

## بررسی آزمایشگاهی رفتار لرزه ای دیوارهای خشتی تقویت شده با مش الیاف خرما

هادی میبیدیان<sup>۱</sup>، رضا مرشد<sup>۲\*</sup>، ابوالفضل اسلامی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، دانشگاه یزد، یزد، ایران  
<sup>۲</sup> دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد، یزد، ایران  
<sup>۳</sup> استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد، یزد، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷-۱۲-۱۴  
بازنگری: ۱۳۹۸-۰۱-۲۹  
پذیرش: ۱۳۹۸-۰۲-۰۹  
ارائه آنلاین: ۱۳۹۸-۰۲-۲۱

### کلمات کلیدی:

دیوار خشتی  
عملکرد لرزه ای  
تقویت  
الیاف خرما  
بارگذاری چرخه ای

**خلاصه:** استفاده از مصالح خشتی در اغلب مناطق روستایی و شهرهای تاریخی کشورهای در حال توسعه از جمله ایران به عنوان یکی از روش های فراگیر ساخت و ساز بشمار می رود. در مقایسه با سایر مصالح متداول، مصالح خشتی دارای مزایایی از جمله سازگاری با محیط زیست، در دسترس بودن، کاربرد آسان، ارزانی و همچنین عایق مناسب صوتی و حرارتی هستند. با این وجود عملکرد ضعیف لرزه ای سازه های خشتی در زلزله های گذشته منجر به تلفات جانی و خسارت های مالی گسترده شده است. از این رو مقاوم سازی این ساختمان ها در برابر نیروهای جانبی زلزله و تدوین آیین نامه طراحی این سازه ها ضروری است. همچنین تقویت سازه های خشتی با مصالح طبیعی و سنتی اثر گذاری بیشتری خواهد داشت. با توجه به اینکه در سازه خشتی باربری اصلی بر دوش دیوارها است، مقاوم سازی دیوارهای خشتی از اهمیت بیشتری برخوردار است. از این رو تحقیق حاضر بر اساس استفاده از الیاف طبیعی خرما در مقاوم سازی دیوارهای خشتی طرح ریزی شد. در مجموع ۶ نمونه دیوار خشتی به ابعاد  $200 \times 900 \times 1000$  میلی متر شامل یک نمونه کنترل و پنج نمونه تقویت شده تحت بار جانبی چرخه ای مورد آزمایش قرار گرفتند. روش تقویت شامل نصب مش خرما بر روی سطح خارجی دیوار و پوشش آن ها با ملات کاه گل بود. پارامترهای متغیر در آزمایش شامل ابعاد شبکه مش، تعداد مهار مش دو طرف دیوار و آرایش مش بوده است. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که با استفاده از روش تقویت خارجی با مش الیاف خرما، ضمن ایجاد یکپارچگی بیشتر در اجزای دیوار خشتی، مود شکست برشی به تأخیر افتاده و به مود شکست گهواره ای و خردشدگی پاشنه تبدیل شد. همچنین مقاومت جانبی، ضریب شکل پذیری و جذب انرژی نمونه های دیوار بطور قابل توجهی بهبود یافت.

### ۱- مقدمه

و زیبایی را در خود جای داده است که در میان آن ها شهر یزد به عنوان نخستین شهر خشت خام جهان در سال ۲۰۱۷ به ثبت میراث جهانی یونسکو رسید. علاوه بر آن در سال های اخیر مصالح گلین از جمله خشت به عنوان یک مصالح ساختمانی دوستدار محیط زیست و انرژی پایدار در کشورهای پیشرفته مورد توجه قرار گرفته است [۲]. از دیگر مزیت های مصالح گلین در مقایسه با سایر مصالح ساختمانی متداول می توان به عایق گرمایشی، تنظیم رطوبت، در دسترس بودن، ارزان بودن، و عدم نیاز به نیروی کار ماهر اشاره نمود. از نقطه نظر سازه ای، این مصالح مقاومت فشاری قابل قبول

در اقلیم های گرم و خشک و معتدل خاک همیشه از متداول ترین مصالح ساختمانی بوده است. در حال حاضر تقریباً یک سوم جمعیت جهان و نیمی از جمعیت کشورهای در حال توسعه در خانه های گلین سکونت دارند [۱]. خاک از مهم ترین مصالح ساختمان های تاریخی است که ارزش فرهنگی قابل توجهی در اکثر تمدن ها دارد و باید این ساختمان ها برای نسل های آینده محافظت شود. فلات ایران به عنوان یکی از کهن ترین تمدن های در جهان، شهرهای تاریخی

\* نویسنده عهده دار مکاتبات: morshed@yazd.ac.ir



پلی پروپیلن باعث شد تا ترک ها در مدل پخش گردد و از فروریزش مدل جلوگیری کند. همچنین این روش تقویت منجر به افزایش قابل توجه شکل پذیری مدل تقویت شده گردید. فیگایردو<sup>۴</sup> و همکاران [۹] تحت بارگذاری چرخه ای درون صفحه، یک دیوار خشتی I شکل با مقیاس واقعی و ضخامت ۲۹۰ میلی متر را آزمایش کرده، سپس آن نمونه را تعمیر و با مش پلاستیکی مقاوم سازی کردند. مقاومت دیوار تعمیر و تقویت شده، ۲۳ درصد و تغییرمکان نسبی آن تا دو برابر افزایش یافت. هراکوف<sup>۵</sup> و همکاران [۳] هشت نمونه دیوار خشتی به ضخامت ۲۴۰ میلی متر با دو نوع بلوک خشتی متفاوت، برای ارزیابی رفتار لرزه ای درون صفحه دیوار خشتی با تقویت خارجی ژئونت<sup>۶</sup> از دو جنس پلی اتیلن<sup>۷</sup> و پلی پروپیلن، همچنین از روش کاشت نزدیک به سطح با کابل فولادی تحت بارگذاری چرخه ای آزمایش کردند. هر دو روش تقویت یکپارچگی دیوار را حفظ کردند و منجر به افزایش مقاومت جانبی شدند.

تولز<sup>۸</sup> و همکاران در تحقیق خود از تمسه های از جنس نایلون در جهت های افقی و قائم به صورت یک حلقه ی بسته جهت مقاوم سازی یک اتاقلک خشتی استفاده کردند [۱۰ و ۱۱]. این روش مقاوم سازی توانست تا حدودی از ریزش مدل های خشتی جلوگیری کند و با وجود اینکه تمسه ها نتوانست مانع شروع ترک خوردگی شود، در حفظ انسجام سازه تحت جابجایی های بزرگ موفق بود. بلوندت<sup>۹</sup> و همکاران [۱۲] در تحقیق خود یک مدل خشتی که با استفاده از طناب های مصنوعی به روش چسباندن روی سطح خارجی مقاوم سازی شده بود را آزمایش کردند. مدل اصلی، بدون تقویت، ابتدا روی میز لرزه و تحت زلزله متوسط آزمایش شد. سپس مدل با استفاده از ترزیق ملات با پایه رسی به داخل شکاف ها و ترک های ایجاد شده تعمیر و با استفاده از قرار گیری طناب های مصنوعی روی سطح خارجی، مقاوم سازی و دوباره مورد آزمایش قرار گرفت. پس از وقوع ترک، طناب ها به خوبی قادر به کنترل جابجایی و جلوگیری از فروریزش دیوار بودند. روش مقاوم سازی خارجی با استفاده از نوارهای لاستیکی بدست آمده از لاستیک های فرسوده توسط چارلسون<sup>۱۰</sup> و

