

ارزیابی آزمایشگاهی رفتار دیوار خشتی غیر مسلح ساخته شده از خشت‌های مورد استفاده در توسعه بافت تاریخی شهر یزد

عاطفه جهان محمدی^{*۱}

۱- استادیار بخش مهندسی سازه و ابنیه فنی، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی

Email: jahanmohammadi@bhrc.ac.ir

تاریخ دریافت: [۱۴۰۲/۰۴/۰۹] تاریخ پذیرش: [۱۴۰۲/۰۶/۲۴]

چکیده

پیرو ثبت جهانی بافت تاریخی شهر یزد در کمیته میراث جهانی یونسکو، ایران ملزم به حفظ و نگهداری بناهای واقع در عرصه و حریم میراث جهانی و احداث ساختمان‌های جدید در این محدوده شده است. با توجه به اینکه ساختمان‌های خشتی غیرمسلح بخش عمده‌ای از ساختمان‌های واقع در محدوده مذکور را شامل می‌شوند، توسعه این بافت براساس الزام یونسکو، احداث بناهای خشتی مشابه را در پی خواهد داشت. به این ترتیب، مطالعه روی خشت و بناهای خشتی واقع در این بافت تاریخی و تعیین شیوه‌های اجرایی متناسب با طراحی و احداث ساختمان‌های خشتی مقاوم در برابر زلزله از اهمیت بالایی برخوردار است. در پژوهش حاضر، ابتدا الگوی رفتاری سازه بناهای دارای معماری سنتی و تاریخی شهر یزد، در تحمل بارهای وارد شده بررسی و نوع مشارکت دیوارهای خشتی در تحمل همزمان بارهای ثقلی و لرزه‌ای تعیین شده است. سپس و با اتکا بر مطالعات موجود، حدود مشخصات مورد انتظار برای مصالح به کار رفته در تولید خشت به شیوه سنتی و متعارف در منطقه سرشماری شده است. همچنین، به منظور دستیابی به برآوردی از عملکرد دیوارهای خشتی غیرمسلح که با دانش و تجربه بومی ساخته شده اند، ضمن مرور پژوهش‌های صورت گرفته در سطح استان، مطالعات آزمایشگاهی تکمیلی با تاکید بر انتخاب مصالح مصرفی شامل خاک و خشت از مصالح متعارف مورد استفاده در منطقه و شیوه اجرای دیوارهای خشتی متناظر با روش کار استادکاران بومی دنبال شده است. در این مطالعات، ابتدا ویژگی‌های مکانیکی خشت و منشورهای خشتی تعیین شده و سپس، مطالعات آزمایشگاهی برای شناسایی عملکرد دیوارهای خشتی در تحمل بارهای ثقلی و لرزه‌ای انجام شده است. در نتیجه این مطالعات، رفتار لرزه‌ای دیوار خشتی غیرمسلح استخراج و نقاط ضعف این نوع از دیوار شناسایی و گزارش شده است. بر همین مبنای، پیشنهادی برای سازه‌ای برای حدود مشخصات بنا و همچنین، برخی ملاحظات اجرایی برای احداث ساختمان‌های خشتی کوتاه مرتبه ارائه شده است.

واژگان کلیدی: خشت، ساختمان‌های خشتی، بافت تاریخی، یزد، ساختمان‌های مقاوم در برابر زلزله.

۱- مقدمه

از منظر میراث فرهنگی، شهر تاریخی یزد دربرگیرنده محدوده‌ای به وسعت ۱۷۰۰ هکتار شامل مناطق ارزشمند از نظر تاریخی و فرهنگی است که با در نظر گرفتن تمرکز بناها و نمادها، محدوده‌ای با مساحت تقریبی ۷۰۰ هکتار به عنوان بافت قدیمی در این شهر قابل شناسایی است. با عنایت به پژوهش‌های صورت گرفته در وزارت میراث فرهنگی، گردشگری و صنایع دستی و مجموعه اداره کل میراث فرهنگی و گردشگری استان یزد و مستندات ارائه شده در خصوص ویژگی‌های معماری، سازه و شهرسازی بافت تاریخی شهر یزد [1]، پرونده ثبت جهانی این بافت در ۴۱مین کمیته میراث جهانی (world heritage) یونسکو به تصویب و این بافت در عرصه‌ای به وسعت ۱۹۶ هکتار و حریمی به وسعت ۶۶۶ هکتار در ردیف (iii) و (v) اسناد یونسکو به ثبت رسیده است. با توجه به موارد مندرج در سند یونسکو و مصوبات کمیته میراث جهانی، ایران موظف است در این مدت زمانی که شهر یزد همچنان در ذیل ردیف‌های ثبت جهانی باقی می‌ماند، نسبت به انجام مطالعات پژوهشی روی آمادگی عرصه و حریم ثبت جهانی برای مواجهه با زلزله و تهیه دستورالعمل‌هایی برای ساخت، نگهداری و بهبود شرایط ساختمان‌های واقع در این محدوده اقدام نماید [2].

مطالعات انجام شده مویید این مطلب است که معماری حاکم بر این محدوده، معماری خشتی است و علاوه بر روش‌های خاص و منحصر به فرد تولید خشت، استفاده از خشت در ایجاد قطعات سازه‌ای در فرمی معمارانه و خلاق، ویژگی‌های منحصر به فردی را به سازه‌های واقع در آن افزوده است. قطعاً بهره گرفتن از منابع بومی را می‌توان یکی از دلایل اصلی استفاده از خشت در تشکیل بافت تاریخی شهر یزد در گذشته بر شمرد. این موضوع در کنار توجه استادکاران سنتی به یکپارچگی الگوی ساخت در گستره این بافت، سبب شده تا استفاده از مصالحی به جز خشت به کمترین مقدار ممکن برسد. به این ترتیب و با هنر و خلاقیت استادکاران حرفه‌ای، تمامی نیازهای سکونت‌گاهی این بافت با احداث بناهای خشتی (شامل ساختمان‌های مسکونی و بناهای ضروری و خدمت رسان از جمله آب انبارها، حمام‌ها، معابر، کاروانسراها و ...) پاسخ داده شده است. این موضوع سبب شده تا یکپارچگی

بافت به عنوان یک شاخصه معماری مورد توجه باشد (شکل ۱). چه بسا این شاخصه، به دلیل ایجاد پشت بندهای مستحکم در حفظ پایداری قطعات قائم و قوسی خشتی، تاثیر قابل ملاحظه‌ای نیز روی عملکرد سازه‌ای و لرزه‌ای بناهای واقع در این بافت داشته‌است [1].

این در حالی است که با رخداد زلزله بم در سال ۱۳۸۲ و عملکرد ضعیف سازه‌های خشتی و وسعت آسیب‌های گزارش شده، مبحث هشتم مقررات ملی که تا آن زمان منعی برای احداث بناهای خشتی منظور نمی‌کرد، در ویرایش سوم خود (۱۳۹۸) ساختمان‌های خشتی را از دسته ساختمان‌های بنائی مقاوم در برابر زلزله خارج نموده و ضوابطی در این خصوص ارائه نمی‌نماید [3]. بر همین اساس و به منظور پاسخگوئی به تعهدات تعریف شده در ذیل لزوم یونسکو برای محدوده میراث جهانی شهر یزد، دستیابی به شناخت تحلیلی و قابل استناد از رفتار دیوارهای خشتی که به شیوه سنتی اجرا می‌شوند و کلیه مولفه‌های تاثیرگذار بر رفتار سازه حاصل از این نوع دیوارها ضروری است.

