

نوع مقاله: پژوهشی

چکیده

سازه‌های بنایی به علت سادگی ساخت و هزینه کم همواره در سراسر جهان مورد استفاده بوده است. در سال‌های اخیر خسارت‌های ناشی از زلزله منجر به آسیب‌های شدید به این سازه‌ها شده است؛ لذا بررسی رفتار آنها جهت شناسایی و بهبود عملکرد آنها در برابر زلزله حائز اهمیت می‌باشد. هدف از این مقاله ارزیابی رفتار لرزه‌ای دیوارهای بنایی ۲۰ سانتی‌متری با دو نوع آجرچینی راسته و بلوکی در حالت بدون تقویت و تقویت‌شده با ورق‌های CFRP در برابر نیروی زلزله می‌باشد که هر دو دیوار با روش ضربدری تقویت شدند. همچنین دیوار راسته به روش ترکیب نوارهای ضربدری و افقی نیز تقویت شده است. به منظور مدل‌سازی دیوارهای مورد بررسی از روش ریزمدل‌سازی ساده شده به روش اجزای محدود استفاده شده و صحت‌سنجی آن با نمونه‌های آزمایشگاهی انجام شد و به کمک منحنی هیستریزس دیوارها به بررسی پارامترهای لرزه‌ای آنها پرداخته شد. در دیوارهای آجرچینی شده به روش راسته، پارامترهای ضریب شکل‌پذیری، ظرفیت باربری و انرژی تلف‌شده بیشتر و افت مقاومت آن نیز کمتر از آجرچینی بلوکی بوده است. در حالت تقویت‌شده به روش ضربدری دیوار با آجرچینی بلوکی شکل‌پذیری، سختی مؤثر، ظرفیت باربری، انرژی تلف‌شده و میزان افت مقاومت بیشتری نسبت به دیوار با آجرچینی راسته داشته است. به‌طور کلی میزان تأثیر ورق‌های تقویت بر روی پارامترهای لرزه‌ای دیوار راسته بیشتر از دیوار بلوکی بوده است. همچنین روش تقویت ترکیبی نسبت به روش ضربدری مزیت چشمگیری را در بهبود ضریب شکل‌پذیری و جلوگیری از افت مقاومت زیرسازه از خود نشان داده است.

واژگان کلیدی: دیوار آجری، مدل‌سازی، آجرچینی، بار لرزه‌ای، اجزای محدود.

بررسی عددی اثر نوع آجرچینی بر تقویت دیوارهای آجری بدون کلاف با ورق CFRP

سینا کمالی

دانش‌آموخته کارشناسی ارشد عمران - سازه، دانشگاه بجنورد، بجنورد، ایران

مهدی ادیبی (نویسنده مسئول)

دانشیار، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه بجنورد، بجنورد، ایران، m.adibi@ub.ac.ir

۱ - مقدمه

سرانجام ارزان‌تر بودن قیمت تمام شده این قبیل ساختمان‌ها نسبت به ساختمان‌های با اسکلت فولادی و بتن مسلح می‌باشد. بنابراین در این میان، ساختمان‌های آجری به‌عنوان یکی از رایج‌ترین روش‌های ساخت در کشور توجه بیشتری را می‌طلبد. این ساختمان‌ها به دلیل عدم انسجام کافی و نداشتن سیستم مقاوم باربر جانبی مناسب از مقاومت لرزه‌ای پایینی برخوردار بوده و گزارش‌های زلزله‌های گذشته حاکی از عملکرد ضعیف این ساختمان‌ها، حتی در زلزله‌های با شدت متوسط بوده است.

استفاده از مصالح بنایی یک روش ساخت قدیمی است و سازه‌های مصالح بنایی بخش وسیعی از ساختمان‌های ایران و جهان را تشکیل می‌دهند. این مصالح در معماری گذشته بسیار کاربرد داشته و اکنون نیز با وجود گسترش مصالح جدید همچنان مورد استفاده قرار می‌گیرد. مهم‌ترین عامل مقبولیت ساختمان‌های بنایی در ایران به‌ویژه در شهرستان‌ها در دسترس بودن مصالح، ساده بودن تکنولوژی تولید آجر و بلوک‌های بنایی، آشنایی سازندگان با نحوه ساخت و ساز با مصالح بنایی و

قرار دادند و سپس به مقایسه بین نتایج تجربی و تئوری در این رابطه پرداختند.

در رابطه با تحقیقات انجام شده در زمینه بررسی ورق‌های FRP، در آزمایشی که توسط تریانتافیلو (Triantafillou, 1998) در سال ۱۹۹۸ انجام شد، نوارهای CFRP روی دیوارهای بنایی بدون تقویت اعمال شد و دیوارها در معرض خمش خارج از صفحه، خمش درون و برش درون صفحه توسط نیروی محوری قرار گرفتند. در نهایت مشخص شد که CFRP ظرفیت برشی درون صفحه دیوارها را در بارهای محوری کم بهبود می‌بخشد. دیماز و احسانی (Velazquez-Dimas & Ehsani, 2000) در سال ۲۰۰۰، دیوارهای مصالح بنایی غیر مسلح تقویت شده با ورق‌های FRP را تحت بار خارج از صفحه مورد آزمایش قرار دادند. آنها معادلاتی برای محاسبه تغییر شکل ارائه دادند و کرنش کششی میانگین در FRP برای سه مرحله بارگذاری را گزارش نمودند که عبارت است از: ۰/۰۰۴ برای اولین ترک مشاهده شده، ۰/۰۵۵ برای اولین جداسازی و ۰/۰۱ برای وضعیت نهایی. در مطالعه دیگری شرایو و همکاران (Shirve et al., 2001) در سال ۲۰۰۱ ورق‌های FRP را در یک طرف دیوار بلوک بتنی توخالی و غیر مسلح جهت بررسی ویژگی‌های رفتاری دیوار اعمال کردند. در این پژوهش از انواع مختلف FRP (ورق‌های الیاف شیشه، ورق‌های فیبر کربن و نوارهای فیبر کربن) با جهت عمودی و مورب استفاده شد. نتایج نشان‌دهنده این بود که تقویت FRP می‌تواند مقاومت خمشی و ویژگی‌های جذب انرژی دیوارهای بلوک بتنی را بهبود بخشد.

در پژوهشی که در سال ۲۰۰۳ توسط چوانگ و همکاران (Chuang et al., 2003) انجام گرفت سه دیوار بنایی آجری با ورق‌های FRP تحت نیروی فشاری و بار چرخه‌ای جهت مدل‌سازی بار زلزله مورد آزمایش قرار گرفتند. ورق‌های FRP به دو صورت نوارهای مورب متقاطع و ترکیب نوارهای مورب و عمودی مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج آزمایش نشان داد که نوارهای FRP به‌طور قابل توجهی استحکام، شکل‌پذیری و ظرفیت اتلاف انرژی دیوارهای بنایی کم ارتفاع را افزایش

عوامل مختلفی بر روی رفتار لرزه‌ای دیوارهای آجری تأثیرگذار است، اما پارامترهای ضخامت دیوار و نوع آجرچینی دیوارها از جمله موارد مهمی هستند که اثر آنها در برابر زلزله کمتر مورد بررسی و توجه قرار گرفته است. بنابراین تحلیل آسیب‌پذیری ساختمان‌های مصالح بنایی تحت اثر زلزله، اهمیت بسیار زیادی دارد.

در گذشته مطالعات مختلفی در رابطه با دیوارهای مصالح بنایی و مقاوم‌سازی آنها انجام شده است که در اینجا به تعدادی از آنها اشاره شده است.

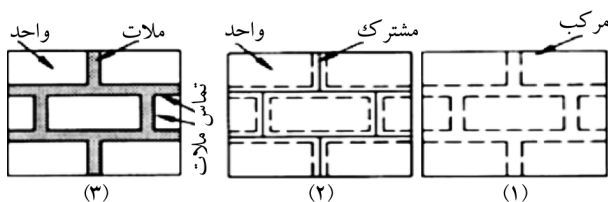
مایورکا و مگورو (Mayorca & Meguro, 2003) در سال ۲۰۰۳، با استفاده از روش ریزمدل‌سازی مدل و همچنین بررسی آزمایشگاهی دریافتند که برای یک دیوار آجری پنج نوع شکست محتمل می‌باشد که عبارتند از جداسازی از محل اتصال آجر به ملات، شکست واحدهای آجر تحت کشش مستقیم، ایجاد ترک‌های قطری کششی، لغزش در طول اتصال و ایجاد ترک‌های قطری کششی در آجرها. لورنکو و همکاران (Lourenço et al., 2005) در سال ۲۰۰۵ یک کار آزمایشگاهی و همچنین عددی بر روی دیوارهای مصالح بنایی انجام دادند. آنها به دنبال بررسی مکانیسم شکست و همچنین مقاومت نهایی دیوارها بودند. در نهایت نحوه رفتار سختی دیوار و همچنین تأثیر بار عمودی در نحوه شکست دیوار را گزارش نمودند. مارکوس و لورنکو (Marques & Lourenço, 2019) در سال ۲۰۱۹ به بررسی اثر محصورشدگی دیوارهای مصالح بنایی در برابر زلزله تحت بارهای درون صفحه‌ای پرداختند و تئوری‌های موجود در این زمینه با مدل‌های جدید پیشنهادی جهت ارائه قوانین جدید در دستورالعمل‌های طراحی بین‌المللی را مورد بررسی و مقایسه قرار دادند. در نهایت فرمولی جهت طراحی دیوارهای محصور شده بر اساس مقاومت فشاری ارائه کردند و در رابطه با مقاومت برشی فرمول ارائه شده در یورو کد ۶ را مورد تأیید قرار دادند.

در سال ۲۰۲۱ سلانو و همکاران (Celano et al., 2021)، فرمول‌های طراحی موجود برای مقاومت درون صفحه دیوارهای بنایی در رابطه با حالت‌های شکست آنها را مورد نقد و بررسی

دیوارهای بنایی آجری سفالی انجام داد که از خارج توسط نوارهای عمودی، افقی، ترکیبی از نوارهای افقی-عمودی و مورب تقویت شده بودند. نتایج نشان داد که الگوی مورب مؤثرترین الگو از نظر افزایش ظرفیت نیرو و جابه‌جایی است. در نهایت، بررسی پژوهش‌های صورت گرفته در این زمینه نشان می‌دهد عوامل مختلفی بر روی رفتار لرزه‌ای دیوارهای آجری تأثیرگذار است، اما پارامترهای ضخامت دیوار و نوع آجرچینی دیوارها از جمله موارد مهمی هستند که اثر آنها در برابر زلزله کمتر مورد بررسی و توجه قرار گرفته است. بنابراین تحلیل آسیب‌پذیری ساختمان‌های مصالح بنایی تحت اثر زلزله، اهمیت بسیار زیادی داشته و در این تحقیق نیز با استفاده از مدل‌سازی رفتار لرزه‌ای این سازه‌ها به بررسی اثر نوع آجرچینی و ضخامت دیوارهای مصالح بنایی در رفتار لرزه‌ای آنها و همچنین اثر این پارامترها در تقویت دیوارهای بنایی پرداخته شده است.

۲- روش پژوهش

۲-۱- انواع روش‌های مدل‌سازی دیوار و مدهای تخریب آن
مدل‌سازی عددی دیوارهای آجری با استفاده از روش اجزای محدود (FEM)^۱ به‌طور کلی به دو دسته ریزمدل‌سازی^۲ و درشت‌مدل‌سازی^۳ تقسیم می‌شود (شکل ۱).



شکل (۱): انواع روش‌های مدل‌سازی دیوار آجری (۱) درشت (۲) ریز ساده شده (۳) ریز دقیق.

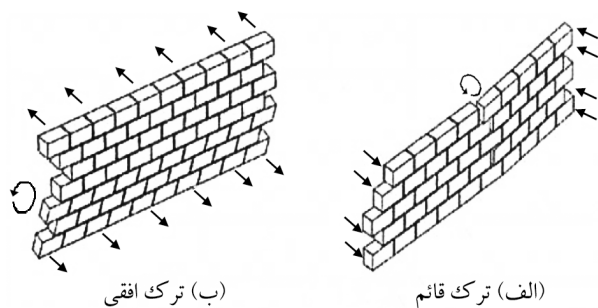
دیوار آجری یک ماده مرکب از سه جزء اصلی می‌باشد؛ آجر، ملات و سطح تماس آجر و ملات. در ریزمدل‌سازی هر کدام از اجزای دیوار آجری به‌طور جداگانه مدل‌سازی می‌شوند. هر چند که مدل‌سازی در این روش از دقت قابل توجهی برخوردار است،

می‌دهند. در سال ۲۰۰۴، تان و پاتوری (Tan & Patoary, 2004) به بررسی تحلیلی و آزمایشگاهی چند نمونه دیوار مقاوم‌سازی شده با ورق‌های FRP پرداختند. در نهایت مدهای شکست دیوار را گزارش کردند. همچنین نتایج آزمایش نشان داد که ورق‌های تقویت منجر به افزایش ظرفیت باربری با افزایش ضخامت FRP شده است.

مارکاری و همکاران (Marcari et al., 2007) در سال ۲۰۰۷، به بررسی آزمایشگاهی رفتار دیوار مقاوم شده با الیاف FRP و دیوار مقاوم‌سازی نشده پرداخته‌اند و پی برده‌اند که ظرفیت برشی دیوار با استفاده از این الیاف افزایش می‌یابد و مود خرابی در دیوار از حالت برشی به حالت برشی-خمشی تغییر پیدا کرده است، همچنین به علت کمتر بودن مدول الاستیسیته GFRP نسبت به CFRP ترک‌های به وجود آمده در نمونه‌های مقاوم‌سازی شده با GFRP عریض‌تر از نمونه‌های مقاوم شده با CFRP است. ثقفی و همکاران در سال ۲۰۱۴ (Saghafi et al., 2014) یک مطالعه تحلیلی بر روی سازه‌های بنایی تقویت‌نشده و تقویت‌شده توسط ورق‌های CFRP تحت تأثیر بارهای عمودی و برش درون‌صفحه با استفاده از ANSYS ارائه کردند. نتایج آزمون نشان داد که منحنی مدل‌سازی عددی از صلیب بیشتری نسبت به منحنی تجربی برخوردار بوده و ظرفیت باربری مدل عددی و نمونه تجربی بسیار به هم نزدیک بودند.