ولی مقاومت کششی پایینی دارد [۳]. به همین جهت سازه های گلین به خوبی توانسته اند سالیان متمادی پایداری خود را تحت بارهای ثقلی حفظ کنند ولی تحت بارهای جانبی آسیب پذیر هستند. در زلزله های اخیر از جمله السالوادور (۲۰۰۱)، پرو (۲۰۰۱)، بم در ایران (۲۰۰۳)، ونچون در چین (۲۰۰۸)، شیلی (۲۰۱۰) و نیپال (۲۰۱۱) ضعف باربری جانبی آنها اثبات شده است [۲]. متأسفانه بسیاری از سازه های گلین در سراسر جهان در مناطق با خطر لرزه خیزی بالا ساخته شده اند و لذا تقویت آن ها و حفظ یکپارچگی آنها برای تحمل نیروهای ناشی از بارهای لرزه ای به منظور حفظ جان ساکنین از ضرورت ویژه ای برخوردار است [۳، ۴]. علاوه بر آن آثار تاریخی بسیار باارزشی بصورت سازه خشتی موجود است که حفظ آنها نیازمند روش های مبتکرانه و خاص تقویت است. ملی<sup>۱</sup> و همکاران [۵] در سال ۱۹۸۰ با آزمایش خانه های خشتی به مقیاس ۱:۲،۵ بر روی میز لرزان اولین بررسی گسترده را بر روی رفتار لرزه ای سازه های خشتی انجام دادند. بر اساس نتایج بدست آمده، روش تقویت با مش سیمی جوش شده، کارآمدترین روش در این تحقیق معرفی شد. بخشی و همکاران [۶] دو مدل بنای خشتی با سقف قوسی چهار ترک شامل: نمونه شاهد و نمونه با تقویت مش فولادی با مقیاس ۲:۳ را روی میز لرزان آزمایش کردند. نمونه بدون تقویت به دلیل عدم یکپارچگی سازه، با ایجاد ترک قائم در دیوارها و خرابی در گوشه ها منجر به ناپایداری سازه و فروریزش کامل گردید، ولی در بنای تقویت شده، به دلیل محصور بودن دیوارها و جلوگیری از باز شدن ترک های درون صفحه، این ترکها به سطوح پایین دیوار هدایت شدند و مود خرابی لغزشی در رج های افقی پایین نمونه مشاهده شد. توتونچی و همکاران [۷] رفتار داخل صفحه شش نمونه دیوار خشتی با بار ثقلی صفر، ۰/۰۹۷، ۰/۲۱۵ و ۰/۳۵۷ مگاپاسکال را به صورت بارگذاری یک جهته مورد آزمایش قرار دادند که دو نمونه از آنها تحت بار ثقلی ۰/۲۱۵ مگاپاسکال با مش پلی پروپیلن<sup>۲</sup> تقویت کردند و مقاومت نهایی نمونه ها با افزایش بار ثقلی افزایش داشت. سائی پرن<sup>۳</sup> و همکاران [۸] سه مدل خانه خشتی دارای سقف قوسی به مقیاس ۱:۴، با تقویت مش نوار پلی پروپیلن جوش شده به همراه میل مهار قوس، بر روی میز لرزان مورد آزمایش قرار دادند. محصوریت تقویت مش

4 Figueiredo  
5 Hračov  
6 Geo-Net  
7 Polyethylene  
8 Tolles  
9 Blondet  
10 Charleson

1 Meli  
2 Polypropylene  
3 Sathiparan

جدول ۱. مشخصات نمونه های آزمایش

Table 1. Test Specimens

نمونه	تقویت	تعداد مهاری	اندازه شبکه (میلی متر)	آرایش شبکه	اندود کاه گل	طرح
W1	-	-	-	-	-	-
W2	مش الیاف خرما	-	۱۰۰×۱۰۰	مربعی	*	الف
W3	مش الیاف خرما	۵	۱۰۰×۱۰۰	مربعی	*	ب
W4	مش الیاف خرما	۹	۱۰۰×۱۰۰	مربعی	*	ج
W5	مش الیاف خرما	۵	۵۰×۵۰	مربعی	*	ب
W6	مش الیاف خرما	۵	۵۰×۵۰	لوزی	*	ب

را با تقویت الیاف پلیمری نساجی مورد مطالعه قرار دادند [۱۷]. بر اساس نتایج بدست آمده نمونه های دیوار تا قبل از گسیختگی الیاف، رفتار شکل پذیری را نشان دادند و دیوارهای تقویت شده تا ۱۳۶ درصد در حالت بارگذاری داخل صفحه افزایش مقاومت داشتند. اضافه نمودن مش سیمی فولادی موجب افزایش مقاومت بیشتری گردید. در این مقاله نتایج آزمایش بارگذاری جانبی چرخه ای شش دیوار خشتی به ابعاد ۲۰۰×۹۰۰×۱۰۰۰ میلی متر تحت تنش فشاری عمودی ثابت ۰/۳ مگاپاسکال و با تقویت خارجی با مش الیاف خرما مورد ارزیابی قرار می گیرد.

۲- برنامه ریزی آزمایش ها

تحقیق حاضر بر مبنای آزمایش ۶ نمونه دیوار خشتی متوسط مقیاس با در نظر گرفتن پارامترهای متغیر اندازه شبکه مش تقویت، آرایش شبکه و تعداد مهاری عرضی برنامه ریزی گردید.

۲-۱- مشخصات نمونه های دیوار

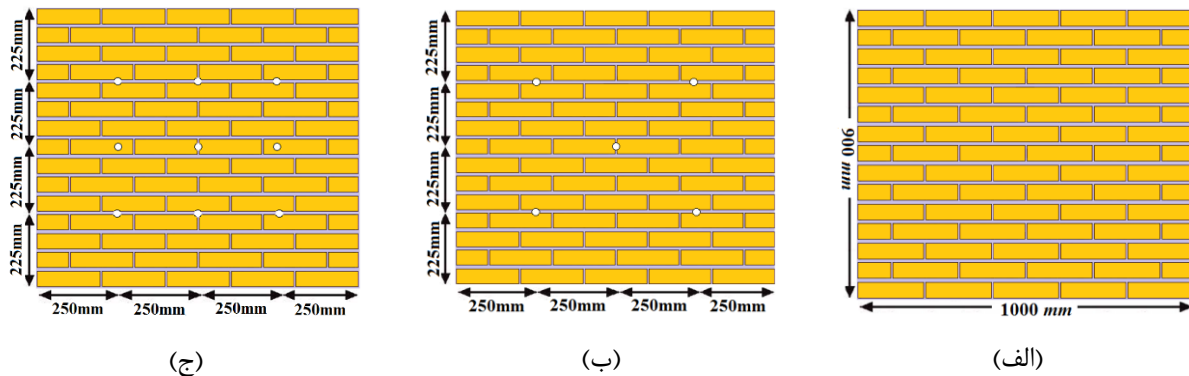
در ساخت نمونه های دیوار، از خشت های ساخته شده در کارگاه های خشت زنی یزد به ابعاد ۲۰۰×۲۰۰×۴۵ میلی متر استفاده شد. دیوارها از ملات گل به نسبت ۱:۱ رس و ماسه بادی، با چیدمان راسته ساخته شدند. نمونه های دیوار خشتی به ابعاد ۲۰۰×۹۰۰×۱۰۰۰ میلی متر ساخته و مورد آزمایش قرار گرفتند. مشخصات و شماره نمونه های دیوار خشتی در جدول ۱ مشخص

