

## ارزیابی تحلیلی و آزمایشگاهی مقاوم سازیلرزه ای دیوارهای بنایی کلافدار با استفاده از پوشش های بتن مسلح الیافی فلزی و پلیمری

محمد خلف رضایی

کارشناس ارشد مهندسی زلزله، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران  
[mohammadkhalaf65@gmail.com](mailto:mohammadkhalaf65@gmail.com)

مهران موسوی

کارشناس ارشد مهندسی زلزله، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران  
[mohammadkhalaf65@gmail.com](mailto:mohammadkhalaf65@gmail.com)

حمزه شکیب

استاد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران  
[shakib@modares.ac.ir](mailto:shakib@modares.ac.ir)

صادق دردایی

استادیار، دانشکده فناوری های برتر، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران  
[dardaiei@modares.ac.ir](mailto:dardaiei@modares.ac.ir)

مسعود صمدیان

مدیر واحد پژوهش، شرکت گاز استان تهران، تهران، ایران  
[m\\_samadian@nigctpgc.ir](mailto:m_samadian@nigctpgc.ir)

**کلید واژه‌ها:** دیوارهای بنایی کلاف دار، مقاوم سازی لرزه‌ای، پوشش بتن مسلح، بارگذاری سیکلی، ریز مدل سازی

### چکیده

ساختمان‌های بنایی به دلیل در دسترس بودن مصالح، قیمت پایین و سهولت ساخت بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرند. به طور کلی در سالیان اخیر خرابی‌های زیادی در اثر وقوع زلزله برای این ساختمان‌ها گزارش شده است. بسیاری از ساختمان‌های بنایی غیرمسلح موجود به لحاظ لرزه‌ای آسیب‌پذیر هستند و نیاز به مقاوم‌سازی دارند. امروزه تکنیک‌های مختلفی برای مقاوم‌سازی سازه‌های بنایی وجود دارد که از این تکنیک‌ها، استفاده از مش فولادی به همراه پوشش بتن مسلح بسیار متداول می‌باشد. این مقاله به بررسی نتایج حاصل از آزمایش و تحلیل دیوارهای بنایی کلاف‌دار مقاوم سازی شده با استفاده از بتن مسلح الیافی فلزی و پلیمری می‌پردازد. به همین منظور سه نمونه دیوار بنایی کلاف‌دار در مقیاس کامل در آزمایشگاه ساخته شد و به طور همزمان تحت اثر بارگذاری جانبی سیکلی و ثقلی قرار گرفت. نمونه اول نشان‌دهنده دیوار شاهد در حالت بدون مقاوم‌سازی می‌باشد. نمونه دوم و سوم به ترتیب با استفاده از بتن مسلح الیافی فلزی و الیاف پلیمری به صورت یکطرفه مقاوم‌سازی و مورد آزمایش قرار گرفتند. در نهایت سختی، مقاومت، شکل‌پذیری و مود شکست نمونه‌های دیوار تعیین و مقایسه شد. نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد مقاومت دیوارهای به‌سازی شده با استفاده از بتن الیافی فلزی و پلیمری به ترتیب حدود 57% و 55% نسبت به دیوار شاهد افزایش داشته است. همچنین مشاهده شد که استفاده از الیافی فلزی در مقایسه با الیاف پلیمری تاثیر بیشتری در بهبود مقاومت و شکل‌پذیری دیوار دارد. در انتها به منظور دستیابی به نتایج دقیق‌تر، از یک ریز مدل‌سازی عددی استفاده و نتایج تحلیل با پاسخ‌های آزمایشگاهی کالیبره گردید. نتایج نشان می‌دهد که تطابق خوبی از لحاظ ظرفیت برشی و مودهای شکست بین نمونه‌های آزمایشگاهی و تحلیلی وجود دارد.