ژو و همکاران (Zhou et al., 2013) در سال ۲۰۱۳ رفتار درون‌صفحه‌ای دیوارهای بنایی بدون تقویت را قبل و بعد از تقویت توسط BFRP بررسی کردند. نتایج حاصل از این مطالعه تجربی نشان داد که استحکام دیوارهای بنایی بدون تقویت با اعمال تقویت BFRP بهبود یافته است. رحمان و اوندا (Rahman & Ueda, 2016) رفتار دیوارهای بنایی با آجر سفالی تقویت شده خارجی را با استفاده از CFRP و پلی‌اتیلن ترفتالات (PET-FRP) به صورت تجربی بررسی کردند. نتایج نشان داد که ظرفیت برشی درون‌صفحه دیوار با استفاده از هر دو نوع FRP به طور قابل توجهی افزایش یافته است. مارتینلی و همکاران (Martinelli et al., 2016) یک مطالعه تجربی را بر روی

پاشنه (شکل ۲) (FEMA 356, 2000). مودهای خرابی خارج صفحه دیوارها شامل (الف) ترک قائم (ب) ترک افقی می‌باشد (شکل ۳) که در اثر تنش کششی منجر به شکست این نوع ترک‌ها اتفاق می‌افتند. این نوع شکست به عواملی همچون نوع اتصالات اجزا با یکدیگر، سختی داخل صفحه، نوع دیافراگم، نسبت طول به ارتفاع و مقدار بار قائم بستگی دارد.



شکل (۳): مودهای خرابی برون‌صفحه‌ای دیوارهای بنایی.

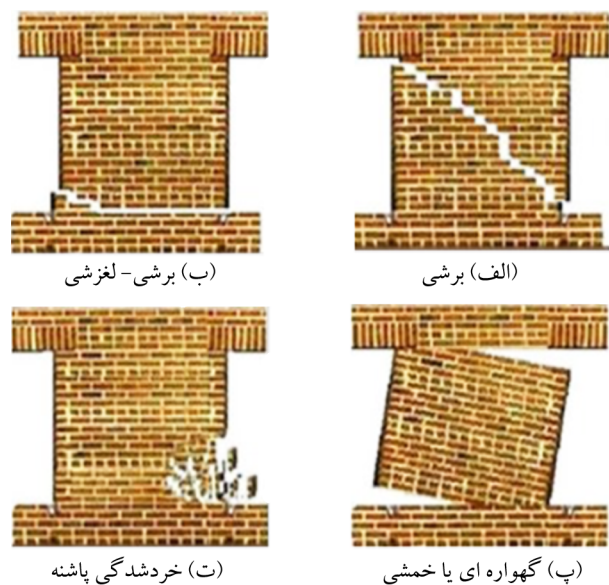
۲-۲- معرفی خصوصیات مدل‌سازی دیوارهای مورد بررسی

اجزای مدل‌سازی در این تحقیق شامل آجرها و تیرهای بتنی می‌باشد. رفتار تیرهای بتنی به صورت الاستیک در نظر گرفته شده است، زیرا تنها خرابی مورد انتظار، خرابی در آجرها بوده است. لذا جهت تعریف رفتار غیرخطی آجرها از مدل Concrete Damage Plasticity استفاده شده است که قابل استفاده برای بتن و سایر مصالح ترد و شکننده مثل آجر می‌باشد. در این مدل فرض بر این است که ترک کششی و خردشدگی فشاری دو وجه اصلی مکانیسم گسیختگی می‌باشد. بدین منظور برای رفتار فشاری بتن از مدل تحلیلی تنش-کرنش تک‌محوری هاگنستاد (Hognestad, 1951) و برای رفتار کششی بتن از مدل تحلیلی تنش-کرنش نایال و رشید (Nayal & Rasheed, 2006) استفاده شده است (شکل ۴).

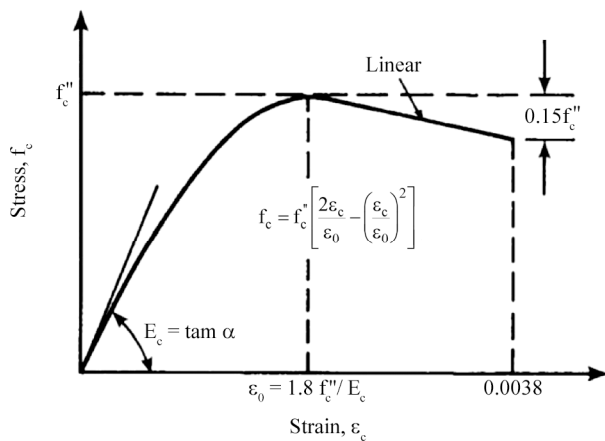
در ادامه مشخصات آجرهای مدل‌سازی شده در نرم‌افزار (جدول ۱)، پارامترهای مدل رفتاری Concrete Damage Plasticity (جدول ۲)، مشخصات مربوط به ورق‌های CFRP (جدول ۳) و همچنین مشخصات تماسی بین آجرها (جدول ۴) نشان داده شده است:

اما از نظر حجم محاسبات و شیوه مدل‌سازی بسیار پیچیده است و برای مدل‌سازی در ابعاد بزرگ به علت سختی و زمان بر بودن انجام تحلیل کاربرد کمتری دارد. این مدل خود به دو نوع ریز مدل‌سازی ساده شده (در آن ضخامت ملات به آجر داده می‌شود و فقط خواص آن بین سطوح اعمال می‌شود) و ریزمدل‌سازی دقیق (در این مدل ملات به صورت مجزا مدل می‌شود) تقسیم‌بندی می‌شود. در درشت‌مدل‌سازی، دیوار آجری به صورت یک ماده همگن و یکدست، با خواص مکانیکی معادل فرض می‌شود. مدل‌سازی در این روش ساده بوده و حجم محاسبات نیز بسیار کمتر از ریزمدل‌سازی می‌باشد. اما دقت این روش چندان زیاد نیست و معمولاً برای مدل‌سازی در ابعاد بزرگ به کار برده می‌شود (Najafgholipour & Maheri, 2009).

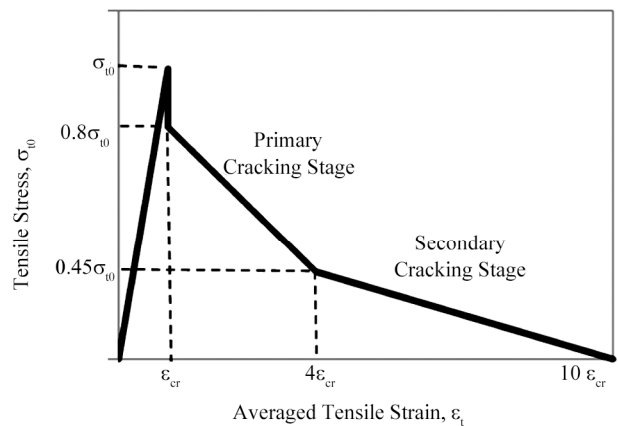
خرابی دیوارهای مصالح بنایی به طور کلی شامل دو نوع خرابی درون‌صفحه‌ای و برون‌صفحه‌ای می‌باشد. خرابی دیوارهای بنایی به عواملی از قبیل میزان سربار، نسبت ارتفاع به طول دیوار، مقاومت‌های برشی و... وابسته است که می‌توانند بر روی مود خرابی دیوار تأثیرگذار باشند. چهار مود اصلی برای شکست درون‌صفحه وجود دارد که عبارتند از: مود برشی، مود لغزشی-لغزشی، مود گهواره‌ای یا خمشی و خردشدگی



شکل (۲): مودهای خرابی درون‌صفحه‌ای دیوارهای بنایی.



(ب) مدل نایبال و رشید (Nayal & Rasheed, 2006)



(الف) مدل هاگنستاد (Hognestad, 1951)

شکل (۴): منحنی‌های تنش-کرنش فشاری و کششی بتن.

جدول (۱): مشخصات آجر استفاده شده در مدل سازی.

چگالی ^۰ (کیلوگرم بر متر مکعب)	مدول الاستیسیته (مگاپاسکال)	ضریب پواسون	مقاومت فشاری (مگاپاسکال)	مقاومت کششی (مگاپاسکال)
۱۸۵۰	۶۰۵۰	۰/۱۵	۱۱	۱/۱

جدول (۲): پارامترهای مدل رفتار پلاستیسیته بتن در نرم افزار.

Dilation Angle	Eccentricity	$\sigma_{b0} / \sigma_{c0}$	K	Viscosity Parameter
۲۰	۰/۱	۱/۱۶	۰/۶۷	۰/۰۰۱

جدول (۳): مشخصات مربوط به ورق‌های تقویت CFRP (Ahmad & Raza, 2020).

چگالی (کیلوگرم بر متر مکعب)	مدول الاستیسیته در جهت طولی، E1 (گیگاپاسکال)	مدول الاستیسیته در جهت عرضی، E2 (گیگاپاسکال)	ضریب پواسون ν_{12}	مدول برشی (مگاپاسکال)		
				G ₁₂	G ₁₃	G ₂₃
CFRP	۱۷۸۰	۲۳۰	۰/۳	۹۱۸۸/۵	۱۲۲۵۹	۵۹۱۱

جدول (۴): مشخصات تماسی بین آجرها جهت مدل سازی رفتار ملات.

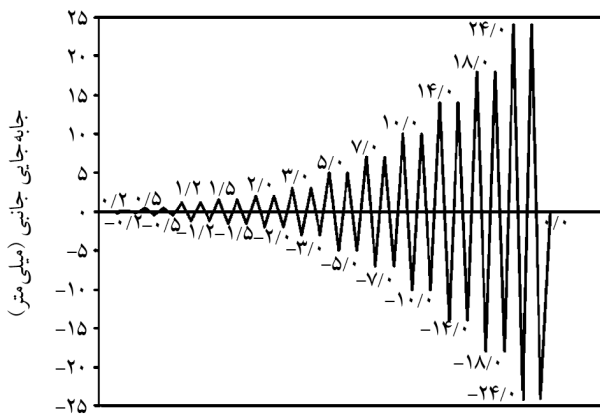
رفتار خرابی				رفتار چسبندگی			رفتار نرمال	ضریب اصطکاک در تعریف رفتار مماسی	
تکامل		شروع		k_{tt}^8	k_{ss}^9	k_{nn}^{10}		سطوح افقی	سطوح عمودی
G_f^{114}	G_f^{15}	f_t^6	f_t^7	(نیوتن بر میلی متر مکعب)	(نیوتن بر میلی متر مکعب)	(نیوتن بر میلی متر مکعب)	تماس صلب ^{۱۱}	۰/۸۵	۱/۱۸
(نیوتن میلی متر بر میلی متر مربع)	(نیوتن میلی متر بر میلی متر مربع)	(نیوتن بر میلی متر مربع)	(نیوتن بر میلی متر مربع)	۵	۵	۱۱			

مدل اعمال شود. یکی از مدل‌هایی که به منظور مطالعه شکست مصالح مختلف استفاده می‌شود مدل چسبندگی مبتنی بر سطح است. المان‌های چسبنده بین دو سطح قرار می‌گیرند و در صورت وجود تغییر مکان نسبی، باعث ایجاد تنش روی سطوح می‌شوند. به‌طور کلی، تأثیر رفتار مصالح چسبنده روی رفتار یک سازه بیشتر از تأثیر رفتار مصالح اطراف می‌باشد. به‌طوری‌که شروع و

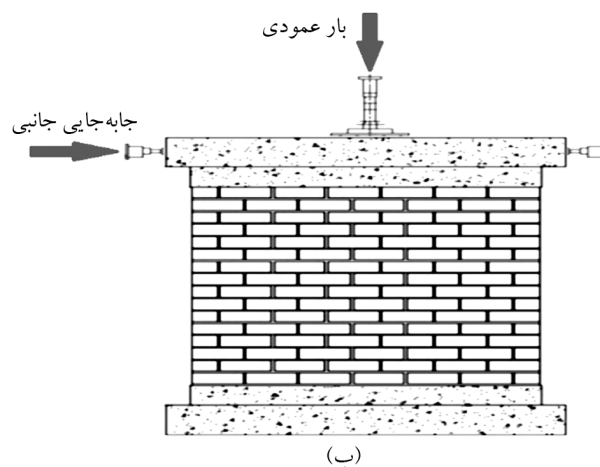
روش تحلیل استفاده شده در نرم‌افزار از نوع دینامیکی صریح (Dynamic Explicit)^{۱۲} می‌باشد. حل صریح بر اساس ماتریس جرم کار می‌کند و مسئله را گره به گره حل می‌کند در این روش واگرایی در حل مسئله به‌ندرت اتفاق می‌افتد و زمان حل سریع‌تر می‌باشد. ملات دارای خاصیت چسبندگی و اصطکاک است که این خواص باید برای سطوح شبه‌سازی شود تا تأثیر ملات در

قبل از شروع کاهش سختی چسبندگی، فقط مدل رفتاری چسبنده فعال بوده و مدل اصطکاک غیرفعال است. هنگامی که کاهش سختی چسبندگی شروع می‌شود، مدل اصطکاک فعال شده و سهمی از تنش برشی را بر عهده می‌گیرد (Sephehrinia et al., 2016).

نحوه بارگذاری در مدل‌سازی به این صورت بود که یک بار قائم روی دیوار به‌عنوان سربار قرار گرفت (شکل ۵-ب) که مقدار آن برابر ۹۸ کیلو نیوتن بود و پس از آن با ثابت ماندن بار قائم جابه‌جایی جانبی (شکل ۵-الف) به دو طرف تیر بالاسری اعمال شد. برای مش‌بندی اجزا از المان C3D8R استفاده شد. این المان دارای هشت گره می‌باشد که هر گره آن شامل سه درجه آزادی انتقالی است. برای مدل‌های ساخته‌شده از سازه مش ۴ سانتی‌متری استفاده شد.