همکاران مورد ارزیابی قرار گرفت [۱۳، ۱۴]. نوارهای لاستیکی با استفاده از برش حلزونی یک لاستیک فرسوده و تبدیل آن به نوار پیوسته تهیه شدند و به صورت افقی و عمودی روی دیوارهای خشتی قرار گرفتند. مدل خشتی که با استفاده از این روش مقاوم سازی شده بود روی میز لرزه آزمایش شد. نتایج بدست آمده افزایش قابل توجه در ظرفیت جابجایی دیوار را بدون فروریزش آن نشان داد. مقاوم سازی دیوارهای بنایی آجری نیز به روش چسباندن نوارهای پلیمری روی سطح خارجی تجربه شده و به نتایج رضایت بخشی منجر شده است. فاروق<sup>۱</sup> و همکاران [۱۵] در تحقیق خود از چسباندن نوارهای CFRP و فولادی روی سطح خارجی برای مقاوم سازی دیوارهای بنایی استفاده کردند. آنها افزایش ۲/۱۴ و ۱/۵۷ برابری مقاومت جانبی دیوارهای مقاوم سازی شده با نوارهای CFRP و فولادی را گزارش دادند. همچنین جابجایی نهایی دیوارها نیز در مقایسه نمونه ی غیر مسلح افزایش ۴/۲۸ و ۳/۴۰ برابری را از خود نشان داد.

شابدین و همکاران در رابطه با مود شکست دیوارهای آجری و تاثیر ملات قویتر در رفتار برشی درون صفحه ای آنها تحت بار چرخه ای مطالعه نمودند [۱۶]. بر اساس نتایج، دیوار آجری با ملات قویتر مقاومت و شکل پذیری بهتری از خود نشان داد و مود شکست دیوار از حالت لغزش برشی توام با کشش قطری به مود شکست لغزش برشی تغییر یافت. دریفت قابل تحمل دیوارها بین ۱ تا ۲ درصد مشاهده گردید. اسماعیل<sup>۲</sup> و همکاران نمونه های دیوار بنایی غیر مسلح

1 Farooq

2 Ismail



شکل ۱. چیدمان مهار جانبی مش‌ها در دیوار: (الف) بدون مهار؛ (ب) پنج مهار؛ (ج) نه مهار  
 Fig. 1. Lateral anchor hole patterns (a) no anchor (b) 5 anchor (c) 9 anchor

جدول ۲. مشخصات مصالح ساخت دیوار  
 Table 2. Properties of materials used

مدول الاستیسیته (گیگاپاسکال)	مقاومت فشاری (مگاپاسکال)	مصالح
۱/۱۲	۳/۳۱	ملات گل
۰/۷۸	۱/۱۴	ملات کاه‌گل
۱/۵۳	۴/۴۳	خشت
-	۲/۳۴	ستون منشور خشت

[۱۹] آزمایش شدند. میانگین نتایج حاصل از آزمایش شش نمونه در ۲-۲-جدول ۲ ارائه شده است. مدول الاستیسیته بر اساس شیب ۴۰٪ اولیه منحنی تنش - کرنش تعیین شده است. مقاومت کمتر ستون خشتی در مقایسه با خشت و ملات گل را می‌توان هم به اثر اندازه و هم به کوبیده نبودن ملات گل مصرفی در تهیه ستون خشتی نسبت داد.

برای تقویت خارجی دیوار خشتی از مش بافته شده با قیود بافت گیردار از طناب الیاف خرما استفاده شد (شکل ۲). طناب الیاف خرما به قطر ۵ میلی‌متر از شهرستان بافق یزد تهیه گردید. مش‌های تقویتی الیاف خرما در طرفین دیوار به هم متصل بودند (شکل ۳) و همچنین مش‌ها توسط طناب الیاف خرما به قطر ۵ میلی‌متر عبور داده شده از سوراخ‌های به قطر ۱۰ میلی‌متر با چیدمان مشخص (شکل ۱) به یکدیگر مهار شدند (شکل ۴). شبکه مش‌ها دارای ابعاد ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌متر بودند و به دو حالت لوزی و مربع مورد استفاده

شده است. همچنین فواصل و تعداد مهارهای مش دو طرف دیوار در شکل ۱ نشان داده شده است. در محل مهارها دیوار خشتی سوراخ شده و مش‌های دو طرف دیوار به کمک طناب الیاف خرما به هم دوخته شدند.

## ۲-۲- مشخصات مصالح

دیوار خشتی از دو جزء اصلی بلوک‌های خشت خام و ملات گل تشکیل شده است. با توجه به نبود استاندارد مجزا برای تعیین مشخصات مصالح خشت و مشابهت رفتار مکانیکی مصالح خشتی با مصالح بنایی، از استانداردهای تعیین خصوصیات مکانیکی مصالح بنایی، برای اجرای آزمایش‌ها استفاده گردید. مقاومت فشاری ستون‌های منشوری خشت طبق استاندارد مقاومت فشاری ستون آجری ASTM-C67 [۱۸] آزمایش گردید و مقاومت فشاری نمونه‌های ملات گل و کاه‌گل بر اساس استاندارد ASTM-C109M



شکل ۵. اندودکاری دیوار با ملات کاهگل  
Fig. 5. Plastering with thatch mortar



شکل ۲. مش الیاف خرما  
Fig. 2. Woven palm fibers mesh



شکل ۳. تقویت نمونه W6 با مش الیاف خرما  
Fig. 3. Strengthening of W6 with palm meshes

داشتند (شکل ۵).

مشخصات مکانیکی مش های الیاف خرما در تقویت خارجی دیوار خشتی در جدول ۳ آمده است. این نتایج بر اساس میانگین ده نمونه طناب الیاف خرما به قطر پنج میلیمتر و با طول آزاد ۵۰۰ میلی متر که در آزمایشگاه نساجی دانشگاه یزد آزمایش شدند، بدست آمده است. با توجه به تعداد طناب در واحد عرض مش بافته شده، نتایج مقاومت کششی بر حسب واحد عرض تعمیم داده شده است.