### مقدمه

ساختمان‌های بنایی به‌علت هزینه اقتصادی کم، دسترسی گسترده جغرافیایی به مصالح، نیاز کم به نگهداری و همچنین آسان بودن



ساخت، از سازه‌های متداول در جهان هستند. در حال حاضر بسیاری از ساختمان‌های بنایی غیر مسلح موجود در برابر پدیده‌هایی مثل زلزله بسیار آسیب پذیر بوده و دچار تخریب می‌شوند. در ساختمان‌های بنایی با دیوارهای باربر، دیوارهای برشی بنایی در معرض هر دو بار افقی و عمودی درون صفحه قرار می‌گیرند. لذا یک راهکار مناسب برای بهبود عملکرد این ساختمان‌ها در هنگام وقوع زلزله بهبود عملکرد درون صفحه‌ی دیوارهای این ساختمان‌ها می‌باشد. در هنگام زلزله‌مدهای شکست نهایی درون صفحه‌ی دیوارهای برشی بنایی شامل: لغزش، واژگونی، ترک برشی (قتری) و شکست در پنجه‌می باشد (Rodriguez, M., 2004). در سال‌های اخیر مطالعات زیادی توسط محققین برای مقاوم سازی و بهبود عملکرد لرزه ای دیوارهای بنایی غیر مسلح انجام شده است. این تحقیقات سبب ارائه تکنیک‌های مختلفی برای مقاوم سازی این ساختمان‌ها شده است (Abrams et al., 2007). یکی از متداول‌ترین این روش‌ها استفاده از شاتکریت می‌باشد. در این روش یک شبکه فولادی از میلگردهایی به قطر 4-6 mm روی دیوار نصب شده، سپس یک لایه ملات سیمانی یا بتنی روی دیوار شاتکریت می‌شود. ضخامت لایه بتنی بر حسب میزان افزایش مقاومت مورد نیاز می‌تواند متغیر باشد ولی عموماً حدود 60 mm در نظر گرفته می‌شود. به جهت عملکرد یکپارچه دیوار و لایه شاتکریت باید شبکه فولادی به طور کامل به دیوار مهار شود. این روش مقاوم سازی به طور قابل ملاحظه‌ای سبب افزایش مقاومت و شکل پذیری دیوار می‌شود. زیرا لایه بتن مسلح روی دیوار توزیع ترک‌ها روی دیوار را تحت تاثیر قرار می‌دهد و مانع گسترش آن‌ها می‌شود (Abrams and Lynch 1999) (Tomazevic 1999) (2001). محققینی چون Balaguru and Ezelidin (1992) با اضافه کردن الیاف فولادی به بتن دریافتند که الیاف فولادی سبب افزایش مقاومت و شکل پذیری بتن نسبت به حالت عادی می‌شود. مدلسازی المان بنایی به جهت اینکه دارای رفتاری غیر همگن و غیر همسان می‌باشد بسیار مشکل می‌باشد. به همین دلیل برای مدلسازی آن از تکنیک‌های اجزاء محدود استفاده می‌شود. یکی از دقیق‌ترین این روش‌ها روش ریز مدلسازی (micro modeling) می‌باشد. در این روش هر یک از اجزاء المان بنایی شامل آجر و ملات به طور جداگانه مدل شده و بین آن‌ها خواصی چون اصطکاک و چسبندگی تعریف می‌شود (Lourenço 1996). هدف از این مطالعه بررسی و ارزیابی رفتار درون صفحه دیوارهای بنایی کلاف دار مقاوم سازی شده تحت اثر بارگذاری سیکلی می‌باشد. به همین منظور سه نمونه دیوار با ابعاد واقعی در آزمایشگاه به شرح ذیل ساخته شد:

۱- نمونه اول، نشان دهنده دیوار مرجع در حالت بدون مقاوم سازی (URM-W).