(الف)



(ب)

شکل (۵): (الف) نمودار جابه‌جایی جانبی اعمال شده به دیوار و (ب) تصویر شماتیک نحوه بارگذاری دیوارهای مورد بررسی.

گسترش خرابی در مصالح چسبنده کنترل‌کننده رفتار کلی مصالح کامپوزیت از جمله مصالح بنایی است. علاوه بر این، امکان تعریف رفتار تنش-جداشدگی برای سطح نیز وجود دارد. این رفتار قابلیت شبیه به المان‌های چسبنده با مدل رفتاری تنش-جداشدگی ارائه می‌دهد. مدل رفتاری تنش-جداشدگی موجود در نرم‌افزار آباکوس، رفتار مصالح را قبل از شروع گسیختگی به صورت الاستیک خطی در نظر می‌گیرد. سپس مدل به گسیختگی رسیده و تا خرابی کامل ادامه پیدا می‌کند. رفتار الاستیک به صورت یک ماتریس الاستیک خطی تعریف می‌شود که تنش‌های نرمال و برشی را به جداشدگی نرمال و برشی در طول رابط، ربط می‌دهد. این رابطه به صورت زیر می‌باشد:

$$t = \begin{Bmatrix} t_n \\ t_s \\ t_t \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{nn} & k_{ns} & k_{nt} \\ k_{ns} & k_{ss} & k_{st} \\ k_{nt} & k_{st} & k_{tt} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_n \\ \delta_s \\ \delta_t \end{Bmatrix} = K\delta \quad (1)$$

در این رابطه δ_s ، δ_n و δ_t تغییر مکان‌های نسبی دو سطح به ترتیب در جهت عمود و دو جهت موازی هستند. t_s ، t_n و t_t نیز به ترتیب تنش نرمال و تنش‌های برشی به وجود آمده روی سطح بر اثر تغییر مکان نسبی هستند. در رابطه بالا منظور از ماتریس k ، ماتریس سختی المان رابط است. مدل‌سازی خرابی امکان شبیه‌سازی نزول و شکست احتمالی پیوستگی بین دو سطح چسبنده را فراهم می‌کند. مکانیسم خرابی شامل دو جزء، معیار شروع خرابی و تکامل خرابی است.

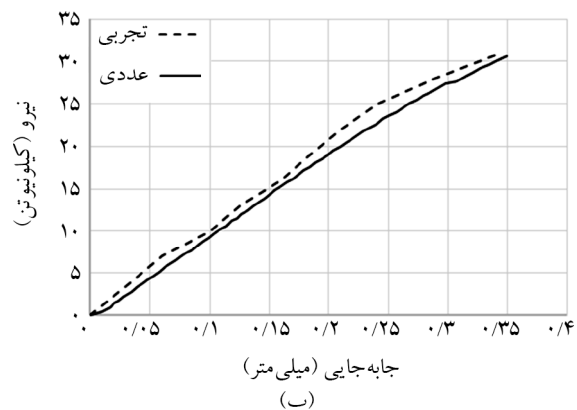
موضوع مهم دیگر در رفتار تنش-جداشدگی، نحوه رفتار سطوح پس از از بین رفتن چسبندگی آنهاست. این رفتار به صورت رفتار فشاری و اصطکاک مدل‌سازی می‌گردد. هنگامی که سطوح در تماس با یکدیگر نیستند، فشاری بین آنها منتقل نمی‌شود، ولی هنگامی که دو سطح با یکدیگر در تماس هستند، نیروی فشاری می‌تواند بین آنها منتقل گردد. رفتار سطوح به صورت تماس صلب در نظر گرفته می‌شود. یعنی هنگامی که چسبندگی سطوح یا به اصطلاح ملات بین واحدهای بنایی از بین رفت دو سطح هیچ نفوذی در یکدیگر نداشته و رفتاری سخت خواهند داشت. همچنین در راستای برشی فرض می‌شود که تا

۳-۲- اعتبارسنجی مدل سازی

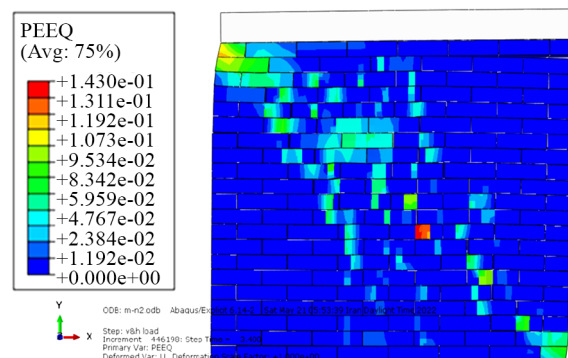
برای صحت‌سنجی مدل‌سازی از سه نمونه آزمایشگاهی شامل دو نمونه دیوار بدون تقویت و یک نمونه دیوار تقویت شده با ورق CFRP که توسط نجفقلی‌پور و ماهری (Najafgholipour & Maheri, 2009) و سانتاماریا و همکاران (Santa Maria et al., 2006) مورد آزمایش قرار گرفته بودند استفاده شد که مود خرابی نمونه‌های آزمایش شده از نوع ترک قطری بود (شکل ۶-الف). نمونه اول مربوط به کار آزمایشگاهی



(الف)



(ب)



(پ)

شکل (۶): (الف) دیوار آزمایش شده توسط نجفقلی‌پور و ماهری و نحوه خرابی آن (Najafgholipour & Maheri, 2009)، (ب) منحنی نیرو-جاب‌جایی مدل نرم‌افزاری و کار آزمایشگاهی جهت صحت‌سنجی مدل نجفقلی‌پور و ماهری (Najafgholipour & Maheri, 2009) و (پ) مود خرابی مدل نرم‌افزاری جهت صحت‌سنجی.

انجام شده توسط نجفقلی‌پور و ماهری بود که این نمونه دارای طول ۱۶۰ سانتی‌متر، ارتفاع ۱۴۰ سانتی‌متر و ضخامت ۱۰ سانتی‌متر است که توسط دو جک هیدرولیکی تحت بار قائم و افقی قرار گرفته است، به طوری که این دو جک در هر گام به صورت بار افزون مقدار بار ۳ کیلونیوتن را به صورت هم‌زمان تا لحظه وقوع خرابی و شکست کامل نمونه به آن اعمال می‌کنند و در نهایت منحنی نیرو-جاب‌جایی نمونه استخراج شده است (شکل ۶-ب).

نمونه آزمایشگاهی دوم مربوط به کار انجام شده توسط سانتاماریا است که دیوارهای تست شده در این آزمایش دارای ابعاد ۱۴×۲۰۰×۱۹۷۵ میلی‌متر می‌باشند (شکل ۷) که تحت یک نیروی سربار توسط یک جک هیدرولیکی بر روی تیر بالاسری دیوار که برای انتقال نیرو به دیوار ساخته شده است وارد می‌شود. در ادامه یک جاب‌جایی جانبی به دو طرف دیوار اعمال می‌شود که الگوی جاب‌جایی اعمالی در شکل (۵) نشان داده شده است. در نهایت نمودارهای نیرو-جاب‌جایی نمونه استخراج گردید (شکل ۸). این آزمایش بار دیگر به صورت دیوار تقویت شده با نواریهای CFRP به صورت ضربدری انجام گرفت و منحنی‌های هیستریزس نیرو جاب‌جایی آن استخراج شده است.

با توجه به مقایسه نمودارهای مربوط به کار آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی، مقدار اختلاف حداکثر مقاومت میانگین در حالت بدون تقویت ۱۱ درصد و در حالت تقویت شده ۶ درصد می‌باشد. همچنین مود خرابی در نمونه آزمایشگاهی به صورت ترک قطری می‌باشد که در مدل نرم‌افزاری به درستی اتفاق افتاده است. به علت اینکه در این پژوهش از روش ریز مدل‌سازی ساده شده استفاده شده است، اثر ملات به صورت جداگانه مدل نشده است. همچنین مشخصات ملات مدل‌های آزمایشگاهی به طور کامل و دقیق در اختیار نبوده است و این میزان خطا بین مقدار مقاومت مدل‌های عددی و آزمایشگاهی مشاهده گردیده است.

۴-۲- مدل‌سازی دیوارهای مورد بررسی

برای مدل‌سازی دیوارهای مورد بررسی (جدول ۵) در این پژوهش از ریز مدل‌سازی به روش ساده شده استفاده شد.

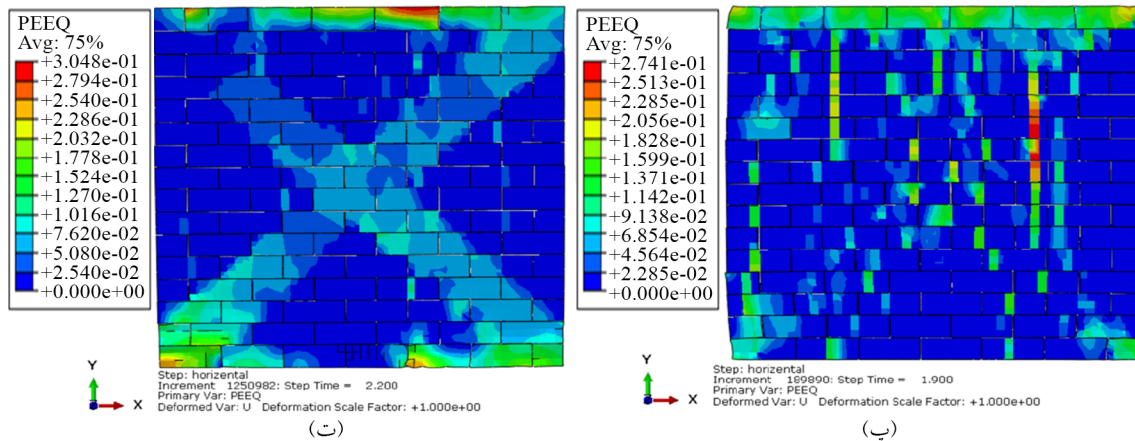
جدول (۵): مشخصات دیوارهای مورد بررسی.

نام مدل	نوع آجرچینی	روش تقویت
URMW-1	راسته	-
URMW-2	بلوکی	-
RMW-1	راسته	ضربدری
RMW-2	بلوکی	ضربدری
RMW-1-2	راسته	ترکیبی



(ب)

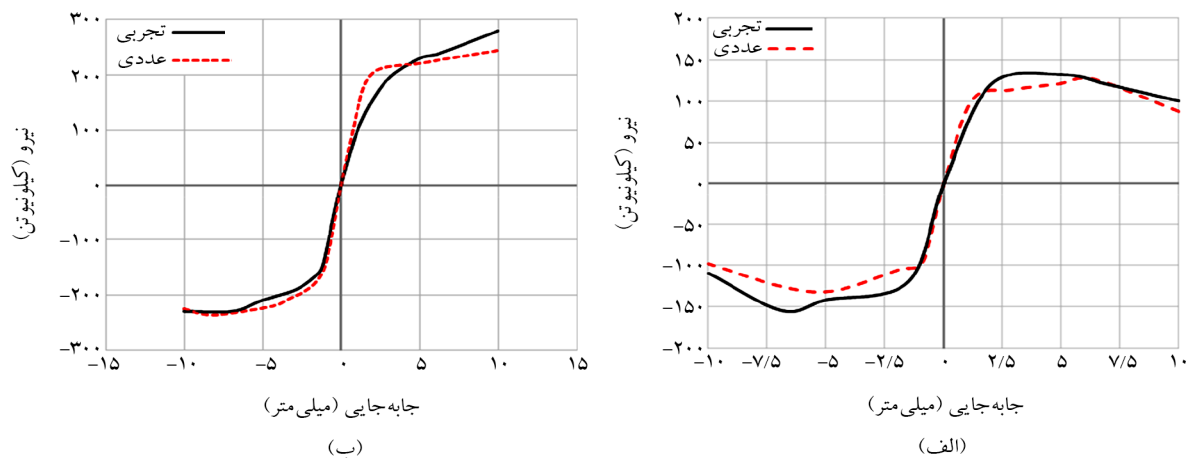
(الف)



(ت)

(پ)

شکل (۷): (الف) دیوار آزمایش شده توسط سانتاماریا و همکاران در حالت بدون تقویت، (ب) دیوار آزمایش شده توسط سانتاماریا و همکاران در حالت تقویت شده، (پ) مود خرابی مدل نرم‌افزاری در حالت بدون تقویت و (ت) مود خرابی مدل نرم‌افزاری در حالت تقویت شده.



