

بررسی آزمایشگاهی ظرفیت باربری دیوار بنایی مقاوم شده با پوشش پلی اوره سرد تحت بارگذاری خارج از صفحه

رمضانعلی ایزدی فرد^۱، محمد قاجار^{۲*}

۱- دانشیار، دانشکده فنی، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)

۲- دانشجوی دکتری، دانشکده فنی، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)

پست الکترونیکی نویسندگان:

۱- izadifard@eng.ikiu.ac.ir

۲- maroofgar@chmail.ir

چکیده:

پس از زلزله کرمانشاه در سال ۱۳۹۶، نیاز به تقویت اعضای غیرسازه‌ای ساختمان‌ها مشخص و پس از آن تغییرات آیین‌نامه‌ای به منظور ایمن‌تر کردن این اعضا اعمال گردید. با این وجود، ساختمان‌هایی که پیش از اعمال تغییرات آیین‌نامه‌ای ساخته شده‌اند نیاز به مقاوم‌سازی داشته که استفاده از پوشش پلی‌اوره می‌تواند یکی از اقدامات مؤثر در این زمینه باشد. بارهای خارج از صفحه‌ای نقش مهمی در تخریب دیوارها هنگام زلزله داشته لذا برای بررسی تاثیر پوشش پلی‌اوره در برابر این نوع بارگذاری، از آزمایش خمشی چهارنقطه‌ای بر روی چهار نمونه دیوار بنایی با مقیاس کوچک، به صورت مقاوم نشده (دیوار مبنا) و مقاوم شده (با پوشش پلی‌اوره سرد به شکل کامل، ضربدری و قبادارضربدری) استفاده شده است. نتایج حاصل از اعمال بار استاتیکی خارج از صفحه‌ای نشان می‌دهد که ظرفیت باربری دیوارها تا حداکثر ۴۵٪ افزایش یافته و جابجایی آنها تا حداکثر ۶۰٪ نسبت به حالت مبنا کاهش یافته است. همچنین از منظر مقاومت و اقتصاد، استفاده از پوشش با طرح قبادارضربدری برای مقاوم‌سازی بارهای خارج از صفحه‌ای مناسب می‌باشد.

واژگان کلیدی:

مقاوم‌سازی دیوار بنایی، پوشش پلی‌اوره سرد، آزمایش خمشی چهار نقطه‌ای، بارگذاری خارج از صفحه.

* محمد قاجار، دانشجوی دکتری دانشکده فنی - دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره).

ایمیل: maroofgar@chmail.ir (نویسنده مسئول مقاله)

Experimental investigation of the bearing capacity of a masonry wall strengthened with cold polyurea coating under out-of-plane loading

R. Izadifard^۱, M. Ghajar^۲

۱- Associate Prof., Civil Engineering Department, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

۲- Ph.D Student of Civil Engineering Department, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

Abstract:

One of the most vulnerable parts of a building during an earthquake, which can severely impact its functionality, is the non-structural walls or separating masonry walls. The ۲۰۱۶ Kermanshah earthquake highlighted that in some newly constructed buildings, while the primary structural elements such as columns and beams remained intact, non-structural components, specifically walls, suffered significant damage, creating hazardous living conditions. These damages not only pose serious safety risks to occupants but also lead to substantial repair and reconstruction costs. Following the earthquake, modifications were made to building bylaws to enhance the reinforcement of non-structural elements, such as separating walls, aiming to improve overall structural stability. However, these regulations primarily apply to newly constructed buildings, and a large number of older structures, built before the implementation of these bylaws, still lack sufficient resistance in their non-structural elements, particularly walls. Thus, the need for strengthening these walls is evident, and the application of polyurea coating is one viable solution. In this research, the effectiveness of polyurea coating in enhancing wall resistance was evaluated through four four-point bending tests conducted on four different masonry walls with various forms of cold-applied polyurea coating. The experimental results demonstrated that walls coated with polyurea exhibited significantly higher load-bearing capacity compared to uncoated walls. Furthermore, displacement at the midpoint of the coated walls was considerably lower than in uncoated samples, confirming the effectiveness of polyurea in strengthening masonry structures. Specifically, walls treated with full polyurea coating and cross-framed polyurea coating showed a ۴۵% and ۳۹% increase in bearing capacity, respectively, compared to uncoated walls. Additionally, displacement in these coated walls decreased by ۵۰%. Considering the optimal balance between structural resilience and cost-effectiveness, the application of polyurea coating in the form of a cross-frame or full coating is highly recommended to improve the resistance of masonry walls against out-of-plane loads, such as earthquakes and explosions. This method not only enhances the overall safety of buildings but also significantly mitigates damage risks during seismic events.

