



بررسی تکنیک اتصال ملات برای مقاوم سازی لرزه ای دیوارهای

آجری با چیدمان مختلف آجر

حمید صابری^۱، وحید صابری^{۱*}، علی حسین زاده^۲، عباسعلی صادقی^۳

^{۱*} استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه غیرانتفاعی ایوانکی، سمنان، ایران (saberi.vahid@gmail.com)

^۲ کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشگاه غیرانتفاعی ایوانکی، سمنان، ایران

^۳ دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران

(تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۳/۲۱، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۶/۲۵)

چکیده

از آنجایی که سازه‌های غیرمسلح بیشترین پتانسیل خرابی در برابر زلزله را دارا می‌باشند و دارای مکانیسم‌های متعدد شکست هستند با توجه به وجود عدم قطعیت‌های فراوان در پارامترهای موجود در این نوع سازه‌ها، باید مطالعه آسیب‌پذیری آن‌ها با آگاهی مناسبی از این پارامترها و در نظر گرفتن بیشترین مدهای محتمل برای شکست آن در نظر گرفته شود. همچنین اغلب سازه‌هایی که دارای اهمیت تاریخی می‌باشند، با استفاده از مصالح بنایی و آجری ساخته شده‌اند. این نوع سازه‌ها معمولاً در برابر زلزله دارای ضعف‌های عمده‌ای می‌باشند. شناخت این ضعف‌ها مقدمه‌ای بر انتخاب روشی مناسب برای مقاوم‌سازی آن‌ها می‌باشد. در دهه‌های گذشته، محققین از روش‌های مختلفی برای تقویت رفتار لرزه‌ای دیوارهای آجری استفاده کرده‌اند. روش‌های متداول برای این کار عبارت است از روکش کاری و تقویت با گچ و بتن پاشیده که استفاده از بتن پاشیده متداول‌ترین روش است. در این تحقیق، از روش میکرو برای مدل‌سازی اجزای محدودی در نرم‌افزار ABAQUS استفاده شده است. در مدل‌سازی، از سه روش مقاوم‌سازی استفاده می‌شود که شامل مقاوم‌سازی با ورق فولادی، ورق FRP و ملات است. نتایج این تحقیق نشان داد چیدمان راسته نوارهای FRP نسبت به سایر روش‌ها، تأثیر بیشتری در بهبود انعطاف‌پذیری و چیدمان قطری نوارهای مذکور تأثیر ملموسی در افزایش مقاومت نهایی دیوارهای بنایی داشته‌اند.

کلمات کلیدی

دیوار آجری، مدل‌سازی اجزای محدودی، مقاوم‌سازی، ورق فولادی، ملات، ورق FRP، نرم افزار ABAQUS.



Seismic Retrofitting of Masonry Walls with Different Arrangement of Brick by Using a Mortar Joint Technique

Hamid Saberi¹, Vahid Saberi^{1*}, Ali Hoseinzadeh², Abbasali Sadeghi³

^{1*} Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Eyvanekey University, Semnan, Iran
(saberi.vahid@gmail.com)

² M.Sc., Department of Civil Engineering, Eyvanekey University, Semnan, Iran

³ PhD Candidate, Department of Civil Engineering, Mashhad Branch, Islamic Azad University, Mashhad, Iran

(Date of received: 11/06/2021, Date of accepted: 16/09/2021)

ABSTRACT

Since unreinforced structures have the highest potential for earthquake damage and have multiple failure mechanisms, due to the lack of many uncertainties in the parameters of this type of structures, their vulnerability should be studied with proper knowledge of this and considering the parameters and the most probable modes for its failure. Also, most of the structures that are of historical importance are made of building materials and bricks. These types of structures usually have major weaknesses against earthquakes. Recognition of these weaknesses is a prelude to choosing the appropriate method to strengthen them. In recent decades, researchers have used various methods to enhance the seismic behavior of brick walls. Common methods for this work are coating and reinforcement with plaster and sprayed concrete, which is the most common method of using sprayed concrete. In this study, the micro method is used for finite element modeling in ABAQUS software. In modeling, three methods of reinforcement are used, which include reinforcement with steel sheet, FRP sheet and mortar. The results of this study showed that the sequential arrangement of FRP strips, compared to other methods, had a greater effect on improving the flexibility and the diagonal arrangement of the mentioned strips had a tangible effect on increasing the final strength of masonry walls.

Keywords:

Brick Wall, Finite Element Modeling, Reinforcement, Steel Sheet, Mortar, FRP Sheet, ABAQUS Software.



۱- مقدمه

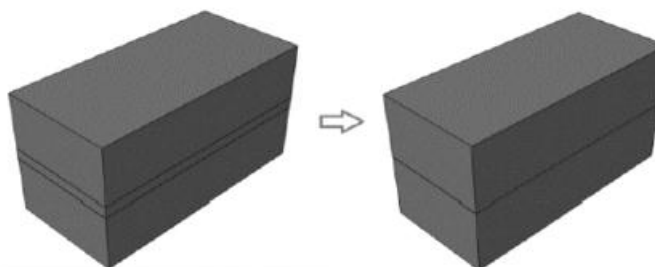
مصالح بنایی از قدیمی‌ترین مصالح ساختمانی هستند، که در اکثر سازه‌های تاریخی موجود مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این نوع سازه‌ها امروزه نیز استفاده گسترده‌ای دارند. باین‌حال با ظهور فولاد و بتن به عنوان مصالح کلیدی در قرن بیستم، توجه کمتری به مصالح بنایی می‌شود [۱]. این امر موجب می‌گردد مهندسين سازه در زمان حاضر علم محدودی درمورد مصالح سنتی و روش‌های استفاده از آنها را داشته باشند. دیوار آجری یک سیستم سازه‌ای و غیرسازه‌ای ترکیبی است که از آجر و ملات ساخته شده و قرن هاست که در ساخت و ساز به کار می‌رود. استفاده‌ی گسترده از دیوارهای آجری در نواحی مستعد زلزله، به خصوص به شکل پنل‌های تو پر با بتن تقویت شده (RC) یا چارچوب‌های فولادی همواره مطرح بوده است. بنابراین پرکردن این دیوارها به صورت متداول با عناصر ثانویه صورت می‌گیرد (که به عنوان عناصر غیرسازه‌ای نیز نامیده می‌شوند) تا سازه تقویت شده و محاسبات ظرفیت ارتعاش زلزله نیز بهبود یابد. با این وجود همچنان هدررفت انرژی زیادی وجود دارد [۲]. در دهه‌های گذشته، محققین از روش‌های مختلفی برای تقویت رفتار ارتعاشی دیوارهای آجری غیرتقویت شده استفاده کرده‌اند. این روش‌ها شامل تکنیک‌های به اصطلاح متداول تا مدرن مقاوم‌سازی سازه‌های مصالح بنایی می‌باشد. به صورت معمول، کار روی سطح دیوار یک روش مناسب برای بهبود رفتار دیوار آجری است. برخی از مشکلات روش‌های متداول اشاره شده را می‌توان با استفاده از بهسازی به کمک *FRP* حل کرد. تقویت دیوارهای آجری با استفاده از *FRP* می‌تواند منجر به افزایش مقاومت جانبی با ضریبی تقریباً از ۱/۱ تا بالای ۳ شود [۳]. ایجاد یک مدل محاسباتی بر اساس روش اجزا محدود گسسته در اینجا ارائه می‌گردد. یعنی استفاده از آجرها برای مدل‌سازی یک عنصر کامل که به صورت ضخامت مختلف، نمودی از اتصالات ملاتی است. این اتصال می‌تواند ویژگی‌های غیرالاستیک داشته باشد که با استفاده از سطح شکست موهر-کلمب با آستانه‌ی تنش و فاصله فشردگی دقیق اندازه‌گیری می‌گردد. روش مدل‌سازی زمانی که در مورد یک پنل دیوار آجری تک لایه به کار رود (یعنی غیرتقویت شده) تنها روی تحلیل سه‌بعدی تمرکز دارد، در حالی که در مورد دیوارهای آجری چند لایه، مشخص است که لازم است این حالت به سه بعدی تعمیم یابد. این مدل در نرم‌افزار تجاری *MIDAS FEA* پیاده سازی می‌شود و همه نتایج تحلیل نیز با خروجی‌های آزمایش استخراج شده کنونی، مقایسه و اعتبارسنجی می‌گردد [۴]. تعدادی از پژوهشگران بر روی روش‌های پیچیده اجزا محدودی تحقیق کرده‌اند. با توجه به رفتار کاملاً متفاوت آجر و ملات در دیوار و آزمایش‌های متعدد انجام شده بر روی این‌گونه سازه‌ها که نمایش دهنده پدیده‌هایی همچون لغزش، جداسازی ملات از آجر و ترک‌های قطری می‌باشند، مدل‌سازی ترک و کاهش سختی ناشی از آن همواره از بحث‌های مهم بوده است و این‌گونه عملکردها ناشی از رفتار مکانیکی پیچیده و خاصیت غیرهمگن و شکننده مصالح بنایی می‌باشد. مصالح بنایی از المان‌های یکنواختی ساخته شده‌اند که از بالا و پایین به وسیله ملات به هم پیوسته‌اند. این اتصالات ملاتی ضعیف بوده و به طور قابل توجهی رفتار غیرخطی از خود نشان می‌دهند. خاصیت غیرخطی اتصالات ملات در ابتدا از تغییرشکل غیرخطی آن‌ها تحت برش یا فشار حاصل می‌شود. ولی به وسیله‌ی شکست محلی، باز و بسته شدن و لغزش اتصالات تشدید می‌شوند. در خصوص مدل‌سازی عددی، در دهه‌های گذشته، تحقیقات مرتبط با دیوارهای آجری پیشرفت قابل توجهی داشته است. اما مدل‌سازی دیوار آجری با تحمل بار، یا دیوار آجری پر شده تحت بار سطحی، می‌تواند منجر به تقویت سازه شده است. روش‌های متفاوت دیگری برای شبیه‌سازی رفتار مکانیکی دیوارهای آجری طراحی شده که به صورت بارگذاری استاتیکی یا دینامیکی می‌باشند و روی صفحه، خارج از صفحه یا حتی به صورت هم‌زمان مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. انتخاب مناسب‌ترین روش برای استفاده، بستگی به عوامل زیادی دارد، شامل تحلیل سازه‌ای، سطح دقت و ساده‌سازی مورد نیاز، دانش یا آگاهی از ویژگی‌های ورودی مدل و داده‌های تجربی یا آزمایشی موجود، میزان منابع مالی موجود، زمان مورد نیاز و تجربه قالب گیرنده (لورنکو) می‌باشد. ترجیحاً، روش انتخابی برای مدل‌سازی دیوار آجری باید اطلاعات مربوط را به روشی مطلوب به کار برده و سطح قابل قبولی از دقت و نیز کمترین هزینه را در پی داشته باشد. طبق دیدگاه لورنکو، استراتژی‌های موجود برای



مدل‌سازی عددی سازه‌های آجری باید جزء یکی از این دو گروه تلقی گردد: (الف) مدل‌سازی مقیاس کوچک، و (ب) مدل‌سازی مقیاس بزرگ. در این تحقیق، دیوار مصالح بنایی به روش اجزا محدودی مدل‌سازی و رفتار غیرخطی آن‌ها مطابق نمونه‌ی آزمایشگاهی راستی آزمایی شده است. سپس به عنوان نوآوری از سه روش مقاوم‌سازی استفاده می‌شود که شامل بهسازی با ورق‌های فولادی، FRP و ملات است. در ادامه، رشد و ظهور ترک در نمونه‌ی مورد مطالعه، بررسی شده است.