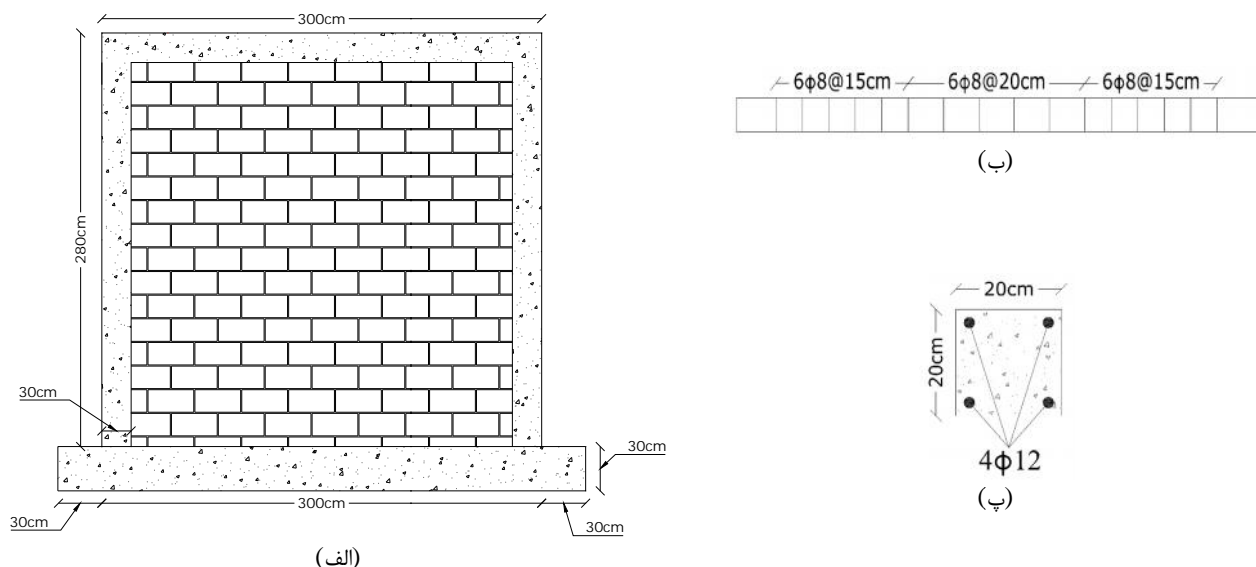
۲- نمونه دوم، دیوار مقاوم سازی شده با استفاده از بتن مسلح الیافی فلزی (MRSFS).

۳- نمونه سوم، دیوار مقاوم سازی شده با استفاده از بتن مسلح الیافی پلیمری (MRPFS).

در این تحقیق مقاومت، سختی، شکل پذیری و مود شکست دیوارهای مقاوم سازی شده نسبت به دیوار مرجع مقایسه شده است. در انتها به منظور دستیابی به یک مکانیزم دقیق از رفتار دیوارها یک تحلیل اجزاء محدود با استفاده از ریز مدلسازی بر روی تمام نمونه‌ها انجام شد و نتایج تحلیل با نمودارهای آزمایشگاهی کالیبره شد. مشاهده شد که تطابق خوبی بین نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی وجود دارد.

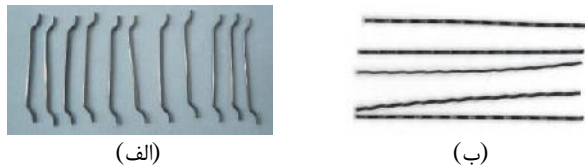
## مطالعات آزمایشگاهی

در این مطالعه سه نمونه دیوار بنایی با آجر فشاری به ابعاد 260×260 cm به ضخامت 20 cm ساخته شد. همه دیوارها با یک کلاف بتنی به ابعاد 20×20 cm محصور شده‌اند. همچنین یک فونداسیون بتنی به ابعاد 360×00×30 cm زیر همه دیوارها قرار دارد. شکل ۱ ابعاد دیوارهای ساخته شده و فاصله میلگردها در کلاف‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۱: ابعاد دیوار: الف: نمای کلی دیوار، ب: فاصله میلگردهای عرض کلاف‌ها، پ: مقطع کلاف‌ها