Keywords: Reinforcement of masonry wall, cold polyurea coating, four-point bending test, out-of-plane loading

۱- مقدمه و تاریخچه تحقیقات

دیوارهایی که امروزه در ساختمان‌ها بکارگیری می‌شوند، از اجزای غیرسازه‌ای یک ساختمان به حساب می‌آیند و در طراحی‌های سازه‌ای مورد تحلیل واقع نمی‌گردند. اگرچه آسیب‌های وارده بر دیوارها، باعث فرو ریختن ساختمان نمی‌گردد، لیکن این آسیب‌ها می‌تولند موجب ایجاد حس نگرانی دائم پیش از زمین لرزه احتمالی و عدم بهره‌برداری مناسب پس از وقوع زمین لرزه گردد. علیرغم اینکه در ساختمان‌های با اهمیت بالا به منظور بهره‌برداری بی وقفه، تمهیداتی در طراحی سازه‌ای (اعم از کنترل جابجایی‌ها) منظور می‌گردد اما از لحاظ اقتصادی این نوع طراحی‌ها برای تمامی ساختمان‌ها به صرفه نبوده و برای تامین ایمنی اجزای غیرسازه‌ای می‌بایست راه‌حل‌های دیگری در نظر گرفت.

دیوارهای با مصالح بنایی در برابر بارهای جانبی مانند زلزله، انفجار و ... مقاومت زیادی نداشته و در صورت زیاد بودن بارهای جانبی تخریب در آن‌ها صورت می‌پذیرد. مقاومت جانبی دیوارها به نوع مصالح بکار رفته در آن‌ها بستگی داشته که از آن بین می‌توان به مقاومت فشاری، سبکی مصالح، مقاومت کششی و چسبندگی بین اجزاء اشاره نمود. معمولاً برای سنجش مقاومت جانبی دیوارها از دو نوع بارگذاری درون صفحه‌ای و برون صفحه‌ای استفاده می‌گردد. در حالت درون صفحه‌ای بارگذاری در راستای دیوار صورت پذیرفته و در حالت برون صفحه‌ای، بارگذاری عمود بر راستای دیوار اعمال می‌گردد.

زلزله اخیر از جمله زلزله کرمانشاه در سال ۱۳۹۶ نشان داد با وجود پیشرفت در محاسبات و برورسانی آیین‌نامه‌های طراحی، عملکرد سازه‌ای ساختمان‌ها از وضعیت مطلوبی برخوردار بوده، اما در اعضای غیرسازه‌ای می‌تواند آسیب‌های جبران‌ناپذیری ایجاد نماید. پس از آن زلزله، الزامات و محدودیت‌هایی در آیین‌نامه‌ها و دستورالعمل‌ها اعمال گردید (از جمله نصب وال‌پست در دیوارهای ساختمانی) تا از تخریب و آسیب‌های وارده بر دیوارها جلوگیری نماید. اگرچه در ساختمان‌های جدید الاحداث اعمال این نوع الزامات

مطلوب می‌باشد، اما لازم است برای بسیاری از ساختمان‌ها که پیش از ایجاد این محدودیت‌ها ساخته شده‌اند، تمهیداتی در نظر گرفته شود. لذا اهمیت بررسی مقاومت‌سازی دیوارها در برابر بارهای جانبی، بیشتر برای آن دسته از ساختمان‌هایی است که سازه آن‌ها، از مقاومت لازم برخوردار است ولی دیوارهای جداکننده در معرض آسیب‌های ناشی از بارهای جانبی قوی قرار دارند. بنابراین جامعه هدف، ساختمان‌های در حال بهره‌برداری بوده و به منظور مقاومت‌سازی از پوشش پلی‌اوره استفاده می‌شود.