۲- پیشینه‌ی تحقیق

در سال‌های اخیر تحقیقات گسترده‌ای برای بررسی انواع آسیب‌های وارده به سازه‌های بنایی و راهکارهای مقاوم‌سازی آن‌ها صورت گرفته است، که در زیر به طور مختصر به چندین مورد از این پژوهش‌ها اشاره خواهد شد: جهت بررسی رفتار لرزه‌ای سازه‌های بنایی تحقیقات متعددی توسط افراد مختلف در سطح دنیا انجام گرفته است. این تحقیقات شامل انجام آزمایش‌های متعددی بر روی مقیاس‌های مختلف از سازه‌های بنایی و یا استفاده از برنامه‌های کامپیوتری جهت مدل‌سازی عددی دیوار بنایی می‌باشند. با توجه به زمان بر و پرهزینه بودن آزمایش‌های لازم، شبیه‌سازی رفتار و توسعه مدل‌های عددی می‌تواند به عنوان یک راهکار مناسب در بررسی رفتار سازه‌های بنایی مورد استفاده قرار گیرد. ویژگی‌های رفتاری مصالح این گونه سازه‌ها از قبیل تفاوت خواص مکانیکی آجر و ملات و هم‌چنین پیچیدگی رفتار سطح مشترک ملات و آجر و ناهمگن بودن و هم‌چنین رفتار غیرخطی هندسی و فیزیکی آن‌ها، مدل‌سازی عددی این سازه‌ها را بسیار پیچیده می‌کند. یک مدل‌سازی مناسب برای چنین سیستم‌هایی باید بتواند انواع مکانیزم‌های گسیختگی مصالح را در شرایط مختلف بارگذاری مدل نماید. بنابراین می‌بایست دو نوع رفتار مکانیکی ناپیوستگی‌ها و رفتار بلوک‌ها در مدل‌سازی در نظر گرفته شود انواع روش‌های محاسباتی مورد استفاده برای ارزیابی رفتار سازه‌های بنایی تحت بارگذاری استاتیکی و دینامیکی را می‌توان در سه گروه تحلیل در مقیاس میکرو، ماکرو و مزو دسته بندی کرد. در این جا پیشوند مزو نشان دهنده مقیاسی بین مقیاس میکرو و مقیاس ماکرو است برای تحلیل در مقیاس میکرو، رفتار دقیق سازه اهمیت زیادی دارد و به مسیر ترک‌ها در رفتار غیر خطی اجزا توجه زیادی می‌شود، در حالی که در تحلیل مقیاس ماکرو و مزو اجزا، رفتار کلی به جای جزئیات اهمیت دارد. روش تحلیل مقیاس مزو و ماکرو با استفاده از برخی فرض‌های ساده کننده بهره‌وری محاسباتی را بهبود می‌بخشند [۵]. مدل‌سازی میکرو بر مبنای رفتار سنجی هر مصالح در جایگاه خودش است. لذا نحوه‌ی قرارگیری هر یک از مصالح در این مدل‌سازی بسیار مهم است. برای مثال در سازه‌های بنایی، نقش آجرها و ملات و ضخامت و چگونگی قرارگیری آن‌ها در کنار هم مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای مدل‌سازی در مقیاس واقعی سازه‌های بنایی که شامل تعداد زیادی اجزا و عناصر هستند، استفاده از این روش غیر عملی و غیر واقع بینانه می‌باشد [۶]. با توجه به این که تعداد زیادی آجر در یک مقطع سازه‌ی بنایی وجود دارد، نحوه قرار گرفتن آنها بین ملات‌ها می‌تواند باعث بالا رفتن اشتباه در ایجاد پیوستگی میان اجزا مدل گردد. بنابراین برای کاهش مقدار این خطا، روش ماکرو برای هماهنگ‌سازی دیوار بنایی غیر مسلح مورد استفاده قرار می‌گیرد. روش مدل‌سازی در مقیاس ماکرو نیازمند یک ماده‌ی همگن به عنوان جایگزین آجرها و ملات در یک مقطع از سازه است. ماده‌ی همگن معادل می‌تواند ایزوتروپیک یا ارتوتروپیک و ... باشد [۷]. از لحاظ سطح دقت و مقدار محاسبات مورد نیاز، مدل‌سازی در مقیاس مزو بین تحلیل در مقیاس میکرو و ماکرو قرار می‌گیرد. در این روش ملات عملاً نقشی نداشته و نقش اصلی را المان حدفاصل^۹ (رابط) و المان واحد بنایی ایفا می‌کنند [۸ و ۹].



شکل ۱: افزایش ابعاد المان واحد بنایی بعد از حذف ملات [۹].

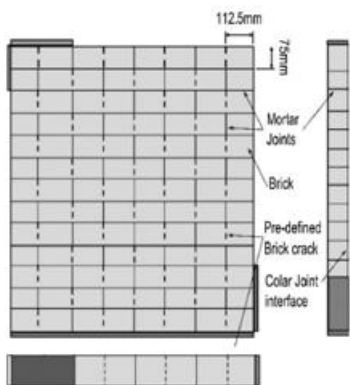
به علت ضخامت صفر المان حدفاصل در این روش، ابعاد هندسی المان واحد بنایی باید مطابق شکل ۱ افزایش یابد تا هندسه‌ی کلی بدون تغییر باقی بماند. سختی الاستیک المان حدفاصل می‌تواند با در نظر گرفتن خواص ملات و واحد بنایی محاسبه گردد. این روش به دلیل در نظر نگرفتن اثر پواسون در سطح ملات نسبت به روش میکرو از دقت کمتری برخوردار است، مقایسه‌ی نتایج تحلیل‌هایی که تاکنون بر روی مدل‌سازی میکرو و مزو صورت گرفته است، بیان‌گر دقت مناسب مقیاس مزو می‌باشد. رفتار دیوارهای بنایی تحت بارگذاری‌های مختلف اعم از بارگذاری یکنواخت داخل و خارج صفحه، بار زلزله و ... به صورت گسترده‌ای توسط محققین زیادی مورد مطالعه قرار گرفته است. اکثر این تحقیقات روی رفتار دیوار بنایی غیر مسلح متمرکز شده اند، و برخی دیگر نیز به بررسی دیوارهای مسلح و تقویت شده پرداخته اند. به عنوان مثالی از کارهای اولیه در مدل‌سازی سازه‌های بنایی در مقیاس مزو می‌توان به مدل پیشنهادی پیچ اشاره کرد. دیوار بنایی بررسی شده توسط وی، مجموعه‌ای از المان‌های پیوسته آجر الاستیک است. علی و پیچ با در نظر گرفتن المان رابط بین آجرها، سطح تسلیم را فقط برای شکست برشی و کششی تعریف کرده است [۱۰]. پیچ هم‌چنین به بررسی رفتار سازه‌های بنایی تحت بارگذاری متمرکز نیز پرداخته است [۱۱]. سانتاماریا و آلکانیو در سال ۲۰۱۱، دو دیوار بنایی غیرمسلح و چهار دیوار بنایی که توسط CFRP تقویت شده و تحت بارگذاری دوره‌ای داخل صفحه قرار گرفته‌اند را مورد بررسی قرار گرفته است [۱۲]. برای تقویت دیوارها از دو نوع چیدمان افقی و قطری نوارهای CFRP استفاده شده است، دیوارها با مقیاس واقعی و آجر رسی توخالی ساخته شده‌اند، نوارهای تقویتی FRP به کار رفته از الیاف کربن می‌باشند. از جمله نتایج این آزمایش می‌توان به چیدمان افقی نوارهای FRP تأثیر بیشتری در بهبود انعطاف پذیری و چیدمان قطری نوارهای مذکور تأثیر بیشتری در افزایش مقاومت نهایی دیوارهای بنایی اشاره کرد. کانسیتینگا و همکاران در سال ۲۰۱۳، به بررسی آزمایشگاهی اثر مقاومت و شکل‌پذیری دیوارهای مقاوم‌سازی شده با نوارهای CFRP تحت بارگذاری چرخه‌ای پرداختند و مشخص شد که ظرفیت جابجایی دیوارها به علت تقویت افزایش یافته است [۱۳]. آسترس و همکاران در سال ۲۰۱۳، ماکرو مدل‌های مختلفی برای طراحی قاب میانبر مصالح بنایی پیشنهاد دادند، نتایج نشان داد که مدل‌هایی با سه دستک فشاری اندرکنش بین قاب و میان قاب را با دقت بیشتری نسبت به مدل‌هایی با یک دستک فشاری پیشبینی می‌کند [۱۴]. کامپیون در سال ۲۰۱۵، مدل قاب میانبر را با توجه به اثرات بار محوری بروزرسانی کردند [۱۵]. ژای و همکاران در سال ۲۰۱۶، رفتار لرزه‌ای قاب میانبر مصالح بنایی با و بدون بازشو چهار نمونه تک دهانه و تک طبقه با مقیاس کامل آزمایش شده تحت بار ثابت و بار جانبی چرخه‌ای شبه استاتیکی قرار گرفته‌اند. نتایج نشان داده است قاب میانبر از نظر مقاومت و سختی تأثیر بیشتری دارد [۱۶]. تیموراگالو و همکاران در سال ۲۰۱۷، مقایسه‌ای بین مدل‌های تحلیلی میانقاب‌های بنایی انجام دادند، آنها از نتایج تحلیلی دریافتند که روش مدل‌سازی با دستک فشاری معادل تنها روش ساده و مؤثر برای نشان دادن رفتار کلی قاب بتن مسلح میانبر است [۱۷]. کاریم و همکاران در سال ۲۰۱۸، دو روش مدل‌سازی ماکرو مدل دستک فشاری قطری معادل و مدل‌سازی گسسته دو بعدی قاب میانبر را بررسی و با یکدیگر مقایسه کردند و دریافتند بین دو روش تفاوت‌هایی از جمله منحنی ظرفیت و حالت‌های شکست میانقاب وجود دارد [۱۸].