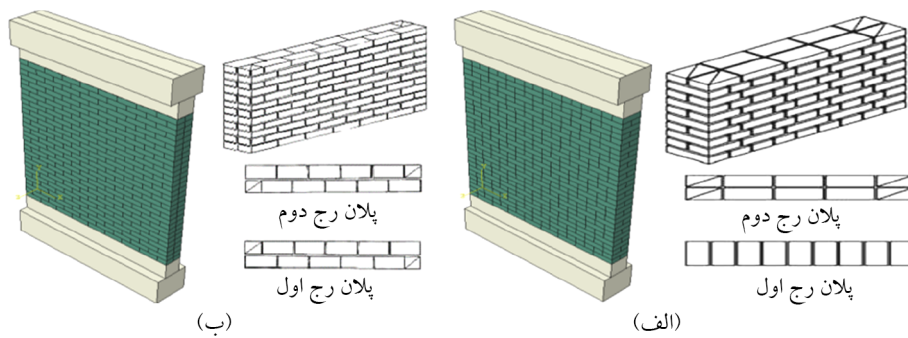
جابه‌جایی (میلی متر)

(ب)

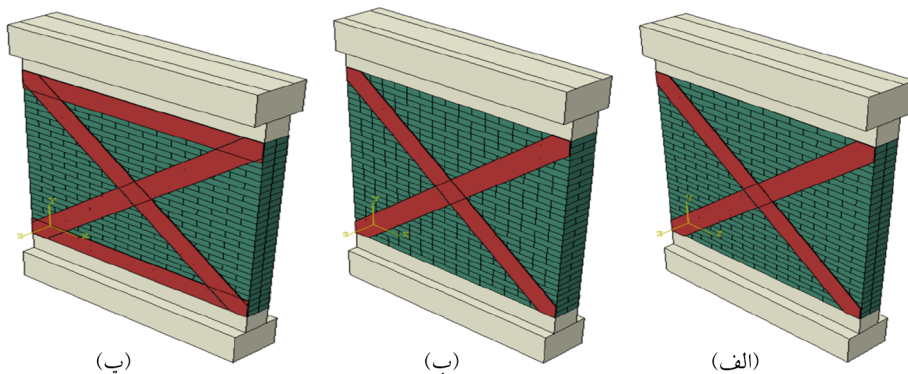
جابه‌جایی (میلی متر)

(الف)

شکل (۸): (الف) منحنی پوش نیرو- جابه‌جایی مربوط به مدل نرم‌افزاری و کار آزمایشگاهی نمونه بدون تقویت جهت اعتبارسنجی مدل سانتاماریا و همکاران (Santa Maria et al., 2006) و (ب) منحنی پوش نیرو- جابه‌جایی مربوط به مدل نرم‌افزاری و کار آزمایشگاهی نمونه تقویت شده جهت اعتبارسنجی مدل سانتاماریا و همکاران (Santa Maria et al., 2006).



شکل (۹): نحوه آجرچینی دیوارهای مورد بررسی (الف) آجرچینی راسته (URMW-1)، (ب) آجرچینی بلوکی (URMW-2).



شکل (۱۰): نمایش نحوه تقویت دیوارهای مدل سازی شده (الف) دیوار ۲۰ سانتی متری با آجرچینی راسته (RMW-1)، (ب) دیوار ۲۰ سانتی متری با آجرچینی بلوکی (RMW-2) و (پ) دیوار ۲۰ سانتی متری با آجرچینی راسته با تقویت ترکیبی (RMW-1-2).

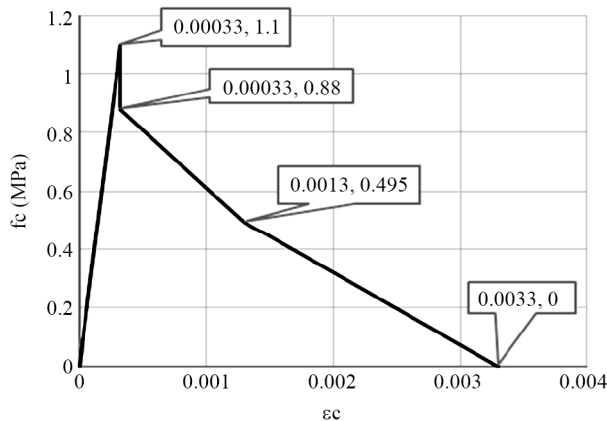
مدل غیرخطی تعریف شده CDP در نرم افزار مشاهده شد که وقوع خرابی بر اثر عدم تحمل کشش در آجرها می باشد یعنی خرابی ایجاد شده به علت ایجاد ترک های کششی است و دیوار در برابر فشار دچار خرابی و ترک نمی شود. حد تسلیم در فشار با توجه به مدل CDP برابر با تنش $9/35$ مگاپاسکال و حد تسلیم در کشش برابر با کرنش معادل $0/0033$ می باشد (شکل ۱۱). همچنین شکل خرابی ها بیانگر وقوع ترک قطری روی دیوار می باشد که این خرابی ها از قسمت های گوشه ای دیوار شروع می شوند (شکل های ۱۲ و ۱۳) و به مرور به نواحی میانی دیوار ادامه پیدا می کنند. معیارهای خرابی برای ورق های CFRP شامل مقاومت فشاری برابر 3120 مگاپاسکال و میزان مقاومت کششی برابر 3900 مگاپاسکال است که بر اساس آن مقدار کرنش الاستیک برابر $0/017$ می باشد که با بررسی های صورت گرفته حاصل از نتایج تحلیل مدل های مورد بررسی ورق های تقویت دچار پارگی نشدند (Ahmad & Raza, 2020).

دیوارهای مدل سازی شده شامل دو نوع دیوار ۲۰ سانتی متری با آجرچینی راسته (URMW-1) و بلوکی (URMW-2) بودند (شکل ۹) که توسط نوارهای CFRP به روش های ضربدری تقویت شدند. همچنین دیوار ۲۰ سانتی متری با آجرچینی راسته بار دیگر به روش ترکیب نوارهای افقی و ضربدری نیز تقویت شد (شکل ۱۰). همچنین دیوارهای مورد بررسی دارای طول و عرض برابر به اندازه ۲ متر بودند. ابعاد آجر استفاده شده برابر با $22 \times 10 \times 5/5$ سانتی متر و ابعاد مقطع دو تیر بتنی در بالا برابر 400×330 و 200×200 میلی متر و ابعاد مقطع دو تیر پایینی برابر 400×300 و 200×200 میلی متر بودند. ورق های تقویت CFRP دارای ضخامت $0/13$ میلی متر و عرض آنها ۲۰ سانتی متر می باشند.

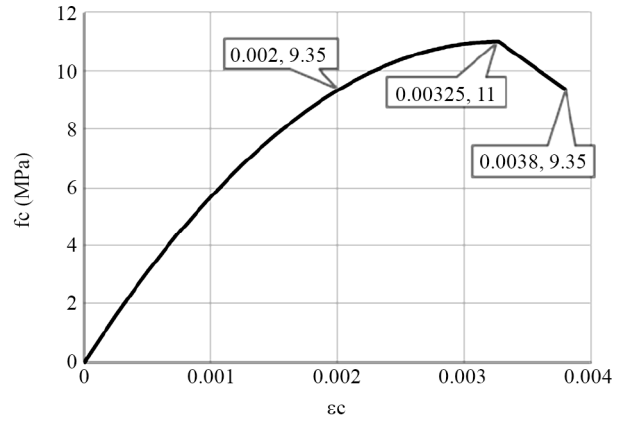
۳- بحث و بررسی نتایج مدل سازی

۳-۱- بررسی نوع خرابی دیوارهای مورد بررسی

با بررسی معیار گسیختگی آجرها در کشش و فشار بر اساس

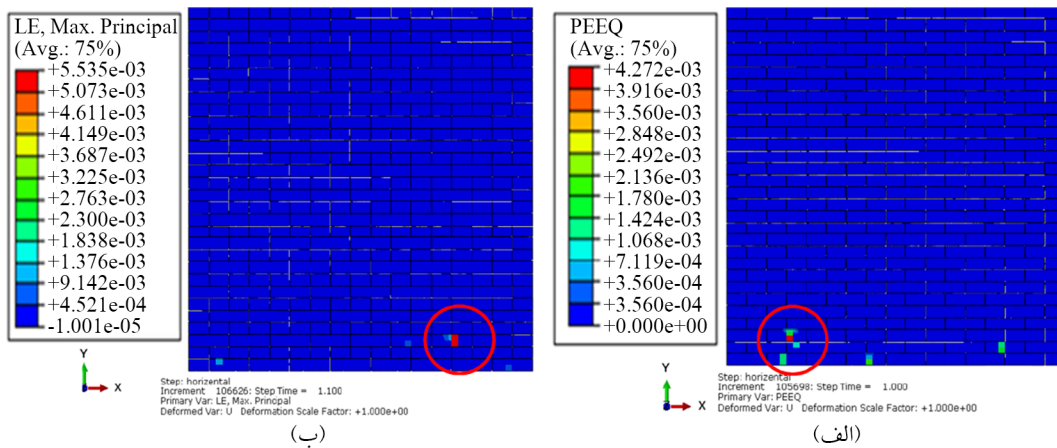


(ب) مدل نایلار رشید

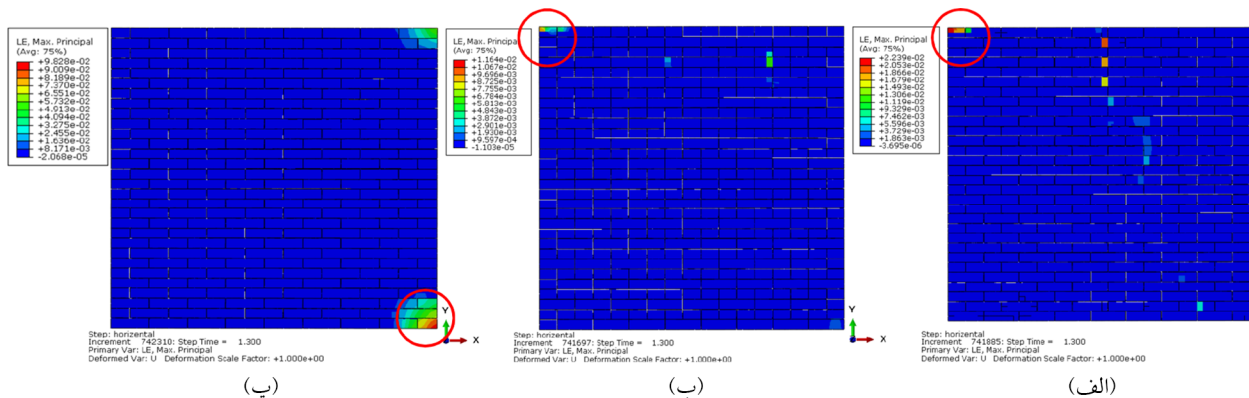


(الف) مدل هاگنستاد

شکل (۱۱): منحنی‌های تنش-کرنش فشاری و کششی جهت تعریف معیارهای خرابی.



شکل (۱۲): نمایش اولین ترک کششی رخ داده در آجرها در مدل‌های بدون تقویت مورد بررسی (الف) مدل URMW-1 در دررفت ۰/۱ درصد و (ب) مدل URMW-2 در دررفت ۰/۱۵ درصد.



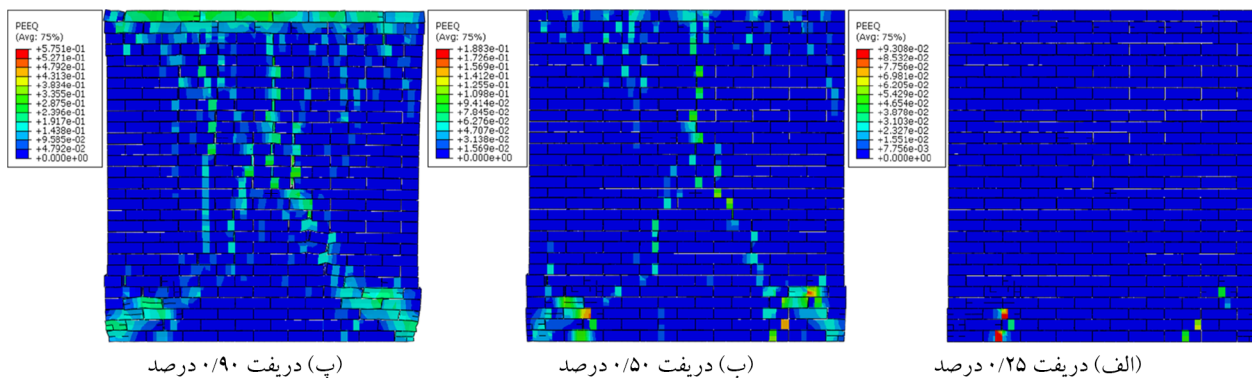
شکل (۱۳): نمایش اولین ترک کششی رخ داده در آجرها در مدل‌های تقویت شده مورد بررسی (الف) مدل RMW-1 در دررفت ۰/۲۵ درصد، (ب) مدل RMW-2 در دررفت ۰/۲۵ درصد و (پ) مدل RMW-1-2 در دررفت ۰/۲۵ درصد.

درصد مشاهده شد که وقوع خرابی بر اساس معیار خرابی حد تسلیم در کشش در مدل‌های بدون تقویت از قسمت‌های پایین و گوشه‌ای دیوار شروع می‌شوند و در ادامه به قسمت‌های میانی نفوذ

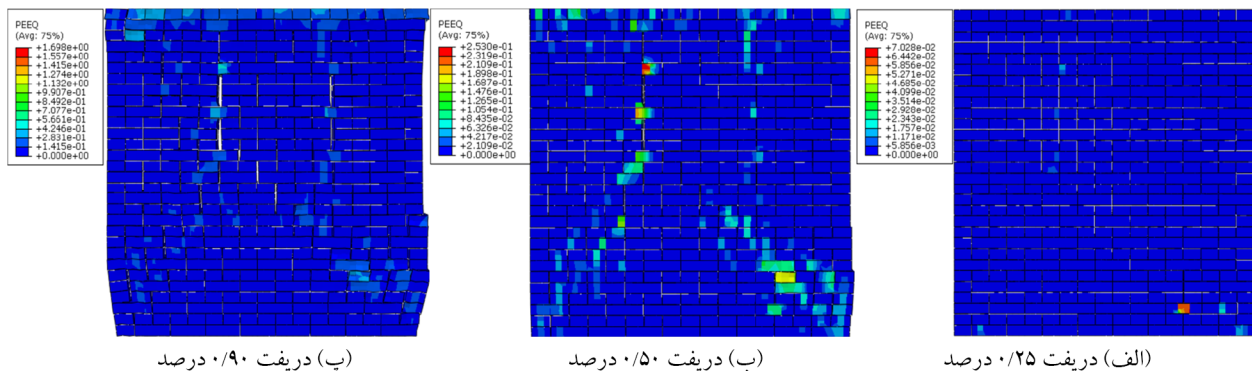
با توجه به وضعیت خرابی‌های ناشی از کشش در دیوارها، همه دیوارها در دررفت یکسان دچار اولین ترک خوردگی در آجر شده‌اند. با بررسی وضعیت خرابی در دررفت‌های ۰/۲۵، ۰/۵ و ۰/۹

