



بررسی تحلیلی عملکرد لرزه‌های دیوارهای مصالح بنایی غیر مسلح تقویت شده با استفاده از تسمه‌های فولادی

دلارام استاد^۱، جلیل شفائی^{۲*}

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد عمران-سازه، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران،
^۲ استادیار عمران-سازه، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸-۰۴-۰۱
بازنگری: ۱۳۹۸-۰۷-۰۸
پذیرش: ۱۳۹۸-۰۷-۲۷
ارائه آنلاین: ۱۳۹۸-۰۸-۲۲

کلمات کلیدی:

دیوارهای بنایی غیر مسلح
مقاوم‌سازی لرزه‌ای
عملکرد لرزه‌ای
تسمه فولادی
تحلیل اجزای محدود

خلاصه: در زلزله‌های اخیر ساختمان‌های مصالح بنایی به دلیل وزن زیاد و شکل‌پذیری پایین و ضعف مقاومت برشی کم در برابر زلزله مقاوم نبوده است، و خسارات زیادی را تجربه کرده‌اند. بهسازی و مقاوم‌سازی سازه‌های مصالح بنایی غیر مسلح بحث جدی در ساخت و ساز شهری می‌باشد. دیوارهای مصالح بنایی در برابر زلزله کمبود مقاومت نداشته است و ضعف اساسی آن‌ها در شکل‌پذیری است؛ زمانی که نسبت طول به ارتفاع دیوار افزایش می‌یابد، علاوه بر کاهش مقاومت دیوار، شکل‌پذیری آن هم کاهش پیدا می‌کند. هدف از این تحقیق بررسی عملکرد لرزه‌ای دیوارهای مصالح بنایی با دو نسبت ارتفاع به طول $0/5$ و $0/7$ با مقیاس $1:2$ است و مقاوم‌سازی دیوارهای مصالح بنایی با استفاده از چیدمان‌های مختلف تسمه‌های فولادی می‌باشد. ارزیابی تحلیلی رفتار لرزه‌ای دیوار مصالح بنایی تقویت شده با تسمه‌های فولادی، با استفاده از نرم افزار اجزای محدود ABAQUS انجام شده است. با روش FEMA356 نمودارهای نیرو-جابجایی تمام نمونه‌ها دو خطی شده است و نتایج تحلیلی در غالب مقاومت نهایی، سختی مؤثر و شکل‌پذیری با یکدیگر مقایسه شد. نتایج نشان می‌دهد که بهترین حالت قرارگیری تسمه‌های فولادی با حالت ضربدری دو طرف دیوار بیشترین تأثیر را در بهبود مشخصات لرزه‌ای دیوار دارد. افزایش مقاومت نهایی 10 برابری و سختی مؤثر 2 برابری و شکل‌پذیری بیشتر نسبت به دیگر نمونه‌های تقویت شده با استفاده از تسمه‌های فولادی نسبت به نمونه شاهد را نشان می‌دهد.

خوبی دارند ولی در برابر نیروهای جانبی و کششی مقاومت زیادی نداشته و پس از رسیدن به مقاومت نهایی، خردشدگی را تجربه می‌کنند و شکل‌پذیری محدودی دارند [۱، ۲]. ساختمان‌های مصالح بنایی در کشور ایران به دلایل متعددی از اهمیت فراوانی برخوردار می‌باشند؛ زیرا اکثر ساختمان‌های موجود یا ساختمان‌های قدیمی که در حال حاضر وجود دارند از مصالح بنایی ساخته شده‌اند، که بیشترین آسیب‌پذیری در زلزله‌های گذشته کشورمان بر روی سازه‌های مصالح بنایی آجری بوده است. در دهه‌های اخیر از زلزله‌های ویرانگر در کشور از جمله استان گیلان که در سال ۱۳۶۹ (رودبار-منجیل) و استان کرمان در سال ۱۳۸۲ (بم) و در استان کرمانشاه که در ۲۱ آبان ماه سال ۱۳۹۶ رخ داد، باعث تخریب در بسیاری از ساختمان‌های مصالح بنایی شد

۱- مقدمه

مصالح بنایی از قدیمی‌ترین مصالح ساختمانی هستند، که در سازه‌های موجود یا تاریخی به کار رفته است. تحلیل آسیب‌پذیری ساختمان‌های مصالح بنایی تحت اثر زلزله، اهمیت بسیار زیادی دارد. زیرا ضوابط آیین‌نامه‌های مختلف در مورد دیوارهای مصالح بنایی عموماً بر مبنای مطالعات آزمایشگاهی و مشاهده خسارت‌های وارده به این دسته از سازه‌ها در زلزله‌های گذشته می‌باشد و روابط تحلیلی مناسبی برای ارزیابی مقاومت و شکل‌پذیری مصالح بنایی وجود ندارد. مصالح بنایی از جمله آجر و ملات در برابر نیروهای فشاری عملکرد بسیار

1 Ductility

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: jshafaei@shahroodut.ac.ir





شکل ۱. خسارت دیوارهای مصالح بنایی غیر مسلح در زلزله ۲۱ آبان ماه کرمانشاه ۱۳۹۶
 Fig. 1. Damages of unreinforced masonry walls, earthquake Kermanshah 2 November 2017.



(الف) ژئوگرید [۹] (ب) FRP [۷] (پ) شاتکریت بتنی [۱۳] (ت) تزریق دوغاب ملات سیمان [۱۰]

شکل ۲. روش‌های مختلف مقاوم‌سازی دیوارهای مصالح بنایی
 Fig. 2. Various methods for retrofitted of masonry walls.

a) Geogid b) FRP c) Concrete shotcrete d) Cement mortar grout injection

تقویت می‌توان استفاده از FRP^۱ بر روی سطح دیوار مصالح بنایی [۷]، استفاده از نوار فولادی ضد زنگ [۸]^۲، استفاده از ژئوگرید در اتصالات بین آجرها [۹]، جلوگیری از ترک‌های برشی دیوارهای مصالح بنایی با استفاده از مهاربندهای فولادی، تزریق دوغاب ملات سیمان [۱۰]، کامپوزیت‌های سیمانی و یا چسب اپوکسی [۱۱]، شاتکریت بتنی [۱۲] و دیگر روش‌ها برای مقاوم‌سازی دیوارهای مصالح بنایی اشاره کرد شکل ۲ [۱۳].

هدف از این مقاله بررسی عملکرد مقاوم‌سازی دیوارهای مصالح بنایی غیر مسلح^۳ با استفاده از چیدمان‌های مختلف تسمه‌های فولادی^۴ در دو طرف دیوار است. دیوار مصالح بنایی دارای نسبت ارتفاع به طول متفاوت در برابر زلزله است، که برای این منظور دو نوع دیوار آجری با مقیاس (۱:۲) در نسبت ابعادی ارتفاع به طول ۰/۵ و ۰/۷ که به ترتیب ضخامت‌های آنها ۱۶۰ و ۱۱۰ میلی‌متر است، که تحت اثر بارگذاری جانبی یک طرفه مورد بررسی قرار گرفته‌اند [۱۴، ۱۵]. این نمونه‌های آزمایشگاهی با استفاده از نرم افزار اجزای محدود ABAQUS مدل‌سازی و صحت‌سنجی شده‌اند.

شکل ۱. سازه‌های مصالح بنایی به علت عدم رعایت ضوابط مهندسی در طراحی و اجرای آنها جزء آسیب پذیرترین سازه‌ها در زمان وقوع زلزله محسوب می‌شوند. در زلزله‌ها سهم عمده‌ای از خسارات مالی و جانی از ساختمان‌های مصالح بنایی حاصل می‌شود. در این سازه‌ها دیوارها تنها تحت اثر بارهای قائم نیستند، بلکه تحت اثر بارهای جانبی افقی مثل باد و زلزله نیز هستند. بارگذاری بر روی دیوارها با توجه به اندرکنش این بارها بر روی دیوار انجام می‌شود [۳].

در ادبیات فنی درآیین‌نامه‌های FEMA356، ASCE، نشریه ۳۶۰ و دیگر آیین‌نامه‌های طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله، روش‌های بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌های مصالح بنایی ارائه گردیده است [۴-۶]. با توجه به اینکه هنوز هم بسیاری از سازه‌های موجود در کشور از نوع سازه‌های بنایی است، برای جلوگیری از خسارت ساختمان‌های موجود، باید مقاوم‌سازی و بهسازی شوند. شناخت دقیق انواع آسیب‌های وارده به ساختمان و یافتن روش‌های مناسب مقاوم‌سازی با تقویت قسمت‌های اصلی و باربر ساختمان و افزودن عناصر باربر اضافی و نوع سازه بنایی می‌تواند راهی برای دسترسی به ایمنی بالاتر در مقابل زلزله باشد [۶].

تحقیقات آزمایشگاهی و تحلیلی بسیاری برای تقویت نمونه‌های دیوارهای مصالح بنایی انجام پذیرفته شده است، از جمله روش‌های

1 Fiber Reinforced Polymer
 2 Stainless Steel Strip
 3 Unreinforced Masonry Wall
 4 Steel Tie

جدول ۱. مشخصات آزمایشگاهی دیوارهای مصالح بنایی [۱۴]

Table 1. Experimental Specification of masonry walls.

نمونه مرجع	تنش محوری (MPa)	تنش برشی ملات (MPa)	ارتفاع (mm)	ضخامت (mm)	طول (mm)	نمونه تقویت شده
URMW-C-0.5	۰/۱	۰/۲	۱۴۰۰	۱۶۰	۲۷۰۰	URMW-C-R1-0.5
URMW-C-0.7	۰/۱	۰/۲	۱۴۰۰	۱۱۰	۱۹۰۰	URMW-C-R1-0.7

مناسبی در نحوه اجرا و مصالح مصرفی از جمله آجر و ملات برخوردار بوده است و مشخصات مصالح آنها به گونه‌ای است که متوسط شرایط ساختمان‌های مصالح بنایی موجود را داشته باشد. بر این اساس دو نمونه دیوار با مشخصات متفاوت ابعادی، ضخامت، نسبت بار محوری و مقاومت برشی ملات طراحی گردید، که جزئیات دیوارهای مرجع در جدول ۱ آمده است. نمونه‌های آزمایشگاهی به علت محدودیت‌های موجود در ساخت نمونه و بارگذاری در آزمایشگاه از مقیاس ابعادی ۱:۲ و ملات درز آجرها هم نیز مقیاس شده است.

دو نوع دیوار بنایی غیر مسلح مرجع، با نام‌های URMW-C-0.5 و URMW-C-0.7 نام گذاری شده است. همچنین ابعاد دیوار URMW-C-0.5 (۱۶۰*۲۷۰*۱۴۰۰) میلیمتر و URMW-C-0.7 (۱۱۰*۱۹۰*۱۴۰۰) میلیمتر که به ترتیب (ارتفاع*طول*ضخامت) دیوارهای بنایی غیر مسلح است. علاوه بر آن یک تیر بتنی^۲ برای بالا و پایین دیوار ساخته شده است، وجود این تیر به منظور اعمال یکنواخت سربار و نیز امکان اعمال بار جانبی می‌باشد، این تیر در واقع شرایط سقف را شبیه‌سازی می‌کند، و می‌توان با ایجاد ریلی روی آن سقف صلب را شبیه‌سازی نمود همچنین در پای دیوار این تیر می‌توانند شرایط پی را شبیه‌سازی کند.

آجرهای مورد استفاده در دیوارهای آزمایشگاهی از کیفیت مناسبی برخوردار بوده و ابعاد آجرها یکنواخت و یکسان می‌باشد. این آجرها دارای مقاومت فشاری و کششی متناسب با پراکندگی ناچیزی هستند. آجرها با مقیاس ۱:۲ مدل شده‌اند با ابعاد (۳۱*۴۹*۱۰۵) میلیمتر که به ترتیب (طول*ارتفاع*ضخامت) آجر است. آجر چینی هردو نمونه دیوار که ابعاد مختلفی دارد، در شکل ۳ و ۴ نشان داده شده است. ملات به عنوان اتصال دهنده واحد بنایی باید از کیفیت مناسبی برخوردار باشد، در مدل آزمایشگاهی ملات با نسبت وزنی ماسه به سیمان ۱:۶ است و ضخامت ملات در دیوار مصالح بنایی آزمایشگاهی ۶ میلیمتر است.

برای مقاوم‌سازی دیوار مصالح‌بنایی بر روی سطح دیوار تسمه‌های فولادی با حالت‌های مختلف از جمله قائم، افقی، قطری، مورب، ضربدری، شبکه‌ای، مدل‌سازی و بررسی شده است. با دوخطی^۱ کردن نمودار نیرو-جابجایی مقاومت نهایی، سختی مؤثر، شکل‌پذیری را در تمام نمونه‌ها به دست آمده و با یکدیگر مقایسه شده است. در حال حاضر استفاده از روکش بتنی مسلح با بتن پاشی روی دیوار و یا ایجاد پوشش با مواد کامپوزیتی روی دیوار که اجرا می‌گردد، نیاز به تراشیدن نازک کاری روی دیوار و تمیز کردن آن دارد، که خود باعث صرف وقت بیشتر و هزینه زیادتری خواهد شد. استفاده از تسمه‌های فولادی نیاز به تمیز کردن سطح کلی دیوار ندارد، فقط در قسمت‌هایی که تسمه فولادی قرار می‌گیرد سطح دیوار تمیز می‌شود، در این رابطه باعث کاهش هزینه‌ها نیز خواهد شد. استفاده از تسمه‌های فولادی جهت مقاوم کردن دیوارهای مصالح بنایی باعث افزایش باربری و بهبود رفتار در مقابل بارهای جانبی درون صفحه اعمال شده به دیوار می‌شود و همچنین وجود حالت قرارگیری تسمه‌های فولادی ضربدری بر انسجام دیوار می‌افزاید [۱۶]. پارامترهای لرزه‌ای در عملکرد لرزه‌ای دیوارها دخیل‌اند، مثل: مقاومت، شکل‌پذیری، سختی مؤثر که در دیوارهای مصالح بنایی غیرمسلح و تقویت شده با تسمه‌های فولادی متفاوت است، که در این مقاله بررسی و مقایسه شده است. در انتها هم مدلی که نتیجه‌ای مطلوبی برای دیوارهای مصالح بنایی غیرمسلح دارد پیشنهاد شده است.