شکل ۱. شمای کلی از ساختار یکپارچه بافت تاریخی شهر یزد [1]

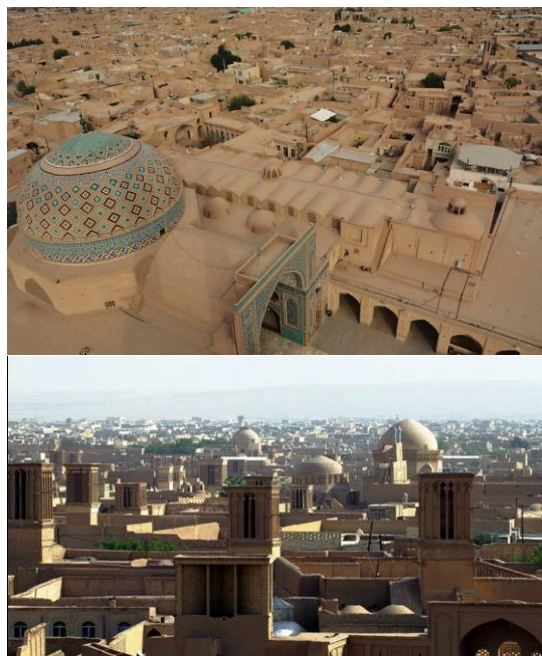


Fig 1. Integrated district of historic city of Yazd [1]

با توجه به اهمیت این موضوع در سطح منطقه، در سال‌های گذشته مطالعات متنوعی توسط پژوهشکده معماری گلین و دانشکده مهندسی عمران دانشگاه یزد صورت گرفته که ضمن بررسی ضوابط بین المللی موجود در زمینه تولید خشت و

پیوسته یا گسسته احداث شده‌اند. با وجود این طاقها، ضمن آنکه از ساکنین بافت در برابر تابش مستقیم آفتاب حفاظت شده است، بناهای واقع در دو سمت یک معبر به یکدیگر متصل شده و پشت بندهای سازه ای به شکل مطلوب برای دیوارهای بیرونی بناها نیز تامین می‌شود.

شکل ۲. نمونه‌هایی از اجرای دیوارها، پشت بندها و طاقها در معماری

ستی بافت تاریخی شهر یزد [1]



Fig 2. Examples of walls, backings and vaults in historic districts of Yazd [2]

از دیگر مولفه‌های معماری که بر فرم سازه و مهار جانبی دیوارها تاثیرگذار است، تنوع موجود در انتخاب طاقها و گنبدهای مناسب برای بنا با توجه به نقشه معماری می‌باشد. با توجه به مشاهدات میدانی شکل (۲)، تبحر استادکاران و معماران سستی در اجرای انواع سقف‌های قوسی به شیوه‌های متنوع و با بهره‌گیری از المان‌های مختلف، امکان اجرای

احداث بناهای خشتی [4] و ملاحظات سازه‌ای در انواع فرم‌های شناسایی شده برای بناهای خشتی [5]، به رفتارشناسی ترکیب‌های مصالح بومی در تولید خشت [6-7] و همچنین، ارزیابی عملکرد دیوارهای خشتی ساخته شده به شیوه سستی [8-11] پرداخته است. در این پژوهش، به اختصار به مجموعه مطالعات صورت گرفته در حوزه‌های مختلف اشاره شده و با تکمیل مطالعات آزمایشگاهی، رفتار دیوارهای خشتی غیرمسلح تحت اثر همزمان بارهای ثقلی و لرزه‌ای به بحث گذاشته می‌شود.

۲- بیان مسئله

بررسی مولفه‌های متعدد بافت تاریخی شهر یزد نشان می‌دهد در احداث ساختمان‌های خشتی واقع در این بافت، شرایط اقلیمی، جغرافیایی و زلزله‌خیزی در نظر گرفته شده است. بر کسی پوشیده نیست که خشت به تنهایی از مقاومت فشاری کم و مقاومت کششی ناچیزی برخوردار است. از این رو بدیهی است بیشترین استفاده از ظرفیت خشت منوط به تعریف الگوهای معماری سازگار با انتظارات عملکردی بنا می‌باشد.

به طور کلی در انتخاب اجزاء باربر ساختمان‌های خشتی و اجرای سازه آن، بر ظرفیت باربری دیوارهای ضخیم، آثار وجود طاقها، الگوی خاص تعبیه زیرزمین در ساختمان‌ها و همچنین، یکپارچگی فضاها در بافت تکیه شده است. با توجه به اینکه در گذشته، زمین‌های تحت مالکیت افراد وسعت کافی داشته است، اجرای دیوارهای ضخیم و بسیار ضخیم با هدف تامین باربری ثقلی و مقاومت در برابر بارهای جانبی به ویژه بارهای لرزه‌ای و بارهای رانش در پاتاق‌ها، راهکار مناسبی برای اطمینان از مقاومت ساختمان‌های خشتی به حساب آمده است. علاوه بر این در ارزیابی‌های میدانی مشهود است که فضاهای مجاور واقع در یک بنای واحد و همچنین فضاهای مجاور که در دو یا چند بنای همسایه واقع شده‌اند، با کمک دیوارهای متعامد یا پاتاق‌های مشترک به یکدیگر دوخته می‌شوند. به این ترتیب، مهار جانبی دیوارها بواسطه حضور پشت بندهای نسبتاً مقاوم تامین می‌شود. همچنین، به دلیل اقلیم گرم و خشک حاکم بر این منطقه، بیشتر معابر بافت به صورت سرپوشیده و با طاقهای

سقف‌های قوسی در دهانه‌ها و خیزهای بزرگ را فراهم می‌کند [1].

پیرو مطالعات مفصل صورت گرفته توسط حاجی صادقی و همکاران روی عملکرد سقف‌های قوسی که با الگوی سنتی و معماری شهر یزد ساخته می‌شوند، می‌توان از این موضوع اطمینان حاصل نمود که توزیع نیرو در المان‌های اجرا شده در سقف‌های قوسی در سازگاری با ظرفیت دیوارهای نگهدارنده قوس بوده و در بیشتر موارد، تعادل نیرویی و سازگاری تغییرشکل را به شکل مطلوب تامین می‌نماید [12].