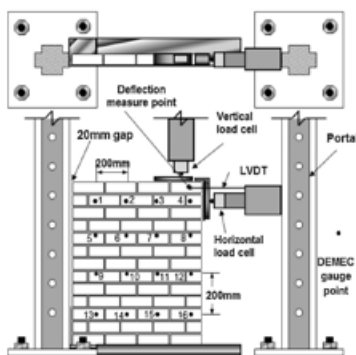
۳- روش تحقیق

۳-۱- نمونه ی آزمایشگاهی دیوار مصالح بنایی

در این تحقیق، یک دیوار آجری به منظور صحت سنجی انتخاب شده است. جزئیات نمونه ی آزمایشگاهی مطابق شکل های ۲ تا ۴ ارائه شده است. آزمایش انجام شده به صورت اولیه روی جابجایی استاتیکی و ظرفیت های بار تمرکز دارد که می تواند منطق نیمه استاتیکی عملکرد در هر بار مرتبط با زمین لرزه را ارزیابی نماید. ابعاد درون صفحه ای هر دیوار آجری در نمونه ی آزمایشگاهی به صورت ۹۷۵ در ۹۰۰ میلی متر می باشد. این پنل با آجر فشاری ساخته شده اند و روی یک صفحه ی قاعده فولادی آزمایش می شوند که دارای یک نگهدارنده ی فولادی نیز هست [۱۹].



شکل ۴: مدل سه بعدی دیوار آجری [۱۹].



شکل ۳: ابعاد نمونه ی آزمایشگاهی دیوار آجری [۱۹].

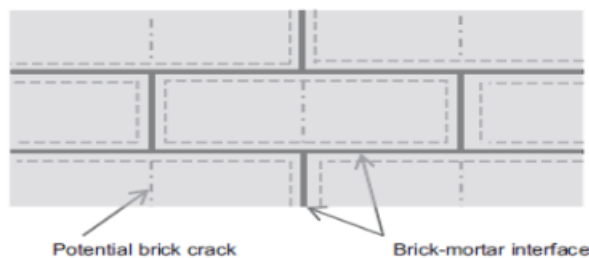


شکل ۲: نمونه ی دیوار آجری تک لایه با ملات [۱۹].

۳-۲- مصالح نمونه آزمایشگاهی

۳-۲-۱- مشخصات آجری

مطابق شکل ۵، پنل تست با ابعاد استاندارد انگلیس به صورت $۶۵ \times ۱۰۲/۵ \times ۲۱۵$ میلی متر ساخته شده است که مبتنی بر کلاس B توصیفی مهندسی است. بر اساس مشخصات سازنده، آجرها به صورت میانگین دارای میزان جذب آب ۵/۶ درصد، تخلخل معادل ۲۵ درصد، تراکم تقریبی ۱۸۸۵ کیلوگرم بر متر مکعب، و استحکام تراکمی با درجه ۳۵ نیوتن بر میلی متر مربع می باشند. یک سری از تست کوچک مقیاس برای بررسی مدول های مختلف الاستیسیته آجرها انجام می گیرد که مبتنی بر BS 3291:1985 و BS EN722-1:2011 می باشد. و مدول های مختلف الاستیسیته آجرها معادل با ۱۹/۹ کیلونیوتن بر میلی متر مربع مشخص می گردد [۱۹].



شکل ۵: ابعاد آجر با ملات آزمایشگاهی شده [۱۹].

۳-۲-۲- مشخصات ملات

یک نوع ملات در این آزمایش از نوع N به کار می رود. که دارای تناسب ترکیب سیمان معمولی پورتلند (OPC): آهک: ماسه معادل با ۱: ۱: ۶ می باشد. استحکام تراکمی برای معکب‌های ۱۰۰ میلی‌متری در اتاق مه با رطوبت نسبی ۹۹ درصد و دمای ۲۱ درجه به صورت ۶/۷ مگا پاسکال است که تست های استحکام تراکمی ملات بر اساس $BS\ En\ 1015-11:1999$ انجام می گیرد. اتصالات ملات نیز به صورت نرمال روی آجرهای ۱۰ میلی‌متری تست می‌شود [۱۹].

۳-۳- شرایط و فرآیند تست پنل

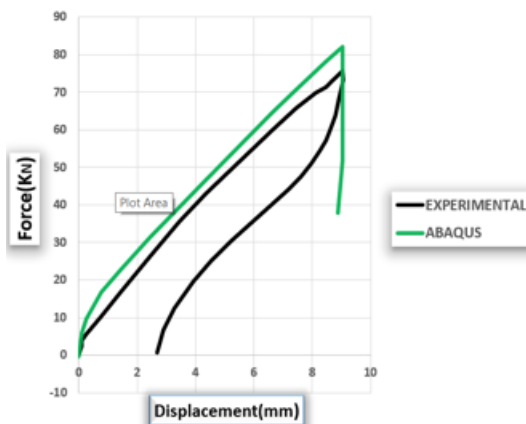
پنل دیوار با استفاده از بار بیرونی روی گوشه بالا سمت چپ تست می‌شود. این بار روی این پنل با استفاده از یک بازوی هیدرولیک اعمال می‌شود و ملات روی یک صفحه فولادی ضخیم پخش می‌شود که لایه روی آجر را پوشانده است. صفحات فولادی روی سه لایه بالایی در راستای عمودی قرار داشته‌اند و طول یک لایه به صورت افقی را دارا هستند. در ابتدا یک فاصله ۱۰ میلی‌متری وجود دارد که بعد به ۲۰ میلی‌متری بین قسمت بدون اعمال بار پنل و ستون چارچوب عمودی افزایش می‌یابد تا امکان قرارگیری ملات در فواصل افقی نیز فراهم شود. برای سه تست اول، با شروع از کف، این فاصله با ملات به تدریج پر می‌شود تا هر گونه جابجایی افقی احتمالی در دیوار، به حداقل برسد. بار افقی اعمال شده روی هر دیوار به تدریج افزایش می‌یابد (۲ کیلونیوتن در دقیقه) تا زمانی که پنل دیگر نتواند بار اعمال شده را تحمل کند. گستره تست به صورتی است که تحریک احتمالی چارچوب RC روی دیوار پر شده واقعی تست می‌شود. بنابراین یک بار عمودی نیز برای فشار به قسمت داخلی دیوار یا لایه ایجاد شده بین آن صورت می‌گیرد که در واقع شبیه سازی اتصال با چارچوب RC محسوب می‌شود. به صورت اولیه، بار عمودی به صورت ۲۰ کیلونیوتن در نظر گرفته می‌شود (و بعد به تدریج با حد خاصی با شروع از قسمت کف افزایش می‌یابد) [۱۹].

۳-۴- صحت سنجی مدل سازی

بررسی صحت سنجی مدل سازی از مدل هندسی سه بعدی نشان‌دهنده‌ی پنل آجری متصل به ملات حلقه‌ای به صورت فرآیند نیرو می‌باشد (مثلا احتمال ترک برداشتن در وسط آجرهاست). مقایسه‌ی منحنی های رفتار متداول اتصال حلقه‌ای به دست آمده از تحلیل اجزا محدودی و منحنی‌های نظیر حاصل از آزمایش صورت می‌گیرد، تعیین کننده‌ی رفتار کلی دیوار است. مشابه با اتصال ملاتی، اتصال حلقه‌ای دارای ضخامت خاص ارتباطی است. مقدار قابل توجهی از انعطاف پذیری مشاهده می‌شود. این امر به دلیل این نکته است که تست $W6$ زمانی متوقف می‌شود تنها ترک‌های اولیه روی بدنه‌ی آن ظاهر می‌شود و اطلاعات مهمی در مورد شکل پذیری، مقاومت و جذب انرژی نمونه را در اختیار می‌گذارد. مشخصات مصالح و نحوه بارگذاری در ادامه شرح داده شده است:



آجرهای تست با ابعاد استاندارد انگلیس به صورت ۲۱۵ در ۱۰۲/۵ در ۶۵ میلی‌متر ساخته شده‌اند. براساس مشخصات سازنده، آجرها به صورت میانگین دارای میزان جذب آب ۵/۶ درصد، تخلخل معادل با ۲۵ درصد، تراکم تقریبی ۱۸۸۵ کیلوگرم بر متر مکعب، و استحکام تراکمی با درجه ۳۵ نیوتن بر میلی‌متر مربع می‌باشند. یک سری از تست کوچک مقیاس برای بررسی مدول‌های مختلف الاستیسیته آجرها انجام می‌گیرد که مبتنی بر *BS 3291:1985* و *BS EN722-1:2011* می‌باشد. که یک نمونه تست می‌شوند و مدول الاستیک آجرها معادل با ۱۹/۹ کیلونیوتن بر میلی‌متر مربع مشخص می‌گردد. ملات در این آزمایش دارای تناسب ترکیب سیمان معمولی پورتلند (*OPC*): آهک: ماسه به صورت ۱: ۱/۲ : ۴ می‌باشد. هر پنل دیوار با استفاده از بار بیرونی روی گوشه بالا سمت چپ تست می‌شود. این بار روی هر پنل با استفاده از یک بازوی هیدرولیک اعمال می‌شود و ملات روی یک صفحه فولادی ضخیم پخش می‌شود که لایه روی آجر را پوشانده است. صفحات فولادی روی سه لایه بالایی در راستای عمودی قرار داشته‌اند و طول یک لایه به صورت افقی را دارا هستند. در ابتدا یک فاصله ۱۰ میلی‌متری وجود دارد که بعد به ۲۰ میلی‌متری بین قسمت بدون اعمال بار پنل و ستون چارچوب عمودی افزایش می‌یابد تا امکان قرارگیری ملات در فواصل افقی نیز فراهم شود. برای تست اول، با شروع از کف، این فاصله با ملات به تدریج پر می‌شود تا هر گونه جابجایی افقی احتمالی در دیوار، به حداقل برسد. بار افقی اعمال شده روی هر دیوار به تدریج افزایش می‌یابد (۲ کیلونیوتن در دقیقه) تا زمانی که پنل دیگر نتواند بار اعمال شده را تحمل کند. گستره تست به صورتی است که تحریک احتمالی چارچوب *RC* روی دیوار پر شده واقعی تست می‌شود. بنابراین یک بار عمودی نیز برای فشار به قسمت داخلی دیوار یا لایه ایجاد شده بین آن صورت می‌گیرد که در واقع شبیه‌سازی اتصال با چارچوب *RC* محسوب می‌شود. به صورت اولیه، بار عمودی به صورت ۲۰ کیلونیوتن در نظر گرفته می‌شود (و بعد به تدریج با حد خاصی با شروع از قسمت کف افزایش می‌یابد). همچنین، یک *LVDT* در گوشه بالایی پنل نصب می‌شود. با هر بار افزایش بار، مقادیر خوانده شده توسط *LVDT* برای علامت‌های مختلف افزایش تدریجی در تغییر شکل تحت بار به کار می‌رود. توزیع مجدد بار به صورت خاص طوری است که ترک‌های ایجاد شده و انتشار آن‌ها در هر پنل به دقت مشخص شوند. معمولاً اولین ترک‌های مشاهده شده دارای عرض ۰/۲ میلی‌متر می‌باشند.



شکل ۶: مقایسه نتایج آزمایشگاهی و تحلیل مدل اجزا محدودی.

مطابق شکل ۶، نتایج حاصل از مدل‌سازی در نرم‌افزار *ABAQUS* [۲۰] و نمونه‌ی آزمایشگاهی با هم مقایسه شده‌اند. بیشینه‌ی جابجایی در نمونه‌ی آزمایشگاهی برابر ۹/۱ میلی‌متر و در نمونه شبیه‌سازی شده برابر ۹ میلی‌متر است که اختلافی در حدود یک درصد را نشان می‌دهد. نتایج بیانگر انطباق مناسب مدل اجزای محدود و نمونه آزمایشگاهی دارد.



۴- نحوه مدلسازی در آباکوس

۴-۱- مدل سازی دیوار آجری مصالح بنایی غیرمسلح

مدل سازی عددی ساختار مصالح بنایی دو رویکرد (درشت بینانه) ماکرو و (ریزبینانه) میکرو وجود دارد. در رویکرد ماکرو تفاوتی بین آجر و ملات در نظر گرفته نمی شود بلکه کل مقطع به صورت یک جسم یکپارچه فرض می گردد. در رویکرد میکرو بلوک های بنایی به طور جداگانه مدل سازی می شود در مدل سازی میکرو دو دیدگاه در زمینه مدل سازی ملات وجود دارد. روش اول "میکرو مدل ساده سازی شده" که در آن ملات به صورت جداگانه مدل سازی نشده بلکه خواص اندرکنشی آن با بلوک های بنایی اطراف نظیر چسبندگی و ضریب اصطکاک مدل می شود و روش دوم "میکرو مدل با جزئیات" که دقیق ترین روش موجود برای مدل سازی اجزای بنایی است. در این روش المان های جداگانه ای برای بلوک آجر یا خشت، ملات و تماس بین ملات و آجر تعریف می شود. این روش به دلیل هزینه محاسباتی بسیار بالا تا به حال کمتر مورد توجه قرار گرفته است. به منظور تعیین مواردی از قبیل شروع شکست، گسترش ترک و لغزش در سطوح مختلف و ...، روش میکرو مدل ساده سازی شده جهت مدل سازی رفتار دیوار مصالح بنایی انتخاب می گردد.

۴-۲- مدل سازی ورق فولادی

در ورق های مدل سازی شده از فولاد ST-37 استفاده شده است. برای مدل سازی فولاد با استفاده از مدل رامبرگ-اسگود (*Ramberg-Osgood*) بدست آمده استفاده شده است. مدل رامبرگ-اسگود شامل ایجاد منحنی تنش- کرنش مهندسی است که پس از آن منحنی تنش-کرنش واقعی نشان داده شده در تجزیه و تحلیل المان محدود، مواد فلزی تا زمانی که به تنش تسلیم برسد، به عنوان مواد الاستیکی در نظر گرفته می شوند. پس از آن نقطه، به عنوان مواد پلاستیکی شبیه سازی می شوند. مدول الاستیسیته (E) برابر با $210GPa$ ، توصیه شده توسط $AISC360$ و ضریب پواسون (ν) برابر 0.3 در نظر گرفته شده است.

۴-۳- مدل سازی ملات

برای مدل سازی رفتار برشی ملات از ضریب اصطکاک متغییر با فشار تماسی استفاده شد به طوری که میزان ضریب اصطکاک برای شبیه سازی رفتار برشی ملات به ازای فشار تماسی در جدول (۱) در نظر گرفته شده است. در ضمن از مقاومت کششی ملات صرف نظر شده است و بیشتر روی استفاده از مقاومت برشی آن که با ضریب اصطکاک تعیین می گردد، تمرکز می شود.

جدول ۱: مدل سازی رفتار برشی ملات.

Friction Coeff	Contact Pressure (kg/cm^2)
1.302	0.5
0.75	1
0.41	2

۴-۴- مدل سازی FRP

برای مدل سازی FRP از المان $Shell$ استفاده شده است که از یک سو قابلیت تعریف لایه های مصالح تا 100 لایه ای و از سوی دیگر قابلیت در نظر گرفتن تغییر شکل های بزرگ (برای تحلیل غیرخطی) را دارد.

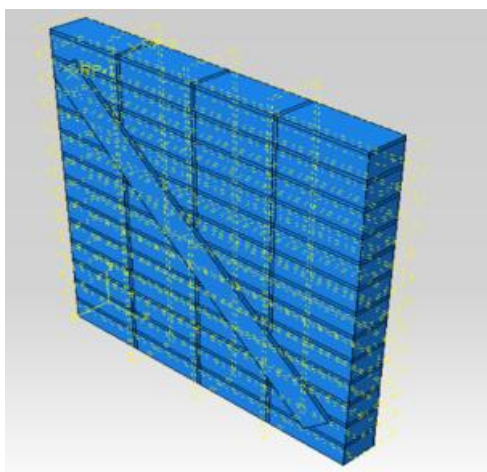


۴-۵- مدل سازی نمونه ها در نرم افزار ABAQUS

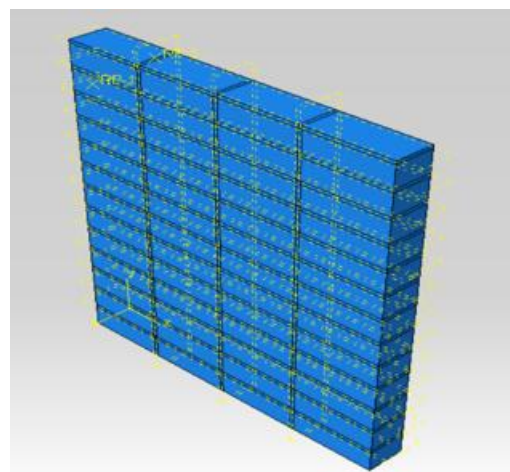
نمونه‌های مورد مطالعه در این تحقیق شامل چهار نمونه اصلی می‌باشد که در واقع جهت بررسی دقیق‌تر رفتار لرزه‌ای دیوار بنایی همان نمونه‌ی آزمایشگاهی [۱۹] می‌باشد. نمونه با ابعاد $215\text{mm} \times 102.5\text{mm} \times 65\text{mm}$ است. سپس مقاوم‌سازی نمونه‌ی مرجع با سه روش مطابق شکل‌های ۷ تا ۱۰ انجام شد و مشخصات نمونه‌ها در جدول (۲) ارائه شده است.