پلی‌اوره به دلیل ساختار و خواص منحصر به فرد و کاربرد آسان در مکان‌های صعب‌العبور، به عنوان یک مصالح ساختمانی مدرن توجه مهندسين را جلب کرده است. این پلیمر با خواصی مانند دوام، مقاومت در برابر عوامل جوی، شیمیایی و بیولوژیکی، تقویت مصالح و سازه‌های ساختمانی و مقاومت در برابر خوردگی و سایش، محبوبیت زیادی پیدا کرده است. همچنین، به عنوان پوشش محافظ و آب‌بندی در صنعت ساختمان استفاده می‌شود. فناوری پوشش پلی‌اوره سبز و بدون آلودگی بوده و استفاده از سیستم‌های کامپوزیت پلی‌اوره برای بهینه‌سازی خواص مکانیکی و حرارتی و کاهش هزینه‌ها رو به افزایش است [۱].

۱-۱- مقاومت‌سازی دیوارها در حالت درون

صفحه‌ای

در خصوص بررسی مقاومت‌سازی دیوارها با اعمال بار در حالت درون صفحه‌ای پژوهشگرانی آزمایشاتی انجام داده‌اند که به برخی از آنان اشاره می‌گردد. آقای افتخاری از طریق اتصال صفحات GFRP^۲ به دیوارهای بنایی، شکل‌پذیری ظرفیت باربری آن‌ها را مورد بررسی قرار داده که برای آن از ۱۱ نمونه دیوار بنایی (تقویت شده و نشده)، تحت بارگذاری قطری (رفتار درون صفحه‌ای) بهره برده و نتیجه آن نشان از شکل‌پذیری نمونه‌های تقویت شده نسبت به نمونه‌های بدون تقویت تا حدود ۱۱۰ درصد افزایش بوده است [۲]. شابدین^۳ و همکاران به بررسی مقاومت‌سازی دیوار بنایی غیر مسلح URM^۴ با استفاده از الیاف شیشه پارچه‌ای^۵ همراه ملات (TRM)^۶ پرداخته‌اند.

^۵ Textiles

^۶ Textile reinforced mortar

^۲ Glass Fiber Reinforced Polymer

^۳ Shabdin

^۴ Un-reinforced masonry

برای این منظور ۱۰ عدد دیوار مورد آزمایش کششی قطری (برشی) قرار گرفته تا اثر سیستم مقاومسازی دیوار آجری مورد بررسی قرار گیرد. نتایج آزمایش از تاثیر مقاومت دیوار زمانی که دوطرف آن از پارچه‌های شیشه‌ای مسلح استفاده شده است، حکایت دارد [۳].

سان^۷ به بررسی مقاومسازی دیوارهای URM از طریق الیاف شیشه‌ای مسلح با پلی‌اوره پرداخت. پلی‌اوره که دارای مقاومت کششی و نرخ افزایش طول بالایی بوده، می‌تواند برای افزایش مقاومت درون صفحه‌ای و شکل‌پذیری دیوارهای غیرمسلح بکار برده شود. نتایج نشان می‌دهد دیوار بنایی مقاومسازی شده با الیاف شیشه‌ای مسلح با پلی‌اوره باعث بهبود ظرفیت باربری، شکل‌پذیری و جذب انرژی شده است [۴]. باقری به بررسی آزمایشگاهی عملکرد لرزه‌ای دیوار بنایی در حالت تقویت شده و بدون تقویت پرداخت. روش‌های مقاومسازی شامل ترکیب فنس فلزی، صفحات فولادی و اتصالات صفحات فولادی و پوشش پلیمری بوده است. جهت بهبود و رسیدن به حد نهایی مقاومت، تغییرشکل و اتلاف انرژی، استفاده از ترکیب مواد پلیمری و صفحات فولادی به عنوان روش جایگزینی معرفی شده است. حداکثر مقاومت و جابجایی نمونه‌های تقویت شده به ترتیب برابر با ۱۲۲-۲۷۸ درصد و ۱۱۰-۲۴۶ درصد بیشتر از نمونه‌های بدون تقویت بوده و همچنین تقویت دیوارها باعث افزایش سختی آنها نشده است [۵]. پیانگ یو^۸ به بررسی پاسخ درون صفحه‌ای دیوار بنایی تقویت شده با شبکه GFRP مسلح شده با پلی‌اوره پرداخت. این دیوارها تحت بارگذاری فشاری درون صفحه‌ای قطری قرار گرفته و انواع مختلفی از اشکال نوارهای افقی یا عمودی GFRP به‌همراه پلی‌اوره مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج آزمایش نشان می‌دهد مد شکست در دیوارهای تقویت شده به شکل و طرح مقاومسازی مرتبط بوده و همچنین استفاده از GFRP به‌همراه پلی‌اوره از موثرترین روش برای تقویت دیوار می‌باشد، به طوری که باعث افزایش ۱۰-۶۰٪ در ظرفیت درون صفحه‌ای نسبت به دیوار بدون تقویت گردیده و نقش موثری در ایجاد عملکرد مناسب در زمان نصب، اجرای کار و بهبود ظرفیت برشی گردیده است [۶]. هو کنگ^۹ به بررسی نمونه‌های دیوار بنایی آجری با