### ۲-۳- نحوه آزمایش

شکل ۶ بصورت شماتیک نحوه آزمایش نمونه های دیوار خشتی را نشان می دهد. قسمت پایین دیوار بصورت گیردار در پایه مخصوصی که به کف صلب متصل بود، قرار گرفت و در بالای دیوار شرایط تکیه گاهی غلتکی تأمین گردید. جهت شبیه سازی بار ثقلی دیوار خشتی، بار قائم ثابت توسط جک هیدرولیکی دستی به نمونه های تحت بارگذاری چرخه ای جانبی اعمال گردید. عکس العمل جک دستی از طریق ۴ میله در طرفین دیوار به کف قوی منتقل شد. میزان بار قائم اعمالی معادل با ایجاد تنش قائم ۰/۳ مگاپاسکال در صفحه دیوار خشتی انتخاب شد. بارگذاری چرخه ای جانبی با کنترل تغییر مکان توسط اکچویاتور دینامیکی با ظرفیت ۱۰۰ کیلونیوتن در ارتفاع ۸۰۰ میلی متر به دو رج فوقانی دیوار اعمال گردید. بارگذاری طبق پروتکل شکل ۷، با افزایش دامنه ۲/۵ میلی متر و سه دوره تکرار در هر جابه جایی و با فرکانس ۱۰ هرتز انجام گرفت و رابطه نیروی برشی - جابجایی ثبت گردید.



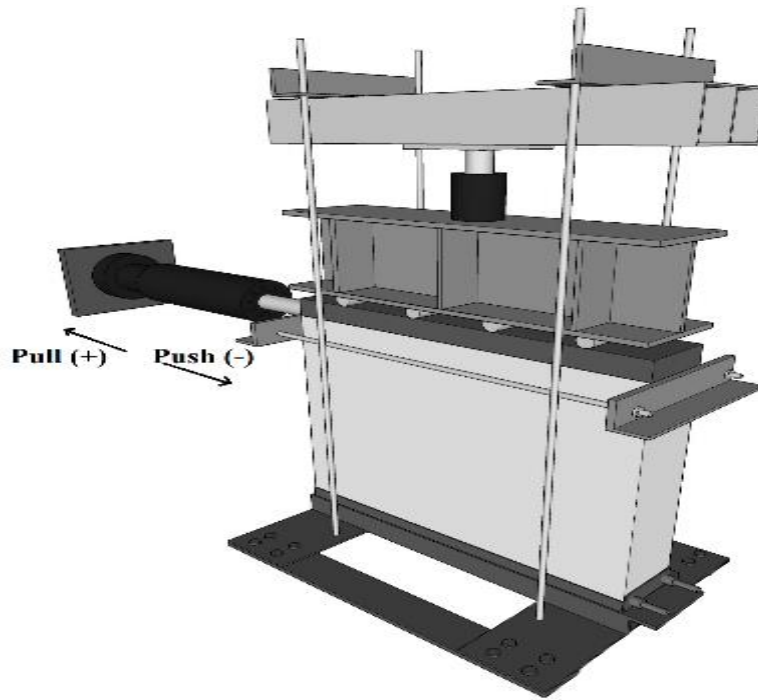
شکل ۴. نحوه ی مهار مش با طناب الیاف خرما  
Fig. 4. Lateral restraint of palm meshes with palm tie

قرار گرفتند (جدول ۱). نمونه های دارای تقویت خارجی با ملات کاه گل اندودکاری شدند که این اندود سه وظیفه: چسباندن مش ها به دیوار، سخت کردن شبکه مش و محافظت از مش ها را برعهده

جدول ۳. مقاومت کششی در واحد عرض مش الیاف خرما

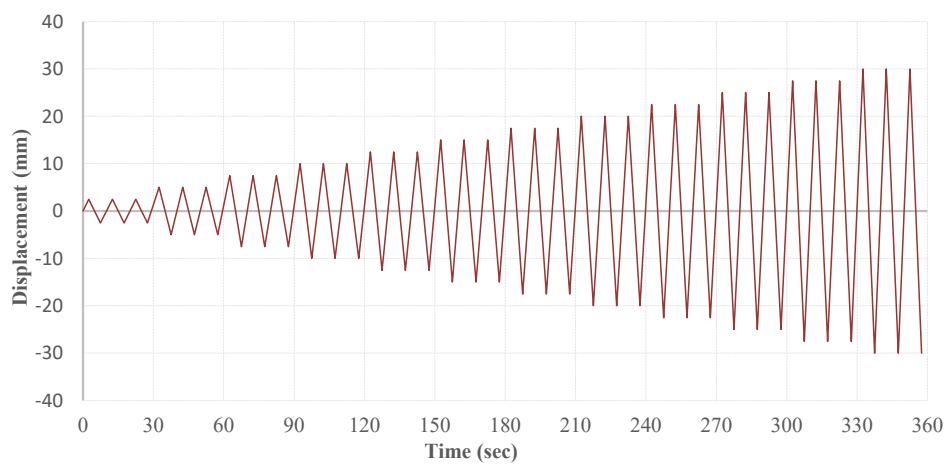
Table 3. Tensile strength of palm meshes

کرنش نهایی (%)	مدول الاستیسیته (GPa)	مقاومت کششی در واحد عرض (kN/m)	تقویت
۵/۵	۰/۴۳	۲/۲	مش الیاف خرما ۱۰۰×۱۰۰
۵/۵	۰/۴۳	۴/۴	مش الیاف خرما ۵۰×۵۰



شکل ۶. سازوکار آزمایش دیوار تحت بارگذاری چرخه‌ای

Fig. 6. Test setup under push-pull loading



شکل ۷. پروتکل بارگذاری چرخه‌ای

Fig. 7. Cyclic Loading regime



(ب)



(الف)



(د)



(ج)



(و)



(ه)

شکل ۸. الگوی شکست نهایی نمونه‌های: (الف) W1؛ (ب) W2؛ (ج) W3؛ (د) W4؛ (ه) W5؛ (و) W6.  
**Fig. 8. Failure patterns of the specimens: (a) W1 (b) W2 (c) W3 (d) W4 (e) W5 (f) W6**

### ۳- ارائه و بررسی نتایج

#### ۳-۱- مشاهدات و مودهای شکست

مصالح مصرفی، ضخامت دیوار، ضخامت درز ملات و چیدمان خشت بستگی دارد. در طول آزمایش‌ها الگوی ترک خوردگی روی سطح نمونه‌ها در محدوده ۸۰۰ میلی‌متر ارتفاع موثر ثبت گردید. شکل ۸ شرایط نمونه‌ها را در پایان بارگذاری چرخه‌ای نشان می‌دهد. مود شکست نهایی نمونه‌های دیوار W1 تا W4 مود شکست برشی بود و فقط نمونه‌های W5 و W6 همزمان مود شکست گهواره‌ای-

مودهای شکست درون صفحه‌ی یک دیوار خشتی شامل گسیختگی در اثر شکست برشی، لغزشی، گهواره‌ای و خردشدگی پاشنه‌هست. این مکانیزم‌های شکست به ابعاد دیوار (نسبت ارتفاع به طول)، شرایط تکیه‌گاهی، مقادیر بارهای قائم و افقی، مشخصات

الیاف خرما را عمود بر ترکهای برشی قطری و به موازات جهت کشش اصلی قرار می‌داد، کمترین بازشدگی ترک و خرابی ظاهری را دارا بود (شکل ۸). همچنین یکپارچگی نمونه W6 سبب شد مود گهواره ای تا لحظه افت بار نهایی ناشی از خردشدگی شدید پاشنه دیوار ادامه داشته باشد (شکل ۱۰).