۲- معرفی مدل آزمایشگاهی اولیه برای صحت سنجی مدل تحلیلی

برای این مقاله از مدل آزمایشگاهی که توسط درب هنزی و همکاران در آزمایشگاه سازه دانشگاه تهران ساخته شده بود، برای صحت سنجی استفاده شده است [۱۴، ۱۵]. این دیوارهای بنایی غیر مسلح از کیفیت

2 Loading Beam

1 Bilinear



الف) الگوی آجرچینی نمونه URMW-C-0.5، ردیف اول (ب) الگوی آجرچینی نمونه URMW-C-0.5، ردیف دوم

شکل ۳. الگوی آجرچینی نمونه URMW-C-0.5 با ضخامت ۱۶۰ میلی‌متر و نسبت ارتفاع به طول ۰/۵

Fig. 3. Brick pattern of specimen URMW-C-0.5 with thickness of 160 mm and height to length ratio of 0.5.

a) Brick pattern of specimen URMW-C-0.5, first row, b) Brick pattern of specimen URMW-C-0.5, second row



الف) الگوی آجرچینی نمونه URMW-C-0.7، ردیف اول (ب) الگوی آجرچینی نمونه URMW-C-0.7، ردیف دوم

شکل ۴. الگوی آجرچینی نمونه URMW-C-0.7 با ضخامت ۱۱۰ میلی‌متر و نسبت ارتفاع به طول ۰/۷

Fig. 4. Brick pattern of specimen URMW-C-0.7 with thickness of 110 mm and height to length ratio of 0.7.

a) Brick pattern of specimen URMW-C-0.7, first row, b) Brick pattern of specimen URMW-C-0.7, second row



شکل ۵. مشخصات تسمه‌های فولادی برای مقاوم سازی دیوارهای مصالح بنایی [14]

Fig. 5. Specifications of steel ties for retrofitted of masonry walls.

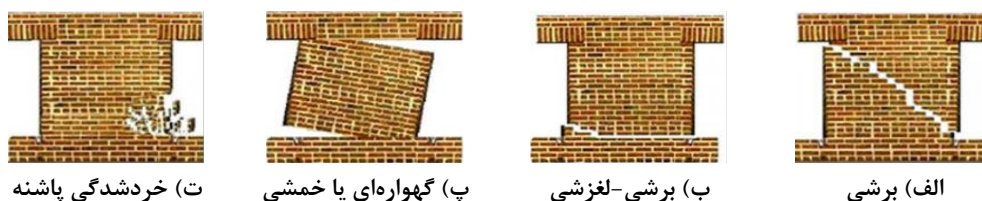
ملات منشور بنایی، اندازه بازشو، می‌توانند در رفتار دیوار مصالح بنایی اثرات مختلفی داشته باشد که می‌تواند مد دیوار را تعیین کند [۱۷]. بعضی از این مدها شکل‌پذیر بوده است و می‌توانیم برای آن منحنی نیرو-جابجایی فرض نمود. منحنی نیرو-جابجایی هر مقدار جابه‌جایی بیشتری در ناحیه پلاستیک داشته باشد، نشان دهنده شکل‌پذیری دیوار مصالح بنایی است، شکل‌پذیری با دو خطی کردن نمونه‌های تحلیلی بر اساس روش FEMA356 که در بخش شش مقاله ارائه شده است، با توجه به فرمول $\mu = \delta_m / \delta_y$ به دست می‌آید، به طوری که δ_m جابه‌جایی حداکثر و δ_y جابه‌جایی متناظر با حد تسلیم است.

با توجه به حرکت زمین در زمان وقوع زلزله ممکن است نیروهای موزی دیوار برشی اعمال شود که موجب شکست داخل صفحه می‌گردد و یا عمود بر دیوار باشد، که در آن صورت شکست خارج از صفحه رخ می‌دهد. همچنین مدهای شکست یک دیوار بنایی مجزا به

برای مقاوم‌سازی دیوارهای بنایی غیر مسلح در دو طرف دیوار از تسمه‌های فولادی (عرض ۳۰ میلی‌متر و ضخامت ۳ میلی‌متر) توسط بست‌های افقی (تسمه فولادی ۳۰*۳۰*۱۵۰ میلی‌متر) که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، استفاده شده است. جهت مهار تسمه‌ها بر روی دیوار از میله مهارهایی به قطر ۶ میلی‌متر (فاصله افقی و قائم به ترتیب ۱۵ و ۲۰ سانتیمتر استفاده شده است) و جهت اجرا دیوار در محل‌های مورد نظر با مته سوراخ و میله مهارها توسط چسب در جای خود قرار داده می‌شوند و سپس تسمه در محل خود نصب و توسط مهره محکم می‌گردد [۱۴].

۲-۱- معرفی مدهای گسیختگی دیوارهای مصالح بنایی

دیواره‌های آجری بسته به رفتار درون صفحه که وابسته است به میزان سربار، نسبت ارتفاع به طول دیوار، مقاومت‌های برشی و فشاری



شکل ۶. مدهای گسیختگی مختلف دیوارهای مصالح بنایی [5]

Fig. 6. Different failure modes of URM walls.

a) Shear b) Slip-shear c) Rocking or bending d) Corner crushing

با ابعاد معمولی انتظار رخ دادن این مد نمی‌رود [۵].

۳- مدل سازی دیوارهای مصالح بنایی در نرم افزار اجزای محدود ABAQUS

نرم افزاری که از آن جهت مدل سازی و صحت سنجی نمونه‌های آزمایشگاهی استفاده شده است، نرم افزار تحلیل اجزای محدود ABAQUS است. این نرم افزار دارای چندین نوع المان است، برای هر مدل باید المان متناسب انتخاب کرد تا نتایج حاصل قابل اطمینان باشد. برای مدل سازی ساختار مصالح بنایی در نرم افزار اجزای محدود ABAQUS همانند نمونه آزمایشگاهی مدل سازی شده است.

۳-۱- روش‌های مدل سازی دیوار مصالح بنایی

برای مدل سازی ساختار مصالح بنایی سه رویکرد وجود دارد: ۱- رویکرد همگن ماکرو^۱ (درشت بینانه) ۲- رویکرد غیرهمگن میکرو^۲ (ریز بینانه) ۳- رویکرد مزو^۳ (بین مقیاس ماکرو و میکرو است). در رویکرد همگن ماکرو دیوار آجری متشکل از سه جزء اصلی می‌باشد از جمله آجر، ملات، سطح تماس آجر و ملات است. در مدل سازی ماکرو، مانند شکل ۷-الف آجر و ملات به صورت یک جسم همگن در نظر گرفته می‌شود. برای این جسم همگن مشخصات مکانیکی در نرم افزار وارد می‌شود، در این روش مدل سازی بسیار ساده و حجم محاسبات بسیار کمتر از حالت مدل سازی میکرو است، اما دقت این روش کم است و معمولاً برای مدل سازی در ابعاد بزرگ به کار می‌رود [۱۸، ۱۹]. در رویکرد غیر همگن میکرو آجر و ملات به صورت جداگانه مدل می‌شود مطابق شکل ۷-ب و برای هر یک از آنها مشخصات مکانیکی و رفتار مربوطه به نرم افزار داده می‌شود، که این

دو گروه شکست درون صفحه و شکست خارج از صفحه تقسیم می‌شود. FEMA356 [۵] چهار مد برای شکست درون صفحه با ظرفیت‌های آنها در نظر گرفته است، که در زیر به آن اشاره شده است. چهار مد عبارتند از: مد برشی، مد برشی-لغزشی، مد گهواره‌ای یا خمشی، خردشدگی پاشنه.

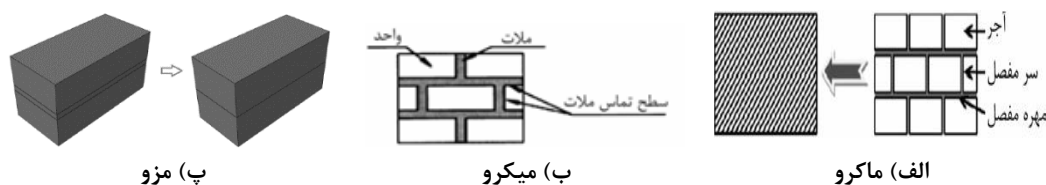
در صورتی که دیوار تحت بار قائم زیاد و نسبت ارتفاع به طول دیوار کمتر از واحد باشد، مد شکست برشی رخ می‌دهد. در شکل ۶-الف مشاهده می‌شود، حالت شکست در راستاهای بندهای افقی میان قاب اتفاق می‌افتد یا به عبارت دیگر شکست برشی به صورت لغزش بین سطوح آجر و ملات اتفاق می‌افتد. همچنین اگر نسبت ارتفاع به طول بزرگتر از ۱ باشد (تقریباً برابر با ۲) و مقدار بار قائم بسیار زیاد باشد، باز هم امکان شکست برشی وجود دارد. دیوارهای آجری کشور به دلیل شرایط خاص فوق‌الذکر بیشتر مد قطری (برشی) را تجربه می‌کنند [۵]. در صورتی که مقاومت برشی دیوار اندک و بار جانبی در مقایسه با بار قائم بزرگ باشد، مطابق شکل ۶-ب شکست برشی-لغزشی رخ می‌دهد، در این حالت معمولاً نسبت ارتفاع به طول دیوار به اندازه ۱/۵ به ۱ و در حدود ۱ به ۱ است [۵].

در صورتی که مقاومت برشی دیوار به اندازه کافی باشد و نسبت ارتفاع به طول در حدود ۲ به ۱ است مطابق شکل ۶-پ شکست خمشی رخ می‌دهد، اگر مقدار بار قائم اندک باشد، در صورت کم بودن مقاومت برشی نیز شکست خمشی اتفاق می‌افتد.

خرد شدگی پاشنه در حالتی اتفاق می‌افتد که چسبندگی خوبی میان آجرها یا واحدهای بنایی و ملات موجود داشته باشد، مطابق شکل ۶-ت خردشدگی پاشنه رخ می‌دهد [۵].

مد شکست خارج از صفحه ابتدا مرکز میان قاب خرد شده و سپس به سمت بیرون پرتاب می‌شود، این مد شکست در میان قاب‌هایی با نسبت ابعادی زیاد و ضخامت کم (لاغر) رخ می‌دهد و در میان قاب‌هایی

1 Macro Modeling
2 Micro Modeling
3 Mezzo Modeling



شکل ۷. روش‌های مدل‌سازی دیوار مصالح بنایی

Fig. 7. Modeling methods of masonry a) Macro b) Micro c) Mezzo

خوبی در راستای رفتار این نوع دیوارها ارائه می‌دهد، اما بسیار زمان بر است و در عین حال در ترم‌های زمان به کار برده شده است و برای آنالیزهای پیچیده نا کار آمد می‌باشد. علت آن این است که در تکنیک‌های غیر صریح باید معادلات تعادل شامل ماتریس سختی کل سازه را حل کرد، که بسیار وقت گیر است. زمانیکه دیوار مصالح بنایی دچار ترک می‌شود، به دلیل بدخیمی ماتریس سختی همگرا نمودن مسأله دشوار است، برای حل این مشکل از تکنیک مدل‌سازی اجزای محدود صریح استفاده کردند. حل صریح بر اساس ماتریس جرم کار می‌کند و مسئله را گره به گره حل می‌کند و به ماتریس سختی دیگر احتیاجی ندارد، در این مقاله از روش دینامیکی صریح استفاده شده است. برای آنالیزها به دلیل زمان بر بودن تحلیل دینامیکی صریح از مقیاس جرمی^۳ استفاده شده است.

۳-۳ معرفی مصالح در نرم افزار

جهت تعریف مصالح دیوار بنایی از بتن آسیب دیده پلاستیک^۴ استفاده شده است، که قابل استفاده برای بتن و سایر مصالح ترد و شکننده تحت تأثیر بارگذاری یکنواخت و رفت و برگشتی می‌باشد. که با توجه به نوع دیوار انتخابی و شرایط بارگذاری در این تحقیق گزینه مناسبی می‌باشد. مدل خسارت آسیب دیده بتن تکنیکی است که قابلیت نشان دادن رفتار غیر خطی و خصوصیات بحرانی مواد شبه ترد همانند بتن را دارد. بتن آسیب دیده پلاستیک تنها مدلی است که برای در هر دو تحلیل استاتیکی و دینامیکی قابل استفاده است، در این مدل فرض بر این است که ترک کششی و خردشدگی فشاری دو جبهه اصلی مکانیسم گسیختگی بتن می‌باشد. بنابراین برای معرفی رفتار کامل منشور بنایی علاوه بر پارامترهای الاستیک، مقدار عددی زاویه اتساع، خروج از مرکزیت و دیگر پارامترهای معرف رفتار منشور بنایی^۵

مدل خود به دو روش انجام می‌شود مدل میکرو ساده سازی شده که از ضریب اصطکاک برای اتصال آجر در نرم‌افزار استفاده می‌شود و میکرو ریزبینانه که ملات به صورت جداگانه مدل‌سازی می‌شود. در روش غیرهمگن میکرو رفتار دقیق سازه اهمیت زیادی دارد. سازه‌های بنایی که شامل تعداد زیادی اجزا و عناصر هستند، استفاده از رویکرد میکرو، روش غیر عملی و غیر واقع بینانه است، زیرا نحوه قرار گرفتن ملات بین آجرها می‌تواند باعث بالا رفتن اشتباه در ایجاد چسبندگی میان آجرها شود [۲۰، ۱۸].