این موارد موید این مطلب است که رفتار دیوار خشتی به عنوان یک عضو باربر سازه‌ای در یک بنای خشتی واقع در بافتی یکپارچه، با رفتار دیوار خشتی به عنوان یک عضو باربر سازه‌ای در یک بنای خشتی منفرد قابل مقایسه نخواهد بود و به این ترتیب، مهار جانبی دیوارهای خشتی بناهای خشتی منفرد برای تحمل بارهای جانبی به ویژه بارهای لرزه‌ای و بارهای رانش در پاتاق‌ها، باید بر اساس نتایج ارزیابی‌های سازه‌ای دیوارها و با روش‌های اجرایی مناسب تامین شود. در این راستا، ابتدا لازم است شناخت دقیق‌تری از مشخصات خشت‌های تولیدشده به روش سنتی که مصالح بومی استان یزد در آنها به کار رفته است، حاصل آید تا بتوان برآورد واقع بینانه‌تری از رفتار یک دیوار خشتی غیرمسلح بدست آورد.

۳- ویژگی‌های مکانیکی انواع ترکیب‌های خاک برای تولید خشت

خشت به طور کلی از ترکیب آب و خاک رس ساخته شده و پس از گذراندن فرآیند آماده سازی گل خشت، کتیبه‌های خشتی به مدت ۳ تا ۳۰ روز در زیر تابش مستقیم نور آفتاب خشک می‌شوند. مرور مطالعات پیشین نشان می‌دهد خاک رس مورد استفاده در خشت‌های منطقه یزد اغلب از خاک سرزمین (خاک بومی منطقه) انتخاب شده و تجربه و تبحر استادکار معمار نقش به سزایی در انتخاب خاک داشته است. از مشخصات مورد توجه استادکاران در انتخاب خاک رس مناسب برای تولید خشت می‌توان به قابلیت خمیری و شکل‌پذیری بالا، کارایی و فرم‌پذیری در شرایط آب و هوایی مختلف و عاری

بودن از مواد شیمیایی مضر اشاره کرد. ضمن آنکه انسجام کتیبه خشتی پس از از دست دادن رطوبت و کم بودن قابلیت نفوذپذیری آن، مناسب بودن خاک رس انتخاب شده توسط استادکار را تأیید می‌نموده است [13]. فارغ از روش‌های به کار گرفته شده در انتخاب خاک رس، شیوه ترکیب خاک و آب و عمل آوری گل خشت شامل آبخوره کردن، ورز دادن (شلاق زدن) و روش قالب‌گیری بر میزان تراکم ترکیب ماتریس گلی تأثیرگذار است که این موضوع نیز، مرتبط با تجربه استادکاران سنتی است [13-14]. به هر صورت، سابقه مطالعات نشان می‌دهد خشت از نظر مقاومت کششی و فشاری در رده مصالح ضعیف تا متوسط قرار گرفته و اصلاح مقاومت آن با استفاده از افزودنی‌های طبیعی سازگار با شرایط اقلیمی منطقه یزد، همواره مورد توجه بوده است. تجربه استفاده از افزودنی‌های طبیعی مانند کاه، خرده‌سنگ، لوخ، موی بز، پشم شتر، الیاف خرما، ساقه و پوست برنج، و همچنین تثبیت‌کننده‌های شیمیایی مانند آهک به منظور افزایش میزان چسبندگی یا استحکام کتیبه‌های تولید شده در مطالعات پیشین گزارش شده است [15].

با توجه به تأثیر مقاومت مصالح پایه در افزایش مقاومت دیوارها و بناهای خشتی و الزام یونسکو بر انجام مطالعات پژوهشی برای بهبود شرایط ساختمان‌های خشتی، مطالعات مفصلی توسط ویسه و همکاران [16] روی خشت‌های تولید شده در شهر یزد با استفاده از مصالح بومی صورت گرفت. در این مطالعات، خاک سه موقعیت جغرافیایی شامل مناطق حسین آباد، سید میرزا و یک منطقه بیابانی در شمال شرقی شهر یزد با احداث گمانه‌های با عمق ۲-۳ متر برداشت شده و تحت آزمایش‌های لازم قرار گرفته است. با استناد به نتایج آزمون‌های فیزیکی و شیمیایی انجام شده روی این نمونه‌ها، خاک‌های انتخابی سازگاری لازم با حداقل مشخصات خاک مصرفی در تولید خشت را دارد. طرح اختلاط مدنظر برای ساخت نمونه‌های آزمایش شده توسط ویسه و همکاران شامل ترکیبی از خاک رس و آب بوده که در برخی نمونه‌ها، مقادیر طراحی شده‌ای از ماسه، آهک و کاه به این ترکیب اضافه شده اند [16]. مطالعات صورت گرفته روی طرح‌های اختلاط مختلف و آزمایش‌های انجام شده روی نمونه‌های مکعبی با ابعاد ۵×۵×۵

تولید خشت در شهر یزد دنبال شده است مورد توجه قرار می گیرد. در این مطالعات، ضمن حفظ مقادیر خاک و آب در ترکیب طرح اختلاط خشت، اثر افزودن مقادیر مختلف وزنی الیاف طبیعی درخت خرما به عنوان یک مسلح کننده طبیعی بر مقاومت فشاری و کششی و همچنین، شکل پذیری کتیبه های خشتی بررسی شده است. در این مطالعات علاوه بر تولید نمونه های شاهد با ترکیب خاک و آب، در نمونه های مسلح به الیاف خرما مقدار وزنی الیاف برابر ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ درصد وزنی خاک در نظر گرفته شده است. در تمامی نمونه ها آب به مقداری به ترکیب اضافه شده که خمیری بودن ترکیب برای قالب گیری تامین شود. الیاف خرما مصرفی از پوسته تنه درخت خرما تهیه شده که ابتدا تار و پود آن با دست جدا شده و بعد از رشته شدن، در طول های کوچک خرد شده اند (شکل ۳).

شکل ۳. نمایی از الیاف خرما و تصویر میکروسکوپی آن [7]



Fig.3. Palm fibers and their microscopic picture [7]

برای این الیاف، قطری بین ۰/۱ تا ۱ میلی متر، طولی بین ۵ تا ۶۰ میلی متر، میانگین مقاومت کششی ۸۶ مگاپاسکال، میانگین کرنش گسیختگی ۰/۱۰۹ و میانگین مدول الاستیسیته ۲۳۸۲ مگاپاسکال گزارش شده است [7]. با بررسی نمونه های مکعبی با ابعاد ۵ × ۵ × ۵ سانتی متر برای آزمایش مقاومت فشاری، اسلامی و همکاران وجود الیاف را بر افزایش شکل پذیری به ویژه در ناحیه افت مقاومت فشاری موثر دانسته و بیشترین شکل پذیری را برای نمونه های مسلح شده با الیاف با درصد وزنی ۰/۵ و ۰/۷۵ درصد گزارش کرده اند. تغییر در مقدار مقاومت فشاری نیز مانند شکل پذیری در تناسب با تغییر مقدار وزنی الیاف خرما مشاهده نشده است. به شکلی که در شرایطی که کمترین مقاومت فشاری نمونه شاهد حدود ۳/۳۶

سانتی متر، موبد این مطلب است که به طور کلی گسترش ترک های فشاری در نمونه ها با سرعت بالایی اتفاق می افتد و این موضوع در حضور کاه به عنوان افزودنی طبیعی کاهش می یابد. به این ترتیب می توان نقش کاه در افزایش شکل پذیری نمونه های خشتی را تأیید نمود به شرط آنکه حدود افزایش کاه به ۳ درصد محدود شود. لازم به ذکر است افزودن کاه باعث کاهش در مقدار مقاومت فشاری می شود. علاوه بر این افزودن ماسه تا ۲۰ درصد تاثیر مثبتی در افزایش مقاومت فشاری دارد و مقادیر بیشتر از آن، رفتار نمونه را به رفتار خاک های فاقد ماسه نزدیک می کند. ضمن اینکه این مقدار ماسه، کنترل ترک خوردگی ها در نمونه را نیز سبب می شود. استفاده از تثبیت کننده های شیمیایی از جمله آهک نیز، به شرط آنکه مقدار آهک به حدود ۱۰ درصد محدود شود، موجب افزایش مقاومت فشاری را فراهم می کند.