می‌کنند و در نهایت خرابی به صورت ترک قطری روی دیوار اتفاق افتاده است. اما در مدل‌های تقویت شده به روش ضربردی این خرابی‌ها از قسمت‌های میانی طول دیوار که ورق‌های CFRP وجود ندارد شروع شدند و در ادامه به قسمت‌های دیگر دیوار و زیر محل ورق‌های CFRP نفوذ کردند. در واقع این حالت تقویت باعث شده است که ضعف دو مدل قبل در محل وقوع ترک پوشش داده شود. در حالت تقویت ترکیبی دیوار، وقوع ترک‌ها تا حدودی شبیه به حالت بدون تقویت بوده است یعنی از قسمت‌های

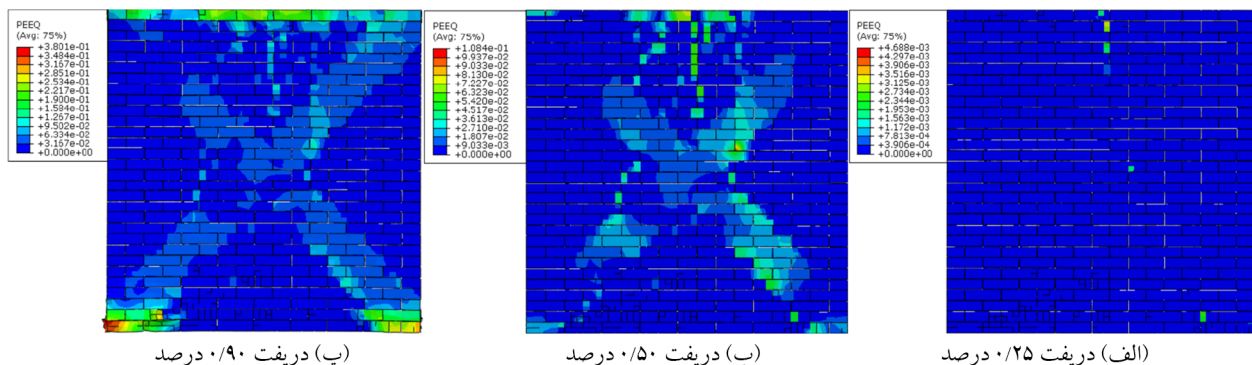
گوشه‌ای دیوار شروع شده اما تفاوت آن با حالت بدون تقویت در این است که مقدار ترک‌ها در یک دررفت یکسان نسبت به حالت بدون تقویت کاهش داشته است و رشد ترک‌ها سرعت کمتری نسبت به حالت تقویت ضربردی داشته است. همچنین در بررسی وضعیت خرابی ورق‌های تقویت هیچ‌گونه خرابی در ورق‌ها مشاهده نشد و تا انتهای بارگذاری ورق‌ها سالم و بدون پارگی ماندند (شکل‌های ۱۴ تا ۱۹ وضعیت کرنش در دیوارهای مورد بررسی و ورق‌های تقویت را نشان می‌دهد).



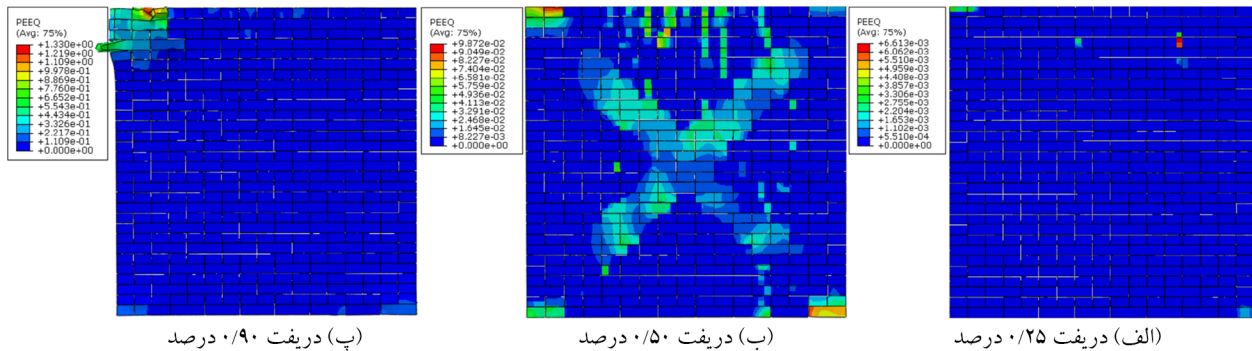
شکل (۱۴): نمایش وضعیت کرنش آجرها در دررفت‌های مختلف در مدل URMW-1.



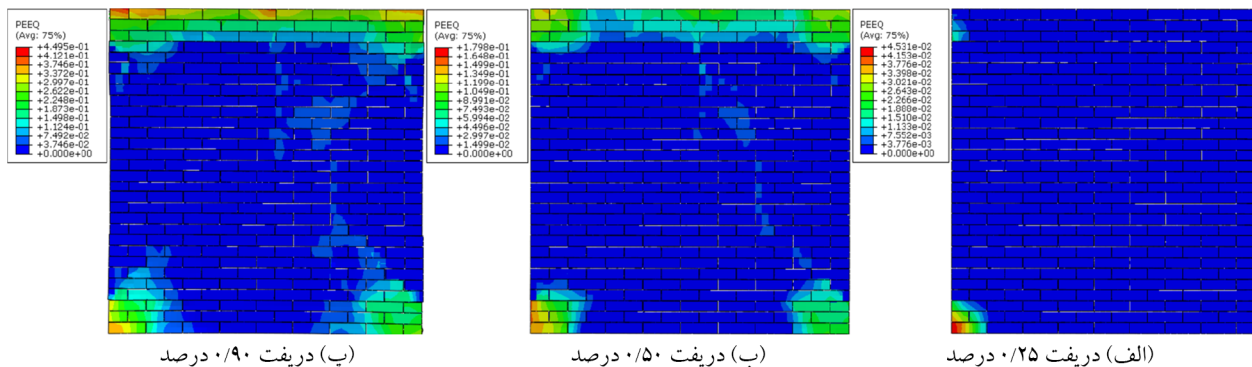
شکل (۱۵): نمایش وضعیت کرنش آجرها در دررفت‌های مختلف در مدل URMW-2.



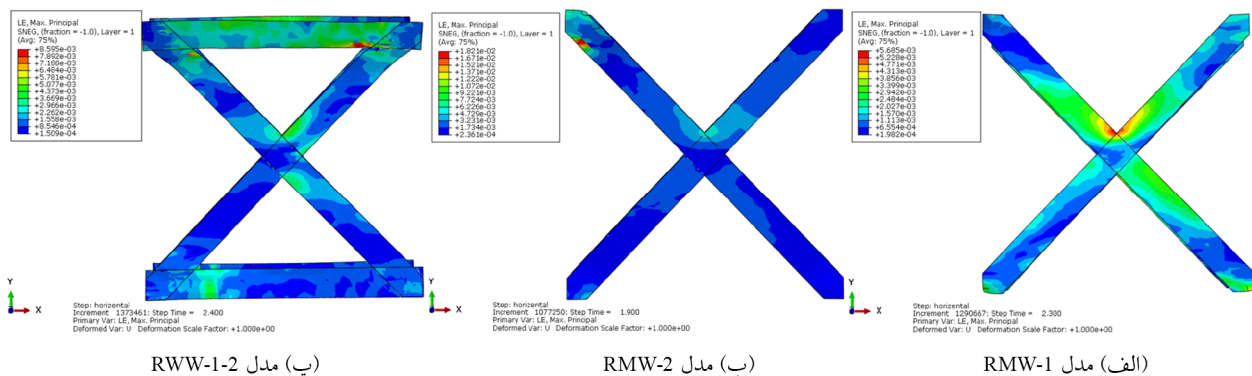
شکل (۱۶): نمایش وضعیت کرنش آجرها در دررفت‌های مختلف در مدل RMW-1.



شکل (۱۷): نمایش وضعیت کرنش آجرها در دریفتهای مختلف در مدل RMW-2.



شکل (۱۸): نمایش وضعیت کرنش آجرها در دریفتهای مختلف در مدل RMW-1-2.



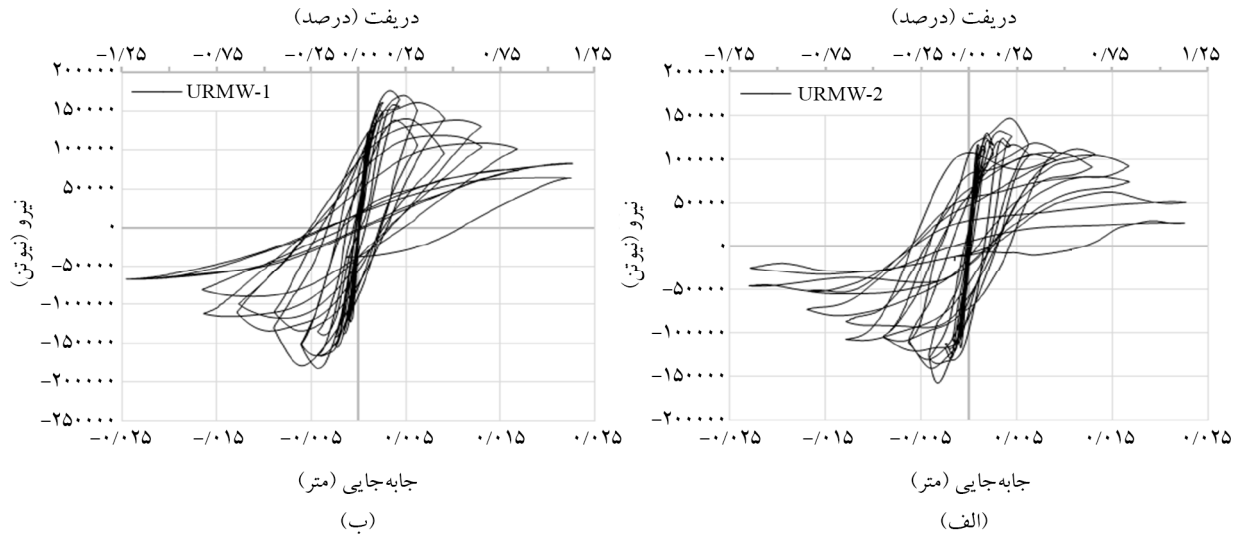
شکل (۱۹): نمایش وضعیت ورقهای تقویت در ماکزیمم کرنش در مدل‌های مورد بررسی.

لاغر شدگی^{۱۳} مشهود است. همچنین از مقایسه این منحنی‌ها با یکدیگر می‌توان تفاوت رفتاری نمونه‌های مورد بررسی را مورد ارزیابی قرار داد (شکل ۲۱).

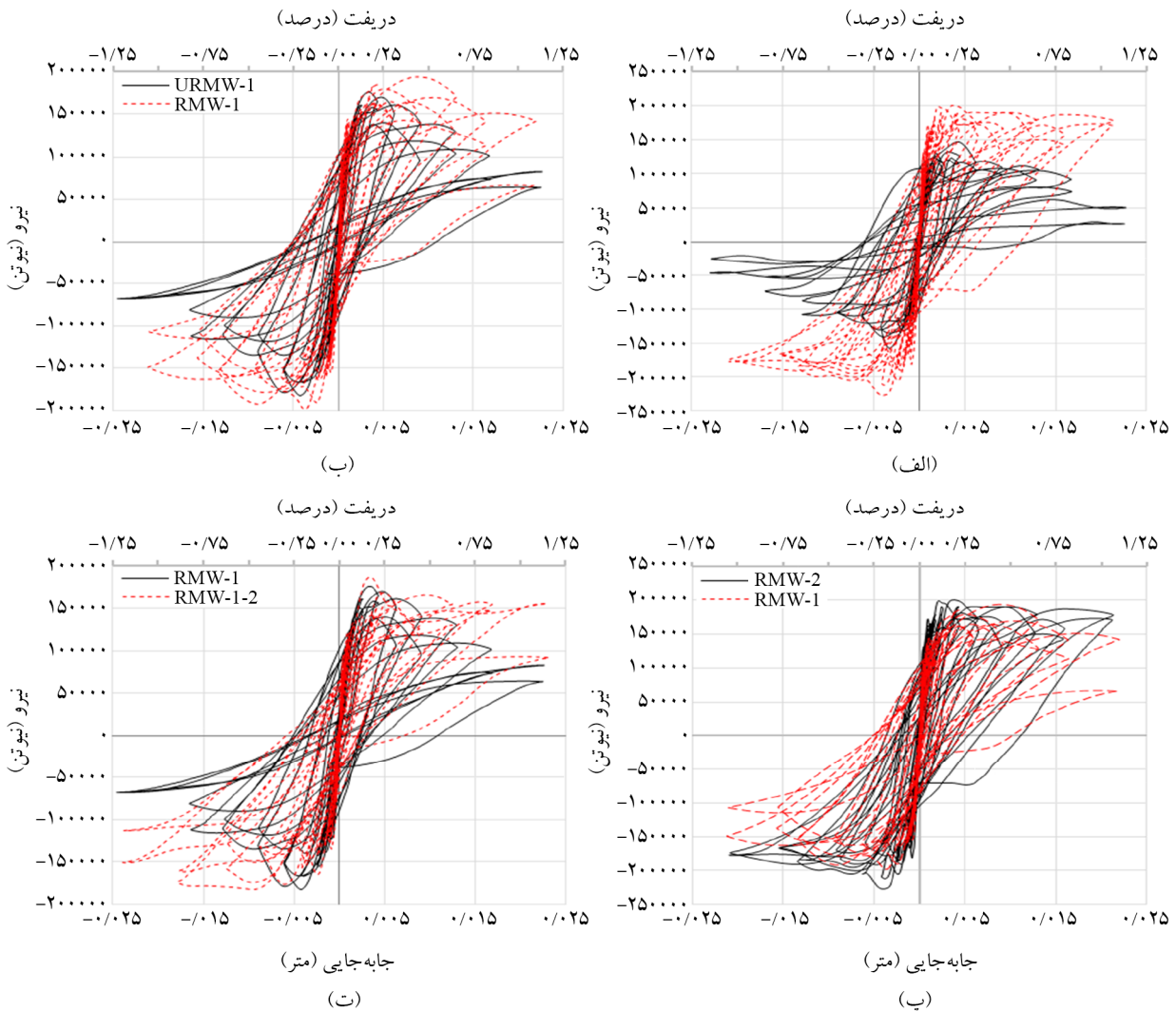
۳-۳- منحنی‌های پوش

با توجه به منحنی‌های پوش هیستریزس دیوارهای بدون تقویت مشاهده شد که دیوار URMW-1 نسبت به دیوار URMW-2 مقاومت بیشتری از خود نشان می‌دهد. در بررسی نمودارها واضح

۲-۳- منحنی‌های هیستریزس نمونه‌های دیوار مورد بررسی یکی از نتایج مهم حاصل از تحلیل مدل‌ها استخراج منحنی‌های هیستریزس مربوط به نیرو- تغییر مکان می‌باشد (شکل ۲۰). این منحنی‌ها بیانگر پاسخ سازه تحت جابه‌جایی رفت و برگشتی می‌باشد که با کمک آن می‌توان به متغیرها و پارامترهای مختلف لرزه‌ای برای قیاس و استدلال نتایج دست یافت و رفتار سازه را تحلیل کرد. با توجه به منحنی‌های هیستریزس مربوط به نمونه‌های مورد بررسی خصوصیات از جمله زوال سختی، زوال مقاومت و



شکل (۲۰): منحنی‌های هیستریزس نیرو-جاب‌جایی دیوارهای بدون تقویت مورد بررسی.