### ۳-۲- رابطه بار- تغییر مکان جانبی

منحنی چرخه‌ای (نیرو-جابجایی) نمونه های دیوار خشتی در ۳-۲- شکل ۱۱ ارائه شده است. در مقایسه کلی منحنی‌ها بهبودی قابل توجه رفتار با کاهش اندازه شبکه مش (افزایش مقاومت مش) و تغییر آرایش شبکه مش از مربعی به لوزی دیده می‌شود. در مقایسه، نمونه W6 دارای بهترین رفتار چرخه‌ای است (۳-۲- شکل ۱۱-و).

در جدول ۴ حداکثر مقاومت برشی نمونه‌ها (متوسط بارگذاری رفت و برگشت) و جابجایی متناظر آن مقایسه شدند. در مقایسه حداکثر مقاومت برشی، نمونه های تقویت شده با مش ۱۰۰ میلی متر بطور متوسط حدود ۱۹ درصد و نمونه های تقویت شده با مش ۵۰ میلی متر (با مقاومت و سختی دو برابر نسبت به مش ۱۰۰ میلی متر) بطور متوسط ۴۶ درصد نسبت به نمونه شاهد افزایش مقاومت داشته اند. کمترین افزایش مقاومت مربوط به مش بدون مهار با ۱۲ درصد افزایش مقاومت بوده است. بنابر این در تقویت با مش خرما مهار مش ها و انتخاب مناسب میزان مش مصرفی حائز اهمیت است. علاوه بر این طبق جدول ۴ جابجایی متناظر با مقاومت حداکثر نیز با افزایش مش تقویتی افزایش یافته است. به عبارت دیگر مش‌های قویتر توانسته اند در جابجایی های بزرگتر هم مقاومت برشی قابل توجهی ایجاد نمایند. پارامتر مقایسه‌ای دیگر میزان افزایش مقاومت در جابجایی مشابه (تغییر مکان نسبی ۲ درصد، که معادل با جابجایی ۱۵ میلی متر است، برای این منظور انتخاب شد) است (جدول ۵). در این حالت نیز متوسط افزایش مقاومت برشی نمونه‌ها نسبت به نمونه شاهد، در حالت مش ۱۰۰ میلی متر کمتر از ۳۰ درصد و در مش ۵۰ میلی متر بیش از ۱۰۰ درصد است که نشان دهنده تأثیر بسیار بهتر مش‌های قویتر با شبکه ۵۰ میلی متر است.

### ۳-۳- ضریب شکل پذیری

بر اساس استاندارد ASTM E2126 [۲۰]، ضریب شکل‌پذیری



شکل ۹. مود شکست برشی و خردشدگی پاشنه ناشی از حرکت گهواره ای نمونه W5 و گسیختگی تارهای افقی مش

Fig. 9. Shear failure and toe crushing due to rocking motion in W5

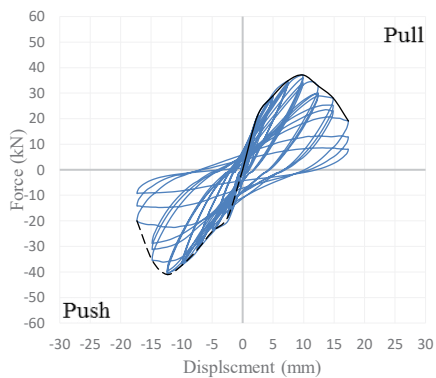


شکل ۱۰. مود شکست خردشدگی پاشنه ناشی از حرکت گهواره ای نمونه W6

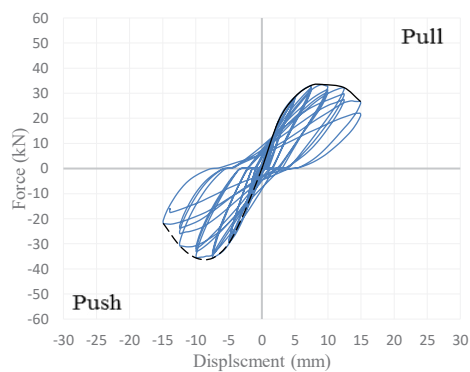
Fig. 10. Toe crushing due to rocking motion in W6

خردشدگی پاشنه را تجربه کردند (شکل ۸). در نمونه های W2، W3 و W4 که دارای تقویت مش الیاف خرما با شبکه ۱۰۰ میلی متر بودند، پس از گسیختگی تارهای افقی مش در جابجایی ۱۲/۵ میلی متر، ترکهای برشی قطری در سطح دیوار گسترش پیدا کرد. علاوه براین، مش الیاف خرما نمونه W2 به علت عدم مهار جانبی، با گسترش ترکها، از سطح مرکزی دیوار جدا شد و همین عامل سبب افت بار در این نمونه گردید. پس از گسیختگی تارهای افقی مش الیاف خرما در نمونه W5 در جابجایی ۱۷/۵ میلی متر ترکهای قطری در سطح دیوار گسترده شد و این نمونه با ادامه روند شکست گهواره ای، خردشدگی پاشنه را هم تجربه کرد (شکل ۹). از سوی دیگر نمونه W6 بعلاوه آرایش لوزی تارهای مش الیاف خرما که امتداد

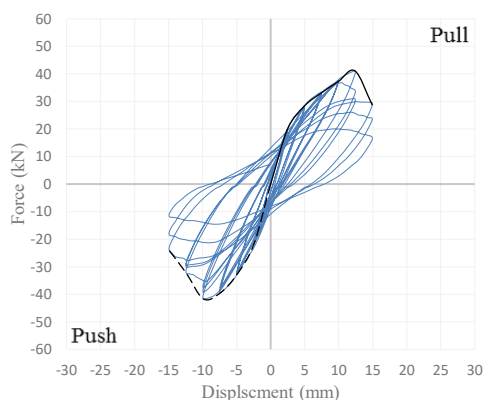




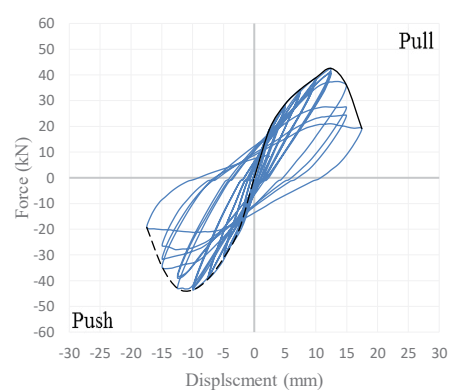
(ب)



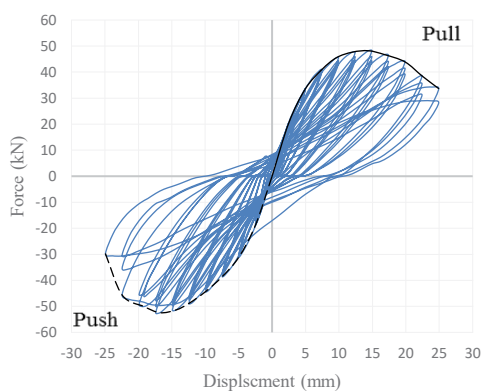
(الف)