براساس نتایج عددی آزمون ها، مقاومت فشاری نمونه های خشتی با ترکیب خاک و آب به حدود ۳ مگاپاسکال محدود شده است، این در حالی است که با افزودن ماسه به میزان ۲۰ درصد، عدد مقاومت تا ۴ مگاپاسکال افزایش یافته اما در نمونه های حاوی ماسه به میزان ۳۰ درصد، تغییری در مقدار مقاومت فشاری به نسبت نمونه بدون ماسه گزارش نشده است. در نمونه های خشتی ساخته شده با ترکیب خاک، آهک و آب که به خشت تثبیت شده معروفند، افزودن آهک به میزان ۱۰ درصد مقاومت فشاری را افزایش داده و مقدار ۵-۴/۵ مگاپاسکال برای این نمونه ها گزارش شده است. این در حالیست که افزودن کاه به ترکیب، در حضور ماسه یا بدون آن، مقاومت فشاری را به مقداری بین ۱-۲ مگاپاسکال نزدیک می کند [16].

در راستای بهره مندی از مصالح بومی و در دسترس برای تقویت و اصلاح مشخصات خشت با تاکید بر عدم استفاده از مصالح شیمیایی، مطالعات متعددی صورت گرفته که مناسبترین نتایج حاصله را می توان مرتبط با استفاده از الیاف خرما در تولید خشت دانست [7,17]. با توجه به تمرکز این مقاله بر خشت های تولید شده در شهر یزد، مطالعات اسلامی و همکاران [7] که با بهره گیری از خاک منطقه و شیوه های سنتی

مناسب برای تولید خشت تعیین شوند [7, 16]. ضمن آنکه لازم است در فرآیند اصلاح خشت و در تعریف طرحهای اختلاط علاوه بر مشخصات مکانیکی خشت به سایر مشخصات آن از جمله عملکرد در مواجهه با رطوبت و نیز، مشخصات عمومی ملات گِل در فرم پذیری و قالب زدن توجه شود.

۴- ارزیابی آزمایشگاهی واحدهای بنائی خشتی

به منظور دستیابی به برآوردی از عملکرد دیوارهای غیرمسلح ساخته شده از خشت، لازم است مشخصات خشت به عنوان یک واحد مصالح بنائی و مجموعه خشت و ملات در قالب واحدهای بنائی شناسایی شود. با توجه به پراکندگی اطلاعات موجود در این زمینه، انجام هرچه بیشتر مطالعات آزمایشگاهی پایه اطمینان بیشتری در موضوع ارائه می دهد. در این بخش و به تفکیک موضوعات مورد بررسی، ابتدا به ارائه نتایج حاصل از پژوهشهای موضوع این مقاله پرداخته می شود و نتایج مطالعات میرجیلی و همکاران [8]، میبدیان و همکاران [9] و میرابی و همکاران [10-11] برای مقایسه ارائه می شود. لازم به ذکر است مطالعات مورد اشاره با تمرکز بر ارزیابی دیوارهای خشتی که به روش سنتی و با استفاده از مصالح در دسترس در شهر یزد ساخته می شوند، انجام شده است.

۴-۱ تعیین مشخصات ملات

به منظور تعیین حدود مشخصات ملات مصرفی، آزمونهای مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مقاومت خمشی روی ملات مصرفی صورت گرفته است. در کلیه تحقیقات ذیل این موضوع، از ملات گِل با ترکیب خاک رس و ماسه بادی به نسبت حجمی ۱ به ۱ با نسبت آب به گِل رس ۰/۵ استفاده شده است. به این منظور، نمونههای مکعبی با ابعاد ۵×۵×۵ سانتی متر برای آزمون مقاومت فشاری براساس استاندارد مرجع ASTM C109 [18]، نمونههای براکتی (استخوان قلم) برای آزمون مقاومت کششی براساس استاندارد مرجع ASTM C307 [19] و نمونههای مکعب مستطیلی با ابعاد ۲۰×۵×۵ سانتی متر برای آزمون مقاومت خمشی براساس استاندارد مرجع ASTM

مگاپاسکال گزارش شده، بیشترین مقاومت فشاری میانگین در نمونههای حاوی الیاف مساوی ۵/۰۳ مگاپاسکال و متناظر با درصد وزنی ۲۵٪ برای الیاف است و با افزایش درصد وزنی الیاف، مقاومت فشاری کاهش یافته و به مقدار گزارش شده در نمونههای شاهد نزدیک می شود. این مسئله به دلیل افزایش پراکندگی الیاف در ماتریس گِلین و گسستگی ایجاد شده در اتصال و اصطکاک ذرات ماتریس حادث شده است [7].

پیرو مطالعه نمونههای مکعب مستطیلی با ابعاد ۲۰×۵×۵ سانتی متر در آزمایش خمش سه نقطه‌ای، اسلامی و همکاران افزایش شکل پذیری در رفتار کششی را نیز در تناسب با افزایش مقدار وزنی الیاف خرما گزارش نکرده و در شرایطی بیشترین شکل پذیری را برای نمونههای تقویت شده با ۰/۵ درصد الیاف و برابر با مقدار میانگین ۲/۹ اعلام کرده اند که این مقدار برای نمونه شاهد برابر با ۱/۶۲ گزارش شده است. اما در بررسی مقاومت کششی، متناسب بودن افزایش این مقاومت با افزایش مقدار الیاف در مطالعات مورد اشاره گزارش شده و بیشترین مقاومت کششی برای نمونه حاوی ۱ درصد الیاف و برابر با ۱/۱۲ مگاپاسکال تعیین شده است. این مقدار برای نمونه شاهد (بدون الیاف) به طور میانگین برابر با ۰/۵۵ مگاپاسکال است.

براساس نتایج حاصل از مطالعات اسلامی و همکاران [7]، استفاده از الیاف خرما در بلوکهای خشتی تا میزان ۱ درصد وزنی خاک باعث بهبود و افزایش مقاومت فشاری و کششی نمونهها به ترتیب تا حدود ۵۰ و ۱۰۰ درصد و افزایش مقدار مدول الاستیسیته تا حدود ۴۵ درصد بیشتر از نمونه شاهد می شود ولی روند بهبود هر دو مقاومت فشاری و کششی، با افزایش مقدار الیاف کاهش می یابد. همچنین، استفاده از الیاف خرما به مقدار مناسب در مصالح خشتی، می تواند باعث افزایش شکل پذیری تا حدود ۸۰ درصد نسبت به نمونه شاهد شود.