در ساخت نمونه‌ها از ملات ماسه-سیمان با نسبت حجمی ۱:۵ ( ۱ واحد سیمان - ۵ واحد ماسه) با ضخامت حدود ۱۷ میلیمتر استفاده شده است. میزان آب مصرفی در ملات با توجه به کارایی ملات در حین کار انتخاب شده است. همچنین آجرهای رسی مصرفی دارای ابعاد  $21 \times 10.5 \times 6$  cm می باشد. برای به دست آوردن مقاومت برشی و اصطکاک ملات از آزمون درجا در چند نقطه از دیوار مطابق شکل ۳-ج استفاده شده است (Harris and Sabnis 1999). پس از این آزمون مقاومت برشی ملات 0.5Mpa به دست آمد. در ساخت نمونه‌ها از بتن به مقاومت 12Mpa برای کلاف‌ها استفاده شد. همچنین برای بتن الیافی فلزی از ۱۰٪ وزنی سیمان و برای بتن الیافی پلیمری از ۲/۵٪ وزنی سیمان استفاده شده است (Ezeldin and Balaguru 1992). شکل ۲ الیاف فلزی و پلیمری استفاده شده در بتن شاتکریت را نشان می‌دهد. همچنین مشخصات مکانیکی الیاف‌ها در جدول شماره ۱ آورده شده است.



شکل ۲: الف: الیاف فلزی؛ ب: الیاف پلیمری

جدول ۱: مشخصات مکانیکی الیاف‌های فولادی و پلیمری

طول (mm)	مقاومت کششی ( $N/mm^2$ )	قطر (mm)	نوع مصالح
$53 \pm 2.5$	$< 1.2$	۰.۸	الیاف فولادی
۶۰	۰.۲۴	۰.۹۷	الیاف پلیمری

در ساخت نمونه‌ها از میلگردهایی به قطر ۱۲ و ۸ میلیمتر به ترتیب برای میلگردهای طولی و عرضی استفاده شده است. مشخصات مکانیکی تمامی مصالح مصرفی در این مطالعه در جدول شماره ۲ آورده شده است. برای اجرای دیوار بر روی کف قوی آزمایشگاه، از یک ورق فولادی به ابعاد  $360 \times 30 \times 1$  cm استفاده گردید. این ورق پس از سوراخ کردن توسط پیچ و مهره به کف آزمایشگاه متصل شد. برای جلوگیری از حرکت صلب نمونه در زمانیکه نمونه تحت بار قرار دارد، از تعدادی نبشی با ابعاد  $10 \times 10 \times 1$  cm به عنوان برشگیر استفاده شد که به ورق جوش شدند.



شکل ۳: مراحل ساخت دیوار؛ الف: نصب پلیت کف، ب: نصب کلاف‌های قائم،

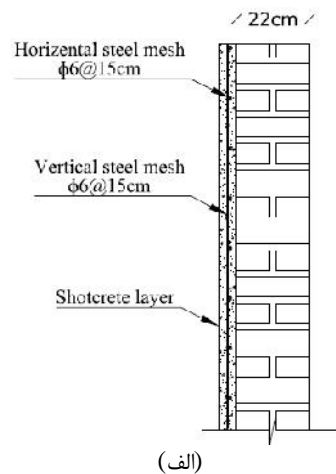
ب: دیوار بدون مقاوم سازی، ج: آزمون برش درجا ملات

برای نمونه‌های تقویت شده با پوشش بتن مسلح الیافی فلزی و پلیمری مطابق شکل ۴ از مش فولادی بدون آج با قطر ۶ میلیمتر و فواصل چشمه 15cm به صورت یکطرفه استفاده شد. این شبکه با فاصله‌ای حدوداً ۲۰ میلیمتر از سطح دیوار بر روی برشگیرهای عسایی شکل، که در فواصل حدوداً ۶۰ سانتیمتری روی دیوار نصب شده بود قرار گرفت تا سبب یکپارچگی بیشتر بین لایه بتنی و دیوار و همچنین انتقال نیرو بین دیوار و لایه بتنی مسلح شود. به منظور ایجاد اتصال کاملاً گیردار شبکه میلگرد و دیوار، انتهای آزاد شبکه میلگرد از طریق ایجاد سوراخ‌هایی به عمق ۶ سانتیمتر و قطری معادل دو برابر قطر میلگرد شبکه، در کلاف‌های پیرامونی مهار شد و سپس با استفاده از تزریق چسب اپوکسی کاملاً محکم شد. در نهایت لایه‌های بتن الیافی روی نمونه‌ها شاتکریت شد.