جدول ۲: نمونه‌های مورد مطالعه جهت مدل‌سازی در نرم افزار ABAQUS

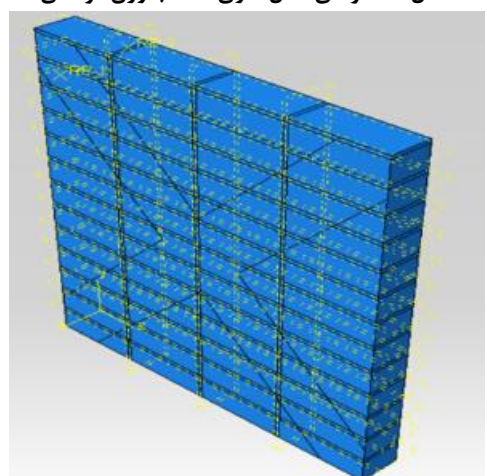
نوع چیدمان	شرح نمونه‌ی مورد مطالعه
راسته نما	دیوار بنایی غیر مسلح
راسته نما با ورق فولادی	دیوار بنایی مقاوم‌سازی شده با روش ورق فولادی با تکنیک تسلیح با اتصال خارجی
راسته نما با ملات	دیوار بنایی مقاوم‌سازی شده با روش ملات با تکنیک تسلیح با اتصال خارجی
راسته نما با ورق FRP	دیوار بنایی مقاوم‌سازی شده با روش FRP با تکنیک تسلیح با اتصال خارجی



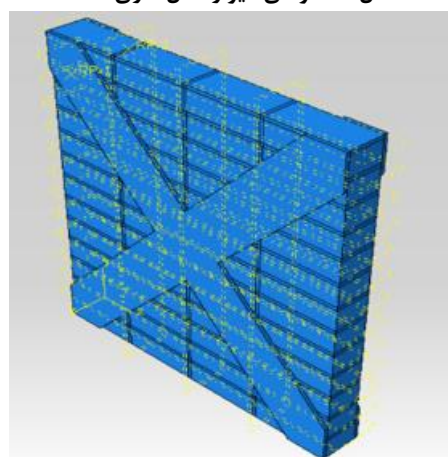
شکل ۸: نمونه‌ی مدل‌سازی شده با ورق فولادی



شکل ۷: نمونه‌ی دیوار مدل‌سازی شده



شکل ۱۰: نمونه‌ی مدل‌سازی شده با ورق FRP

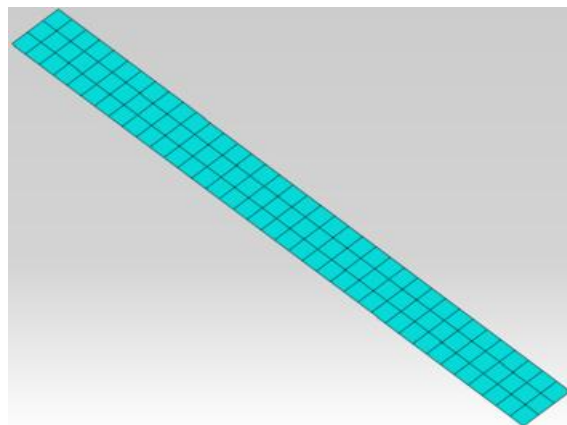
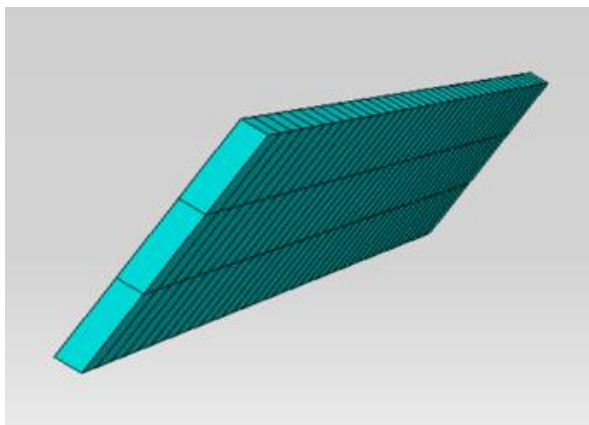


شکل ۹: نمونه‌ی مدل‌سازی شده با ملات

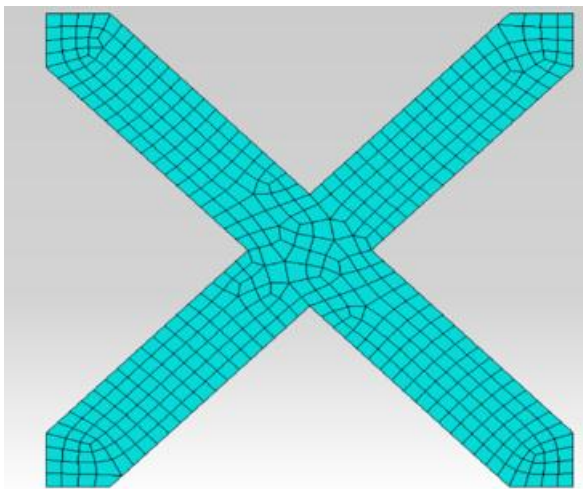
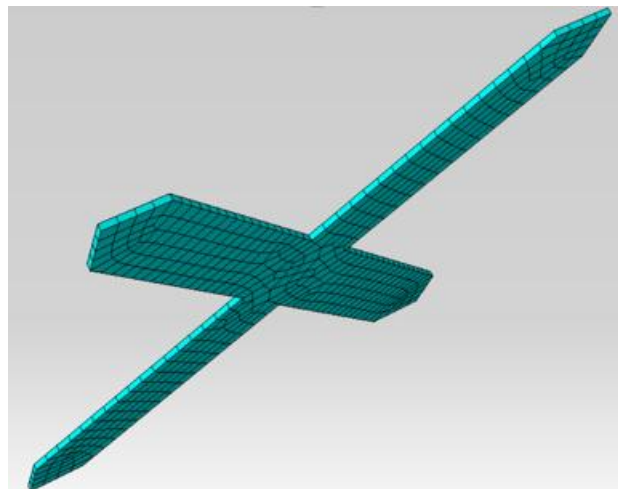


۴-۶- نوع المان و مش بندی

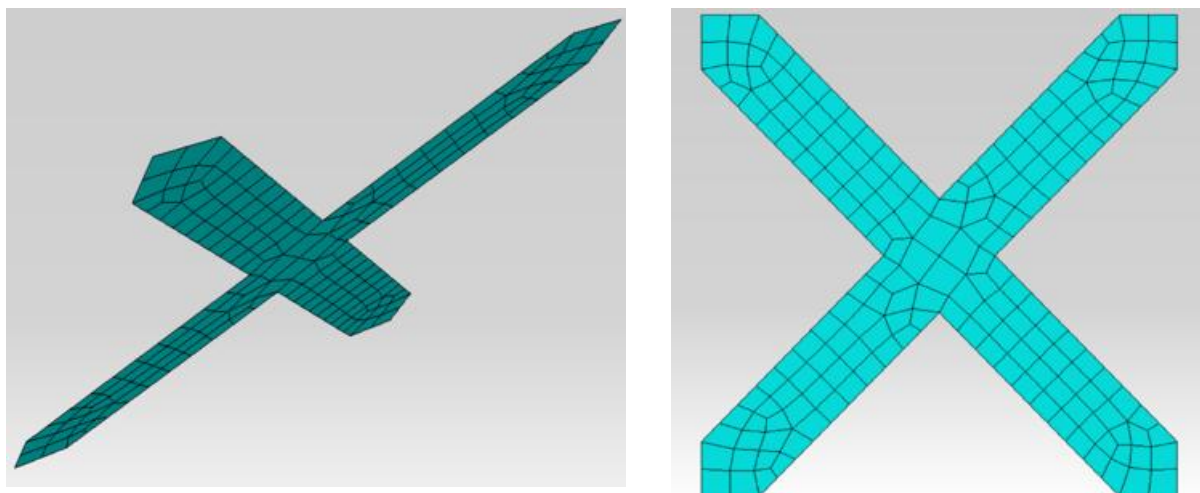
برای مدل سازی با ورق فولادی، ملات و FRP در نرم افزار، از المان *Continuum* یا *Solid* شش وجهی هشت گرهی در تکی ورق فولادی، دوازده وجهی بیست و چهار گرهی در ملات تقویتی بصورت قطری و دوازده وجهی بیست و چهار گرهی FRP با روش قطری، دارای سه درجه آزادی انتقالی در هر گره با روش انتگرال گیری کامل خطی که در نرم افزار ABAQUS با 8DR3C نشان داده می شود، استفاده شده است. این المان در هر گره دارای سه درجه آزادی جابجایی در جهت محورهای X، Y و Z است. این المان برای آنالیزهای خطی، غیرخطی پیچیده، مسائل تماسی و پلاستیسیته همراه با تغییر شکل های بزرگ مناسب می باشد. در المان های سه بعدی *Solid* می توان خصوصیات مصالح را در چندین لایه با مقادیر متفاوت و در جهت های مختلف اعمال کرد. در این برنامه تمام المان های *Solid* اثرات کرنش محدود را در نظر می گیرند. مفهوم کرنش محدود آن است که ماده رفتار غیر الاستیک داشته باشد. در تمام موارد المان های *Solid* این توانایی را دارند که میزان تنش را به طور دقیق تعیین کنند. همچنین در این المان ها مولفه های تنش-کرنش بر حسب جهات محورهای اصلی تعیین می شوند؛ به جز در مواردی که برای المان محورهای محلی تعریف شده باشد در تحقیق حاضر برای تعیین مش بندی مناسب، حساسیت مش بندی مطابق شکل های ۱۱ تا ۱۳ مورد مطالعه قرار گرفت حداکثر اندازه مش بندی برای ورق فولادی، ملات 30 mm و ورق FRP 50mm انتخاب شد.



شکل ۱۱: مش بندی ورق فولادی با المان S8R



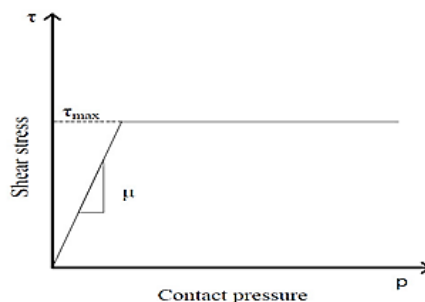
شکل ۱۲: مش بندی ملات با المان S24R



شکل ۱۳: مش بندی ورق FRP با المان S24R

۴-۷- مدل اندرکنش بین ورق فولادی، ملات، FRP و دیوار آجری

اندرکنشی که در مدل *ABAQUS* استفاده می‌شود، اندرکنش سطح به سطح است. هر مدل نیاز به دو اندرکنش دارد. اولین تماس بین ورق فولادی و بخش دیوار بود که در آن قسمت داخلی آجر سطح اصلی بود و قسمت خارجی ورق فولادی سطح پیرو بود. با در نظر گرفتن تماس سخت، نفوذ سطح دیوار آجری به سطح ورق فولادی در محل های مقید شده به حداقل می رسد و اجازه انتقال تنش کششی را در طول بخش اندرکنش نمی‌دهد. از سوی دیگر تماس بین ورق فولادی و دیوار آجری صفحه به صفحه در نظر گرفته شده است. مطابق شکل ۱۴، مدل اصطکاکی کلمب استفاده شده است که تنش برشی بحرانی را از رابطه $\tau_{crit} = \mu P$ تعیین می‌کند که در این معادله μ ضریب اصطکاک و P فشار تماسی است. ضریب اصطکاک در نظر گرفته شده بین فولاد و بتن ۰/۳ می‌باشد.