مقایسه نتایج ارائه شده در پژوهشهای پیشین، بیانگر این مطلب است که امکان ارائه یک طرح اختلاط مشخص یا محاسباتی برای تولید خشت با مقاومت مناسب وجود ندارد و ضروری است با در نظر گرفتن دانه بندی و مشخصات ساختاری خاک پایه، طرحهای بهینه اختلاط و افزودنیهای



Fig. 5. Compressive strength test on adobe sample

۳-۴ تعیین مشخصات واحد بنایی خشتی

برای تعیین مقاومت فشاری و برشی واحد بنایی، لازم است منشورهای بنایی متشکل از رجهایی از خشت و ملات ساخته شود و پس از طی شدن فرآیند خشک شدن، تحت آزمون قرار گیرند. در اجرای این منشورها، رعایت ضخامت درز ملات بین ۱۰ تا ۱۲ میلیمتر مدنظر بوده است با اینحال در برخی نمونه ها به دلیل ناصافی زیاد سطوح فوقانی و تحتانی کتیبه های خشتی، اجرای ملات با ضخامتی بیشتر از مقدار مورد نظر صورت گرفته است. در این تحقیق، ۶ آزمون منشور خشتی (متشکل از ۵ رج خشت و ۴ رج ملات بین آنها) برای آزمون مقاومت فشاری براساس استاندارد مرجع ASTM C1314 [22] آماده سازی شده و پس از مسطح شدن صفحه اعمال بار با لایه نازکی از گچ، تحت آزمون قرار گرفته اند. متوسط مقدار مقاومت فشاری حاصل از آزمایش این آزمون ها که براساس استاندارد مرجع و متناسب با ابعاد نمونه های تحت آزمون اصلاح شده، در جدول (۲) ارائه شده است (شکل ۶).

شکل ۶. آزمون مقاومت فشاری منشور خشتی



Fig. 6. Compressive strength test on adobe prism

به منظور برآورد دقیق مقدار مقاومت برشی، انجام آزمون مقاومت برشی قطری توصیه می شود؛ اگرچه انجام این

C348 [20] تدارک دیده شده است (شکل ۴). نتایج آزمون ها به شرح جدول (۱) می باشد.

۲-۴ تعیین مشخصات خشت

با هدف تعیین مقاومت فشاری کتیبه های خشتی موضوع پژوهش حاضر به ابعاد $20 \times 20 \times 6$ سانتی متر، ابتدا سطوح فوقانی و تحتانی کتیبه با لایه نازکی از ملات گچ مسطح شده و سپس، بار فشاری روی صفحه فوقانی آنها اعمال می شود (شکل ۵). این آزمون روی ۶ نمونه مجزا تکرار شده و متوسط مقدار آن به عنوان مقاومت فشاری خشت در جدول (۲) گزارش می شود. لازم به ذکر است در مقالات مرتبط با این تحقیق [8-11]، نمونه های تحت آزمون براساس راهنمایی استاندارد مرجع ASTM C1552 [21] آماده سازی شده و بار فشاری روی وجه جانبی کلاهک گذاری شده خشت ها اعمال شده است. منظور از کلاهک گذاری اجرای لایه نازکی ملات گل است که سطح اعمال بار روی وجه جانبی خشت را هموار نماید.

شکل ۴. ابزاربندی آزمونهای فشاری، کششی و خمشی ملات گل



Fig. 4. Set-up for compressive, tensile and flexural strength tests of clay mortar

جدول ۱ متوسط نتایج حاصل از انجام آزمونهای ملات گل

Ref.	Compressive Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Flexural Strength (MPa)
[8-11]	3.31	0.52	0.95
This Research	2.9	0.65	1.1

Table 1 Average results for clay mortar tests

شکل ۵. آزمون مقاومت فشاری خشت با اعمال بار روی صفحه فوقانی

شکل ۷. جزئیات اجرایی برای کنترل لغزش پای دیوار



Fig. 7. Adopted details for controlling slip at wall's footage

پس از اجرای کامل دیوار و سپری شدن مدت زمان خشک شدن دیوار، در موقعیت قرارگیری جک اعمال کننده بار جانبی یک تیر بتن آرمه با ابعاد 20×20 سانتی متر و مسلح شده با میلگردهای طولی $\Phi 10$ و $\Phi 8$ و خاموت های $\Phi 8$ در فواصل ۱۵ سانتی متر در کل طول دیوار اجرا شد (شکل ۸). برای مهار این تیر در دیوار، از شاخک‌هایی از جنس میلگرد استفاده شد که در رج‌های انتهایی دیوار مهار شد.

با توجه به اینکه در آزمایش حاضر تعیین بیشترین ظرفیت مورد انتظار یک دیوار خشتی غیرمسلح مدنظر بوده است، تلاش شد تا ابرابندی دیوار به شکلی پیاده شود که مود خرابی برش قطری در دیوار حاصل شود. به همین منظور، در موقعیت پنجه و پاشنه دیوار ورق‌های U شکلی تعبیه شد که امکان لغزش در پای دیوار را به صفر برساند (شکل ۹-الف).

شکل ۸. نمایی از دیوار پس از اجرای تیر بتنی فوقانی



Fig. 5. The wall specimen and the top RC beam

همچنین، با استفاده از دو نبشی قائم که در موقعیت پاشنه دیوار و از پائین تا بالا و در دو وجه پشتی و جلویی دیوار قرار گرفته بود، از بروز بلندشدگی (Uplift) به دلیل اعمال بار جانبی

آزمایش برای نمونه های ساخته شده از خشت به دلیل وزن زیاد و ناپایداری محتمل در قاب آزمون میسر نمی باشد. در این تحقیق تلاش شد تا با شبیه سازی شرایط آزمون تعیین مقاومت برشی درجا براساس استاندارد مرجع ASTM C1531 [23]، مطالعات مرتبط با تعیین مقاومت برشی برای ۳ نمونه منشور خشتی (متشکل از ۳ رج خشت و ۲ رج ملات بین آنها) صورت پذیرد. این نتایج در قالب مقدار متوسط در جدول (۲) ارائه شده است.

جدول ۲. متوسط نتایج حاصل از انجام آزمونهای مصالح بنائی

Ref.	Adobe Unit		Adobe Masonry Unit	
	Compressive Strength (MPa)	Load Dir.	Compressive Strength (MPa)	Shear Strength (MPa)
[8-11]	4.43	Lateral	2.34	-
This Research	2.3	Axial	1.08	0.047

Table 2. Average results for adobe masonry units

۴-۴ تعیین مشخصات دیوار خشتی غیرمسلح

۴-۴-۱ جزئیات نمونه و ابزاربندی آزمایش

در سابقه مطالعات صورت گرفته روی دیوارهای ساخته شده با مصالح بومی شهر یزد، نتایج بررسی دیوارهای مقیاس شده با طول و ارتفاع حداکثر ۱ متر گزارش شده است [8-11]. در این پژوهش، ارزیابی عملکرد یک دیوار خشتی غیرمسلح تمام مقیاس به طول ۳ متر، ارتفاع ۲/۵ متر و ضخامت ۲۰ سانتی متر تحت اثر همزمان بار جانبی و قائم در قالب یک برنامه آزمایشگاهی مورد توجه قرار گرفته است.