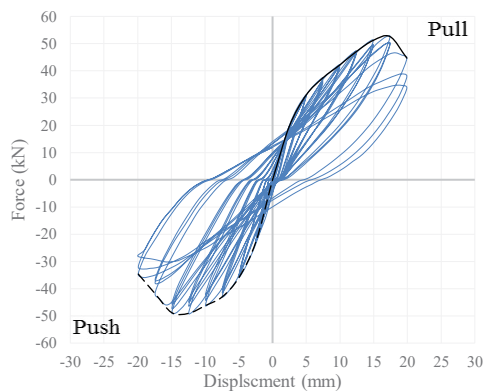
(د)



(ج)



(و)



(ه)

شکل ۱۱. منحنی چرخه‌ای نیرو-جابجایی نمونه‌ها: (الف) W1؛ (ب) W2؛ (ج) W3؛ (د) W4؛ (ه) W5؛ (و) W6.  
**Fig. 11. Hysteresis load-displacement curves: (a) W1 (b) W2 (c) W3 (d) W4 (e) W5 (f) W6**

معادل، نسبت جابجایی نهایی به جابجایی تسایم فرضی از منحنی دو خطی به عنوان ضریب شکل‌پذیری شناخته می‌شود. این ضریب ملاک ارزیابی تردی یا شکل‌پذیری رفتار سازه تحت بار جانبی است.

از نمودار دوخطی معادل حاصل از منحنی پوش میانگین به دست می‌آید. در شکل ۱۲ نحوه‌ی رسم نمودار دو خطی معادل بصورت شماتیک توضیح داده شده است. پس از ترسیم منحنی دوخطی

جدول ۴. حداکثر مقاومت و جابجایی متناظر نمونه های آزمایش  
Table 4. Maximum strength and corresponding displacements

جابجایی در حداکثر مقاومت (mm)		درصد افزایش	میانگین حداکثر مقاومت (kN)	حداکثر مقاومت (kN)		نمونه
Push	Pull			Push	Pull	
۱۰	۱۰	---	۳۴/۵۷	۳۵/۶۸	۳۳/۴۶	W1
۱۲/۵	۱۰	۱۲/۹۳	۳۹/۰۴	۴۰/۹۸	۳۷/۱۰	W2
۱۰	۱۲/۵	۲۴/۶۰	۴۳/۰۸	۴۳/۶۳	۴۲/۵۲	W3
۱۰	۱۲/۵	۱۹/۷۴	۴۱/۴۰	۴۱/۶۹	۴۱/۱۰	W4
۱۲/۵	۱۷/۵	۴۷/۰۴	۵۰/۸۳	۴۹/۰۸	۵۲/۵۸	W5
۱۷/۵	۱۵	۴۵/۵۶	۵۰/۳۲	۵۲/۴۳	۴۸/۲۱	W6

منحنی پوش میانگین نمونه‌ها در شکل ۱۳ مورد مقایسه قرار گرفته است و ضریب شکل‌پذیری که بر اساس معادل سازی دوخطی این پوش‌ها حاصل شده است در جدول ۶ ارائه گردیده است. با توجه به منحنی های پوش در شکل ۱۳ پوش رفتار چرخه‌ای در همه حالات مقاوم‌سازی انجام شده بهبود داشته است ولی این بهبود برای نمونه های تقویت شده با مش ۵۰ میلی متری بسیار مشهود و قابل توجه بوده است. ضعیف‌ترین پوش در نمونه های تقویت شده که تفاوت قابل توجهی با پوش نمونه بدون تقویت ندارد مربوط به نمونه تقویت شده با مش ۱۰۰ و بدون مهار است (W2). گسترده ترین پوش نیز متعلق به نمونه W6 یعنی دیوار با تقویت مش ۵۰ لوزی است. بررسی ضرایب ضرایب شکل‌پذیری بدست آمده در جدول ۶ بیانگر اینست که هرچند در تمامی نمونه ها ضریب شکل پذیری نسبت به نمونه شاهد افزایش داشته است ولی این افزایش چندان قابل توجه نبوده است. کمترین ضریب شکل پذیری مربوط به نمونه شاهد با ضریب ۳/۰۶ و بیشترین مربوط به نمونه W6 با ضریب ۴/۰۳ است که بیانگر حداکثر رشد ۳۲ درصدی ضریب شکل‌پذیری است.

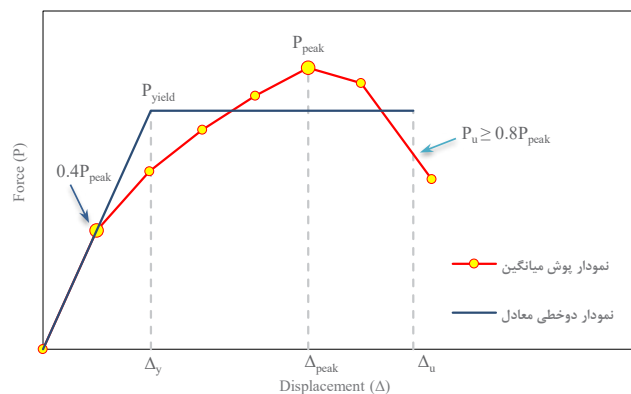
البته ضریب شکل پذیری به تنهایی گویای رفتار لرزه‌ای دیوار نبوده و پارامتر میزان جذب یا استهلاک انرژی نیز در این زمینه نقش‌آفرین است.

#### ۴-۳- استهلاک انرژی تجمعی

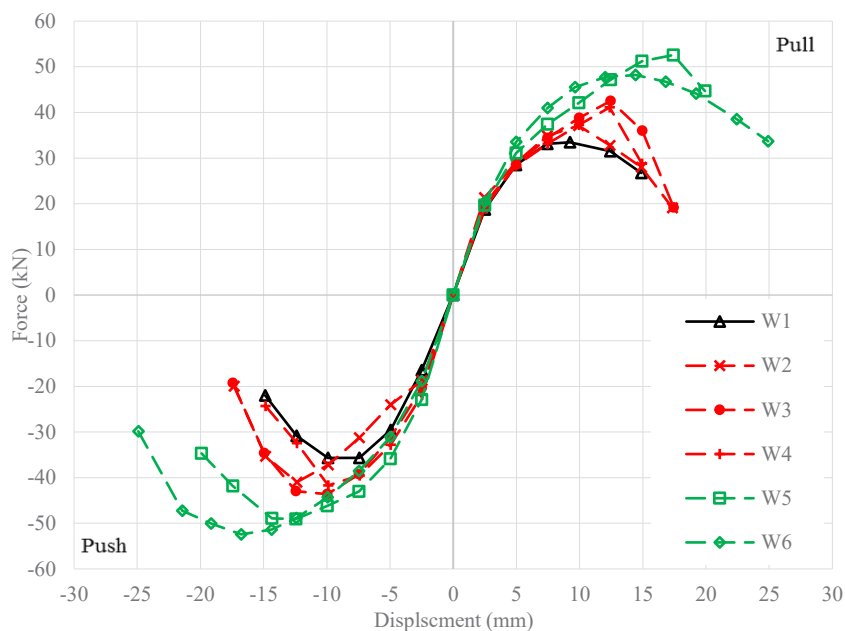
استهلاک انرژی وارده یا جذب انرژی توسط سازه در یک چرخه