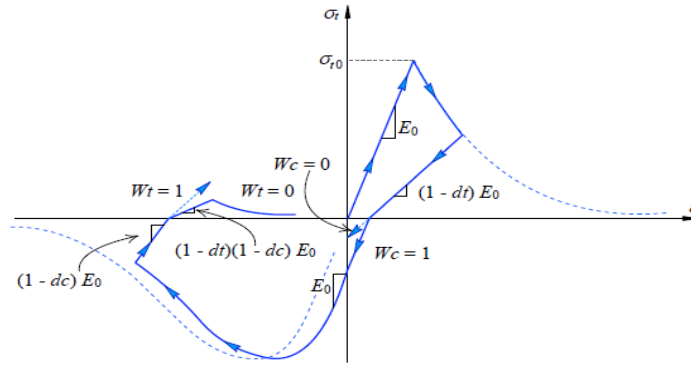
رویکرد مزو این روش از لحاظ سطح دقت و مقدار محاسبات مورد نیاز و مدل‌سازی در مقیاس مزو بین تحلیل در مقیاس میکرو و ماکرو قرار می‌گیرد. در این روش ملات عملاً نقشی نداشته و نقش اصلی را المان حد فاصل (رابط) و المان بنایی ایفا می‌کند. مطابق شکل ۷-پ به علت ضخامت صفر المان در این روش ابعاد هندسی المان آجر باید افزایش یابد تا هندسه کلی بدون تغییر باقی بماند. ضخامت ملات را در این روش از ۵ تا ۱۰ میلی‌متر در نظر می‌گیریم. با توجه به نتایج آنالیزهایی که تاکنون بر روی مدل‌سازی میکرو و مدل‌سازی مزو صورت گرفته است که نتایج بیانگر دقت مناسب مقیاس مزو می‌باشد. در این روش تنها اثرات آن بر روی منشور بنایی به خودی خود در نظر گرفته نمی‌شود، در راستای در نظرگیری این اثر باید آن را بر روی تعریف خصوصیات مکانیکی منشور بنایی تعریف کرد.

۳-۲ روش‌های تحلیل مدل عددی دیوار مصالح بنایی

دو نوع تحلیل برای دیوار مصالح بنایی وجود دارد: ۱- تحلیل صریح^۱ ۲- تحلیل غیر صریح^۲ بعضی از محققین با استفاده از تحلیل غیر صریح رفتار دیوارهای بنایی را شبیه سازی کردند؛ اگر چه این آنالیزهای اجزای محدود دید

3 Mass Scaling
4 Concrete Damage Plasticity
5 Masonry Prism

1 Dynamic Explicit
2 Dynamic Implicit



شکل ۸. رفتار بتن در بارگذاری تک محوره [۲۱]
 Fig. 8. Concrete behavior in uniaxial loading.

جدول ۲. مشخصات مکانیکی بتن آسیب دیده پلاستیک واحد بنایی نمونه‌های تحلیلی

Table 2. Mechanical specification of concrete damaged plastic masonry unit analytical specimens.

نمونه‌های مرجع	Dilation Angle	Eccentricity	σ_{b0}/σ_{c0}	K	Viscosity Parameter
URMW-C-0.5	۲۰	۰/۱	۱/۱۶	۰/۶۷	۰/۰۱
URMW-C-0.7	۲۰	۰/۱	۱/۱۶	۰/۶۷	۰/۰۱

متحده فرمول $E = f'_c * 550$ است. ولی در ایران به علت اینکه مصالح کیفیت کمتری دارند مقدار مدول الاستیسیته را کمتر می‌گیرد به طوری که به جای ۵۵۰ از عدد ۱۵۰ هم بعضی محققین استفاده می‌کنند.

f'_c = مقاومت فشاری مصالح آجری با واحد MPa است.

در جدول ۲ پارامترهای در نظر گرفته شده در مدل رفتاری پلاستیسیتته بتن آسیب دیده در نرم افزار اجزای محدود ABAQUS برای تعریف رفتار پلاستیک مصالح بنایی تعریف می‌گردد:

زاویه اتساع^۲ در بتن آسیب دیده پلاستیک مقدار آن بسیار ناچیز است و در سربارهای قابل توجه مقدار آن در حد صفر است. البته این پارامتر از آزمایش مستقیم و استاندارد حاصل نمی‌شود، برای مصالح بنایی مقدار آن ۵ تا ۲۰ در مدل خسارت دیده بتن است. در واقع پارامتر زاویه اتساع (انبساط برشی)، مقدار بلندشدگی در اثر جابجایی برشی را مشخص می‌کند. این پدیده اثر زبری سطح است که به این صورت نمایان می‌شود. بایستی توجه شود که مقدار انبساط برشی بستگی به مقدار تنش فشاری محصورشدگی دارد و با افزایش این تنش فشاری، زاویه اتساع کم می‌شود. همچنین، با شروع لغزش و تحت تنش‌های فشاری زیاد، به علت از بین رفتن ناهمواری‌های سطحی و صاف شدن

در کشش و فشار نیز می‌بایست برای نرم افزار تعریف گردند، شکل ۸. از آنجا که روش مورد استفاده در این مقاله برای مدل سازی دیوار مصالح بنایی در نرم افزار اجزای محدود ABAQUS رویکرد مزو است که ملات در آن به صورت مستقیم مدل سازی نشده است و تنها اثرات آن (اصطکاک و چسبندگی) در قالب تعریف اندرکنش^۱ بین آجرها شبیه سازی شده است. رفتار اندرکنشی بین آجرها که ناشی از ملات بوده و دارای دو خاصیت رفتاری اند: ۱- چسبندگی در فازهای کششی و برشی ۲- اصطکاک در فاز برشی می‌باشد. به این ترتیب مقاومت فشاری ملات و اثر ترکیبی آن بر روی منشور بنایی به خودی خود در نظر گرفته نمی‌شود. در راستای در نظرگیری این اثر باید به جای تعریف خصوصیات مکانیکی آجر بر روی آجرها، خصوصیات مکانیکی منشور بنایی تعریف گردد، متأسفانه این نکته در بسیاری از تحقیقات قبلی داخل کشور در این زمینه نادیده گرفته شده است.

مدول الاستیسیته مربوط به مصالح بنایی داخل کشور عدد نسبتاً بالایی بوده است و البته بهتر است از آزمایش منشور بنایی به دست آید. میزان مدول الاستیسیته مصالح بنایی معمولاً بر اساس مقاومت فشاری آن تعیین می‌شود. به عنوان مثال پیش استاندارد FEMA356 رابطه زیر را برای بدست آوردن این پارامتر پیشنهاد می‌دهد. در ایالت

2 Dilation Angle

1 Interaction

جدول ۳. خصوصیات مکانیکی مصالح بنایی و بتنی

Table 3. Mechanical specification of masonry and concrete materials.

	چگالی (Ton/mm ³)	مدول الاستیسیته (N/mm ²)	ضریب پواسون	مقاومت فشاری (MPa)
منشور بنایی	۱۸۰۰*۱۰ ^{-۱۲}	۴۷۸۵	۰/۱۵	۸/۷
تیر بتنی	۲۴۰۰*۱۰ ^{-۱۲}	۲۱۰۰۰	۰/۳	-----

جدول ۴. مشخصات مکانیکی المان سطح تماسی

Table 4. Mechanical specification of interface contact.

نمونه مرجع	رفتار چسبنده				رفتار کشش-جداشدگی			رفتار نرمال	رفتار مماسی
	خرابی								
	تکامل خرابی		شروع خرابی						
	G_f^I	G_f^{II}	$C = 1.4f_t$	f_t	K_{mn}	K_{ss}	K_{tt}		$\tan \theta$
URMW-C-0.5	۰/۰۱۲	۰/۰۵	۰/۱۶	۰/۲۲۴	۸۲	۳۶	۳۶	Hard	۰/۷۵
URMW-C-0.7	۰/۰۱۸	۰/۱۲۵	۰/۲۵	۰/۳۵	۸۲	۳۶	۳۶	Hard	۰/۷۵

لیونز برای حل این مشکل پیشنهاد کردند که ماده بتن، به صورت یک ماده ویسکوپلاستیک در نظر گرفته شود. این موضوع باعث می شود که در طی به دست آمدن معادلات در هر مرحله، یک زمان آرامش وجود داشته باشد. وجود این زمان آرامش باعث می شود که حساسیت حل نسبت به سطوح تسلیم کاهش یابد و در نتیجه مشکلات همگرایی تا حدی بهبود یابد. طبیعی است که مقدار این زمان آرامش باید به حدی کوچک باشد که بتوان از تأثیرات آن بر پاسخ کلی سازه صرف نظر کرد. باتوجه به اینکه برای صحت سنجی مدل سازی تحلیلی، از نتایج آزمایشگاهی استفاده می شود، خواص مصالح در جدول ۳ و ۴ ذکر شده است:

میزان جرم حجمی یا چگالی منشور بنایی که عددی بین ۱۸۰۰ تا ۱۸۵۰ کیلوگرم بر متر مربع است. ضریب پواسون مربوط به منشور بنایی عددی بین ۰/۱ تا ۰/۱۵ است. مقاومت فشاری مربوط به منشور بنایی طبق دستور العمل موجود استاندارد ASTM حداقل سه نمونه منشور بنایی تهیه شده است، به این ترتیب پس از ساخت نمونه ها بر اساس توصیه های موجود در استاندارد مورد نظر و مدت زمان مشخص، نمونه ها در دستگاه مربوط تحت آزمایش قرار گرفته اند؛ بدیهی است برای تعیین مقاومت فشاری نمونه ها در راستای عمود بر درزهای افقی نمونه به صورت عادی تحت نیروهای فشاری قرار می گیرد. در حالی که برای تعیین مقاومت فشاری نمونه ها در راستای درزهای افقی نمونه

سطوح قبل از لغزش، زاویه اتساع به سمت صفر میل می کند [۱۸]. خروج از مرکزیت^۱، تابع پتانسیل جریان در ابتدا محور افقی تنش هیدرواستاتیک را با زاویه ۹۰ درجه قطع می کند که تحت این شرایط، این تابع در واقع یک منحنی خواهد بود. مقدار این پارامتر اگر بسیار کوچک در نظر گرفته شود، باعث واگرایی حل در مراحل اولیه خواهد شد.

نسبت تنش فشاری حداکثر دو محوره به تک محوره σ_{b0}/σ_{c0} است، مقدار این پارامتر بین ۱ تا ۲۷ / ۱ متغیر است. هرچه این مقدار بیشتر باشد ماده رفتار سخت تری از خود نشان خواهد داد [۲۲].

پارامتر K در واقع شکل مقطع عرضی سطوح بارگذاری را تعیین می کند، مقدار این پارامتر بین ۰/۵ تا ۱ است. اگر مقدار این پارامتر برابر با یک در نظر گرفته شود، شکل مقطع عرضی سطح تسلیم شبیه دراکر-پراگر می گرد [۲۳].

پارامتر ویسکوزیته^۲، در تحلیل اجزای محدود بر اساس تئوری بتن آسیب دیده پلاستیسیته دارای پتانسیل بسیار زیادی برای واگرایی زودرس است. دلایل بسیار زیادی برای این مسأله می توان بیان کرد که مهمترین آنها کاهش سختی بسیار شدید پس از ترک خوردگی و تغییرات شیب بسیار زیاد در مقطع عرضی سطح تسلیم است. دووات و

1 Eccentricity
2 Viscosity Parameter

نفوذی در یکدیگر نداشته و رفتاری سختی خواهند داشت.

۴- کالیبره کردن و صحت سنجی مدل تحلیلی

ابتدا به بررسی چگونگی رفتار دیوارهای مصالح بنایی غیر مسلح ساخته شده در آزمایشگاه سازه دانشگاه تهران تحت بار پوش آور یک طرفه قرار گرفته است، با مدل سازی در نرم افزار و مقایسه نتایج آزمایشگاهی با نتایج نرم افزاری جهت صحت سنجی دو نمونه دیوار مصالح بنایی غیر مسلح شاهد URMW-C-0.5 و URMW-C-0.7 پس از آن هم به صحت سنجی دو نمونه شاهد تقویت شده با استفاده از تسمه های فولادی به نام های URMW-C-R1-0.5 و URMW-C-0.7 پرداخته شده است [۱۴]. در داخل نرم افزار اجزای محدود آباکوس با تحلیل صریح مدل ها آنالیز شده است و نتایج حاصل از کار عددی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است، نتایج دارای تطابق قابل قبولی هستند. در مدل عددی اختلاف سطح زیر نمودار نیرو-جابه جایی آزمایشگاهی و تحلیلی سازه فولادی، بتنی و آجری به ترتیب به میزان ۱۰٪، ۱۵٪، ۲۰٪ می توانند تفاوت داشته باشند. نمونه های مصالح بنایی رفتار پیچیده ای از قبیل تفاوت خواص مکانیکی آجر و ملات و همچنین پیچیدگی رفتار سطح مشترک ملات و آجر و غیر ایزوتروپ و ناهمگن بودن دارند و همچنین رفتار غیر خطی هندسی و فیزیکی آنها، مدل سازی عددی این سازه ها را بسیار پیچیده می کند.