در اجرای این دیوار از خشت‌های تولید شده در شهر یزد استفاده شده و ملات گل مصرفی نیز از خاک و ماسه برداشت شده از قرضه‌های شهر یزد ساخته شده است. در اولین مرحله از ساخت دیوار، شرایط لازم برای کنترل لغزش پای دیوار با اجرای یک لایه پلاستیک ضخیم و نصب بولتهای مهاری کوتاه در سوراخهای موجود در ریل فولادی پای قاب بارگذاری تامین شد. بولتهای مذکور در یک انتها در ریل فولادی تعبیه و با مهره سفت شدند و در انتهای دیگر، داخل رج‌های ابتدایی دیوار قرار گرفتند (شکل ۷).

در این آزمایش، بارگذاری دیوار به صورت یک سویه تعریف شد و به این ترتیب، بارگذاری در ابتدا به صورت نیرویی و در ادامه به صورت تغییرمکان کنترل ادامه یافت. برای ثبت رفتار دیوار، دو تغییرمکان سنج میله ای قائم در ابتدا و انتهای طول تیر بتنی قرار گرفت تا حرکت قائم دیوار ارزیابی شود. ضمناً، دو تغییرمکان سنج سیمی در لبه اعمال بار جانبی و در تراز جک هیدرولیکی نصب شد تا میزان حرکت جانبی را مشخص نماید (شکل ۱۰).

شکل ۱۰. جزئیات ابزارهای اندازه گیری تغییرمکان



Fig. 10. Adopted instruments for measuring displacement

۴-۴-۲ نتایج و مشاهدات آزمایشگاهی

در نتیجه بار جانبی یکسویه اعمال شده به دیوار، منحنی بار-تغییرمکان دیوار مانند آنچه در شکل (۱۱) نمایش داده شده است، به دست آمد. در منحنی مذکور، نقطه شکل گیری اولین ترک متناظر با تغییرمکان ۱ سانتی متر و بار جانبی ۲۸۰۰ کیلوگرم قابل شناسایی است.

شکل ۱۱. منحنی نیرو-تغییرمکان دیوار تحت آزمون

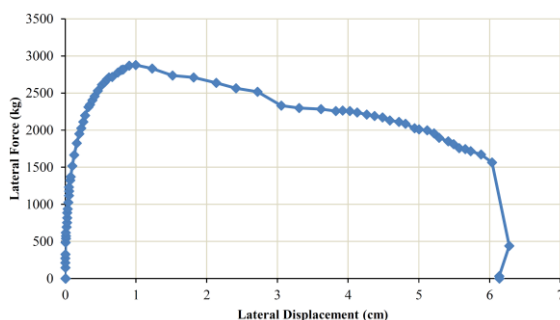


Fig. 11. Load-displacement diagram of the wall

علاوه بر این، رفتار دیوار پس از وقوع ترک را می توان رفتاری نسبتاً شکل پذیر دانست. با توجه به نرخ بارگذاری و شرایط ایجاد شده برای دیوار به صورت موضعی، دیوار تغییرمکان جانبی تا حدود ۶ سانتی متر را در یک فرآیند شکل پذیر و

جلوگیری شد. این دو نبشی، در پایین به ورق U شکل نصب شده در پاشنه جوش شدند و در بالا، به ورق U شکلی که روی تیر بتنی قرار گرفته بود، متصل شدند (شکل ۹-ب). با این تفاسیر، تغییر شکل دیوار محدود شد و احتمال وقوع مود ترک قطری افزایش یافت. برای اعمال بار جانبی، از جک هیدرولیکی و برای اعمال بار ثقلی نیز از سبد بار قائم استفاده شد. این سبد از پروفیل های فولادی با صلیبیت بالا ساخته شده که با شمش های فولادی پر شد و در نهایت، باری در حدود ۳۸۸۰ کیلوگرم به عنوان بار قائم روی نمونه قرار گرفت (شکل ۹-ج).

شکل ۹. جزئیات ابزاربندی آزمایش

الف) مهار پای دیوار در پاشنه و پنجه



a) Controlling slip at heel and toe

ب) جزئیات مهار دیوار برای جلوگیری از وقوع بلندشدگی



b) Adopted details for controlling the uplift in the wall

ج) نمای کلی دیوار تحت آزمایش



c) Overall view of the wall

Fig. 9. Details of the set-up

بدون افت ناگهانی یا خرابی موضعی شدید تجربه می‌کند. در این مسیر، مقاومت دیوار به تدریج کاهش می‌یابد و در تغییر مکان ۶ سانتی‌متر به حدود نصف ظرفیت تجربه شده می‌رسد. با توجه به نگرانی‌های مربوط به خرابی موضعی دیوار، بارگذاری در این تغییر مکان متوقف شده است.

بررسی روند خرابی در نمونه نشان می‌دهد که خرابی از همان ابتدا به صورت قطری آغاز می‌شود و به تدریج در نمونه گسترش می‌یابد. هرچند، در گام‌های ابتدایی به دلیل لغزش موجود بین تیر بتنی و دیوار خشتی در محل اعمال بار جانبی، ترک قطری از نقطه دیگری شروع می‌شود اما، به تدریج و با مشارکت پنجه دیوار در رفتار قطری، ترک مسیر اصلی خود را پیدا می‌کند و بر روی قطر نمونه متمرکز می‌شود (شکل ۱۲).

در خرابی‌های صورت گرفته کاملاً مشخص است که نوار کششی قطری به خوبی در دیوار ایجاد شده و علاوه بر آن، در موقعیت پنجه دیوار، یک المان ستونی تشکیل شده و به خوبی در مقابل لغزش مقاومت نموده است. با در نظر گرفتن روش strut & tie در بررسی نتایج، می‌توان به این نتیجه رسید که این المان ستونی به خوبی نیروی مورد انتظار را دریافت کرده و با کماتش موضعی در ناحیه پائینی، مانع از تغییر مود شکست دیوار شده است.

تعبیه مهارهای جانبی در پنجه دیوار و موقعیت اعمال بار جانبی روی تیر سبب شده است تا تمرکز تنش در این دو ناحیه بیشتر از سایر نواحی مشهود باشد. در لحظه توقف بارگذاری، میزان لغزش دیوار نسبت به تیر و باز شدگی در نقطه آغاز ترک به حدود ۷ سانتی‌متر می‌رسد (شکل ۱۳).