جدول ۵. مقایسه مقاومت در جابجایی ۱۵ میلی‌متر نمونه ها  
Table 5. Comparison of lateral resistance at 15 mm displacement

درصد افزایش	میانگین مقاومت در جابجایی ۱۵ میلی‌متر (kN)	نمونه
---	۲۴/۳۷	W1
۲۹/۷۱	۳۱/۶۱	W2
۴۴/۹۳	۳۵/۳۲	W3
۸/۸۶	۲۶/۵۳	W4
۱۰۵/۴۲	۵۰/۰۶	W5
۱۰۴/۳۱	۴۹/۷۹	W6



شکل ۱۲. نحوه‌ی رسم نمودار دوخطی معادل  
Fig. 12. Equivalent bilinear force-displacement diagram



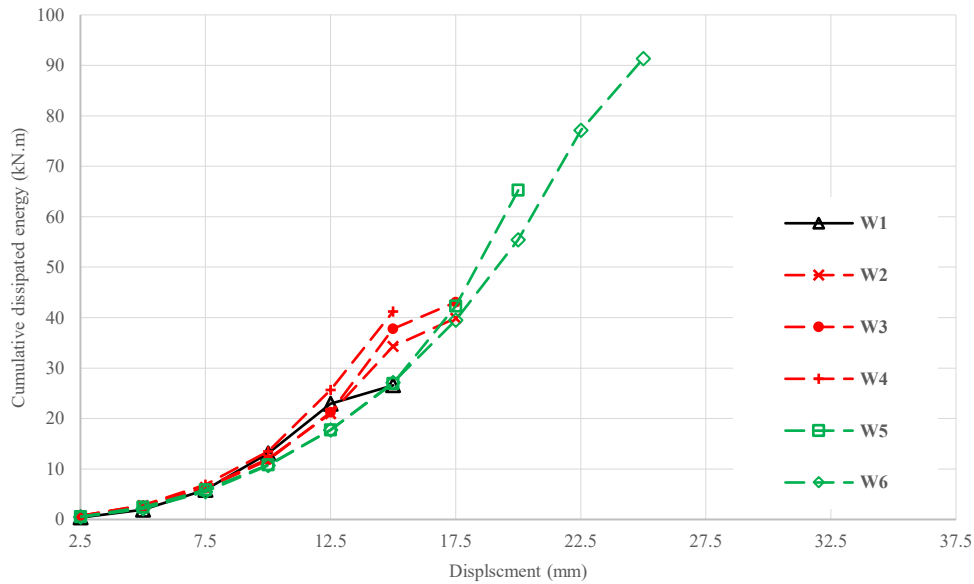
شکل ۱۳. مقایسه پوش منحنی‌های چرخه‌ای نمونه‌ها  
**Fig. 13. The envelopes of Hysteresis curves**

جدول ۶. مقادیر محاسبه شده ضریب شکل پذیری  
**Table 6. Calculated ductility factors**

نمونه	نیروی تسلیم (kN)	جابجایی تسلیم (mm)	جابجایی نهایی (mm)	درصد افزایش	ضریب شکل-پذیری	درصد افزایش
W1	۳۱/۶۶	۴/۴۷	۱۳/۶۹	---	۳/۰۶	---
W2	۳۲/۶۱	۴/۰۳	۱۵/۲۶	۱۱/۴۷	۳/۷۹	۲۳/۸۶
W3	۳۷/۶۱	۴/۷۰	۱۵/۱۲	۱۰/۴۵	۳/۲۲	۵/۲۳
W4	۳۴/۳۶	۴/۰۷	۱۳/۶۵	-۰/۲۹	۳/۳۵	۹/۴۸
W5	۴۳/۵۹	۵/۱۰	۱۹/۷۷	۴۴/۴۱	۳/۸۸	۲۶/۸۰
W6	۴۴/۶۵	۵/۶۷	۲۲/۷۶	۶۶/۲۵	۴/۰۲	۳۱/۳۷

۱۴ برحسب دامنه تغییرمکان جانبی مورد مقایسه قرار گرفته است. همانگونه که مشاهده می شود در تغییرمکان های جانبی کوچک تا حدود ۱۰ میلی متر میزان استهلاک انرژی در نمونه های تقویت شده و نشده تقریباً مساوی است. این مسئله در کنار نزدیک بودن ضرایب شکل پذیری نمونه‌ها بیانگر اینست که رفتار لرزه‌ای دیوارهای خشتی مورد آزمایش در تغییرمکان های جانبی نسبی کم و زلزله های کم

نمودار هیستریزس ناشی از رفتار غیرخطی بوده و بصورت انتگرال نیرو در جابجایی و یا به عبارت دیگر سطح محصورشده در حلقه رفتار بار-جابجایی مربوط به چرخه مربوطه تعیین می گردد. استهلاک انرژی در مجموعی از جمع مقادیر انرژی جذب شده در چرخه های متوالی در طول آزمایش تا لحظه خرابی (افت مقاومت جانبی قابل توجه نمونه) به دست می آید. مقادیر استهلاک انرژی در مجموعی نمونه ها در شکل



شکل ۱۴. استهلاك انرژی تجمعی نمونه‌ها.

Fig. 14. Cumulated dissipated energy of specimens

شکل‌پذیری و افزایش قابلیت استهلاك انرژی بود. نتایج زیر از این تحقیق بدست آمد:

۱- روش تقویت خارجی با استفاده از مش بافته‌شده الیاف خرما، یکپارچگی نمونه‌های دیوار خشتی را بهبود بخشید و قابلیت تحمل تغییرمکان نسبی جانبی دیوار خشتی را افزایش داد. همچنین با توزیع مناسب ترکها در دیوار سبب به تعویق انداختن افت ناگهانی مقاومت، در نمونه های تقویت شده دیوار گردید. مش‌های قویتر در این زمینه بطور قابل ملاحظه‌ای بهتر عمل کردند.

۲- مود شکست اغلب دیوارها به دو صورت مختلف: برشی قطری و گهواره ای توام با خردشدگی پاشنه مشاهده گردید. با افزایش میزان مش تقویتی مود شکست به سمت گهواره‌ای توام با خردشدگی پاشنه تمایل یافت. در نمونه W6 که با مش قویتر و جهت گیری لوزی مش تقویت شده بود کمترین میزان مود شکست برشی قطری و نیز کمترین میزان باز شدگی ترکها مشاهده گردید.

۳- مقاومت برشی دیوارهای خشتی تقویت شده با مش الیاف خرما در دریفت جانبی ۲ درصد، تا ۱۰۵ درصد نسبت به نمونه کنترل (تقویت نشده) افزایش یافت. این افزایش مقاومت در حالت کلی تا ۴۷ درصد مشاهده گردید که نتایج بسیار امیدبخشی در مقاوم سازی لرزه‌ای دیوارهای خشتی است.