۴-۱- صحت سنجی نمونه مدل سازی شده URMW-C-0.5

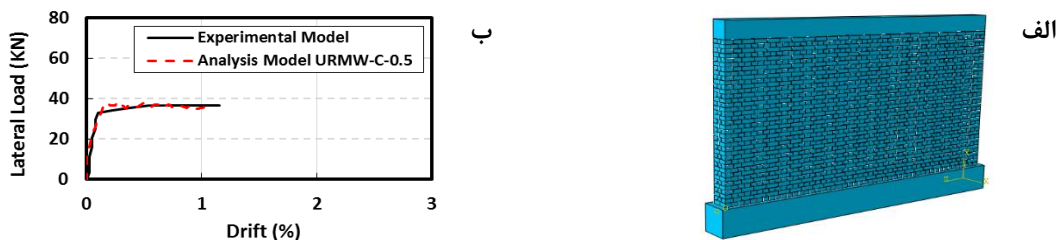
در شکل ۹-الف نمونه شاهد آزمایشگاهی URMW-C-0.5 در نرم افزار ABAQUS مدل سازی شد، شکل ۹-ب تفاوت سطح زیر نمودار نیرو-جابه جایی نمونه URMW-C-0.5 آزمایشگاهی و تحلیلی ۵/۶٪ است، در نمونه آزمایشگاهی مقاومت نهایی ۳۶/۵ کیلونیوتن، سختی مؤثر ۲۴ کیلو نیوتن بر میلی متر، شکل پذیری ۱۰ است؛ در نمونه تحلیلی مقاومت نهایی ۳۷ کیلونیوتن، سختی مؤثر ۲۵ کیلو نیوتن بر میلی متر، شکل پذیری ۱۰ است. درصد اختلاف پارامترهای مورد نظر هر کدام به ترتیب برابر با ۱/۳۶٪، ۴/۱٪، ۰٪ است. با توجه شکل ۱۰-الف مد گسیختگی حاکم در نمونه مرجع URMW-C-0.5 در جابه جایی نسبی ۱/۱٪ مد لغزشی است که در آزمایشگاه مشاهده شده است و در نمونه تحلیلی شکل ۱۰-ب مد گسیختگی هم لغزشی است، شکل ۱۰-پ و ۱۰-ت خرابی دیوار مصالح بنایی مدل سازی شده را در فشار و کشش را به ترتیب نشان می دهد. در رابطه با عدم تطابق شکل گیری ترک ها

از کنار تحت آزمایش قرار می گیرد و مقاومت فشاری منشور بنایی به دست می آید تیر بارگذاری بتنی در بالا و پایین دیوار بنایی غیر مسلح قرار دارد، این تیر بتنی مطمئناً رفتار الاستیک و خطی خواهد داشت به همین علت مقاومت فشاری بتن در نرم افزار تعریف نمی شود و بر حسب چنین تعریفی هیچ گونه خسارتی در آن مجاز نخواهد بود.

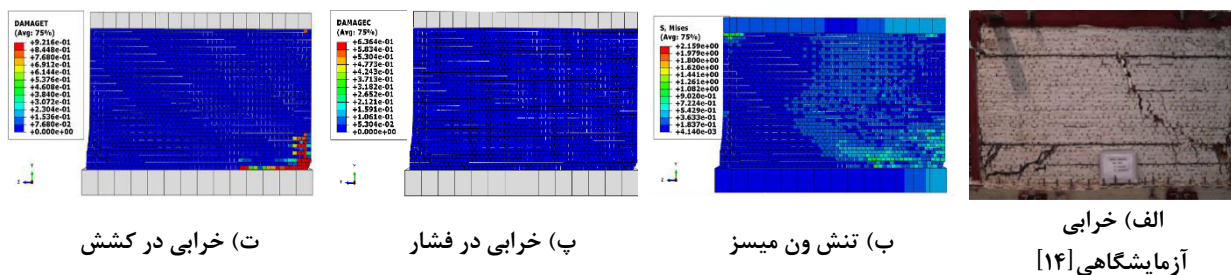
G_f^I پارامتر غیر خطی به نام انرژی شکست در کشش است، این پارامتر در حقیقت انرژی مورد نیاز برای ایجاد ترک با مساحت واحد در سطح تماس آجر و ملات است، این پارامتر از سطح زیر منحنی تنش-تغییر طول از آزمایش کشش مستقیم بر روی درزهای ملات به دست می آید و واحد آن $(N.mm/mm^2)$ است. G_f^{II} پارامتر غیر خطی به نام انرژی شکست در برش است، این پارامتر در حقیقت سطح زیر منحنی نیرو-جابه جایی درز ملات در برش می باشد و واحد آن $(N.mm/mm^2)$ است. f_t این پارامتر مقاومت کششی ملات است، جهت تعیین مقاومت کششی مستقیم ملات، از آزمایش کشش مستقیم نمونه های پایونی ملات استفاده شده است؛ بدین ترتیب شش نمونه پایونی از ملات استاندارد تهیه شده و طبق دستورالعمل استاندارد ASTM-C307-94 در دستگاه آزمایش کشش مستقیم تحت آزمایش قرار گرفته اند و واحد آن (N/mm^2) است. C چسبندگی درز ملات که از فرمول $C = 1.4.f_t$ به دست می آید. K_{mm} سختی ملات در جهت عمودی (کششی)، که واحد آن (N/mm^3) است. K_{ss} سختی برشی ملات در جهت ۱ دستگاه مختصات، که واحد آن (N/mm^3) است. K_{II} سختی برشی ملات در جهت ۲ دستگاه مختصات، که واحد آن (N/mm^3) است.

از جمله رفتار مماسی که آجرها باهم دارند، از نوع پنالتی^۱ است و $\tan \theta$ ضریب اصطکاک عددی بین ۰/۷ تا ۰/۸ است. در واقع زمانی که چسبندگی از بین می رود، فقط اصطکاک است که بر روی رفتار سطوح تأثیر گذار است. در رفتار نرمال موضوع مهم دیگر در رفتار تنش-جداشدگی، نحوه ی رفتار سطوح پس از بین رفتن چسبندگی آنها است. این رفتار به صورت رفتار فشاری و اصطکاک مدل سازی می گردد. هنگامیکه سطوح در تماس با یکدیگر نیستند، فشاری بین آنها منتقل نمی شود، ولی هنگامیکه دو سطح با یکدیگر در تماس هستند، نیروی فشاری می تواند بین آنها منتقل گردد. رفتار سطوح در راستای عمودی تماس سخت، در نظر گرفته می شود. یعنی هنگامیکه چسبندگی سطوح یا به اصطلاح ملات بین واحدهای بنایی از بین رفت دو سطح هیچ

1 Penalty

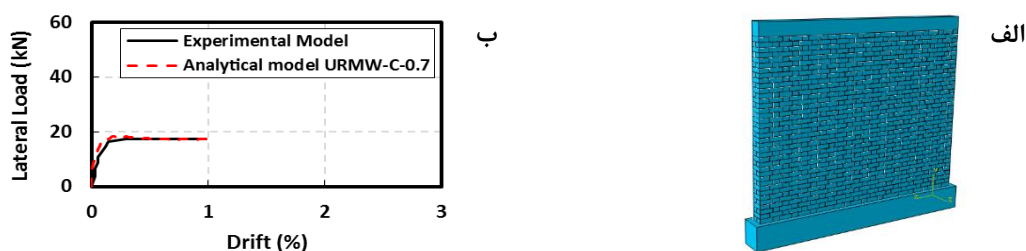


شکل ۹. الف) مدل سازی اجزا محدودی نمونه شاهد URMW-C-0.5 و ب) نمودار نیرو-جابجایی نمونه تحلیلی و نمونه شاهد آزمایشگاهی
 Fig. 9. a) Finite element model of reference specimen URMW-C-0.5, b) Force-displacement curve of analytical specimen and experimental reference specimen.



شکل ۱۰. خرابی نمونه شاهد آزمایشگاهی و نمونه تحلیلی URMW-C-0.5

Fig. 10. Experimental and finite Element of damage pattern of reference specimen URMW-C-0.5
 a) Experimental damage b) Mises stress c) Compression damage d) Tension damage



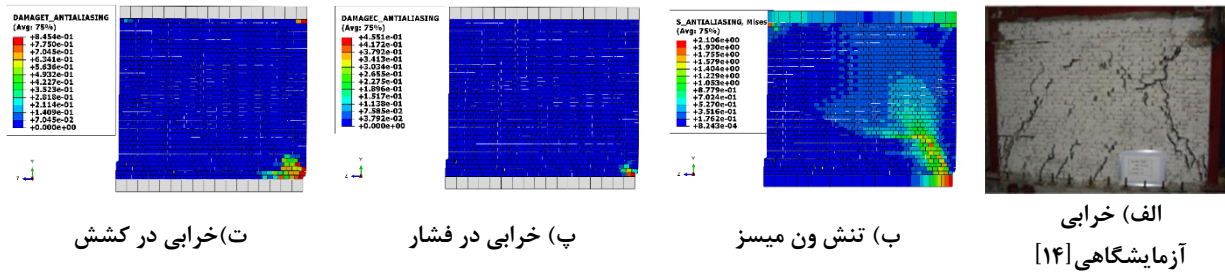
شکل ۱۱. الف) مدل سازی اجزا محدودی نمونه شاهد URMW-C-0.7 و ب) نمودار نیرو-جابجایی نمونه تحلیلی و نمونه شاهد آزمایشگاهی
 Fig. 11. a) Finite element model of reference specimen URMW-C-0.7, b) Force-displacement curve of analytical specimen and experimental reference specimen

است. در نمونه آزمایشگاهی مقاومت نهایی ۱۷ کیلونیوتن، سختی مؤثر ۱۷ کیلونیوتن بر میلی متر و شکل پذیری ۱۴ است؛ در نمونه تحلیلی مقاومت نهایی ۱۷/۵ کیلونیوتن، سختی مؤثر ۱۸ کیلونیوتن بر میلی متر و شکل پذیری ۱۵ است، در صد اختلاف پارامترهای مورد نظر هر کدام به ترتیب برابر با ۲/۹۴٪، ۵/۸۸٪، ۵/۸۸٪ است. با توجه به شکل ۱۲-الف مد گسیختگی حاکم در نمونه مرجع URMW-C-0.7 در جابه جایی نسبی ۱/۱٪ مد برشی است که در آزمایشگاه مشاهده شده است و در نمونه تحلیلی شکل ۱۲-ب مد گسیختگی هم برشی است، شکل ۱۲-پ و ۱۲-ت خرابی دیوار مصالح بنایی مدل سازی شده را در فشار و کشش را به ترتیب نشان می دهد. در رابطه با عدم تطابق شکل گیری ترکها در مدل های تحلیلی در مقایسه با نمونه های آزمایشگاهی، لازم به ذکر

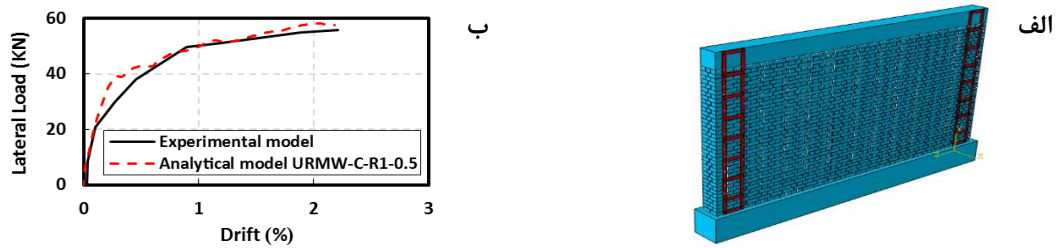
در مدل های تحلیلی در مقایسه با نمونه های آزمایشگاهی، لازم به ذکر است که در مقاله آزمایشگاهی که از نمونه های آن جهت صحت سنجی استفاده شده است بارگذاری به صورت رفت و برگشتی بوده است، اما در نرم افزار ABAQUS فقط از یک سمت پوش داده شده است، به همین علت شکل ترک های به دست آمده مقدار کمی با ترک های که در داخل آزمایشگاه به دست آمده فرق دارد.

۴-۲- صحت سنجی نمونه مدل سازی شده URMW-C-0.7

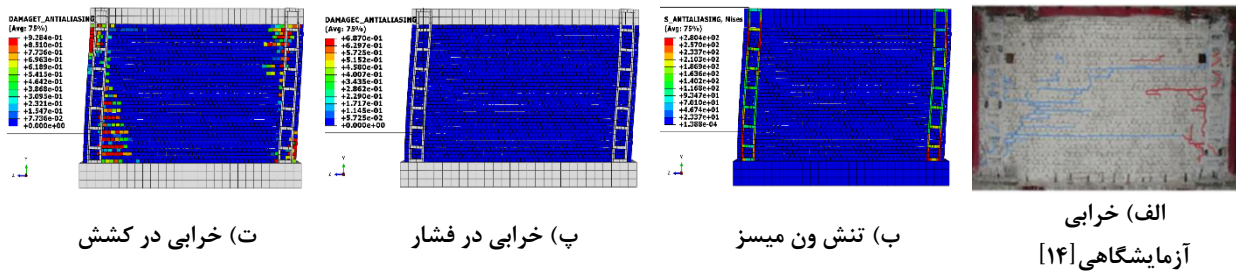
در شکل ۱۱-الف نمونه شاهد آزمایشگاهی در URMW-C-0.7 نرم افزار ABAQUS مدل سازی شد، شکل ۱۱-ب تفاوت زیر سطح نمودار نیرو-جابجایی نمونه URMW-C-0.7 آزمایشگاهی و تحلیلی ۱۴/۳٪



شکل ۱۲. خرابی نمونه شاهد آزمایشگاهی و نمونه تحلیلی URMW-C-0.7
 Fig. 12. Experimental and Finite element of damage pattern of reference specimen URMW-C-0.7
 a) Experimental damage b) Mises stress c) Compression damage d) Tension damage



شکل ۱۳. الف) مدل سازی اجزا محدودی نمونه شاهد URMW-C-R1-0.5 ب) نمودار نیرو-جابجایی نمونه تحلیلی با نمونه شاهد آزمایشگاهی
 Fig. 13. a) Finite element model of reference specimen URMW-C-R1-0.5 b) Force-displacement curve of analytical specimen and experimental reference specimen.