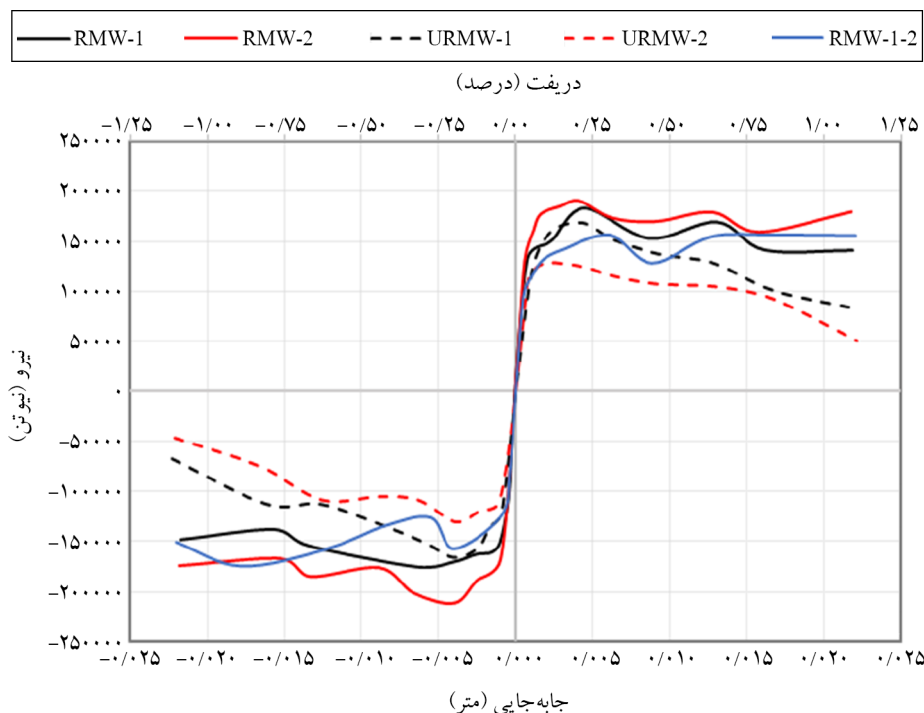
شکل (۲۱): مقایسه منحنی‌های هیستریزس دیوارهای بدون تقویت و تقویت شده با یکدیگر. (الف) مقایسه منحنی هیستریزس دیوارهای با آجرچینی راسته در حالت بدون تقویت و تقویت شده با روش ضربدری، (ب) مقایسه منحنی هیستریزس دیوارهای با آجرچینی بلوکی در حالت بدون تقویت و تقویت شده با روش ضربدری. (پ) مقایسه منحنی هیستریزس دیوارهای با آجرچینی راسته در حالت بدون تقویت و تقویت شده با روش ترکیبی و (ت) مقایسه منحنی هیستریزس دیوارهای با آجرچینی به روش راسته و بلوکی و تقویت ضربدری.

کاربرد دارد و برای تحلیل عددی رفتار یک سازه در برابر بارهای لرزه‌ای، مدل دو خطی سازه مورد نیاز می‌باشد. به این منظور برای دو خطی سازی منحنی پوش رفتار هیستریزس سازه از مدل ارائه شده توسط پااولی و پریستلی در سال ۱۹۹۲ (Paulay & Priestley, 1992) استفاده شده است. این مدل بر اساس یک شاخه الاستیک و یک شاخه بعد از الاستیک طراحی شده است. شاخه بعد از الاستیک به گونه‌ای ترسیم می‌شود که بالانس انرژی در دو طرف منحنی پوش از نقطه جاری شدن نمونه تا محلی که بار جانبی به اندازه ۲۰ درصد افت نموده است، برقرار گردد (شکل ۲۳). در ادامه منحنی‌های دو خطی شده مربوط به نمونه‌ها آورده شده است (شکل‌های ۲۴ و ۲۵). بر اساس منحنی‌های هیستریزس و منحنی‌های ایده آل شده مربوط به منحنی‌های نیرو-تغییر مکان مربوط به سازه‌های مدل سازی شده به روش پریستلی و پااولی و همچنین منحنی‌های پوش رفتار هیستریزس آنها می‌توان مشخصات رفتار لرزه‌ای نمونه‌ها شامل سختی مؤثر، مقاومت حداکثر و شکل پذیری که معیارهای مشخص کننده رفتار لرزه‌ای سازه هستند را محاسبه کرد (جدول ۶). همچنین با مقایسه این پارامترها می‌توان تفاوت رفتاری دیوارهای مورد بررسی را شناسایی کرد (جدول‌های ۷ تا ۹).

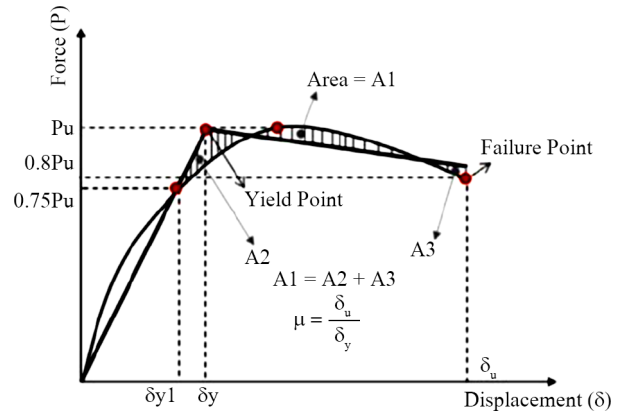
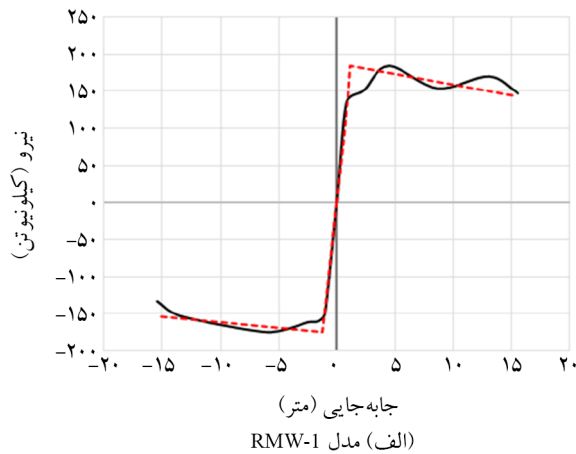
است تا قبل از وقوع اولین ترک (دریافت ۰/۱۵ درصد) مقاومت دیوارها با شیب تند در حال افزایش است و پس از وقوع اولین ترک‌های کششی در آجرها نمودار شروع به افت می‌کند که این ترک‌ها عموماً در جابه‌جایی حدود ۳ میلی‌متر (دریافت ۰/۱۵ درصد) اتفاق افتاده‌اند. همچنین دیوار URMW-1 افت مقاومت کمتری داشته است. در حالت تقویت شده دیوار RMW-2 مقاومت بیشتری از دیوار RMW-1 داشته است همچنین میزان افت مقاومت در این حالت در دیوار RMW-2 کمتر است. نکته قابل توجه دیگر وقوع اولین ترک در این نوع دیوارهاست که مقدار آن از ۰/۱۵ به ۰/۲۵ درصد نسبت به حالت بدون تقویت افزایش یافته است همچنین واضح است که در حالت تقویت شده میزان افت مقاومت کاهش قابل توجهی داشته است (شکل ۲۲).

۳-۴- محاسبه پارامترهای لرزه‌ای رفتار دیوارهای مورد بررسی

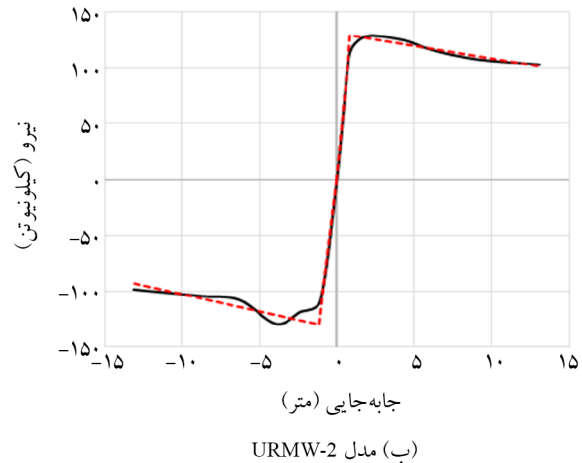
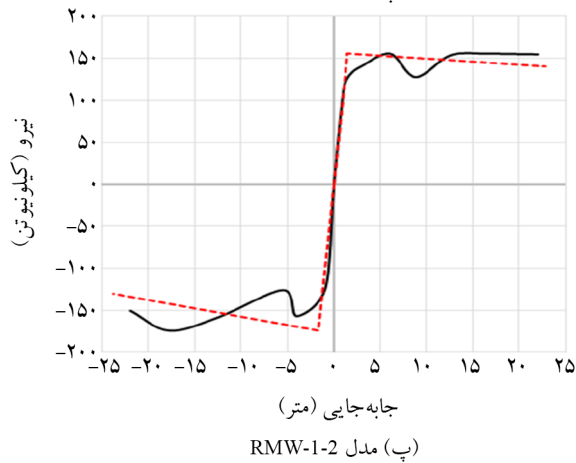
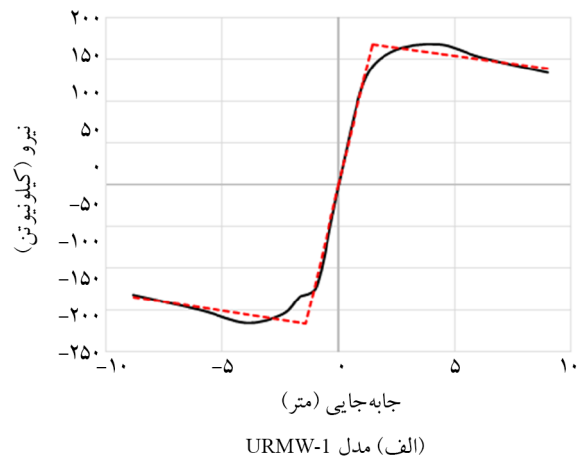
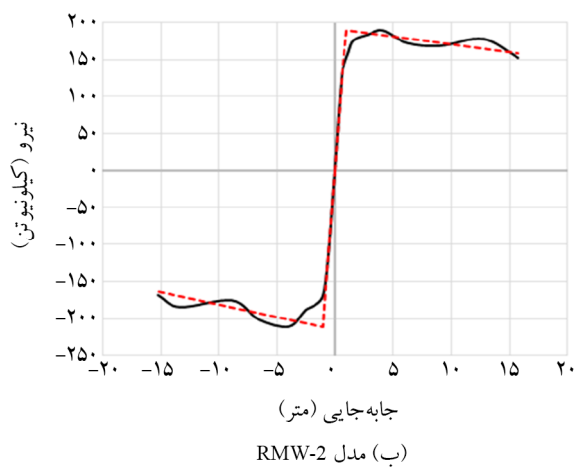
پس از به دست آوردن پوش منحنی‌های هیستریزس نمونه‌ها، بهتر است رفتار آنها در مقابل بار جانبی وارد شده را به صورت دوخطی در آورد. منحنی دوخطی در حقیقت همان منحنی پوش هیستریزس است که در کارهای تحلیلی مدل سازی رفتار سازه



شکل (۲۲): مقایسه منحنی‌های پوش دیوارهای تقویت شده مورد بررسی.



شکل (۲۳): نحوه ایده‌آل‌سازی منحنی پوش به روش پرستلی و باولی.



شکل (۲۵): منحنی ایده‌آل‌سازی شده نیرو-تغییر مکان مدل‌های مورد بررسی.

شکل (۲۴): منحنی ایده‌آل‌سازی شده نیرو-تغییر مکان مدل‌های مورد بررسی.

بارگذاری تجربه می‌کند.
- ضریب شکل‌پذیری: توانایی یک سازه در تغییر شکل بعد از حد الاستیک بدون کاهش شدید مقاومت یا کاهش سختی تعریف می‌شود که از رابطه (۲) به دست می‌آید.

$$\mu = \frac{\delta_u}{\delta_y} \quad (2)$$

- سختی مؤثر: سختی مؤثر اجزای سازه‌ای معمولاً توسط شیب خط منحنی نیرو تغییر مکان که مبدأ را به نقطه ۷۵ درصد ماکزیمم بار در روی منحنی بار-تغییر مکان وصل می‌نماید، تعریف می‌شود.

- مقاومت حداکثر: بیشترین مقاومتی که نمونه در طول

جدول (۶): پارامترهای رفتار لرزه‌ای دیوارهای مورد بررسی.