شکل ۱۲. نمای کلی از دیوار پس از اتمام بارگذاری

الف) نمای ترک خوردگی - وجه جلویی دیوار



a) Front view of the cracking in the wall

ب) نمای ترک خوردگی - وجه پشت دیوار



b) Back view of the cracking in the wall
Fig. 12. Overall view of the wall at the end of the test

شکل ۱۳. خرابی در نقطه آغاز ترک قطری و لغزش در موقعیت تیر بتنی



Fig. 13. Initiation of diagonal cracking

شکل ۱۴ خرابی در پنجه دیوار و خردشدگی پنجه



Fig. 14. Tow crushing

خشتی غیرمسلح، روابط فصل هفتم نشریه ۳۶۰ و روابط متناظر با آن در استاندارد ASCE41-17 برای تعیین مقاومت مورد انتظار دیوار تحت آزمون مورد استفاده قرار گرفت. با در اختیار داشتن متوسط مقاومت برشی ملات (v_{to}) حاصل از آزمایش، مقاومت برشی لغزشی مصالح (v_{me}) حاصل از روابط محاسباتی، و همچنین مقادیر کران پایین مقاومت کششی قطری مصالح بنائی (f'_{dt}) و کران پایین مقاومت فشاری مصالح (f'_m) براساس راهنمای‌های ارائه شده در اسناد مرجع، مقادیر مقاومت برای چهار مود شکست دیوار از جمله شکست برشی لغزشی (kg) ۴۴۶۶، شکست حرکت گهواره ای (kg) ۲۳۰۴، شکست قطری (kg) ۶۷۷۵ و شکست خرابی فشاری پنجه (kg) ۱۷۵۵ تعیین شد. مقایسه نتایج نشان می دهد این مقادیر در تناظر با بیشترین ظرفیت گزارش شده برای نمونه آزمایش شده (kg) ۲۸۰۰ و همچنین، الگوی خرابی مشاهده شده در آزمایش - که به شکست قطری و شکست فشاری پنجه مشابهت دارد - نیست. به عبارت دیگر، واضح است که ارائه برآورد دقیقی از مقاومت مورد انتظار و تعیین مود حاکم در خرابی دیوارهای غیرمسلح خشتی، با اتکا به روابط موجود، با ابهاماتی روبرو خواهد بود.

۵- نتیجه گیری

بررسی رفتار سازه‌های خشتی در زلزله نشان می‌دهد که با وجود مقاومت فشاری و کششی اندک خشت و همچنین وزن زیاد آن، ویژگیهای معماری نقش تعیین کننده‌ای در حفظ پایداری سازه و تحمل بارهای ناشی از زلزله دارد. بر اساس نتایج حاصل آمده از تحقیق حاضر، اصلاح ترکیب خاک تشکیل دهنده خشت و ملات گِل و افزودن افزودنی‌های مجاز مانند ماسه، آهک یا الیاف طبیعی موجبات افزایش مقاومتهای فشاری، کششی و خمشی این اجزاء را تا ۱۰۰٪ فراهم می آورد؛ اگرچه دستیابی یک دیوار خشتی غیرمسلح به حداکثر مقاومت مورد انتظار فقط به مقادیر مقاومتی مصالح مرتبط نبوده و به چگونگی اجرای دیوار و شرایط تکیه گاهی و مهارهای تعبیه شده برای دیوار نیز وابسته است. این موضوع در ارزیابی عددی رفتار دیوار براساس روابط موجود و ضعف این روابط در تعیین مود شکست و تخمین مقاومت مورد انتظار آشکار می‌شود. عدم تناظر مشاهدات و برداشت‌های آزمایشگاهی با

این تغییرشکل، فشردگی موضعی و خرابی از نوع خردشدگی در پنجه را به همراه خواهد داشت که با توجه به تعبیه مهار جانبی، از فروریزش دیوار جلوگیری شده است (شکل ۱۴). براساس آنچه از مشاهدات آزمایشگاهی حاصل شده است، بیشترین میزان بازشدگی در موقعیت ترک قطری معادل ۵ سانتی متر است و ضمناً، نمونه در راستای قائم کمتر از (۱) سانتی متر به سمت پائین حرکت کرده است که بخشی از آن را می‌توان به دلیل وقوع ترک و سُرخوردن سمت چپ و راست ترک نسبت به هم دانست (شکل ۱۵).

شکل ۱۵. بازشدگی ترک در وجوه پشت و جلو دیوار

الف) نمای بازشدگی ترک - وجه جلویی دیوار



a) Crack opening - front view

ب) نمای بازشدگی ترک - وجه پشتی دیوار



b) Crack opening - back view

Fig. 15. Crack opening in the wall

۴-۳ محاسبات عددی

به منظور اعتبارسنجی روابط ارائه شده برای تخمین مقاومت دیوارهای بنائی (بطور عام) در پیش‌بینی مقاومت دیوارهای

۷- مراجع

- [1] ICHHTO, 2017. Nomination of historic city of Yazd, Nomination detailed text for the world heritage committee.
- [2] Technical committee, 2017. Decisions adopted during the 41st session of the world heritage committee, WHC/17/41.COM/18.
- [3] Technical committee, 2018. Design and construction of masonry buildings, Chapter 8 of National Building Regulations of Iran (NBRI).
- [4] Mansouri, F., 2018. An Enquiry into the Principles and Codes of Earthen Architecture (Emphasizing on Earthen Architecture Building Codes in Countries with the Same Seismic Zoning as Iran). MSc. Thesis, 2018. Yazd University.
- [5] Omidvari, F., 2018. Comparative analysis of Adobe Building codes from different countries prone to seismic hazards. Post-Doctoral research. University of Grenoble.
- [6] Faghih Khorasani, F., 2019. Effects of using natural short fibers reinforcing in clay adobe units on the behavior of masonry walls. PhD. Dissertation. Amirkabir University.
- [7] Mohammadi, H., Eslami, A., Morshed, R., 2022. Experimental evaluation into improving the mechanical properties of adobe using palm fibers. *Amirkabir J. Civil Eng.*, 54(6) 2321-2342.
- [8] Mirjalili, A., Eslami, A., Morshed, R., 2020. Experimental investigation into the effect of vertical loading on in-plane cyclic behavior of adobe walls. *Construction and Building Materials*, 264, 120706.
- [9] Meybodan, H., Eslami, A., Morshed, R., 2020. Sustainable lateral strengthening of traditional adobe walls using natural reinforcements. *Construction and Building Materials* 260, 119892.
- [10] Mirabi Banadaki, H., Morshed, R., Eslami, A., 2019. In-plane cyclic performance of adobe walls retrofitted with near-surface-mounted steel rebars. *Engineering Structures* 194, 106-119.
- [11] Mirabi Banadaki, H., Eslami, A., Ronagh, H., 2020. Near-surface-mounted retrofitting of damaged/undamaged adobe walls using steel bars: Analytical evaluation of experimental results. *Structures* 28, 2111-2121.
- [12] HajiSadeghi, N., 2018. Conservation and Safety Assessment of Vaulted Adobe Architecture in Yazd, Iran. Doctoral Thesis, University of Minho.
- [13] Maserrat, H., 2015. From soil to adobe, architectural and anthropology aspects. Yazda publication.
- [14] Dormohammadi, M., Rahimnia, R., 2017. Soil mechanical stabilization and determination of its position in vernacular materials of hot and dry climate, *Journal of Architecture Hot and dry climate*, 5 (6), 29-49.
- [15] Bakhshi A., Ghannad, M., Masaali, H., Yekrangnia, M., 2011. Assessment of seismic Behavior of Domed-roof Adobe Buildings - existing and reinforced cases, Bonyad Maskan Publication.