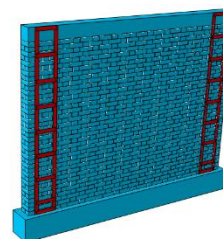
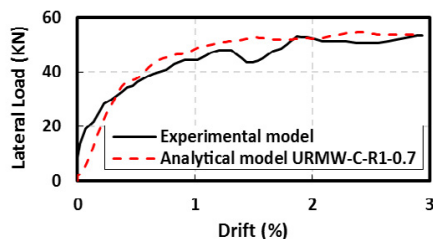


شکل ۱۴. خرابی نمونه شاهد آزمایشگاهی و نمونه تحلیلی URMW-C-R1-0.5
 Fig. 14. Experimental and Finite Element of damage pattern of reference specimen URMW-C-R1-0.5 a) Experimental damage b) Mises stress c) Compression damage d) Tension damage

مقاومت نهایی ۵۵/۷ کیلونیوتن، سختی مؤثر ۱۰/۲ کیلونیوتن بر میلی‌متر و شکل‌پذیری ۷/۲ است؛ در نمونه تحلیلی مقاومت نهایی ۵۷/۶ کیلونیوتن، سختی مؤثر ۱۲/۲ کیلونیوتن بر میلی‌متر و شکل‌پذیری ۸/۵ است، درصد اختلاف پارامترهای مورد نظر هر کدام به ترتیب برابر با ۳/۴٪، ۱۹٪، ۱۸٪ است. با توجه به شکل ۱۴-الف مد گسیختگی حاکم در نمونه مرجع URMW-C-R1-0.5 در جابه‌جایی ۲/۱۹٪ مد چرخشی-لغزشی است که در آزمایشگاه مشاهده شده است و در نمونه تحلیلی شکل ۱۴-ب مد گسیختگی چرخشی-لغزشی است، شکل ۱۴-پ و ۱۴-ت خرابی دیوار مصالح بنایی مدل‌سازی شده را در فشار و کشش را به ترتیب نشان می‌دهد. در رابطه با عدم تطابق شکل‌گیری ترک‌ها در مدل‌های تحلیلی در مقایسه با نمونه‌های آزمایشگاهی، لازم

است که در مقاله آزمایشگاهی که از نمونه‌های آن جهت صحت‌سنجی استفاده شده است بارگذاری به صورت رفت و برگشتی بوده است، اما در نرم‌افزار ABAQUS فقط از یک سمت پوش داده شده است، به همین علت شکل ترک‌های به دست آمده مقدار کمی با ترک‌های که در داخل آزمایشگاه به دست آمده فرق دارد.

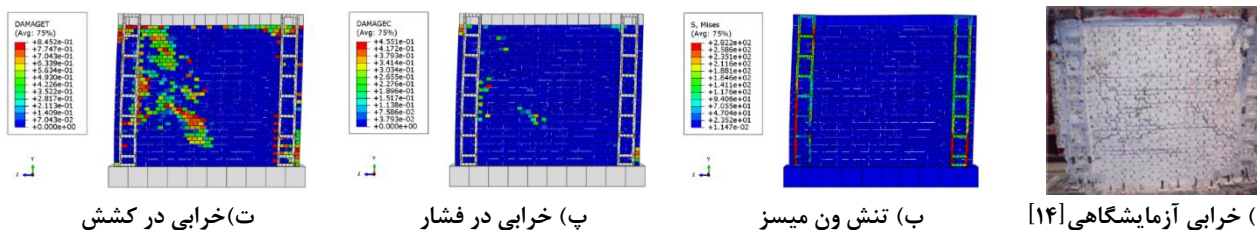
۳-۴- صحت‌سنجی نمونه شاهد تقویت شده URMW-C-R1-0.5
 در شکل ۱۳-الف نمونه شاهد آزمایشگاهی تقویت شده آزمایشگاهی URMW-C-R1-0.5 در نرم‌افزار ABAQUS مدل‌سازی شد، شکل ۱۳-ب تفاوت زیر سطح نمودار نیرو-جابجایی نمونه URMW-C-R1-0.5 آزمایشگاهی و تحلیلی ۳/۲٪ است، در نمونه آزمایشگاهی



شکل ۱۵. الف) مدل سازی اجزا محدودی نمونه شاهد URMW-C-R1-0.7 (ب) نمودار نیرو-جابجایی نمونه تحلیلی با نمونه شاهد آزمایشگاهی

Fig. 15. a) Finite Element model of reference specimen URMW-C-R1-0.7

b) Force-displacement curve of analytical specimen and experimental reference specimen



الف) خرابی آزمایشگاهی [۱۴]

ب) تنش ون میسر

پ) خرابی در فشار

ت) خرابی در کشش

شکل ۱۶. خرابی نمونه شاهد آزمایشگاهی و نمونه تحلیلی URMW-C-R1-0.7

Fig. 16. Experimental and Finite Element of damage pattern of reference specimen URMW-C-R1-0.7

a) Experimental damage b) Mises stress c) Compression damage d) Tension damage

چرخشی-لغزشی است، شکل ۱۶-پ و ۱۶-ت خرابی دیوار مصالح بنایی مدل سازی شده را در فشار و کشش را به ترتیب نشان می دهد. در رابطه با عدم تطابق شکل گیری ترکها در مدل های تحلیلی در مقایسه با نمونه های آزمایشگاهی، لازم به ذکر است که در مقاله آزمایشگاهی که از نمونه های آن جهت صحت سنجی استفاده شده است بارگذاری به صورت رفت و برگشتی بوده است، اما در نرم افزار ABAQUS فقط از دست سمت پوش داده شده است، به همین علت شکل ترک های به دست آمده مقدار کمی با ترک های که در داخل آزمایشگاه به دست آمده فرق دارد.

در جدول ۵ پارامترهای مقاومت نهایی، سختی مؤثر، شکل پذیری، سطح زیر نمودار نیرو-جابجایی نمونه های شاهد آزمایشگاهی و نمونه هایی که در نرم افزار مدل سازی و تحلیل شده است را نشان می دهد. درصد اختلاف هر پارامتر بین نمونه آزمایشگاهی و نمونه تحلیلی محاسبه شده است.

۵- معرفی مدل های تحلیلی مقاوم سازی شده با تسمه فولادی

بررسی رفتار دیوارهای بنایی تقویت شده با تسمه های فولادی هدف اصلی در این مقاله می باشد، با توجه به این موضوع که بیشتر ساختمانها در ایران ساختمان های بنایی غیر مسلح چه به صورت کلاف دار یا بدون کلاف است. در زلزله ها این ساختمانها به دلیل

به ذکر است که در مقاله آزمایشگاهی که از نمونه های آن جهت صحت سنجی استفاده شده است بارگذاری به صورت رفت و برگشتی بوده است، اما در نرم افزار ABAQUS فقط از یک سمت پوش داده شده است، به همین علت شکل ترک های به دست آمده مقدار کمی با ترک های که در داخل آزمایشگاه به دست آمده فرق دارد.

۴-۴- صحت سنجی نمونه شاهد تقویت شده URMW-C-R1-0.7

در شکل ۱۵-الف نمونه شاهد تقویت شده آزمایشگاهی URMW-C-R1-0.7 در نرم افزار ABAQUS مدل سازی شد، شکل ۱۵-ب نمودار نیرو-جابجایی مدل آزمایشگاهی و تحلیلی را نشان می دهد، در نمونه URMW-C-R1-0.7 تفاوت سطح زیر هر نمودار پوش آور آزمایشگاهی با نمودار پوش آور تحلیلی ۳/۱٪ است، در نمونه آزمایشگاهی مقاومت نهایی ۵۴ کیلونیوتن، سختی مؤثر ۱۰ کیلو نیوتن بر میلی متر و شکل پذیری ۱۰٪ است؛ در نمونه تحلیلی مقاومت نهایی ۵۴ کیلونیوتن، سختی مؤثر ۸ کیلونیوتن بر میلی متر و شکل پذیری ۸٪ است. درصد اختلاف پارامترهای مورد نظر هر کدام به ترتیب برابر با ۰٪، ۲۰٪، ۲۰٪ است. با توجه به شکل ۱۶-الف مد گسیختگی حاکم در نمونه مرجع URMW-C-R1-0.7 در جابجایی نسبی ۲/۱۹٪ مد چرخشی-لغزشی است و خردشدگی در قسمت پایین تسمه های فولادی در آزمایشگاه مشاهده شده است و در نمونه تحلیلی شکل ۱۶-ب مد گسیختگی

جدول ۵. مقایسه نمونه شاهد آزمایشگاهی و نمونه تحلیلی

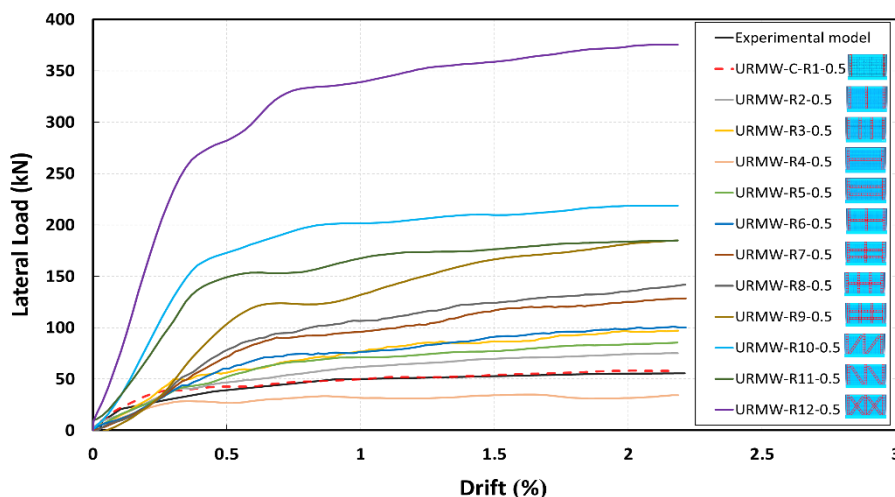
Table 5. Comparison of experimental reference specimen and analytical specimen.

نام نمونه	نوع نمونه	مقاومت نهایی (kN)	% اختلاف	سختی موثر (kN/mm)	% اختلاف	شکل پذیری	% اختلاف	سطح زیر نمودار (mm)	% اختلاف
URMW-C-0.5	آزمایشگاهی	۳۶/۵	%۱/۳۶	۲۴	%۴/۱	۱۰	%۰	۵۵۳/۷۳	%۰۵/۶
	تحلیلی	۳۷		۲۵		۱۰		۵۲۲/۶۷	
URMW-C-0.7	آزمایشگاهی	۱۷	%۲/۹۴	۱۷	%۵/۸۸	۱۴	%۵/۸۸	۲۷۳/۲۹	%۰۱۴/۳
	تحلیلی	۱۷/۵		۱۸		۱۵		۲۳۴/۱۳	
URMW-C-R1-0.5	آزمایشگاهی	۵۵/۷	%۳/۴	۱۰/۲	%۱۹	۷/۲	%۱۸	۱۴۰۷/۹۳	%۰۳/۲
	تحلیلی	۵۷/۶		۱۲/۲		۸/۵		۱۴۵۸/۰۹	
URMW-C-R1-0.7	آزمایشگاهی	۵۴	۰	۱۰	%۲۰	۱۰	%۲۰	۱۸۷۵/۱۹۹	%۰۳/۱
	تحلیلی	۵۴		۸		۸		۱۸۱۸/۷۴	

جدول ۶. نام گذاری و شکل نمونه های مقاوم سازی شده با تسمه های فولادی

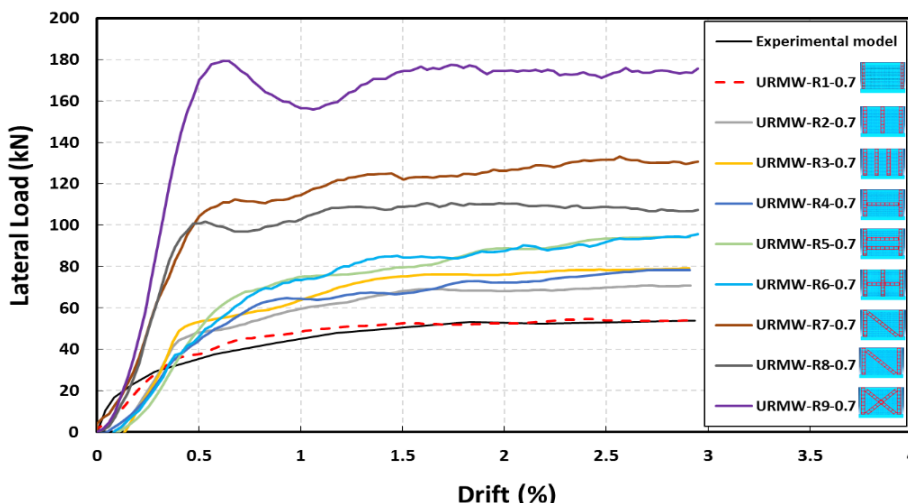
Table 6. Nomenclature and shape of reinforced with steel ties specimens

h/b=0.5		h/b=0.7	
شمای قرارگیری تسمه های فولادی	نام نمونه	شمای قرارگیری تسمه های فولادی	نام نمونه
	URMW-C-R1-0.5		URMW-C-R1-0.7
	URMW-R2-0.5		URMW-R2-0.7
	URMW-R3-0.5		URMW-R3-0.7
	URMW-R4-0.5		URMW-R4-0.7
	URMW-R5-0.5		URMW-R5-0.7
	URMW-R6-0.5		URMW-R6-0.7
	URMW-R7-0.5		URMW-R7-0.7
	URMW-R8-0.5		URMW-R8-0.7
	URMW-R9-0.5		URMW-R9-0.7
	URMW-R10-0.5		
	URMW-R11-0.5		
	URMW-R12-0.5		



شکل ۱۷. نمودارهای نیرو-جابجایی همه‌ی نمونه‌های تقویت شده URMW-R-0.5 با نسبت ارتفاع به طول ۰/۵

Fig. 17. Force-displacement curve of all retrofitted specimens URMW-R-0.5 with height to length ratio of 0.5



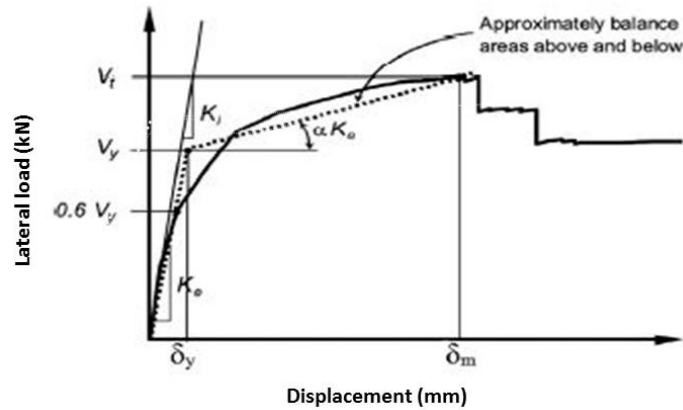
شکل ۱۸. نمودار نیرو-جابجایی نمونه‌های مقاوم‌سازی شده URMW-R-0.7 با نسبت ارتفاع به طول ۰/۷

Fig. 18. Force-displacement curve of all retrofitted specimens URMW-R-0.7 with height to length ratio of 0.7

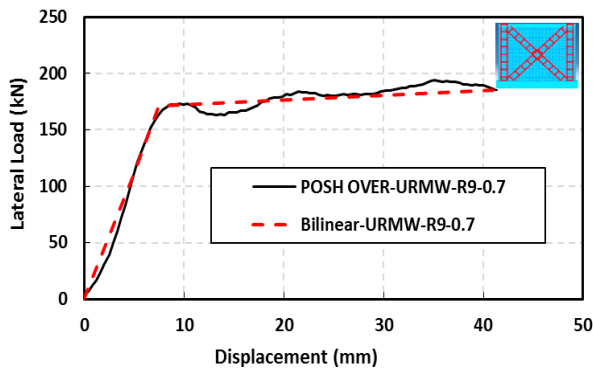
به نیروی متخصص ندارد و همچنین رفتار و درگیری خرابی بتن با آجر باعث تقویت دیوارهای باربر با تسمه فولادی می‌شود. نمونه‌های مقاوم‌سازی با شمای قرارگیری تسمه‌های فولادی و نام‌گذاری نمونه‌ها در جدول ۶ نشان داده شده است. در این نمونه‌ها تسمه‌های فولادی به صورت دو طرف دیوار قرار گرفته است.