مقاومت حداکثر	ضریب شکل پذیری	سختی مؤثر	انرژی	افت مقاومت
کشش (+) فشار (-) (کیلو نیوتن) (کیلو نیوتن)	(II+) (II-) میانگین	کشش (Ke+) فشار (Ke-) (کیلو نیوتن بر میلی متر) (کیلو نیوتن بر میلی متر)	انرژی تلف شده کل (نیوتن در متر)	افت مقاومت تا انتهای بارگذاری (درصد)
۱۶۸	۶/۳۸	۱۱۶/۸۷	۱۵۹۱۸	۵۴
۱۲۹	۱۱/۱۴	۱۲۸/۸۱	۱۳۰۲۱	۶۳
۱۸۴	۱۲/۸۸	۱۵۳/۳۲	۲۱۳۵۵	۱۹
۱۹۰	۱۶/۸۱	۲۰۳/۳۹	۲۳۴۱۶	۱۴
۱۵۶	۱۵/۵۸	۱۰۶/۲۷	۱۷۸۹۲	۷

جدول (۷): مقایسه پارامترهای رفتار لرزه‌ای در دو نوع دیوار ۲۰ سانتی متری با آجر چینی مختلف.

مقدار اختلاف	آجر چینی راسته (RMW-1)	آجر چینی بلوکی (RMW-2)	مقدار اختلاف	آجر چینی راسته (URMW-1)	آجر چینی بلوکی (URMW-2)	مقایسه و بررسی پارامترهای رفتار لرزه‌ای در دیوارهای ۲۰ سانتی متری تقویت شده و بدون تقویت
۲۱ درصد	۱۲/۸۶	۱۵/۵۸	۹۰ درصد	۶/۳۲	۱۲/۰۶	ضریب شکل پذیری
۱۲ درصد	۱۷۹/۵	۲۰۰/۵	۲۹ درصد	۱۶۶/۵	۱۲۹/۵	ظرفیت باربری
۳۴ درصد	۱۴۹/۶۹	۲۰۰/۶۴	۱ درصد	۱۱۸/۷۳	۱۱۹/۷۴	سختی مؤثر
۱۰ درصد	۲۱۳۵۵	۲۳۴۶۱	۲۲ درصد	۱۵۹۱۸	۱۳۰۲۱	انرژی تلف شده
۵ درصد	۱۴ درصد	۱۹ درصد	۹ درصد	۵۴ درصد	۶۳ درصد	افت مقاومت تا انتهای بارگذاری

جدول (۸): مقایسه پارامترهای رفتار لرزه‌ای دیوار ۲۰ سانتی متری با آجر چینی راسته در دو نوع تقویت ضربه‌ای و ترکیبی.

مقدار اختلاف	ضربه‌ای (RMW-1)	ترکیبی (RMW-1-2)	مقایسه پارامترهای رفتار لرزه‌ای در دیوارهای ۲۰ سانتی متری تقویت شده به دو روش ضربه‌ای و ترکیبی با آجر چینی راسته
۱۸ درصد	۸۶/۱۲	۲۳/۱۵	ضریب شکل پذیری
۸ درصد	۵/۱۷۹	۵/۱۶۵	ظرفیت باربری
۳۹ درصد	۶۹/۱۴۹	۶۸/۱۰۷	سختی مؤثر
۱۹ درصد	۲۱۳۵۵	۱۷۸۹۲	انرژی تلف شده
۱۲ درصد	۱۹ درصد	۷ درصد	افت مقاومت تا انتهای بارگذاری

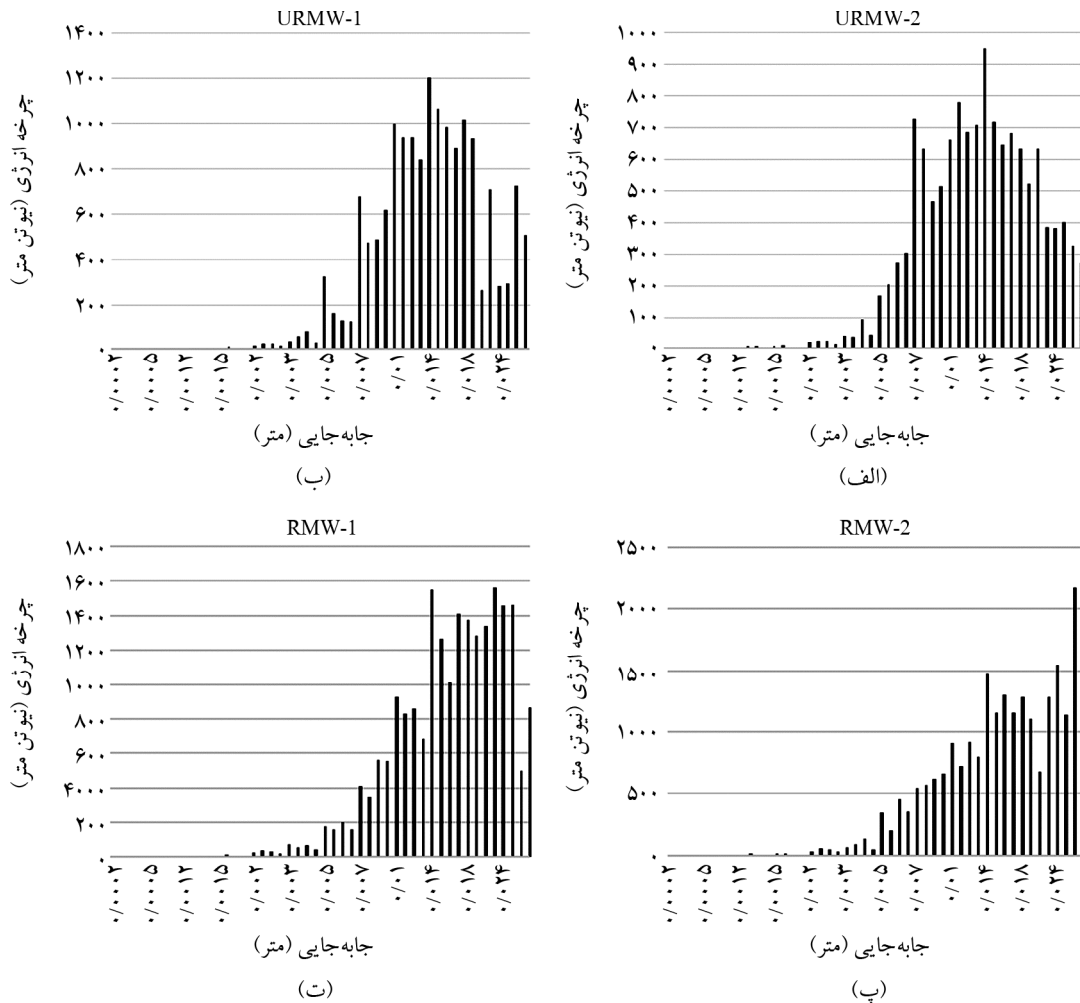
جدول (۹): بررسی اثر ورق‌های تقویت بر روی دیوارهای مدل‌سازی شده.

دیوار با آجر چینی راسته	دیوار با آجر چینی بلوکی	دیوار با آجر چینی راسته و تقویت ترکیبی	بررسی اثر ورق‌های تقویت بر روی بهبود پارامترهای رفتار لرزه‌ای در دیوارهای تقویت شده
۱۰۳ درصد	۲۹ درصد	۱۴۰ درصد	ضریب شکل پذیری
۸ درصد	۵۵ درصد	۱ درصد	ظرفیت باربری
۲۹ درصد	۶۸ درصد	-۱۰ درصد	سختی مؤثر
۳۴ درصد	۸۰ درصد	۱۲ درصد	انرژی تلف شده
-۳۵ درصد	-۴۹ درصد	-۴۷ درصد	افت مقاومت تا انتهای بارگذاری

۳-۵- محاسبه انرژی تلف شده

به‌طور کلی سیکل‌هایی که مقدار انرژی تلف شده در آنها بیشتر است نمایان‌گر وقوع ترک‌های بیشتر یا بزرگ‌تر در آن سیکل هستند که باعث اتلاف انرژی بیشتری شده است. در ادامه نمودارهای مربوط به انرژی تلف شده در هر سیکل آورده شده است.

یکی از حالت‌های بررسی انرژی تلف شده، بررسی انرژی در هر سیکل جابه‌جایی می‌باشد که به کمک آن می‌توان میزان دقیق انرژی تلف شده در هر سیکل از جابه‌جایی را ارزیابی کرد.



شکل (۲۶): نمودار انرژی تلف شده در هر سیکل در دیوارهای مدل سازی شده.

نمودارهای انرژی در حالت تقویت شده و بدون تقویت این است که در حالت بدون تقویت پیک اتلاف انرژی در سیکل های میانی اتفاق می افتد و پس از آن افت محسوسی در مقدار انرژی تلف شده را شاهد هستیم که علت آن می تواند وجود خرابی های زیاد در سیکل های انتهایی باشد زیرا زمانی که دیوار به خرابی رسیده امکان جذب انرژی ندارد لذا مقدار انرژی تلف شده در این مقطع کاهش می یابد اما در حالت تقویت شده این پیک مربوط به سیکل های انتهایی است یعنی زمانی که دیوار توان مقابله با تقاضای لرزه ای را ندارد و خرابی هایی روی دیوار اتفاق افتاده، ورق های تقویت این نیاز را برآورده می کنند و باعث جذب انرژی بیشتری می شوند. نوع دیگری از بررسی وضعیت انرژی که وضعیت کلی سازه در برابر زلزله را نشان می دهد انرژی تجمعی است که نشان دهنده مقدار انرژی جذب شده کلی

با توجه به بررسی نمودارهای انرژی تلف شده در هر سیکل از نمونه ها (شکل ۲۶) مشاهده شد که عموماً اولین سیکل در هر جابه جایی بیشترین انرژی تلف شده در آن مقدار جابه جایی را دارد زیرا معمولاً اولین ترک ها در اولین سیکل هر جابه جایی اتفاق می افتد و جایی که بیشترین میزان اتلاف انرژی را داریم زمانی است که بیشترین یا بزرگ ترین ترک ها در آن سیکل اتفاق افتاده است و در سیکل های بعدی این ترک ها باز و بسته می شوند به همین سبب اتلاف انرژی در این سیکل ها نسبت به سیکل اول آن جابه جایی کاهش می یابد. همچنین مشاهده می شود که پیک اتلاف انرژی در سیکل های میانی در حدود دریافت ۰/۵ تا ۰/۹ درصد می باشد یعنی بازه ای که دیوار به خرابی کامل می رسد و پس از آن مقدار انرژی تلف شده در هر سیکل کاهش قابل توجهی دارد. مهم ترین تفاوت در مقایسه

مشاهده شد که این روش تقویت اثر کمتری بر روی افزایش انرژی تلف شده نسبت به حالت تقویت ضربدری داشت. در رابطه با نوع تقویت ترکیبی دیوار راسته نیز مشاهده شد که این نوع تقویت نسبت به تقویت ضربدری اتلاف انرژی کمتری دارد.

۴- نتیجه گیری

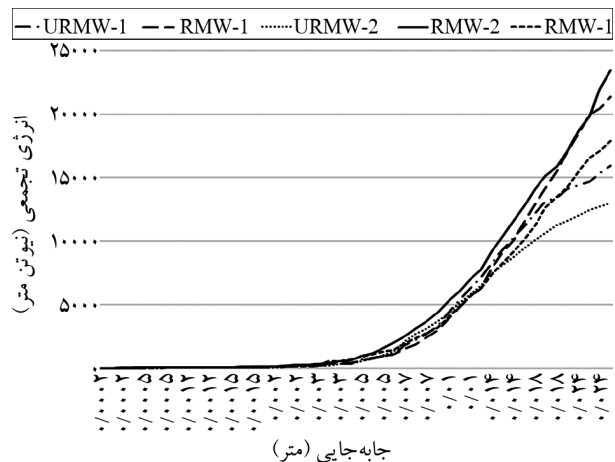
در این مقاله با استفاده از مدل‌سازی سازه در نرم‌افزار Abaqus به روش اجزای محدود، پنج نمونه دیوار بنایی با ضخامت ۲۰ سانتی‌متری و آجرچینی‌های راسته و بلوکی در حالت‌های تقویت شده و بدون تقویت، تحت جابه‌جایی جانبی و یک بار سربار ثابت روی دیوارها مدل‌سازی شدند. با توجه به خروجی‌های به دست آمده به بررسی رفتار لرزه‌ای هر یک از دیوارهای مدل‌سازی شده و مقایسه هر کدام پرداخته شد.

با توجه به بررسی وضعیت تنش و کرنش‌ها در دیوارها خرابی‌های اتفاق افتاده در اثر عدم تحمل کشش در آجرها بوده که باعث وقوع ترک‌های کششی در دیوار شده است. این خرابی‌ها در نهایت منجر به وقوع مدخرابی ترک قطری در دیوارهای بدون تقویت شده است. با بررسی وضعیت کرنش در دیوارهای بدون تقویت مشاهده شد دیوار با آجرچینی بلوکی دیرتر از دیوار با آجرچینی راسته دچار ترک خوردگی می‌شود که اختلاف دررفت آنها در لحظه وقوع اولین ترک حدود ۰/۰۵ درصد است و در حالت تقویت شده نیز دررفت هر دو دیوار در لحظه وقوع اولین ترک با هم برابر است. اما اثرگذاری ورق‌های تقویت بر روی دیوار با آجرچینی راسته در رابطه با وقوع اولین ترک بیشتر از دیوار با آجرچینی بلوکی می‌باشد.

در رابطه با مقایسه پارامترهای رفتار لرزه‌ای دیوارهای بدون تقویت نتایج زیر حاصل شد:

- ضریب شکل‌پذیری دیوار با آجرچینی بلوکی از دیوار با آجرچینی راسته بیشتر است و مقدار اختلاف آن برابر با ۹۰ درصد می‌باشد.
- ظرفیت باربری و انرژی تلف شده در دیوار با آجرچینی راسته بیشتر از دیوار با آجرچینی بلوکی است و مقدار اختلاف آنها به ترتیب برابر با ۲۹ و ۲۲ درصد می‌باشد.