جدول ۲: مشخصات مکانیکی مصالح

نوع مصالح	تعداد نمونه ها	پارامتر اندازه گیری شده	مقدار (Mpa)
آجر	۵	مقاومت فشاری	۲۴.۷
ملات	۵	مقاومت فشاری	۱۶
بتن کلاف ها	۳	مقاومت فشاری	۱۲
		مقاومت کششی	۲.۱
بتن الیافی فلزی	۳	مقاومت فشاری	۲۰
بتن الیافی پلیمری	۳	مقاومت فشاری	۲۰



(الف)



(ب)



(پ)

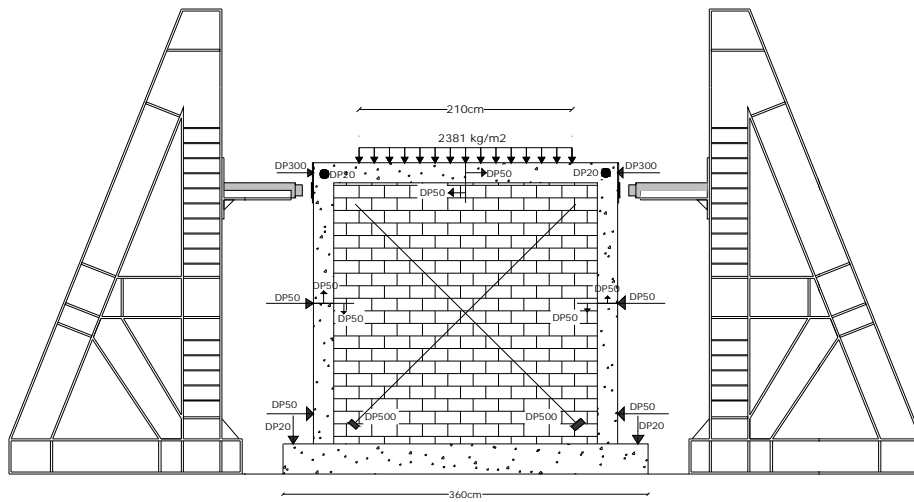


(ج)

شکل ۴: مراحل مقاوم سازی دیوارها؛ الف: نصب شبکه فولادی روی دیوار، ب: مهار انتهایی شبکه در کلاف ها،

پ: نصب برش گیر روی دیوارها، ج: شاتکریت دیوار

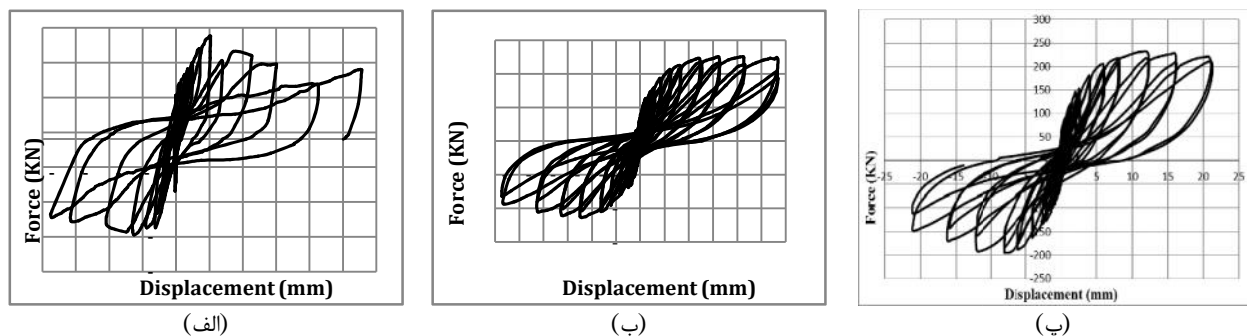
به دلیل اینکه دیوارها باید تحت اثر نیروهای قائم و جانبی قرار گیرند، دو سیستم متفاوت برای اعمال بار این دو نوع بار طراحی شد. برای اعمال بار قائم بر روی نمونه‌های آزمایشگاهی از ۵۰ عدد شمش سرب ۲۰ کیلوگرمی استفاده شد. برای اعمال بار جانبی از دو قاب مثلثی شکل (Reaction frame) همان طور که در شکل ۵ نشان داده شده است استفاده گردید. دو عدد جک فشاری و دو عدد نیرو سنج (load cell) در طرفین دیوار قرار داده شد. در تمام نمونه‌های آزمایش شده بارگذاری سیکی در دو مرحله صورت گرفت. در گام اول بارگذاری به صورت کنترل شونده توسط نیرو انجام شد و در مرحله بعد با مشاهده نخستین ترک‌ها در دیوار بارگذاری به صورت جابجایی کنترل انجام شد. در این مرحله بارگذاری تا زمانی ادامه می‌یابد که دیوار دچار شکست و ناپایداری شود. تغییر مکان نقاط مختلف دیوار با توجه به سنسورهای (LVDT) نصب شده روی نمونه‌ها ثبت می‌شود (شکل ۵).