شکل ۱۴: محدوده‌ی تنش برشی در سطح روبه.

۴-۸- شرایط مرزی

در مجموع دو شرط مرزی برای هر مدل *ABAQUS* استفاده شدند. اولین شرط، نقطه مرجع *RP1* را در مبدا با استفاده از نوع جابجایی / چرخش تثبیت کرد. شرط مرزی دوم برای نقطه مرجع *RP2*، استفاده شده است. فشار دیوار از طریق شرط مرزی دوم و با مقدار تنظیمی در *C2* مقدار 20 معرفی گردید. لازم به ذکر است که بارگذاری توصیفی فوق تضمین می‌کند که بار به طور یکنواخت روی سطح مقطع بالای دیوار بارگذاری شده محوری توزیع شود.



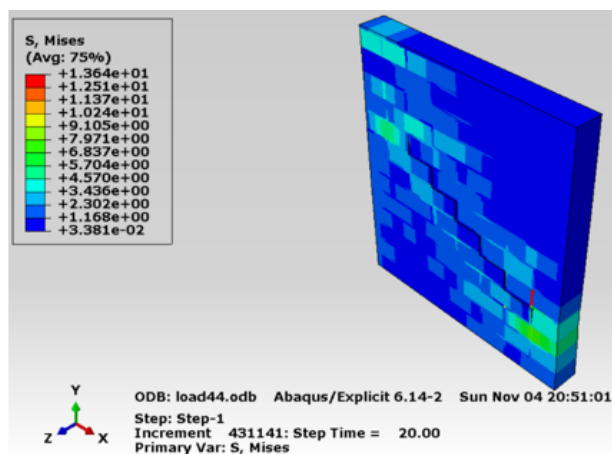
۵- نتایج

۵-۱- دیوار آجری با نمونه چیدمان راسته نما

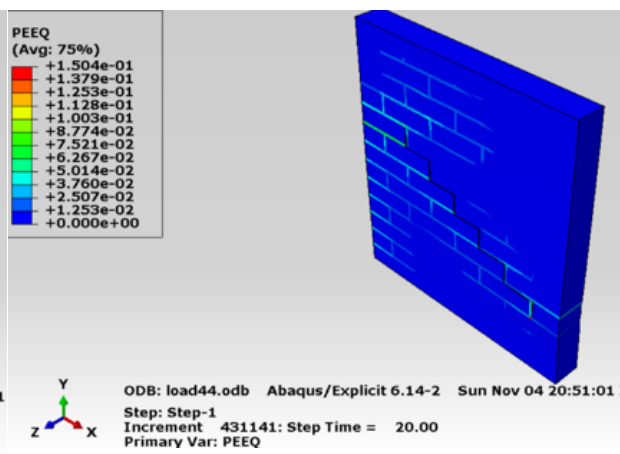
نتایج آنالیز حاصل از تحلیل عددی دیوار، با مشخصات مصالح دیوار در جدول (۳) و کانتور کرنش پلاستیک در شکل ۱۵، کانتور تنش پلاستیک در شکل ۱۶، تغییرشکل خارج از صفحه در شکل ۱۷ و نمودار منحنی بار-جابجایی حاصل از مدل سازی عددی در شکل ۱۸ ارائه شده است.

جدول ۳: مشخصات مصالح دیوار آجری در چیدمان راسته نما.

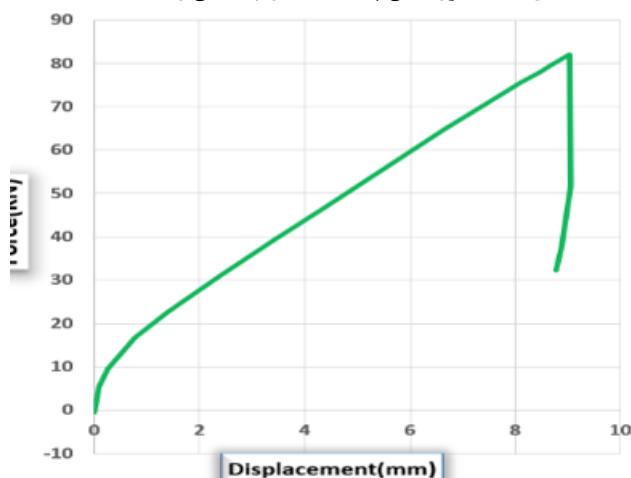
مقاومت فشاری ملات (MPa)	نیرو (kN)	ضخامت ملات (mm)	ابعاد			نوع چیدمان
			طول (mm)	عرض (mm)	ارتفاع (mm)	
8.1	75	10	طول (mm)	عرض (mm)	ارتفاع (mm)	راسته نما
			215	102.5	65	



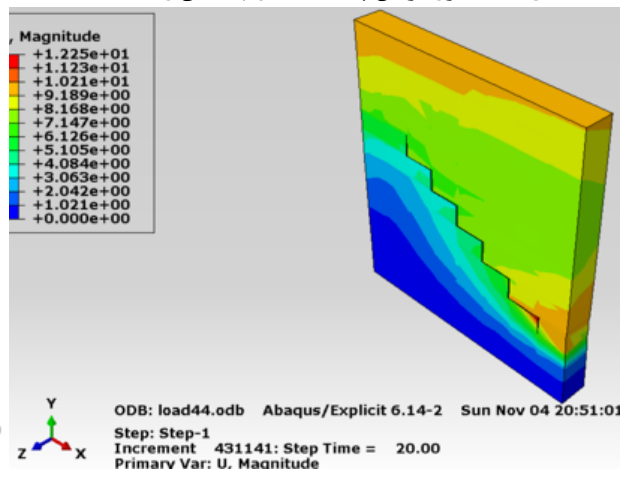
شکل ۱۶: کانتور تنش پلاستیک در چیدمان راسته نما



شکل ۱۵: کانتور کرنش پلاستیک در چیدمان راسته نما



شکل ۱۸: نمودار بار-جابجایی در مدل سازی عددی



شکل ۱۷: تغییرشکل خارج از صفحه در چیدمان راسته نما

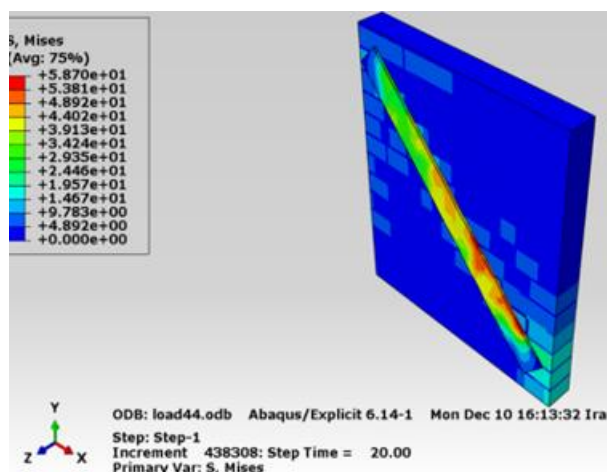


۵-۲- نتایج تحلیل مقاوم سازی دیوار با استفاده از ورق فولادی در چیدمان راسته نما

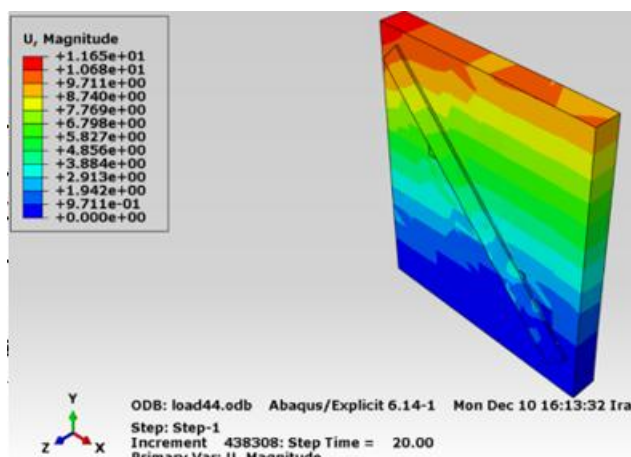
نتایج آنالیز حاصل از تحلیل عددی دیوار مقاوم سازی، با مشخصات مصالح فولادی در جدول (۴) و کانتور کرنش پلاستیک مقاوم سازی در شکل ۱۹، کانتور تنش پلاستیک مقاوم سازی در شکل ۲۰، تغییر شکل خارج از صفحه مقاوم سازی در شکل ۲۱ و مقایسه نمودار منحنی بار-جابجایی حاصل از مقاوم سازی ورق فولادی با چیدمان راسته نما در شکل ۲۲ ارائه شده است.

جدول ۴: مشخصات مصالح ورق فولادی در چیدمان راسته نما.