نمونه‌های تحلیلی بر اساس نام‌گذاری و نحوه مدل‌سازی جدول ۶، در نرم افزار اجزای محدود ABAQUS مدل‌سازی شدند. با به دست آوردن نمودار نیرو-جابجایی آن با استفاده از روش FEMA356 دو خطی شده است [۱۴]. در شکل ۱۷ و ۱۸ تمام نمودارهای نمونه‌های

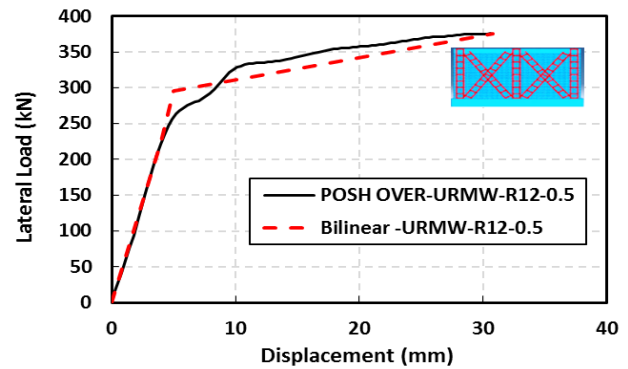
ضعف‌های عمده‌ای که دارند بسیار آسیب‌پذیر هستند، که می‌توانیم به زلزله اخیر در سال ۱۳۹۶ که در کرمانشاه رخ داده است اشاره کنیم. متأسفانه به دلیل قدیمی بودن بعضی از این سازه‌ها و یا عدم نظارت مناسب بر ساخت این ساختمان‌ها اجرای آنها از گذشته تاکنون دارای اشکالات فراوانی است برای این منظور امروزه بحث مقاوم‌سازی، ترمیم ساختمان‌های مصالح بنایی غیر مسلح موجود مطرح است، یکی از این روش‌ها مقاوم‌سازی با استفاده از تسمه‌های فولادی است. مقاوم‌سازی با تسمه‌های فولادی به دلیل اجرا آسانی که دارد و نیازی به تمیز کردن سطح دیوار ندارد، در این رابطه باعث کاهش هزینه‌ها خواهد شد و نیاز



شکل ۱۹. دوخطی سازی نمودار نیرو-جابجایی با روش FEMA356 [۵]
 Fig. 19. Bilinearization of force-displacement curve using FEMA356 method.



ب) نمونه URMW-R9-0.7



الف) نمونه URMW-R12-0.5

شکل ۲۰. نمودار دو خطی نمونه‌های تحلیلی تقویت شده
 Fig. 20. The bilinear curve of the retrofitted analytical specimens
 a) Specimen URMW-R12-0.5, b) Specimen URMW-R9-0.7

که جابه‌جایی به صورت گام به گام زیاد می‌شود و باعث هل دادن سازه می‌شود. این افزایش جابه‌جایی تا جایی ادامه می‌یابد که سازه تغییر شکل‌های پلاستیک را تجربه کند. پس از تشکیل تغییر شکل‌های پلاستیک، سازه همچنان مقاوم است و می‌توان بارگذاری را افزایش داد. این افزایش نیرو تا جایی ادامه پیدا می‌کند که سازه دچار فرو ریزش شود. برای دو خطی کردن نمودارهای نیرو-جابجایی از روشی که FEMA356 [۵] برای سازه‌های مصالح بنایی پیشنهاد داده، استفاده شد. در این روش مقاومت نهایی سازه و جابه‌جایی متناظر با آن δ_m ، سختی موثر K_e ، شکل‌پذیری μ به دست می‌آید. برای محاسبه این پارامترها از رابطه ۱ و ۲ استفاده می‌شود:

$$K_e = \frac{V_y}{\delta_y} \quad (1)$$

مقاوم‌سازی شده با تسمه فولادی در روی دیوار URMW-R-0.5 و URMW-R-0.7 نشان داده شده، که تغییرات و اثرات تسمه‌های فولادی بر روی دیوار مصالح بنایی قابل مشاهده است. به علت تعداد زیاد نمونه‌های تقویت شده از هر نمونه دیوار مصالح بنایی با نسبت ارتفاع به طول ۰/۵ و ۰/۷ با استفاده از روش FEMA356 یک نمونه دو خطی شده و در شکل ۲۰ نشان داده شده است، و در جدول ۷ و ۸ نتایج دو خطی دیگر نمونه‌ها را می‌توان با یکدیگر مقایسه نمود.

۶- نحوه دو خطی کردن نمودارهای نمونه‌های مقاوم سازی شده

تحلیل استاتیکی غیر خطی پوش آور^۱ یک نوع تحلیل افزایشی است

جدول ۷. نتایج دو خطی سازی نمونه‌های تقویت شده URMW-R-0.5

Table 7. Results of bilinearization parameter retrofitted URMW-R-0.5

نام نمونه	δ_y	δ_m	V_y	شکل‌پذیری	سختی مؤثر (KN/mm)	مقاومت نهایی (kN)
URMW-C-R1-0.5	۳/۶	۳۰/۵	۴۴	۸/۵	۱۲/۲	۵۷/۶
URMW-R2-0.5	۴/۷	۳۰/۵	۴۹	۶/۵	۱۰/۵	۷۵/۲۱
URMW-R3-0.5	۴/۷	۳۰/۵	۶۲	۶/۵	۱۳/۲	۹۷/۲۶
URMW-R4-0.5	۴	۳۰/۵	۲۹	۷/۶	۷/۵	۳۴/۴
URMW-R5-0.5	۶/۵	۳۰/۵	۶۱	۴/۷	۹/۴	۸۵/۵
URMW-R6-0.5	۸/۵	۳۰/۵	۷۵	۳/۶	۸/۸	۱۰۰
URMW-R7-0.5	۸/۲	۳۰/۵	۹۱	۳/۸	۱۱	۱۲۹
URMW-R8-0.5	۹	۳۰/۵	۱۰۰	۳/۴	۱۱/۱۱	۱۴۲
URMW-R9-0.5	۸/۷	۳۰/۵	۱۲۶	۳/۵	۱۴/۵	۱۸۵
URMW-R10-0.5	۶	۳۰/۵	۱۵۵	۵	۲۵/۱۱	۱۸۵
URMW-R11-0.5	۵/۵	۳۰/۵	۱۸۲	۵/۶	۳۳	۲۱۹
URMW-R12-0.5	۵	۳۰/۵	۲۹۵	۶/۶	۵۹	۳۷۵/۵
میانگین نمونه‌های تقویت شده				۵/۷	۱۵/۴۴	۱۶۱/۵

جدول ۸. نتایج دو خطی کردن نمونه‌های تقویت شده URMW-R-0.7

Table 8. Results of bilinearization parameter retrofitted URMW-R-0.7

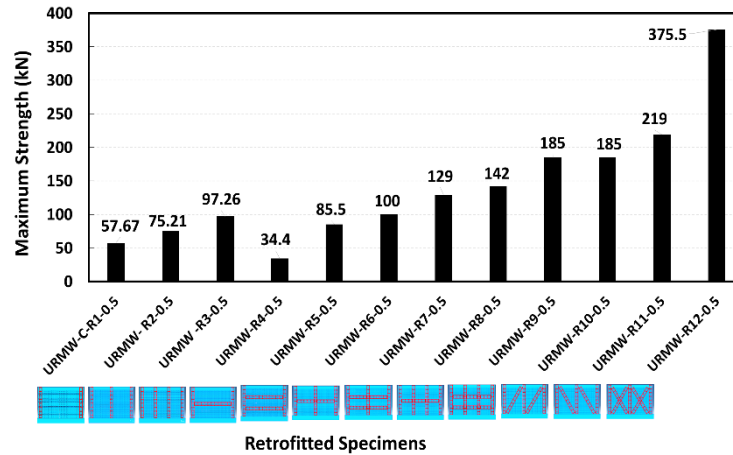
نام نمونه	δ_y	δ_m	V_y	شکل‌پذیری	سختی مؤثر (Kn/mm)	مقاومت نهایی (kN)
URMW-C-R1-0.7	۵/۵	۴۱	۴۵	۸	۸	۵۴
URMW-R2-0.7	۸	۴۱	۵۰	۵	۶/۲۵	۶۶/۳
URMW-R3-0.7	۸	۴۱	۵۷	۵/۱	۷/۱	۸۰
URMW-R4-0.7	۹	۴۱	۵۸	۴/۵	۶/۴	۷۶/۳۵
URMW-R5-0.7	۷	۴۱	۷۰	۴/۱	۷	۹۳/۳
URMW-R6-0.7	۱۰	۴۱	۶۷	۴/۱	۶/۷	۹۵
URMW-R7-0.7	۷	۴۱	۱۱۱	۵/۸	۱۵/۸	۱۳۴
URMW-R8-0.7	۷	۴۱	۱۰۰	۵/۸	۱۴/۲۷	۱۱۹
URMW-R9-0.7	۷	۴۱	۱۷۰	۵/۹	۲۴	۱۸۵
میانگین نمونه‌های تقویت شده				۵/۴	۱۰/۶	۱۰۰/۳۳

است. هرچه تعداد این تسمه‌های فولادی بیشتر شود مقاومت نهایی هم بیشتر می‌شود میانگین مقاومت نهایی در تمام نمونه‌های تقویت شده حدوداً ۱۶۱ کیلونیوتن است. در نمونه‌های URMW-C-R1-0.5 و URMW-R2-0.5 و URMW-R3-0.5 که شکل آن‌ها را در جدول ۶ قرار دارد، با تسمه‌های فولادی قائم تقویت شده‌اند. شکل ۲۱ نشان می‌دهد مقاومت نهایی آنها نسبت به نمونه‌ای که دیوار بدون تقویت است به ترتیب ۵۵٪، ۱۰۳٪، ۱۶۳٪ افزایش مقاومت داشته است. در شکل ۲۳ نشان می‌دهد سختی مؤثر نسبت به نمونه بدون تقویت به ترتیب ۵۱٪، ۵۸٪، ۴۷٪ کاهش داشته است. در شکل ۲۲ نشان می‌دهد

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

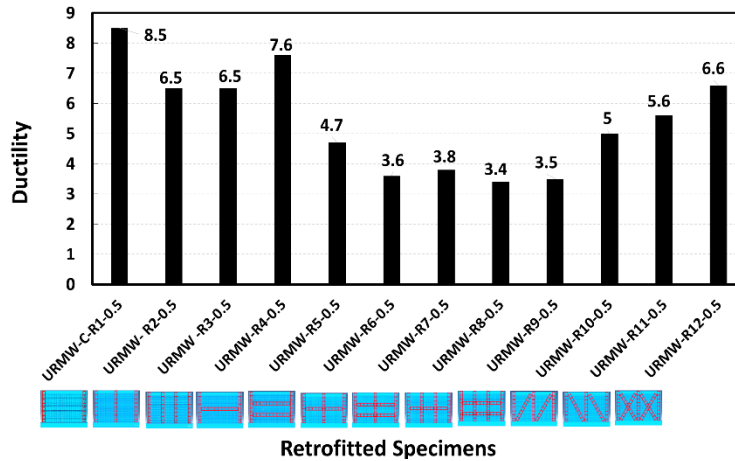
V_y مقاومت تسلیم، δ_y جابه‌جایی متناظر با مقاومت تسلیم و δ_m جابه‌جایی با حداکثر مقاومت سازه که واحد آن‌ها به ترتیب کیلونیوتن و میلی‌متر است، شکل ۱۹.