در سازه می‌باشد که به وسیله آن می‌توان توانایی مقابله سازه در برابر زلزله را شناسایی کرد. در ادامه نمودارهای مربوط به انرژی تلف شده تجمعی آورده شده است (شکل ۲۷). در بررسی انرژی تلف شده دیوارهای مورد بررسی در حالت بدون تقویت دیوار URMW-1 اتلاف انرژی بیشتری نسبت به دیوار URMW-2 داشته است و در حالت تقویت شده با نوارهای ضربدری دیوار RMW-2 نسبت به RMW-1 اتلاف انرژی بیشتری داشته است.



شکل (۲۷): مقایسه اتلاف انرژی تجمعی در نمونه‌های مورد بررسی.

بر اساس نمودار مقایسه اتلاف انرژی تجمعی در نمونه‌های مورد بررسی واضح است که اثرگذاری ورق‌های CFRP بر روی دیوار URMW-2 بیشتر از دیوار URMW-1 بوده است. با توجه به نمودار اتلاف انرژی تجمعی مشخص است که میزان انرژی تلف شده تجمعی دیوارها تا قبل از دررفت ۰/۷ درصد (جابه‌جایی ۱۴ میلی‌متر) بسیار نزدیک به هم است و پس از این میزان جابه‌جایی مقدار آنها تفاوت محسوسی دارد که این میزان جابه‌جایی لحظه وقوع خرابی در دیوارهاست از طرفی با در نظر گرفتن خرابی کامل دیوارهای بدون تقویت در دررفت ۰/۷ درصد مشاهده می‌شود که دیوار URMW-1 قابلیت تحمل خرابی‌های بیشتری نسبت به دیوار URMW-2 دارد زیرا انرژی تلف شده پس از خرابی کامل دیوار افزایش بیشتری نسبت به سایر دیوارهای مورد بررسی دارد اما در حالت تقویت شده این مورد در رابطه با دیوار RMW-2 نسبت به دیوار RMW-1 صادق تر است. در رابطه با نوع تقویت ترکیبی دیوار راسته نیز

- روش ارزشمندتر است.
- با مقایسه و بررسی دو نوع دیوار تقویت شده با آجرچینی راسته به دو روش ضربدری و ترکیبی نتایج زیر حاصل شد:
- ظرفیت باربری، سختی مؤثر و انرژی تلف شده در روش تقویت به صورت ضربدری نسبت به حالت تقویت ترکیبی بیشتر است و مقدار اختلاف آنها به ترتیب برابر با ۸، ۳۹ و ۱۹ درصد می باشد.
 - ضریب شکل پذیری در روش تقویت ترکیبی ۱۸ درصد بیشتر از روش تقویت ضربدری است.
 - میزان افت مقاومت تا انتهای بارگذاری در روش ترکیبی ۱۲ درصد کمتر از روش تقویت ضربدری است.
 - همچنین با بررسی تأثیر نوع آرایش ورق های تقویت بر روی پارامترهای رفتار لرزه ای نتایج زیر حاصل شد:
 - اثر ورق های CFRP بر روی تقویت دیوار با آجرچینی راسته به روش نوارهای ترکیبی در پارامترهای شکل پذیری و افت مقاومت به ترتیب ۳۷ و ۱۲ درصد بیشتر از روش نوارهای ضربدری است.
 - اثر ورق های CFRP بر روی تقویت دیوار با آجرچینی راسته به روش ضربدری در پارامترهای ظرفیت باربری، سختی مؤثر و انرژی تلف شده به ترتیب ۷، ۳۹ و ۲۲ درصد بیشتر از روش تقویت ترکیبی است.
- بنابراین با توجه به نتایج بررسی روش تقویت دیوار با آجرچینی راسته می توان دریافت که روش تقویت ترکیبی نسبت به روش تقویت ضربدری با توجه به مصرف حدود دو برابری ورق های تقویت برتری قابل توجه ای در رابطه با پارامترهای رفتار لرزه ای ندارد.
- References**
- مراجع**
- Ahmad, A., & Raza, A. (2020). Reliability analysis of strength models for CFRP-confined concrete cylinders. *Composite Structures*, 244, 112312.
- Celano, T., Argiento, L. U., Ceroni, F., & Casapulla, C. (2021). In-plane behaviour of masonry walls: Numerical analysis and design formulations. *Materials*,
- سختی مؤثر هر دو نوع دیوار تا حد خیلی زیاد نزدیک به هم است و اختلاف محسوسی ندارند.
 - میزان افت مقاومت تا انتهای بارگذاری در دیوار بلوکی ۹ درصد بیشتر از دیوار راسته می باشد.
 - از مقایسه پارامترهای رفتار لرزه ای دیوارهای تقویت شده نتایج زیر حاصل شد:
 - دیوار تقویت شده با آجرچینی بلوکی در هر پنج پارامتر رفتار لرزه ای عملکرد بهتری نسبت به دیوار با آجرچینی راسته دارد. بدین صورت که میزان ضریب شکل پذیری، ظرفیت باربری، سختی مؤثر و انرژی تلف شده در دیوار بلوکی به ترتیب ۲۱، ۱۲، ۳۴ و ۱۰ درصد بیشتر از دیوار راسته است و همچنین مقدار افت مقاومت تا انتهای بارگذاری در دیوار بلوکی ۷ درصد کمتر از دیوار راسته می باشد.
 - در رابطه با مقایسه میزان تأثیر ورق های تقویت ضربدری بر روی پارامترهای رفتار لرزه ای نتایج زیر حاصل شد:
 - میزان اثرگذاری ورق های تقویت بر روی افزایش ضریب شکل پذیری در دیوار راسته حدود ۷۴ درصد بیشتر از دیوار بلوکی است.
 - در رابطه با پارامترهای ظرفیت باربری، سختی مؤثر و انرژی تلف شده، ورق های تقویت بر روی دیوار با آجرچینی بلوکی اثرگذاری بیشتری نسبت به دیوار با آجرچینی راسته داشته است. بدین صورت که مقدار تأثیر آن در افزایش مقدار پارامترهای ذکر شده به ترتیب ۴۷، ۳۹ و ۴۶ درصد در دیوار بلوکی بیشتر از دیوار راسته است.
 - در رابطه با میزان کاهش افت مقاومت، ورق های تقویت بر روی دیوار بلوکی اثرگذاری بیشتر نسبت به دیوار راسته داشته اند به این صورت که دیوار بلوکی ۱۶ درصد کمتر از دیوار راسته دچار افت مقاومت شده است.
 - بدین ترتیب به طور کلی می توان گفت ورق های تقویت CFRP بر روی دیوار با آجرچینی بلوکی اثرگذاری بیشتری نسبت به دیوار با آجرچینی راسته دارند. لذا تقویت این نوع دیوار با نوارهای ضربدری CFRP نسبت به تقویت دیوار راسته به این

- Rahman, A., & Ueda, T. (2016). In-plane shear performance of masonry walls after strengthening by two different FRPs. *Journal of Composites for Construction*, 20(5), 04016019.
- Saghafi, M. H., Safakhah, S., Kheyroddin, A., & Mohammadi, M. (2014). In-plane shear behavior of FRP strengthened masonry walls. *APCBEE Procedia*, 9, 264-268.
- Santa Maria, H., Alcaino, P., & Luders, C. (2006). Experimental response of masonry walls externally reinforced with carbon fiber fabrics. *8th US National Conference on Earthquake Engineering*.
- 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.
- Shrive, N. G., Masia, M. J., & Lissel, S. L. (2001). *Strengthening and Rehabilitation of Masonry Using Fibre Reinforced Polymers*. University of Calgary, Department of Civil Engineering.
- Tan, K. H., & Patoary, M. K. H. (2004). Strengthening of masonry walls against out-of-plane loads using fiber-reinforced polymer reinforcement. *Journal of Composites for Construction*, 8(1), 79-87.
- Triantafillou, T. C. (1998). Strengthening of masonry structures using epoxy-bonded FRP laminates. *Journal of Composites for Construction*, 2(2), 96-104.
- Velazquez-Dimas, J. I., & Ehsani, M. R. (2000). Modeling out-of-plane behavior of URM walls retrofitted with fiber composites. *Journal of Composites for Construction*, 4(4), 172-181.
- Zhou, D., Lei, Z., & Wang, J. (2013). In-plane behavior of seismically damaged masonry walls repaired with external BFRP. *Composite Structures*, 102, 9-19.
- Chuang, S. W., Zhuge, Y., Wong, T. Y., & Peters, L. (2003). *Seismic Retrofitting of Unreinforced Masonry Walls by FRP Strip* (Doctoral Dissertation, New Zealand Society for Earthquake Engineering).
- Federal Emergency Management Agency. (2000). Seismic rehabilitation of buildings (FEMA Publication 356). Washington, D.C. (in Persian).
- Hognestad, E. (1951). Study of combined bending and axial load in reinforced concrete members (University of Illinois Engineering Experiment Station Bulletin No. 399).
- Lourenço, P. B., Oliveira, D. V., Roca, P., & Orduña, A. (2005). Dry joint stone masonry walls subjected to in-plane combined loading. *Journal of Structural Engineering*, 131(11), 1665-1673.
- Marcari, G., Manfredi, G., Prota, A., & Pecce, M. (2007). In-plane shear performance of masonry panels strengthened with FRP. *Composites Part B: Engineering*, 38(7-8), 887-901.
- Mayorca, P., & Meguro, K. (2003). Modeling masonry structures using the applied element method. *SEISAN KENKYU*, 55(6), 581-584.
- Marques, R., & Lourenço, P. B. (2019). Structural behaviour and design rules of confined masonry walls: Review and proposals. *Construction and Building Materials*, 217, 137-155.
- Martinelli, E., Perri, F., Sguazzo, C., & Faella, C. (2016). Cyclic shear-compression tests on masonry walls strengthened with alternative configurations of CFRP strips. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 14, 1695-1720.
- Najafgholipour, M. A., & Maheri, M. R. (2009). Method for numerical modeling of masonry shear walls using Ansys. *Third International Conference on Modeling Simulation and Applied Optimization*.
- Nayal, R., & Rasheed, H. A. (2006). Tension stiffening model for concrete beams reinforced with steel and FRP bars. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 18(6), 831-841.
- Paulay, T., & Priestley, M. J. N. (1992). *Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings*. John Wiley & Sons.

واژه‌نامه

Finite Element Method (FEM)	۱- اجزای محدود
Micro Modeling	۲- ریزمدل سازی
Macro Modeling	۳- درشت مدل سازی
Shear Fracture Energy	۴- انرژی شکست در برش
Tensile Fracture Energy	۵- انرژی شکست در کشش

Mortar Shear Strength	۶- مقاومت برشی ملات
Mortar Tensile Strength	۷- مقاومت کششی ملات
Mortar Shear Stiffness in Coordinate Direction 2	۸- سختی برشی ملات در جهت ۲ دستگاه مختصات
Mortar Shear Stiffness in Coordinate Direction 1	۹- سختی برشی ملات در جهت ۱ دستگاه مختصات
Mortar Tensile Stiffness	۱۰- سختی ملات در جهت کششی
Hard contact	۱۱- تماس صلب
Dynamic Explicit	۱۲- دینامیکی صریح
Pinching	۱۳- لاغرشدگی

Numerical Investigation of the Effect of Brickwork Configuration on the Strengthening of Unreinforced Masonry Walls Using CFRP Sheets

Sina Kamali¹ and Mahdi Adibi^{2*}

1. M.Sc. Graduate of Structural Engineering, University of Bojnord, Bojnord, Iran
2. Associate Professor, Faculty of Engineering, University of Bojnord, Bojnord, Iran,
*Corresponding Author, email: m.adibi@ub.ac.ir

Masonry structures have long been widely used throughout the world due to their simple construction process and economic advantages. However, severe earthquake-induced damage in recent decades has demonstrated the high vulnerability of unreinforced masonry (URM) structures against seismic loading. Therefore, investigating the seismic behavior of masonry walls and improving their structural performance are of significant importance in earthquake-prone regions. The present study aims to numerically evaluate the seismic behavior of 200 mm thick URM walls with two different brickwork configurations, namely running-bond and stack-bond arrangements, in both unstrengthened and CFRP-strengthened conditions under cyclic lateral loading. In the strengthened specimens, both wall types were retrofitted using diagonal CFRP strip configurations. In addition, the running-bond wall was also strengthened using a combined configuration consisting of diagonal and horizontal CFRP strips.

A simplified micro-modeling approach based on the finite element method was adopted to simulate the masonry walls. The numerical models were validated against available experimental results reported in the literature. The seismic performance of the investigated walls was assessed through the analysis of hysteretic behavior and seismic response parameters, including ductility ratio, load-carrying capacity, effective stiffness, energy dissipation, and strength degradation.

The results obtained from the unstrengthened walls indicate that the running-bond masonry wall exhibits higher ductility, greater load-carrying capacity, larger hysteretic energy dissipation, and lower strength degradation compared with the stack-bond masonry wall. In the CFRP-strengthened condition using the diagonal strengthening scheme, the stack-bond wall demonstrated higher ductility, effective stiffness, load-bearing capacity, energy dissipation, and strength degradation than the strengthened running-bond wall. Overall, the strengthening effect of CFRP sheets on the seismic response parameters was found to be more significant in the running-bond wall compared with the stack-bond wall.

Furthermore, the results reveal that the combined strengthening configuration consisting of diagonal and horizontal CFRP strips does not provide a substantial improvement over the diagonal strengthening scheme in terms of ductility enhancement and prevention of strength degradation in the masonry wall. The findings of this study highlight the important influence of brickwork configuration on the effectiveness of CFRP strengthening techniques and provide useful insights for the seismic retrofit design of unreinforced masonry structures.

Keywords: Masonry Wall, Brickwork Configuration, Seismic Load, Finite Element Modeling.