ارزیابی‌های عددی را می‌توان به سه عامل مرتبط دانست، اول آنکه روابط موجود برای تعیین مقاومت اعضای بنائی برای اعضای با کمترین مشخصات جزء مصالح بنائی و ملات ارائه شده و تعمیم این روابط برای اعضای خشتی با ملات گل، با دقت بالایی همراه نیست. دوم آنکه ارائه برآورد دقیقی از کران پایین مقاومت کششی قطری مصالح در واحدهای خشتی، فقط با انجام آزمایش کشش قطری میسر است که انجام این آزمون به دلیل وزن زیاد نمونه استاندارد و ناپایداری آن در قاب، امکان پذیر نمی‌باشد. و سوم آنکه جزئیات اجرایی و مهار دیوارها در تعیین مود خرابی نقش به سزایی ایفا می‌کنند. به این ترتیب، توسعه روابط محاسباتی برای تخمین مقاومت مورد انتظار دیوارهای خشتی از اهمیت بالایی برخوردار است. با این وجود، ارزیابی منحنی نیرو-تغییرمکان و شکل خرابی‌های دیوار، تاثیر پیشبینی‌های اتحاد شده برای مهار دیوار را در افزایش شکل پذیری و حفظ پایداری دیوار را نشان می‌دهد. به این ترتیب، اگرچه ارائه برآورد دقیق از مقاومت مورد انتظار با ابهاماتی روبروست اما در صورت بهره‌گیری از اجزاء معماری و سازه به صورت یکپارچه و تامین مهارهای لازم، می‌توان تا حد قابل قبولی از عملکرد شکل پذیر سازه‌های خشتی اطمینان حاصل نمود.

۶- سپاسگزاری

این پژوهش بخشی از مطالعات صورت گرفته در طرح «تدوین دستورالعمل تجویزی احداث بناهای خشتی در محدوده میراث جهانی شهر یزد» را در برمی‌گیرد. این طرح توسط مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی با حمایت مالی شرکت بازآفرینی شهری ایران و با همکاری اداره کل راه و شهرسازی یزد و پژوهشکده معماری گلین دانشگاه یزد طی سالهای ۱۳۹۹ تا ۱۴۰۱ انجام شده و در این مقاله، فقط مباحث سازه‌ای به بحث گذاشته شده است. با این وجود نگارنده بر خود لازم می‌داند از همکاری پژوهشگران طرح در حوزه‌های معماری و مصالح و از راهنمایی‌های آقای دکتر ماهر، آقای دکتر عزیزی بندرآبادی و آقای مهندس راد در انجام مطالعات آزمایشگاهی قدردانی نماید.

- [20] ASTM C348-19, 2019. Standard test method for flexural strength of hydraulic cement mortars, West Conshohocken, PA, ASTM International.
- [21] ASTM C1552-16, 2016. Standard practice for capping concrete masonry units and masonry prisms for testing, West Conshohocken, PA, ASTM International.
- [22] ASTM C 1314-07, 2007. Test Method for Compressive Strength of Masonry Prism, West Conshohocken, PA, ASTM International.
- [23] ASTM C1531-16, 2016. Standard Test Methods for In Situ Measurement of Masonry Mortar Joint Shear Strength Index, West Conshohocken, PA, ASTM International.
- [16] Veisheh, S., Mazloomi sani, M., 2023. Utilization of stabilized adobe for restoration of old buildings and construction of new buildings in the historical context of Yazd, G1039, BHRC publications.
- [17] Esmaeili, A., Ghalenoi, M., 2013. Effect of palm fibers and lime as natural stabilizer on the mechanical properties of adobe. *Maskan-o-mohit roosta*, **138**, 53-62.
- [18] ASTM C109/C109M-20a, 2020. Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (using 2-in. or [50-mm] cube specimens), West Conshohocken, PA, ASTM International.
- [19] ASTM C307-18, 2018. Standard test method for tensile strength of chemical resistant mortar, grouts, and monolithic surfacing, West Conshohocken, PA, ASTM International.

Experimental evaluation of unreinforced adobe wall made of adobe units of historical city of Yazd

Atefeh Jahanmohammadi^{*1}

1- Associate professor, Faculty of Structural engineering, BHRC.

Email: jahanmohammadi@bhrc.ac.ir

Abstract:

Regarding the decisions made in the 41st world heritage committee for the nomination of historic city of Yazd, Iran has to maintain the buildings located in the core and buffer zone of historic district of the city and construct new buildings as well. With respect to new buildings, natural and cultural issues must be considered and architectural details must be followed in compatible with district's specifications. In addition, new methods must be adopted to improve the behavior of the buildings; the methods must be compatible with the structural essence. Based on the reports, most of the buildings located in the historic core and buffer zone of Yazd are typically one- or two-story adobe masonry buildings, especially ancient, traditional or historic ones. Therefore, for constructing new buildings, using adobe as the main material is required. This will result in investigating the properties of adobe as the material, adobe masonry building for detecting the load-bearing system and the constructional features that may help the whole response of the building to the earthquake forces. In this regard and with respect to the architectural aspects of historic buildings in a historic district, the structural performance in response to imposed forces is evaluated and participation of adobe walls in bearing the vertical and horizontal forces is determined. Based on the existing information resulted from the evaluation of characteristics of adobe, the main specifications of adobe as the main material in before mentioned construction is presented. These results are mainly focused on the adobe units made in Yazd and by using the soil of the district. Using this information, the common expected values for compressive, tensile and flexural strength of adobe units and clay mortar are presented. To evaluate the performance of adobe walls which are built in a historic building with natural material and by experts, previous investigations are reviewed. These investigations usually cover the experiments on adobe units and adobe prisms made by natural materials of Yazd city. To complete the overall investigation in this regard, complementary tests are followed in this research. Specimens of the test have been prepared by using the adobe units and clay mortars made in the city of Yazd. The preliminary tests have been conducted on the adobe units, clay mortars and adobe prisms. After that, performance of a full-scale adobe wall under the simultaneous horizontal and vertical loads is evaluated. Regarding the results, behavior of an unreinforced adobe wall is detected and its defeats are reported. Based on the experimental results and previous studies performed on studying the architectural features of the historic district of Yazd, recommendations for common values of the strength in adobe units and prisms are presented. In addition, special issues are raised. These issues must be considered in constructing the adobe masonry buildings in order to fulfill the architectural requirements and help the whole structure to bear the gravity and seismic forces. It is expected that these issues be considered in any upcoming guidelines that will be provided for constructing new adobe buildings in Yazd and any other historic districts.

Keywords: Adobe, Adobe masonry buildings, Historic district, Yazd city, seismic resistant buildings