همانطور که در شکل ۲۱ مشاهده می‌شود، با مقاوم کردن دیوار مصالح بنایی نمونه‌های URMW-R-0.5 که نسبت ارتفاع به طول این نمونه‌ها برابر است با ۰/۵ و با تسمه‌های فولادی مقاوم شده‌اند، مقاومت نهایی آن‌ها نسبت به دیوار بنایی غیر مسلح افزایش پیدا کرده



شکل ۲۱. نمودار مقایسه مقاومت نهایی نمونه‌های URMW-R-0.5 با نسبت ارتفاع به طول ۰/۵

Fig. 21. Comparison of the ultimate strength for specimens URMW-R-0.5 with height to length ratio of 0.5



شکل ۲۲. نمودار مقایسه شکل پذیری نمونه‌های URMW-R-0.5 با نسبت ارتفاع به طول ۰/۵

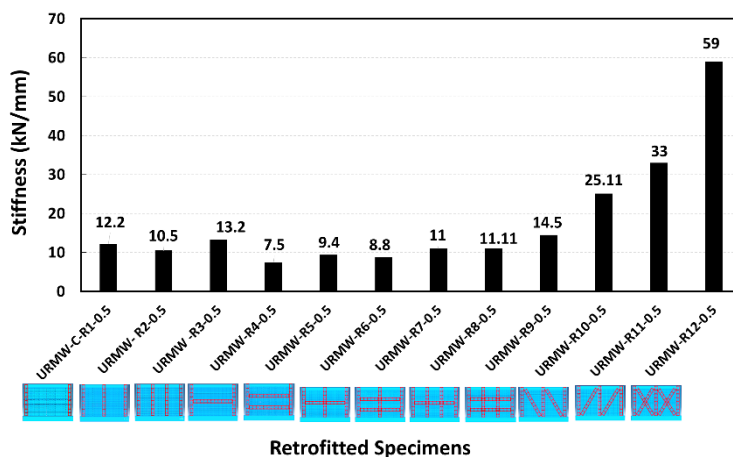
Fig. 22. Comparison of the ductility for specimens URMW-R-0.5 with height to length ratio of 0.5

مؤثر نسبت به نمونه بدون تقویت به ترتیب ۷۰٪، ۱۲/۴٪ کاهش داشته است. در شکل ۲۲ نشان می‌دهد شکل‌پذیری نسبت به نمونه بدون تقویت به ترتیب ۲۴٪، ۵۳٪ کاهش داشته است. در شکل ۲۱ مشاهده می‌شود، بیشترین مقاومت نهایی را در تقویت با تسمه‌های افقی نمونه‌ای دارد که تعداد بیشتری تسمه افقی داشته باشد. میانگین درصد مقاومت نهایی، سختی مؤثر، شکل‌پذیری آنها به ترتیب ۶۰٪، ۴۱/۲٪ و ۳۸٪ است.

در نمونه‌های URMW-R6-0.5 و URMW-R7-0.5 و URMW-R8-0.5 و URMW-R9-0.5 که شکل آنها را در جدول ۶ قرار دارد، با تسمه‌های فولادی به صورت شبکه‌ای تقویت شده‌اند. شکل ۲۱ نشان می‌دهد مقاومت نهایی آنها به ترتیب برابر با ۱۰۰، ۱۲۹، ۱۴۲، ۱۸۵ کیلونیوتن است، که نسبت به نمونه‌ای که دیوار بدون تقویت است به

شکل‌پذیری نسبت به نمونه بدون تقویت به ترتیب ۱۵٪، ۳۵٪، ۳۵٪ کاهش داشته است. در شکل ۲۱ مشاهده می‌شود بیشترین مقاومت را در تقویت با تسمه‌های قائم نمونه‌ای می‌دهد که تعداد بیشتری تسمه قائم داشته باشد، که میانگین درصد مقاومت نهایی، سختی مؤثر، شکل‌پذیری در نمونه‌های تقویت شده با تسمه فولادی به ترتیب برابر با ۱۱۷٪، ۵۲٪ و ۲۸٪ است.

در نمونه‌های URMW-R4-0.5 و URMW-R5-0.5 که شکل آنها را در جدول ۶ قرار دارد، با تسمه‌های افقی که به تسمه‌های قائم کنار دیوار متصل است تقویت شده‌اند، شکل ۲۱ نشان می‌دهد مقاومت نهایی آنها به ترتیب برابر با ۳۴/۴، ۸۵/۵ کیلونیوتن است که نسبت به نمونه‌ای که دیوار بدون تقویت است به ترتیب ۷٪، ۱۳۱٪ کاهش و افزایش مقاومت داشته است. در شکل ۲۳ نشان می‌دهد سختی



شکل ۲۳. نمودار مقایسه سختی مؤثر نمونه‌های URMW-R-0.5 با نسبت ارتفاع به طول ۰/۵

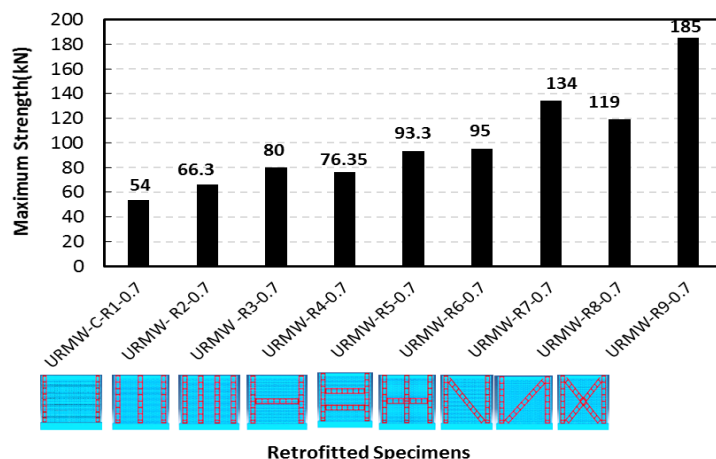
Fig. 23. Comparison of the effective stiffness for specimens URMW-R-0.5 with height to length ratio of 0.5

نمونه بدون تقویت افزایش پیدا کرده است و افزایش دو برابری سختی مؤثر و بیشترین شکل‌پذیری را داشته است. چون شکل‌پذیری پدیده‌ای حساسی است و به δ_y و δ_m بستگی دارد، مقدار آن به راحتی تغییر می‌کند با افزایش δ_y شکل‌پذیری کاهش می‌یابد، ولی نمونه ضربدری و مورب نسبت به دیگر نمونه‌ها شکل‌پذیری بیشتری دارد و میانگین شکل‌پذیری و سختی مؤثر در نمونه‌های تقویت شده به ترتیب برابر ۵/۷ و ۱۵/۴۴ است.

با توجه به شکل ۱۸ همانطور که مشاهده می‌شود، با مقاوم کردن دیوار مصالح بنایی نمونه‌های URMW-R-0.7 که نسبت ارتفاع به طول این نمونه‌ها برابر با ۰/۷ و با تسمه‌های فولادی مقاوم شده‌اند، مقاومت نهایی آن‌ها نسبت به دیوار بنایی غیر مسلح افزایش پیدا کرده است. هرچه تعداد این تسمه‌های فولادی بیشتر شود مقاومت نهایی هم بیشتر می‌شود؛ میانگین مقاومت نهایی نمونه‌های تقویت شده حدوداً ۱۰۰ کیلونیوتن است. در نمونه‌های URMW-C-R1-0.7 و URMW-R2-0.7 و URMW-R3-0.7 که شکل آن‌ها را در جدول ۶ قرار دارد، با تسمه‌های قائم تقویت شده‌اند. در شکل ۲۴ نشان می‌دهد، مقاومت نهایی آن‌ها به ترتیب برابر با ۵۴، ۶۶/۳، ۸۰ کیلونیوتن است، که نسبت به نمونه‌ای که دیوار بدون تقویت است به ترتیب ۲۰۸٪، ۲۷۸٪، ۳۵۷٪ افزایش مقاومت داشته است. در شکل ۲۶ نشان می‌دهد، سختی مؤثر نسبت به نمونه اولیه به ترتیب ۵۵٪، ۶۵٪، ۶۰٪ کاهش داشته است. در شکل ۲۵ نشان می‌دهد، شکل‌پذیری نسبت به نمونه بدون تقویت به ترتیب ۴۷٪، ۶۶٪، ۶۶٪ کاهش داشته است. همانطور که در شکل ۲۴ مشاهده می‌شود، بیشترین مقاومت را در تقویت با تسمه‌های قائم

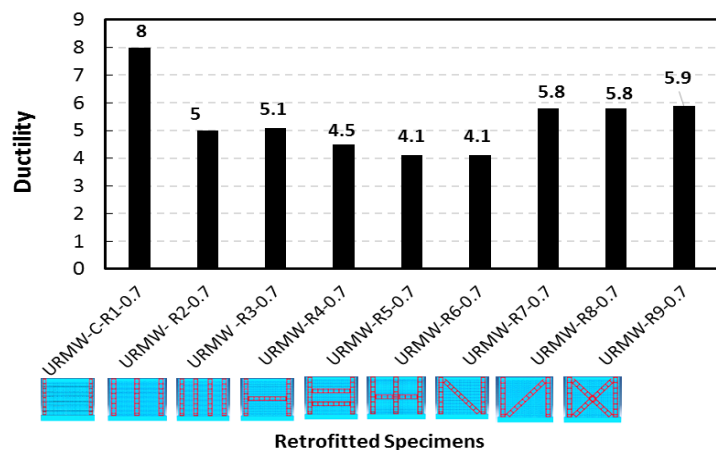
ترتیب ۱۷۰٪، ۲۴۸٪، ۲۸۴٪، ۴۰۰٪ افزایش مقاومت داشته است. در شکل ۲۳ نشان می‌دهد سختی مؤثر نسبت به نمونه بدون تقویت به ترتیب ۶۵٪، ۵۶٪، ۴۲٪ کاهش داشته است. در شکل ۲۲ نشان می‌دهد شکل‌پذیری نسبت به نمونه بدون تقویت به ترتیب ۶۴٪، ۶۲٪، ۶۶٪، ۶۵٪ کاهش داشته است. در شکل ۲۱ مشاهده می‌شود بیشترین مقاومت را در تقویت با تسمه‌های فولادی نمونه‌ای می‌دهد که تعداد بیشتری شبکه داشته باشد. میانگین درصد مقاومت نهایی، سختی مؤثر، شکل‌پذیری به ترتیب برابر با ۲۷۵٪، ۵۵٪ و ۶۵٪ است. در نمونه‌های URMW-R10-0.5 و URMW-R11-0.5 که شکل آن‌ها را در جدول ۶ قرار دارد، با تسمه‌های مورب و ضربدری تقویت شده‌اند، در شکل ۲۱ نشان می‌دهد مقاومت نهایی آن‌ها به ترتیب برابر با ۱۸۵، ۲۱۹، ۳۷۵/۵ کیلونیوتن است که نسبت به نمونه‌ای که دیوار بدون تقویت است، به ترتیب ۴۰۰٪، ۴۹۲٪، ۹۱۵٪ افزایش مقاومت داشته است. در شکل ۲۳ نشان می‌دهد، سختی مؤثر نسبت به نمونه بدون تقویت به ترتیب ۴۴٪، ۳۲٪، ۱۳۶٪ افزایش داشته است. در شکل ۲۲ نشان می‌دهد شکل‌پذیری نسبت به نمونه بدون تقویت به ترتیب ۵۰٪، ۴۴٪، ۳۴٪ کاهش داشته است. در شکل ۲۱ مشاهده می‌شود بیشترین مقاومت را در تقویت با تسمه‌های مورب نمونه‌ای می‌دهد که به صورت ضربدری است. میانگین درصد مقاومت نهایی، سختی مؤثر، شکل‌پذیری به ترتیب برابر با ۶۰٪، ۷۰٪ و ۴۳٪ است.

نمونه ضربدری دیوار بنایی با نسبت ارتفاع به طول ۰/۵ بیشترین مقاومت نهایی در دو سمت دیوار دارد، که حدوداً ۱۰ برابر مقاومت نهایی



شکل ۲۴. نمودار مقایسه مقاومت نهایی نمونه‌های URMW-R-0.7 با نسبت ارتفاع به طول ۰/۷

Fig. 24. Comparison of the ultimate strength for specimens URMW-R-0.7 with height to length ratio of 0.7



شکل ۲۵. نمودار مقایسه شکل پذیری نمونه‌های URMW-R-0.7 با نسبت ارتفاع به طول ۰/۷

Fig. 25. Comparison of the ductility for specimens URMW-R-0.7 with height to length ratio of 0.7

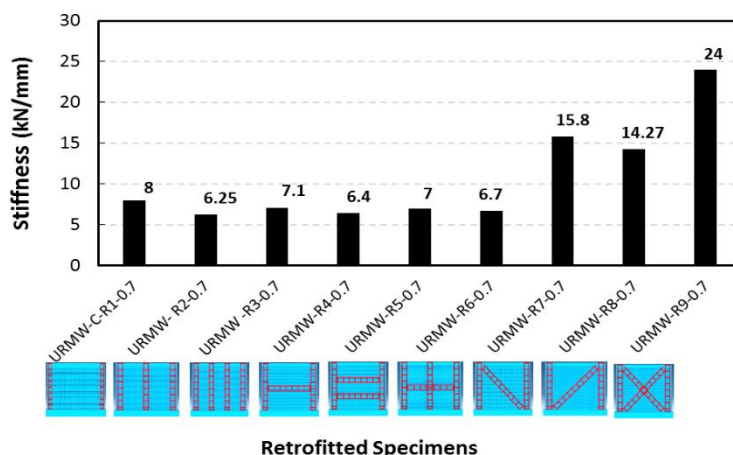
بیشترین مقاومت را در تقویت با تسمه‌های افقی نمونه‌ای می‌دهد که تعداد بیشتری تسمه افقی داشته باشد. میانگین درصد مقاومت نهایی، سختی مؤثر، شکل‌پذیری به ترتیب برابر با ۳۸۵٪، ۶۲٪ است.

در نمونه‌های URMW-R6-0.7 که شکل آن را در جدول ۶ قرار دارد، با تسمه‌های فولادی به صورت شبکه‌ای تقویت شده‌اند. در شکل ۲۴ نشان می‌دهد، مقاومت آنها به ترتیب برابر با ۹۵ کیلونیوتن است، که نسبت به نمونه‌ای که دیوار بدون تقویت است به ترتیب ۴۴۳٪ افزایش مقاومت داشته است. در شکل ۲۶ نشان می‌دهد، سختی مؤثر نسبت به نمونه اولیه به ترتیب ۶۳٪ کاهش داشته است. در شکل ۲۵ نشان می‌دهد، شکل‌پذیری نسبت به نمونه بدون تقویت به ترتیب ۷۳٪ کاهش داشته است.