شکل ۵: نحوه بارگذاری ثقلی و جانبی نمونه ها

## بررسی و تحلیل نتایج آزمایش‌ها

در این قسمت نتایج حاصل از آزمایش‌ها شامل مقاومت، شکل‌پذیری و مود شکست دیوارها ارائه می‌گردد. شکل ۶ منحنی هیسترسیز حاصل از بارگذاری دیوارها را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۶-الف دیده می‌شود مقاومت نهایی دیوار شاهد ۱۴۸ KN در جابجایی جانبی ۵ mm بدست آمد. در این نمونه نخستین ترک‌ها در محل اتصال کلاف‌های قائم و دیوار بوجود آمد ولی با ادامه بارگذاری ترک‌ها در یک امتداد مایل در دیوار نفوذ کرده و مطابق شکل ۶-۷الف به صورت لغزش درز ملات در دیوار ظاهر می‌شود. این نوع شکست باعث شد که از تمام ظرفیت دیوار استفاده نشود و بعد از رسیدن به حداکثر مقاومت دیوار دچار نوعی ناپایداری شود. به همین جهت نیاز به مقاوم سازی دیوار احساس می‌شود. منحنی‌های ۶-ب و ۶-پ به ترتیب رفتار هیسترسیز نمونه‌های تقویت شده با الیاف فلزی و پلیمری را نشان می‌دهند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود استفاده از شبکه میلگرد و پوشش بتن الیافی سبب افزایش مقاومت نهایی و همچنین ظرفیت شکل‌پذیری دیوارها نسبت به دیوار شاهد شده‌است. از طرفی مود شکست نهایی دیوارها از حالت لغزشی به مود گهواره ای (Rocking) تغییر یافته است (شکل ۶-۷ب و ۶-پ). برای دیوار مقاوم سازی شده با الیاف فلزی حداکثر مقاومت دیوار ۲۵۰ KN در جابجایی ۲۸ mm بدست آمد. همچنین برای دیوار مقاوم‌سازی شده با الیاف پلیمری حداکثر مقاومت دیوار ۲۳۱ KN در جابجایی ۱۱.۲ mm بدست آمد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود میلگرد‌های مش فولادی در محل اتصال به فونداسیون نقش کاملاً موثری در ایجاد پیوستگی بین دیوار، پی و لایه بتنی روی دیوار داشته و تحت تنش‌های کشش و فشار سیکیلی می‌باشند به همین دلیل اثر حرکت رفت و برگشتی دیوار دچار انحنای شده‌اند. دیوارهای مقاوم سازی شده دارای شکل‌پذیری و سختی اولیه بیشتری هستند. از طرفی کاربرد الیاف فلزی باعث افزایش ۸.۶٪ مقاومت دیوار نسبت به الیاف پلیمری شده است. ضمن اینکه شکل‌پذیری را هم افزایش داده است. در جدول شماره ۳ مقایسه‌ای بین میزان افزایش ظرفیت نهایی دیوارها نسبت به دیوار شاهد انجام شده است. شکل ۸ مقایسه‌ی بین منحنی‌های آزمایشگاهی ظرفیت نمونه‌ها را نشان می‌دهد.



