with Various Retrofitting Methods. *International Journal of Architectural Heritage*, 1-23.
- [13] Iuorio, O. A. Dauda, J. B. Lourenço, P. (2021). Experimental evaluation of out-of-plane strength of masonry walls retrofitted with oriented strand board. *Construction and Building Materials*. 269. 121358.
- [14] A. Dauda, J. C. Silva, L. B. Lourenço, P. Iuorio, O. (2021). Out-of-plane loaded masonry walls retrofitted with oriented strand boards: Numerical analysis and influencing parameters. *Engineering Structures*. 243. 112683.
- [15] Ali Khan, H. Prasad Nanda, R. (2020). Out-of-plane bending of masonry wallette strengthened with geosynthetic. *Construction and Building Materials*. 231. 117198.
- [16] Yavartanoo, F. Kim, T. Kim, J. Jang, H. Kim, C. (2024). Out-of-plane behavior of U-shaped unreinforced masonry structures. *Journal of Building Engineering*. 86. 108984.
- [17] Baneshi, V. Dehghan, SM. (2021). Introducing a Novel Interlocking Block and Experimental Study on In-plane and Out-of-plane Behavior and Strength of its Prisms Specimens. *Journal of Structural and Construction Engineering*. 8(3). 334-354.
- [18] Hejazi, M. Nazeri, S. (2021). Out-of-Plane Behaviour of Brick Masonry Infilled Walls with Openings Stiffened with FRP Strips in Reinforced Concrete Frames. *Journal of Structural and Construction Engineering*. 8(2). 465-491.
- [19] Dehghan, SM. Baneshi, V. Kahnoot, SY. Najafgholipour, MA. (2022). Experimental Study on Effect of Brick and Mortar Types on Mechanical Properties of Masonry Prisms. *Journal of Structural and Construction Engineering*. 8(11). 5-24.
- [20] Hashemi, E. Sarvghad Moghadam, A. Khajeh Ahmad Attari, N. Hashemi, S. A. (2017). Study the relative contribution of materials, reinforcement and concrete layers at different levels of cyclic deformation of masonry walls reinforced with shotcrete. *Journal of Structural and Construction Engineering*. 5(2). 22-39.
- [21] Aalijahan, M. Zamani Ahari, G. (2022). Evaluation and Comparison of Capability of Finite Element and Discrete Element Methods for Predicting In-plane Behavior of Unreinforced Masonry Wall. *Journal of Structural and Construction Engineering*. 8(12). 69-84.
- [22] Shahri, A. Massumi, A. Soltani, M. Homami, P. (2021). Experimental evaluation of nonlinear behavior of unreinforced masonry (URM) walls retrofitted using center-core technique. *Journal of Structural and Construction Engineering*. 8(2). 59-80.
- [23] Chen, Z. Zhou, Y. Zhong, G. (2024). Investigation on the influence of previous in-plane loading on the out-of-plane behavior of the innovative damped masonry infill wall. *Engineering Structures*. 308. 118029.
- [24] Liu, W, Jin, W, Zhai, C. (2024). Fragility functions for masonry infill walls in RC frames with the in-plane and out-of-plane loading. *Journal of Building Engineering*. 95. 110177.
- [25] Cuadros-Rojas, H. G., Silva, A., González-Vidosa, F. (2024). Out-of-plane bending behaviour of masonry walls with high-strength steel cord mesh embedded in bed joints. *Journal of Structural and Construction Engineering*. 13(1): 45-63.

- [26] Khan, H. A., Nanda, R. P. (2020). Out-of-plane bending of masonry wall strengthened with geosynthetic. *Journal of Structural and Construction Engineering*. 9(4): 310-329.
- [27] Halici, M., Demir, U., Zabbar, Y., Ilki, A. (2023). Out-of-plane seismic performance of lightweight AAC infill walls with flat-truss and cord-type bed-joint reinforcement. *Journal of Structural and Construction Engineering*. 12(2): 123-145.
- [28] Qiu, X., Li, Y., Zhang, H. (2023). Out-of-plane flexural behavior of autoclaved aerated concrete (AAC) block masonry walls strengthened with high-ductility concrete. *Journal of Structural and Construction Engineering*. 12(3): 201-219.
- [29] Thomoglou, A. K., Papantonopoulos, M., Georgopoulos, C.-A. (2023). Review of out-of-plane strengthening techniques of unreinforced masonry walls. *Journal of Structural and Construction Engineering*. 12(4): 289-312.
- [30] Shokrzadeh, M. Nateghi-Alahi, F. Mansoori, M. Javadi, M. (2023). The improvement of the threaded-based mechanical splice by modifying the threaded system: Study of techniques cold rolling and rotating friction welding. *Journal of Building Engineering*. 80: 107964.
- [31] Shokrzadeh, M. Aziminejad, A. Moghaddam, A. S. (2024). Evaluation of various FRP strengthening configurations for RC beam-column joints. *Bridge Structures*. 20: 71-91.
- [32] Shokrzadeh, M. Nateghi-Alahi, F. Mansoori, M. Javadi, M. (2025). Cold rolling versus rotating friction welding techniques in mechanical splices: Study of the inelastic cyclic behavior of reinforced concrete columns. *Structural Concrete*. 2025: 1-21.
- [33] Shokrzadeh, M. Nateghi-Alahi, F. (2023). Evaluation of hybrid NSM-CFRP technical bars and FRP sheets for seismic rehabilitation of a concrete bridge pier. *Bridge Structures*. 18(3-4): 75-88.
- [34] Jedari Zare Zadeh, F. Farzam, M. Dadashzadeh, M. (2023). Localization and investigation of damage extension in reinforced concrete beams using signal processing and machine learning. *Journal of Structural and Construction Engineering*. 11(2): 76-60.
- [35] Jedari Zare Zadeh, F. Farzam, M. Dadashzadeh, M. (2022). Wavelet-based analysis of dynamic response for damage localization in reinforced concrete beams using machine learning. *6th International Conference on Structural Engineering*.
- [36] Jedari Zare Zadeh, F. Farzam, M. Bagheri, S. (2024). Wavelet Transform with Reduced Edge Effects for Damage Identification in the Beams under Incremental Damage. *Civil Infrastructure Researches*. 2024; 10(2): 1-19.
- [37] Zohdi, Ali. N. Kontoni, D-P. Hosseinzadeh, L. Aghaei, M. (2025). Finite element method investigation of seismic design for enlarged beam section (EBS) connection in steel structures under cyclic loading. *Asian Journal of Civil Engineering*.
- [38] Addessi, D. Di Re, P. Gatta, C. Sacco, E. (2021). Multiscale analysis of out-of-plane masonry elements using different structural models at macro and microscale. *Computer Structure*, 247.106477.
- [39] Lin, A. Li, R. Jiang, Z. Dong, S. Liu, Y. Liu, Z. Zhou, L. Tang, L. (2022). Path independent stereo digital image correlation with high speed and analysis resolution. *Optics and Lasers in Engineering*. 149. 106812.
- [40] Abasi, A. Hassanli, R. Vincent, T. Manalo, A. (2022). Influence of prism geometry on the compressive strength of concrete masonry. *Construction and Building Materials*. 264. 120182.
- [41] Aref, A.J. Dolatshahi, K.M. (2013). A three-dimensional cyclic meso-scale numerical procedure for simulation of unreinforced masonry structures. *Computers and Structures*. 120. 9-23.
- [42] Liang, RYK. Li, YN. (1991). Simulations of nonlinear fracture process zone in cementitious material—a boundary element approach. *Computational mechanics*. 7(5). 413-427.