همانطور که در شکل ۲۴ مشاهده می‌شود در نمونه‌های URMW

نمونه‌ای می‌دهد که تعداد بیشتری تسمه قائم داشته باشد. میانگین درصد مقاومت نهایی، سختی مؤثر، شکل‌پذیری به ترتیب برابر با ۲۸۱٪، ۶۰٪ و ۶۰٪ است.

در نمونه‌های URMW-R4-0.7 و URMW-R5-0.7 که شکل آنها را در جدول ۶ قرار دارد، با تسمه‌های افقی که به تسمه‌های قائم کنار دیوار متصل است تقویت شده‌اند. در شکل ۲۴ نشان می‌دهد، مقاومت آنها به ترتیب برابر با ۷۶/۳۵، ۹۳/۳ کیلونیوتن است که نسبت به نمونه‌ای که دیوار بدون تقویت است به ترتیب ۳۳۷٪، ۴۳۳٪ افزایش مقاومت داشته است. در شکل ۲۶ نشان می‌دهد، سختی مؤثر نسبت به دیوار بدون تقویت به ترتیب ۶۴٪، ۶۱٪ کاهش داشته است. در شکل ۲۵ شکل‌پذیری نسبت به دیوار بدون تقویت به ترتیب ۷۰٪، ۷۳٪ کاهش داشته است. همانطور که در شکل ۲۴ مشاهده می‌شود،



شکل ۲۶. نمودار مقایسه سختی مؤثر نمونه‌های URMW-R-0.7 با نسبت ارتفاع به طول ۰/۷

Fig. 26. Comparison of the effective stiffness for specimens URMW-R-0.7 with height to length ratio of 0.7

مصالح بنایی بهترین روش برای جلوگیری از خسارت‌های مالی و جانی مقاوم‌سازی و بهسازی است. روش‌های زیادی برای مقاوم‌سازی وجود دارد که از میان آنها در این مقاله از روش مقاوم‌سازی با استفاده از تسمه‌های فولادی در دو طرف دیوار بنایی غیر مسلح با نسبت ارتفاع به طول ۰/۵ و ۰/۷ استفاده شده است. با توجه به عدم وجود مدارک فنی و آیین‌نامه‌های کافی و کمبود نتایج و مشاهدات آزمایشگاهی در زمینه بهسازی لرزه‌ای دیوارهای بنایی غیر مسلح با استفاده از تسمه‌های فولادی انجام چنین تحلیلی با چیدمان‌های مختلف تسمه‌های فولادی از قبیل افقی، قائم، مورب، ضربدری و شبکه در دو طرف دیوار بنایی غیر مسلح امر ضروری به نظر می‌رسد. هرکدام از این چیدمان‌ها اثر متفاوتی بر مقاومت نهایی و شکل‌پذیری دیوار بنایی دارند با دو خطی کردن نمودارهای نیرو-جابجایی نمونه‌ها این اثرات را با یکدیگر مقایسه شده است. از مهم‌ترین اثراتی که بر بهبود عملکرد لرزه‌ای دیوار بنایی می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

۱- در نمونه‌های تقویت شده در دیوارهای مصالح بنایی غیر مسلح با نسبت‌های ارتفاع به طول ۰/۵ و ۰/۷، میانگین افزایش مقاومت به ترتیب ۱۶۱/۵ و ۱۰۰ کیلونیوتن نسبت به نمونه‌های دیوارهای بنایی شاهد بدون تقویت می‌باشد.

۲- برای نمونه‌های با نسبت ارتفاع به طول ۰/۵ و ۰/۷ مقاومت نهایی دیوار بنایی تقویت شده با تسمه فولادی در دو طرف دیوار به صورت قائم به مراتب بیشتر از مقاومت نظیر دیوار بدون تسمه فولادی است حدود ۱۱۷٪ و ۲۰۸٪ به ترتیب مقاومت نمونه‌ها افزایش پیدا می‌کند.

۳- تسمه‌های فولادی که به صورت ضربدری بر روی دیوار نصب

URMW-R7-0.7 و URMW-R8-0.7 و URMW-R9-0.7 که شکل آن‌ها را در جدول ۶ قرار دارد، با تسمه‌های مورب تقویت شده‌اند مقاومت آنها به ترتیب برابر با ۱۳۴، ۱۱۹، ۱۸۵ کیلونیوتن است که نسبت به نمونه‌ای که دیوار بدون تقویت است به ترتیب ۶۶۵٪، ۵۸۰٪، ۹۵۸٪ افزایش مقاومت داشته است. شکل ۲۶ نشان می‌دهد، سختی مؤثر نسبت به نمونه بدون تقویت به ترتیب ۱۲٪، ۲۰٪، ۳۴٪ کاهش داشته است. شکل ۲۵ نشان می‌دهد، شکل‌پذیری نسبت به نمونه بدون تقویت به ترتیب ۶۱٪، ۶۱٪، ۶۰٪ کاهش داشته است. همانطور که در شکل ۲۴ مشاهده می‌شود، بیشترین مقاومت را در تقویت با تسمه‌های مورب نمونه‌ای می‌دهد که به صورت ضربدری است. میانگین درصد آنها برابر با ۷۳۵٪، ۰/۱۶٪ و ۶۰٪ است.

در نمونه ضربدری دیوار بنایی با نسبت ارتفاع به طول ۰/۷ افزایش ۱۰ برابری مقامت نهایی و افزایش دو برابری سختی مؤثر مشاهده شده است. با توجه به نتایج به دست آمده در هر دو دیوار که نسبت ارتفاع به طول ۰/۵ و ۰/۷ را دارند، شمای قرارگیری تسمه‌های فولادی بهترین حالت قرارگیری نمونه ضربدری که به تسمه‌های فولادی قائم کنار دیوار متصل شده است؛ علاوه بر افزایش مقاومت نهایی و شکل‌پذیری در هنگام زلزله به دلیل محبوس شدن دیوارها در داخل تسمه‌های فولادی شکست برشی ترد و ناگهانی نبوده است، و از وقوع شکست زود هنگام جلوگیری به عمل می‌آید و در هنگام شکست خارج از صفحه از پرتاب مصالح به بیرون جلوگیری می‌نماید.

نتیجه گیری

با توجه به لرزه‌خیزی کشورمان و وجود ساختمان‌های موجود با

انرژی شکست در برش، $(N.mm/mm^2)$	G_f^I
سختی ملات در جهت عمودی (کششی)، (N/mm^3)	K_m
سختی ملات در جهت برشی محور ۱، (N/mm^3)	K_{ss}
سختی ملات در جهت برشی محور ۲، (N/mm^3)	K_{tt}
Unreinforced Masonry Wall-Control-Height/Length	URMW-C-H/B
Unreinforced Masonry Wall-Control-Retrofit-Height/Length	URMW-C-R-H/B
چگالی مصالح بنایی، (Ton/mm^3)	ρ
ضریب پواسون	ν
ضریب اصطکاک	$\tan \theta$

مراجع

- [1] K.A. Korkmaz, F. Demir, M. Sivri, Earthquake assessment of R/C structures with masonry infill walls, International journal of science & technology, 2(2) (2007) 155-164.
- [2] P.J.B.B. Lourenço, Computational strategies for masonry structures, (1997).
- [3] B. Borah, V. Singhal, H.B. Kaushik, Sustainable housing using confined masonry buildings, SN Applied Sciences, 1(9) (2019) 983.
- [4] ASCE/SEL41-06, Seismic rehabilitation of existing buildings, American Society of Civil Engineers, (2007).
- [5] F. Prestandard, commentary for the seismic rehabilitation of buildings (FEMA356), Washington, DC: Federal Emergency Management Agency, 7 (2000).
- [6] Publication360, Instruction for Seismic Rehabilitation of Existing Buildings, In Pershian, (2013).
- [7] A. Parghi, M.S. Alam, A review on the application of sprayed-FRP composites for strengthening of concrete and masonry structures in the construction sector, Composite Structures, 187 (2018) 518-534.
- [8] A. Borri, M. Corradi, G. Castori, A. Molinari, Stainless steel strip-A proposed shear reinforcement for masonry wall panels, Construction and Building Materials, 211 (2019) 594-604.
- [9] H. Sadek, S. Lissel, Seismic performance of masonry

شده است، نقش مؤثرتری در افزایش مقاومت نهایی نسبت به تسمه‌های فولادی که به صورت افقی و قائم بر روی دیوار نصب شده‌اند دارند. در حالی که در ایجاد مقاومت برشی لازم تسمه‌های فولادی قائم و افقی دارای سهم یکسان می‌باشند. تسمه‌های فولادی ضربدری افزایش ۱۰ برابری مقاومت نهایی و دو برابری سختی مؤثر نسبت به نمونه تقویت نشده را نیز دارند.

۴- بهترین حالت‌های قرارگیری برای تقویت بر روی دیوارهای مصالح بنایی مشابه نمونه دیوار مصالح بنایی با نسبت ارتفاع به طول ۰/۵ در نمونه‌های مقاوم شده با تسمه قائم، نمونه دیوار URMW-R3-0.5 و برای نمونه‌های مقاوم شده با تسمه افقی، نمونه دیوار URMW-R5-0.5 و برای نمونه‌های مقاوم شده به صورت شبکه‌ای، نمونه دیوار URMW-R9-0.5 و برای نمونه‌های مقاوم شده با تسمه مورب، نمونه دیوار URMW-R12-0.5 پیشنهاد می‌شود.

۵- بهترین حالت‌های قرارگیری برای تقویت بر روی دیوارهای مصالح بنایی مشابه نمونه دیوار مصالح بنایی با نسبت ارتفاع به طول ۰/۷ در نمونه‌های مقاوم شده با تسمه قائم، نمونه دیوار URMW-R3-0.7 و برای نمونه‌های مقاوم شده با تسمه افقی، نمونه دیوار URMW-R5-0.7 و برای نمونه‌های مقاوم شده به صورت شبکه‌ای، نمونه دیوار URMW-R6-0.7 و برای نمونه‌های مقاوم شده با تسمه مورب، نمونه دیوار URMW-R9-0.7 پیشنهاد می‌شود.

۶- با مقاوم کردن دیوار مصالح بنایی با استفاده از تسمه‌های فولادی به دلیل محبوس شدن دیوارها در داخل تسمه‌های فولادی شکست برشی ترد و ناگهانی نبوده است و از وقوع شکست زود هنگام جلوگیری به عمل می‌آید.

در این مقاله نتایج به دست آمده بر اساس انجام آنالیزهای استاتیکی غیر خطی است، که بایستی برای تکمیل نتایج از آنالیزهای دینامیکی غیر خطی نیز استفاده شود.

نشانه‌ها و علائم

علائم انگلیسی

مدول الاستیسیته مصالح بنایی، (N/mm^2)	E
مقاومت کششی درز ملات، (N/mm^2)	f_t
انرژی شکست در کشش، $(N.mm/mm^2)$	G_f^I

- strips, Earthquakes and Structures, 14(5) (2018) 449-458.
- [16] K. Dong, Z.-a. Sui, J. Jiang, X. Zhou, Experimental Study on Seismic Behavior of Masonry Walls Strengthened by Reinforced Mortar Cross Strips, Sustainability, 11(18) (2019) 4866.
- [17] J.M. Proença, A.S. Gago, A. Vilas Boas, Structural window frame for in-plane seismic strengthening of masonry wall buildings, International Journal of Architectural Heritage, 13(1) (2019) 98-113.
- [18] P.B. Lourenço, A user/programmer guide for the micro-modeling of masonry structures, Report, 3(1.31) (1996) 35.
- [19] B. Pantò, L. Silva, G. Vasconcelos, P. Lourenço, Macro-modelling approach for assessment of out-of-plane behavior of brick masonry infill walls, Engineering Structures, 181 (2019) 529-549.
- [20] A. Drougkas, P. Roca, C. Molins, Experimental analysis and detailed micro-modeling of masonry walls subjected to in-plane shear, Engineering Failure Analysis, 95 (2019) 82-95.
- [21] I. ABAQUS, ABAQUS/THy User manual, in, Version, 2011.
- [22] A. Committee, I.O.f. Standardization, Building code requirements for structural concrete (ACI 318-08) and commentary, in, American Concrete Institute, 2008.
- [23] W.-F. Chen, Plasticity in reinforced concrete, J. Ross Publishing, 2007.
- walls with GFRP and Geogrid Bed joint reinforcement, Construction and Building Materials, 41 (2013) 977-989.
- [10] B. Doran, N. Yuzer, S. Aktan, D. Oktay, S. Ulukaya, Numerical Modeling of Traditional Masonry Walls Strengthened with Grout Injection, International Journal of Architectural Heritage, (2019) 1-16.
- [11] M. Deng, Z. Dong, P. Ma, Cyclic loading tests of flexural-failure dominant URM walls strengthened with engineered cementitious composite, Engineering Structures, 194 (2019) 173-182.
- [12] M. ElGawady, P. Lestuzzi, M. Badoux, Retrofitting of masonry walls using shotcrete, in: 2006 NZSEE Conference, Paper, 2006.
- [13] S. Dadras Eslamlou, M. Masia, Y. Totoev, A. Page, Effect of retrofitting on the structural factors for seismic assessment of unreinforced masonry structures: a review, Australian Journal of Structural Engineering, 20(1) (2019) 26-53.
- [14] A. Darbhanzi, M. Marefat, M. Khanmohammadi, Investigation of in-plane seismic retrofit of unreinforced masonry walls by means of vertical steel ties, Construction and Building Materials, 52 (2014) 122-129.
- [15] A. Darbhanzi, M.S. Marefat, M. Khanmohammadi, A. Moradimanesh, H. Zare, Seismic performance of retrofitted URM walls with diagonal and vertical steel

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

D. Ostad, J. Shafaei, Analytical study of seismic performance of retrofitted unreinforced masonry walls using steel plates, Amirkabir J. Civil Eng., 52(12) (2021) 3161-3182.

DOI: [10.22060/ceej.2019.16570.6281](https://doi.org/10.22060/ceej.2019.16570.6281)