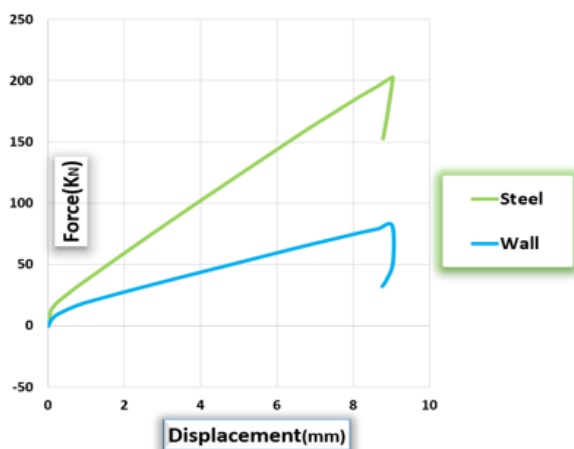
مدول الاستیسیته (MPa)	چگالی (kg/m ³)	ابعاد			نوع تقویتی
		طول (mm)	عرض (mm)	ضخامت (mm)	
210	7850	1100	100	10	تک قطری



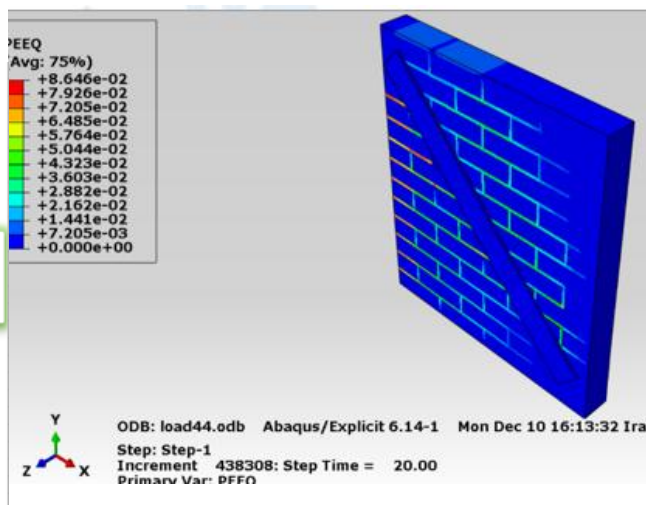
شکل ۲۰: کانتور تنش پلاستیک مقاوم سازی در چیدمان راسته نما



شکل ۱۹: کانتور کرنش پلاستیک مقاوم سازی در چیدمان راسته نما



شکل ۲۲: مقایسه نمودار مقاوم سازی ورق فولادی در چیدمان راسته نما



شکل ۲۱: تغییر شکل خارج از صفحه مقاوم سازی در چیدمان راسته نما

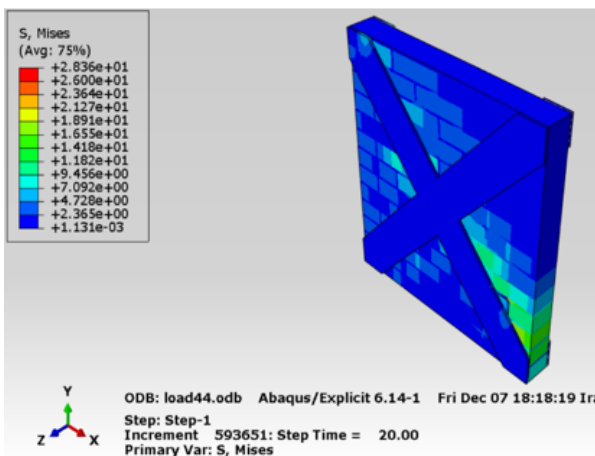


۳-۵- نتایج تحلیل دیوار مقاوم سازی با استفاده از ملات در چیدمان راسته نما

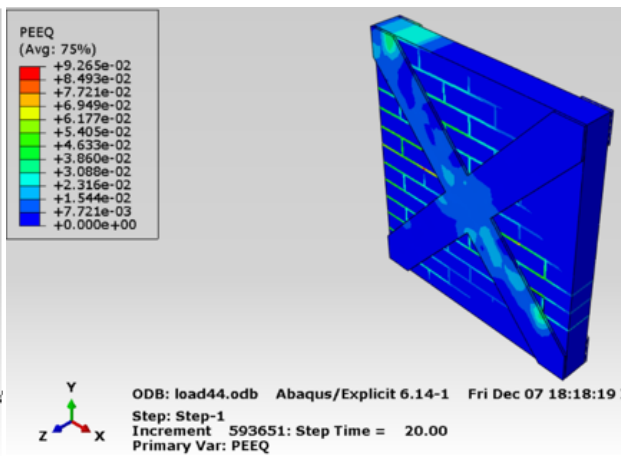
نتایج آنالیز حاصل از تحلیل عددی دیوار مقاوم سازی ، با مشخصات مصالح ملات در جدول (۵) و کانتور کرنش پلاستیک مقاوم سازی در شکل ۲۳، کانتور تنش پلاستیک مقاوم سازی در شکل ۲۴، تغییرشکل خارج از صفحه مقاوم سازی در شکل ۲۵ و مقایسه نمودار منحنی بار-جابجایی حاصل از مقاوم سازی ملات با چیدمان راسته نما در شکل ۲۶ ارائه شده است.

جدول ۵: مشخصات مصالح ملات در چیدمان راسته نما.

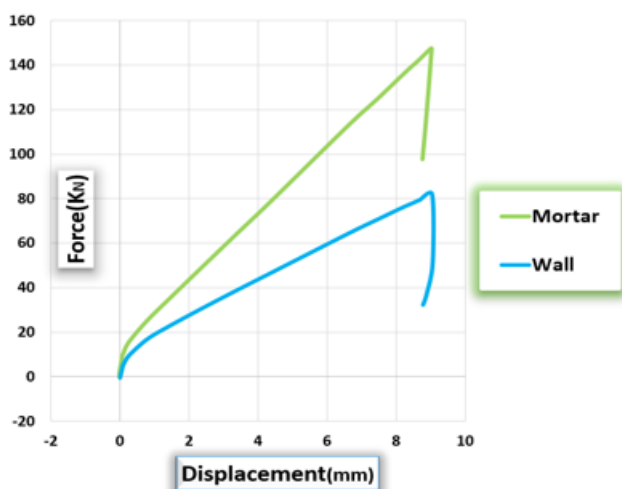
مدول الاستیسیته (MPa)	چگالی (kg/m ³)	ابعاد			نوع تقویتی
		طول (mm)	عرض (mm)	ضخامت (mm)	
110	2100	1300	110	10	دو قطری



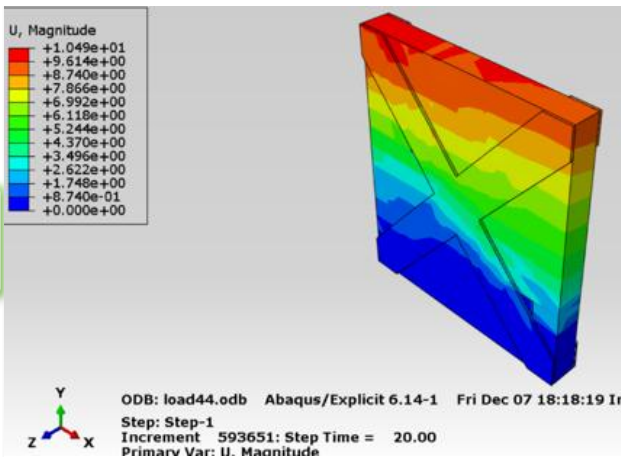
شکل ۲۴: کانتور تنش پلاستیک مقاوم سازی در چیدمان راسته نما



شکل ۲۳: کانتور کرنش پلاستیک مقاوم سازی در چیدمان راسته نما



شکل ۲۶: مقایسه نمودار مقاوم سازی ملات در چیدمان راسته نما



شکل ۲۵: تغییرشکل خارج از صفحه مقاوم سازی در چیدمان راسته نما

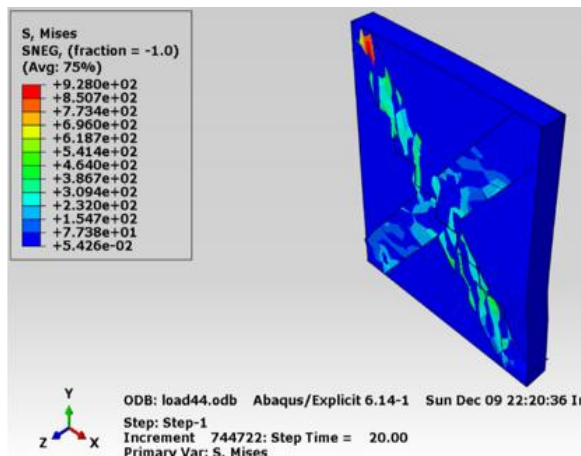


۴-۵- نتایج تحلیل دیوار مقاوم سازی با استفاده از الیاف FRP در چیدمان راسته نما

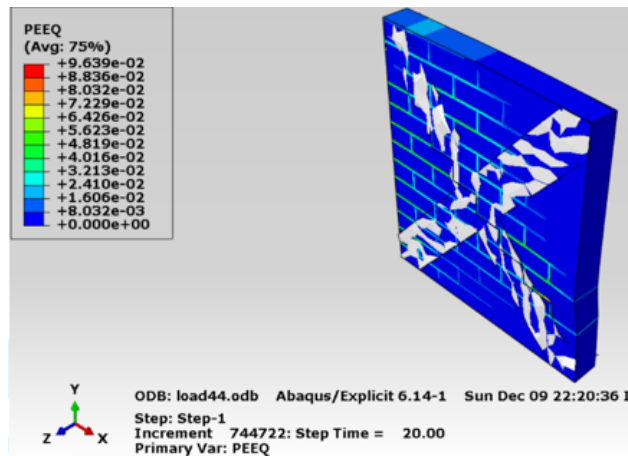
نتایج آنالیز حاصل از تحلیل عددی دیوار مقاوم سازی ، با مشخصات مصالح FRP در جدول (۶) و کانتور کرنش پلاستیک مقاوم سازی در شکل ۲۷، کانتور تنش پلاستیک مقاوم سازی در شکل ۲۸، تغییرشکل خارج از صفحه مقاوم سازی در شکل ۲۹ و مقایسه نمودار منحنی بار-جابجایی حاصل از مقاوم سازی FRP با چیدمان راسته نما در شکل ۳۰ ارائه شده است.

جدول ۶: مشخصات مصالح FRP در چیدمان راسته نما.