و متوسط تقریباً مشابه خواهد بود. با افزایش تغییر مکان جانبی تا حدود ۱۵ میلی متر، یعنی دریفت یا تغییر مکان جانبی حدود ۲ درصد، نمونه های تقویت شده با مش معمولی ۱۰۰ میلی متری جذب انرژی بهتری داشته اند. در تغییرمکان های جانبی بالاتر که مربوط به بارهای تناوبی یا زلزله‌های شدیدتر خواهد بود، نمونه‌های دیوار خشتی تقویت نشده و تقویت شده با مش ۱۰۰ میلی متر تخریب شده و تنها نمونه‌های دیوار تقویت شده با مش قویتر یعنی ۵۰ میلی متر توانسته‌اند تا تغییرمکان نسبی بالای ۳ درصد به استهلاك انرژی و پایداری در برابر بارهای جانبی تناوبی ادامه دهند.

#### ۴- نتیجه گیری

مقاله حاضر نتایج بخشی از یک برنامه پژوهشی گسترده در دانشکده عمران دانشگاه یزد در رابطه با ارزیابی رفتار و مقاوم‌سازی دیوارهای خشتی را ارائه می‌دهد. در این تحقیق نقش مش‌های بافته شده از الیاف خرما که یک مصالح سنتی و سازگار با زیست‌بوم است در بهسازی رفتار دیوارهای سنتی خشتی تحت بارهای چرخه‌ای جانبی درون صفحه مورد ارزیابی قرار گرفت. پارامترهای ارزیابی بهبود رفتار، حفظ یکپارچگی و پخش ترک خوردگی، افزایش باربری جانبی، قابلیت تحمل تغییرمکان های جانبی بالاتر، افزایش ضریب

- [8] N. Sathiparan, P. Mayorca, K. Meguro, Experimental Study on Static and Dynamic Behavior of PP-Band Mesh Retrofitted Adobe Masonry Structure, in: Proc. of the 7th International Conference on Urban Earthquake Engineering (7CUUE), 2010, pp. 5-3.
- [9] A. Figueiredo, H. Varum, A. Costa, D. Silveira, C. Oliveira, Seismic retrofitting solution of an adobe masonry wall, *Materials and Structures*, 219-203 (2013) (2-1)46.
- [10] EL. Tolles, "Getty seismic adobe project research and testing program", Proc, Getty Seismic Adobe Project 2006 Colloquium 2009., p. 41-34.
- [11] EL. Tolles, EE. Kimbro, FA. Webster, WS. Ginell, "Seismic stabilization of historic adobe structures", The Final Report of the Getty Seismic Adobe Project, The Getty Conservation Institute, Los Angeles. 2000.
- [12] M. Blondet, J. Vargas, N. Tarque, JS. Paz, C. Sosa, J. Sarmiento, "Refuerzo sísmico de mallas de sogas sintéticas para construcciones de adobe", *Tierra, sociedad, comunidad: 15° Seminario Iberoamericano de Arquitectura y Construcción con Tierra: Universidad de Cuenca*; 2015. p. 80-67.
- [13] A. Charleson, M. Blondet, "Seismic reinforcement for adobe houses with straps from used car tires", *Earthquake Spectra.*, 2)28;2012):30-511.
- [14] A. Charleson, "Seismic strengthening of earthen houses using straps cut from used car tires: a construction guide", Oakland: Earthquake Engineering Research Institute (EERI), 2011.
- [15] S. Farooq, M. Ilyas, S. Amir, "Response of masonry walls strengthened with CFRP and steel strips", *Arabian Journal for Science and Engineering.*, 3)37;2012):59-545.
- [16] M. Shabdin, Nader K. A. Attari, and M. Zargarani, "Investigating the effect of changing in material properties on the behavior of Un-Reinforced Masonry (URM) walls for using in seismic vulnerability studies", *Modarres Civil Engineering Journal*, 2)18), 2018, pp. 126-113 (In Persian).
- [17] N. Ismail, J. Ingham, "In-plane and out-of-plane testing of masonry walls strengthened using polymer textile
- ۴- ضریب شکل پذیری نمونه دیوار خشتی در حالت تقویت نشده در حدود ۳ بدست آمد که مقدار قابل قبولی برای این مصالح بومی و ارزان و سازگار با محیط زیست محسوب می گردد. این مقدار با تقویت با مش الیاف خرما تا حدود ۴ افزایش یافت.
- ۵- نمونه دیوار خشتی تقویت نشده تا تغییر مکان جانبی ۱۰ میلی متر قادر به استهلاک انرژی در حد قابل قبول بود. با تقویت با مش الیاف خرما با شبکه ۱۰۰ میلی متری (مش ضعیفتر) این قابلیت تا تغییر مکان جانبی حدود ۱۵ میلیمتر ( معادل با دریفت ۲ درصد) ادامه یافت. نمونه‌های دیوار خشتی تقویت شده با مش ۵۰ میلی متر (مش قویتر) قابلیت استهلاک انرژی خود را بخوبی تا تغییر مکان جانبی ۲۵ میلی متر حفظ نمودند.

## مراجع

- [1] G. Minke, *Building with earth: design and technology of a sustainable architecture*, Walter de Gruyter, 2012.
- [2] F. Wu, H.-T. Wang, G. Li, J.-Q. Jia, H.-N. Li, Seismic performance of traditional adobe masonry walls subjected to in-plane cyclic loading, *Materials and Structures*, (1)50 69 (2017).
- [3] S. Hračov, S. Pospíšil, A. Garofano, S. Urushadze, In-plane cyclic behaviour of unfired clay and earth brick walls in both unstrengthened and strengthened conditions, *Materials and Structures*, 3308-3293 (2016) (8)49.
- [4] M. Blondet, G.V. Garcia, S. Brzev, A. Rubiños, Earthquake-resistant construction of adobe buildings: A tutorial, *EERI/IAEE world housing encyclopedia*, (2003).
- [5] R. Meli, O. Hernandez, M. Padilla, Strengthening of adobe houses for seismic actions, in: *Proceedings of the Seventh World Conference on Earthquake Engineering*, 1980, pp. 472-465.
- [6] A. Bakhshi, M. Ghannad, M. Yekrangnia, H. Masaeli, Shaking table tests on dome-roof adobe houses, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, (3)46 490-467 (2017).
- [7] F. Tootoonchy, B. Asgarian, F. Danesh, Experimental in-plane behavior and retrofitting method of mud-brick walls, *International Journal of Civil Engineering*, (2)13 201-191 (2015).

- for compressive strength of hydraulic cement mortars (using -2in. or [-50mm] cube specimens), annual book of ASTM, standards, 4.
- [20] E. ASTM, 2126, Standard Test Methods for Cyclic (Reversed) Load Test for Shear Resistance of Walls for Building, ASTM Designation E 2005) 5 ,2126).
- reinforced mortar”, Engineering Structures, V. 118, July 2016. pp. 177-167.
- [18] ASTM, Standard test methods for sampling and testing brick and structural clay tile, in, ASTM International USA, West Conshohocken, Pennsylvania, 2003.
- [19] C. ASTM, 109/C 109M1999 ,99-, Standard test method

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

*H. Meybodian, R. Morshed, A. Eslami, Experimental investigation on the seismic behavior of adobe walls retrofitted with palm meshes, Amirkabir J. Civil Eng., 52(8) (2020) 2129-2142.*

DOI: [10.22060/ceej.2019.15927.6079](https://doi.org/10.22060/ceej.2019.15927.6079)