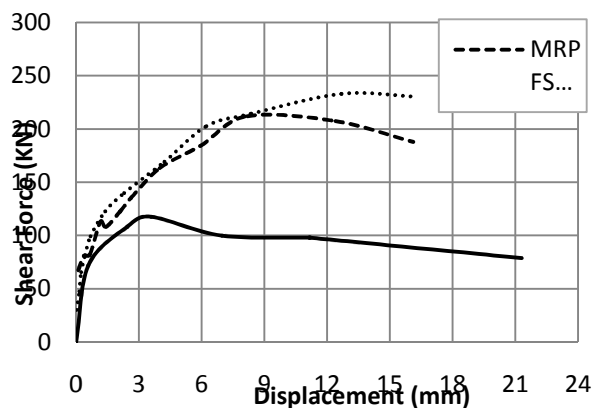
شکل ۶: منحنی‌های هیسترسیز نمونه‌های آزمایشگاهی؛ الف: URM، ب: MRSFS، پ: MRPFS







شکل ۷: حالت نهایی شکست نمونه های آزمایشگاهی الف: URM، ب: MRSFS، پ: MRPFS



شکل ۸: منحنی های ظرفیت آزمایشگاهی نمونه های تست شده

جدول ۳: مقایسه دیوارهای آزمایش شده

دیوار	مقاومت نهایی (KN)	ظرفیت برشی (KN)	درصد افزایش ظرفیت نسبت به دیوار شاهد	مود شکست
URM-W	۱۴۸	۱۱۷.۵	-	لغزشی
MRSFS	۲۵۰	۲۳۳	%۵۰	گهواره ای
MRPFS	۲۳۱	۲۲۰	%۴۶.۵	گهواره ای

### بررسی نتایج حاصل از تحلیل

در این بخش با استفاده نرم افزار ABAQUS از روش ریز مدل سازی برای شبیه سازی رفتار دیوارهای بنایی استفاده شده است و نتایج حاصل از تحلیل با نمودارهای آزمایشگاهی مقایسه شده است. برای مدل سازی بتن و المان های بنایی از رفتار (Concrete Damage) CDP (Plasticity) استفاده شده است. مدل سازی میلگرد با استفاده از المان های یک بعدی انجام شد. رفتار کششی میلگرد مش فولادی از نتایج تست کشش برای مدل سازی این ماده استفاده شده است. نکته مهم در مورد مدل سازی دیوار، استفاده از المان تماسی چسبندگی و اصطکاک بین لایه بتنی با دیوار بنایی و همچنین بین ملات و آجر است که بر رفتار دیوارها اثر قابل ملاحظه ای دارد. شکل های ۹ و ۱۰ به ترتیب مقایسه ای بین نحوه شکست دیوارها در مدل های تحلیلی و آزمایشگاهی و منحنی های ظرفیت مدل های تحلیلی و آزمایشگاهی ارائه می دهد. همان طور که مشاهده می شود که تطابق خوبی بین مدل های تحلیلی و آزمایشگاهی وجود دارد. در واقع ریز مدل سازی انجام شده توانسته مود شکست، ظرفیت برشی و مقاومت نهایی دیوارها را به خوبی شبیه سازی کند.