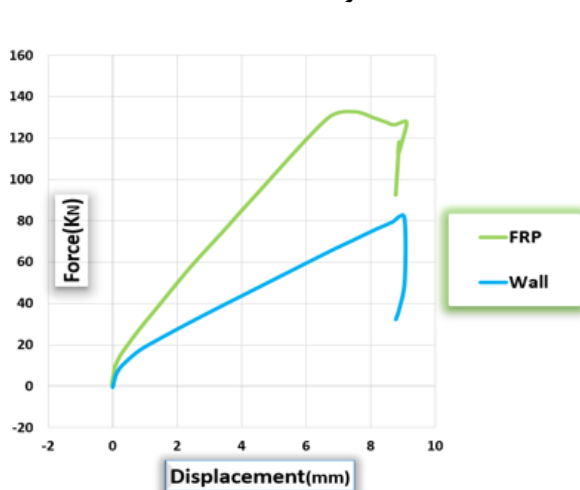
مدول الاستیسیته (MPa)	چگالی (kg/m ³)	ابعاد			نوع تقویتی
		طول (mm)	عرض (mm)	ضخامت (mm)	دو قطری
220	1200	1300	110	0.165	



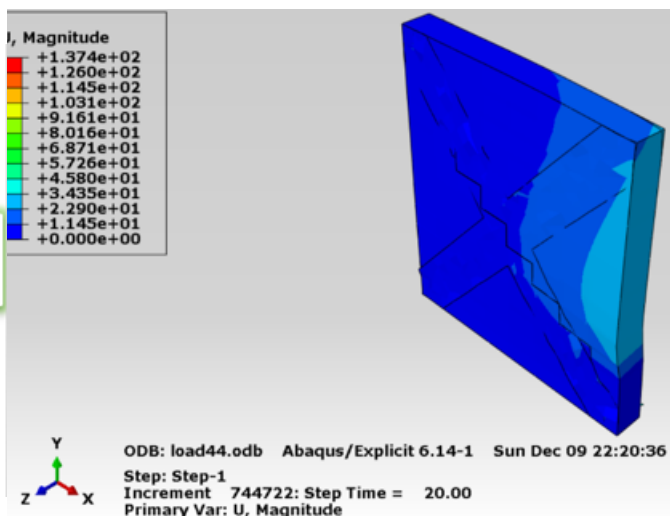
شکل ۲۸: کانتور تنش پلاستیک مقاوم سازی در چیدمان راسته نما



شکل ۲۷: کانتور کرنش پلاستیک مقاوم سازی در چیدمان راسته نما



شکل ۳۰: مقایسه نمودار مقاوم سازی FRP در چیدمان راسته نما

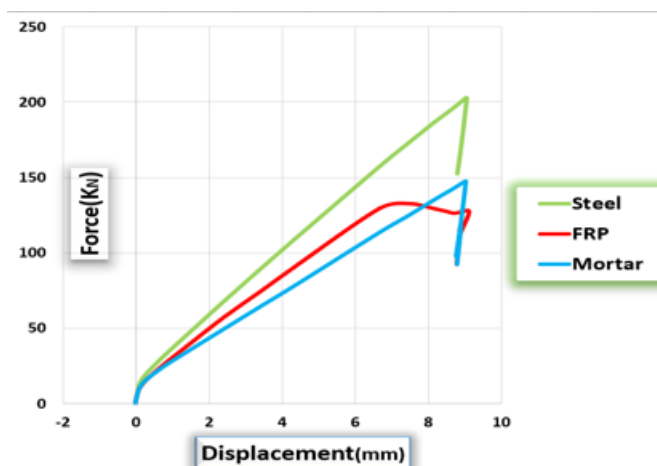


شکل ۲۹: تغییرشکل خارج از صفحه مقاوم سازی در چیدمان راسته نما



۶- مقایسه نمودار ورق فولادی، ملات تقویتی و FRP در چیدمان راسته نما

نتایج تحلیل حاصل مقایسه‌ی نمودار منحنی بار-جابجایی حاصل از مقاوم‌سازی ورق فولادی، ملات تقویتی و FRP در شکل ۳۱ ارائه شده است.



شکل ۳۱: مقایسه نمودار بار-جابجایی ورق فولادی، ملات تقویتی و FRP در چیدمان راسته نما.

۷- جمع بندی و نتیجه گیری

در این تحقیق، نحوه مدل‌سازی عددی دیوار بنایی به روش میکرو بررسی گردیده است. در این مدل‌سازی برای مدل کردن خرابی واحدهای بنایی، رفتار پلاستیک برای آنها لحاظ شده است. همچنین به منظور شبیه‌سازی شکست کششی و برشی در درزها، مدل رفتاری چسبیده برای المان‌های رابط و درزهای بالقوه تعریف شده است. بنابراین امکان شبیه‌سازی تمام مکانیزم‌های خرابی برای مدل‌سازی مدنظر قرار گرفته است. با این روش می‌توان گفت در مدل در نظر گرفته شده، شروع خرابی از مفاصل رابط و درزهای بالقوه عمودی وسط واحدهای بنایی بوده و با خردشدگی واحدهای بنایی تکمیل می‌شود. به‌طور کلی می‌توان گفت رفتار دیوار قبل از خرابی توسط ویژگی‌های المان رابط و درزهای بالقوه کنترل می‌شود. نتایج حاصل از این تحقیق را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

- ۱- نتایج بدست آمده مدل‌سازی دیوار بنایی غیر مسلح با ورق فولادی، ملات و FRP نمونه مرجع نسبت به دیوار معمولی افزایش یافته است.

۲- شکل‌پذیری FRP نسبت به سایر حالات بهبود یافته است.

۳- استفاده از ورق فولادی مقاوم سازی شده در چیدمان مختلف، باعث افزایش مقاومت نهایی نمونه‌ی مرجع شده است.

۴- با توجه به مقاومت و انعطاف‌پذیری بالاتر دیوار بنایی تقویت شده ورق فولادی در یک طرف نسبت به دیوار معمولی از نظر سرعت بالاتر طراحی بهینه محسوب می‌گردد.

۵- به دلیل امکان وقوع شکست ترد در صورت استفاده از ملات تقویتی، باید مقدار ضریب مقاوم‌سازی اعمال گردد.

۶- چیدمان راسته نوارهای FRP تأثیر بیشتری در بهبود انعطاف‌پذیری و چیدمان قطری نوارهای مذکور تأثیر بیشتری در افزایش مقاومت نهایی دیوارهای بنایی دارد.

۷- از آنجایی که ترک‌های ریز می‌تواند به عنوان پیش‌آگاهی مطرح باشد و از شکست ترد جلوگیری نماید. در نتیجه جهت نیل به مقاومت بالاتر، می‌توان از ترکیب دو چیدمان تکی و قطری استفاده نمود.



۸- افزایش ضخامت ورق فولادی در چیدمان مختلف نمونه‌ی مرجع تأثیر بیشتری در افزایش مقاومت و انعطاف‌پذیری دارد.

۸- مراجع

- [1]-Sepehrinia, M., Rahimi bondarabadi, H., Ahmadi Nadoshan, B., 2016, **Study of the Arrangement Effect of Units on the Shear Strength Masonry Walls in Meso-Scale**, Journal of Structural and Construction Engineering, 3(3), 30-41.
- [2]- Mehrabi, A., Shing, B. P., Schuller, M., and Noland, J., 1996, **Experimental evaluation of masonry-infilled RC frames**, Journal of Structural Engineering, ASCE, 122(3), 228–37.
- [3]-ElGawady, M. A., Lestuzzi, P, and Badoux, M., 2004, **A Review of Conventional Seismic Retrofitting Techniques for URM**, In: Proc. 13th International Brick and Block Masonry conference.
- [4]- Midas FEA. Nonlinear FE analysis software, 2013, MIDAS Information Technology Co, CSP FEA.
- [5]- Dolatshahi, K. M., and Aref, A. J., 2011, **Two-Dimensional Computational Framework of Meso-scale Rigid and Line Interface Elements for Masonry Structures**, Engineering Structures, 33(12), 3657-3667.
- [6]- Elgawady, M. A., 2006, **A seismic retrofitting of unreinforced masonry walls using FRP**, Journal of Constructions and Building Materials, 25, 690-702.
- [7]- Korany, Y., and EL-Haggag, S., 1997, **Mechanics and modeling of URM structures**, The Masonry Society Journal, 19(1), 97-106.
- [8]- Aref, A. J., and Dolatshahi, K. M., 2013, **A Three-Dimensional Cyclic Meso-Scale Numerical Procedure for Simulation of Unreinforced Masonry Structures**, Computers & Structures, 120, 9-23.
- [9]-Lourenco, P. B., 1996, **Computational strategies for masonry structures**, TU Delft, Delft University of Technology.
- [10]- Ali, S. S., and Page, A. W., 1988, **Finite element model for masonry subjected to concentrated loads**, Journal of structural engineering, 114(8), 1761-1784.
- [11]- Page, A. W., 1978, **Finite Element Model for Masonry**, Journal of the Structural Division, 104(8), 1267-1285.
- [12]- Alcaino. P., and Santa-Maria., H., 2011, **Repair of in-plane shera damaged masonry walls with external FRP**, Journal of Construction and Building Materials, 25, 1172-1180.
- [13]- Konthesingha, K. M. C., Masia, M. J., Petersen, R. B., Mojsilovic, N., Simundic, G., Page, A. W., 2013, **Static cyclic in-plane shear response of damaged masonry walls retrofitted with NSM FRP strps-An experimental evaluation**, Journal of Engineering Structures, 50, 126-136.
- [14]- Asteris, P. G., Cotsovos, D. M., Chrysostomou, C., Mohebkhah, A., and Al-Chaar, G., 2013, **Mathematical micromodeling of infilled frames: state of the art**, Engineering Structures, 56, 1905-1921.
- [15]- Campione, G., Cavaleri, L., Macaluso, G., Amato, G., and Di Trapani, F., 2015, **Evaluation of infilled frames: an updated in-plane-stiffness macro-model considering the effects of vertical loads**, Bulletin of Earthquake Engineering, 13(8), 2265-2281.
- [16]- Zhai, C., Kong, J., Wang, X., and Chen, Z., 2016, **Experimental and finite element analytical investigation of seismic behavior of full-scale masonry infilled RC frames**, Journal of Earthquake Engineering, 20(7), 1171-1198.



- [17]- Timurağaoğlu, M. O., Doğangün, A., and Livaoğlu, R., 2017, **Comparison of Different Analytical Models of Infilled RC Frame**, Conference: III International Conference on Engineering and Natural Science.
- [18]- Kareem, K. M., and Pantò, B., 2019, **Simplified macro-modelling strategies for the seismic assessment of non-ductile infilled frames: a critical appraisal**, Journal of Building Engineering, 22, 397- 414.
- [19]- Chuanlin Wang, A., John, P., Forth , Nikolaos Nikitas , Vasilis Sarhosis School of Civil Engineering, University of Leeds, Leeds, UK b School of Civil Engineering and Geosciences, Newcastle University, Newcastle, UK.
- [20]-Abaqus Ins Manual, Version 6.12.