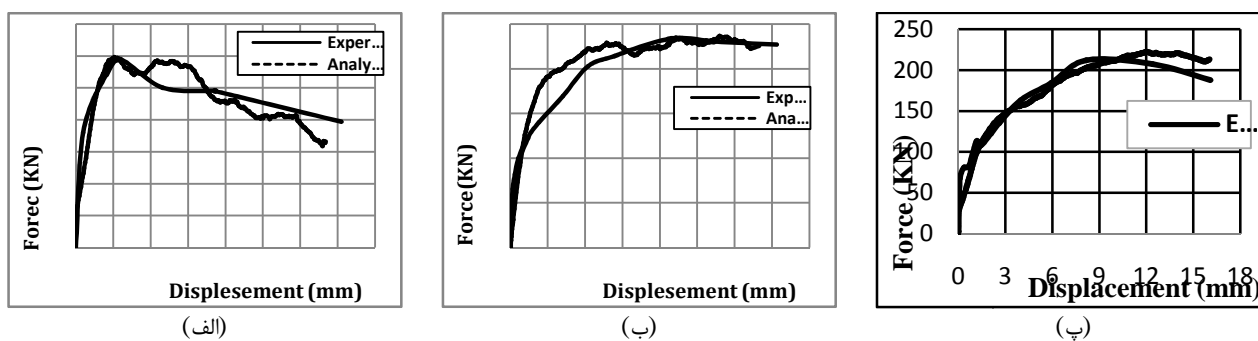


(الف)



(ب)

شکل ۹: مقایسه بین شکست نهایی نمونه های تحلیلی و آزمایشگاهی؛ الف: URM. ب: MRSFS & MRPFS



شکل ۱۰: مقایسه بین منحنی های ظرفیت نمونه های تحلیلی و آزمایشگاهی؛ الف: URM. ب: MRSFS. پ: MRPFS

## نتیجه گیری

مطالعه آزمایشگاهی دیوارهای شاهد و تقویت شده با بتن الیافی نشان می دهد که استفاده از بتن الیافی به ویژه الیاف فلزی تاثیر قابل ملاحظه ای در افزایش ظرفیت برشی و شکل پذیری دیوار داشته است. ضمن اینکه مقاوم سازی سبب تغییر مود شکست دیوار از یک مود لغزشی به شکست گهواره ای شده است و این امر سبب شده است تا دیوارهای تقویت شده ظرفیت جذب انرژی بیشتری داشته باشند. آزمایش های صورت گرفته بر روی دیوارها حاکی از خروج از مرکزیت و جابجایی خارج صفحه این دیوارها به جهت مقاوم سازی یکطرفه آنها می باشد، اما در حالت واقعی به علت وجود یک سازه سه بعدی، این تغییر شکل ها بوسیله دیوارهای متعامد کاهش خواهد یافت. از سوی دیگر استفاده از روش ریزمدل سازی، می تواند مکانیزم های شکست المان بنایی را به خوبی مدل کند و از این نظر نسبت به روش های دیگر مدل سازی دارای برتری است. در انتها نویسندگان پیشنهاد می کنند با توجه به اینکه خرابی در محل اتصال دیوار به فونداسیون بوده است این محل از طریق مقاوم سازی فونداسیون تقویت شود. همچنین با ساخت نمونه ها بر روی میز لرزان، تأثیر بارگذاری دینامیکی واقعی زلزله بر روی ساختمان بنایی مورد ارزیابی قرار گیرد.

## مراجع

Abrams D, Smith T, Lynch J and Franklin S (2007) Effectiveness of Rehabilitation on Seismic Behavior of Masonry Piers, *Journal of Structure Engineering*, 133(1), 32–43

Abrams DP and Lynch JM (2001) *Flexural behavior of retrofitted masonry piers*, KEERC-MAE Joint Seminar on Risk Mitigation for Regions of Moderate Seismicity, Illinois, USA



Ezeldin AS and Balaguru PN (1992) Normal-and high-strength fiber reinforced concrete under compression, *J Mater, Civ. Eng.*, 4(4), 415–429

Harris HG and Sabnis GM (1999) Structural modeling and experimental techniques, CRC Press, New York, NY, USA

Lourenco PB (1996) A User/Programmer Guide for the Micro-Modeling of Masonry Structures, Delft University of Technology; Faculty of Civil Engineering; report no. 03.21.1.31.35

Rodriguez M (2004) confined masonry construction, World Housing Encyclopedia summary publication, EERI

Tomazevic M (1999) Earthquake resistant design of masonry buildings, ImperialCollege Press, London, England