تقویت پلی‌اوره از طریق آزمایش فشاری خمشی و قطری پرداخت و تاثیر پوشش‌های پلی‌اوره یک طرفه و دو طرفه بر ظرفیت بار و جابجایی را مورد مطالعه قرار داد. با توجه به یافته‌های آزمایش، پوشش پلی‌اوره مورد استفاده برای تقویت دیوار، باعث افزایش قابل توجهی در ظرفیت بار و همچنین تغییر شکل ایجاد نمود [۷].

۲-۱- مقاومسازی دیوارها در حالت خارج از

صفحه‌ای

در خصوص بررسی مقاومسازی دیوارها با اعمال بار در حالت خارج از صفحه‌ای آزمایشاتی انجام گرفته که به برخی از آنان اشاره می‌گردد. هی سوک جانگ^{۱۰} به بررسی تقویت دیوار غیرمسلح توسط الیاف شیشه مسلح شده با پلی‌اوره در حالت خارج از صفحه‌ای پرداخت. نتایج آزمایش نشان می‌دهد با افزایش درجه تقویتی دیوار، حداکثر ظرفیت باربری، شکل‌پذیری و ظرفیت جذب انرژی افزایش می‌یابد [۸]. میبرز^{۱۱} به بررسی رفتار خارج از صفحه‌ای دیوار تقویت شده با شبکه پلیمری و سیستم پلی‌اوره پرداخت. در این مطالعه به بررسی سیستم شبکه‌ای چسبنده با استفاده از پلی‌اوره پرداخته شده، که موجب افزایش شکل‌پذیری دیوار و کنترل بهتر مهار تکه‌های جدا شده حاصل از شکست گردیده است. برنامه آزمایشی در تحقیقات صورت پذیرفته، شامل دو فاز آزمایش بر روی دیوار بنایی URM می‌باشد. فاز اول شامل ۹ عدد دیوار URM تحت بارگذاری چهار نقطه‌ای خمشی و فاز ۲ شامل ۶ عدد دیوار URM تحت بارگذاری شبه (استاتیکی) انفجاری می‌باشد. از لحاظ میزان افزایش ظرفیت باربری نمونه‌ها، نتایج آزمایش نشان می‌دهد استفاده از شبکه FRP و پلی‌اوره در حالات و جنس مختلف دیوارها، باعث افزایش ظرفیت باربری به میزان ۲۸.۷، ۳۶.۴ و ۴۹.۵ برابر حالت دیوار بدون تقویتی گردیده است [۹]. کاسول^{۱۲} بر روی تقویت (بازسازی) دیوارهای URM با استفاده از چوب‌های محکم در پشت بند دیوار پرداخته که تحت بارگذاری خارج از صفحه قرار دارند. روش تقویتی که در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفته، شامل اتصال اعضای چوبی عمودی به سطح داخلی دیوار از طریق پیچ

^{۱۰} Hye-Sook Jang

^{۱۱} Myers

^{۱۲} Davide Cassol

^۷ S.H. Son

^۸ Piyong Yu

^۹ Huu Cuong

کردن می‌باشد. برای بررسی رفتار خارج از صفحه‌ای دیوار در حالت تقویت شده و URM، از آزمایش کیسه هوا^{۱۳} در مقیاس واقعی استفاده شده است. مشاهده گردیده، ظرفیت خارج از محوریت دیوار در این دو حالت تقویت شده دارای رشدی در حد ۲۵۴٪ و ۲۴۲٪ نسبت به حالت بدون تقویت (URM) برای دو دیوار شده است [۱۰]. دانگ^{۱۴} به بررسی رفتار خارج از صفحه‌ای، در مقاوم‌سازی دیوار بنایی غیرمسلح با استفاده از پارچه الیافی (کربن و شیشه) به همراه ملات مسلح (TRM) با افزودنی الیاف کوتاه پلی وینیل الکل^{۱۵} PVA پرداخت. نتایج آزمایش نشان می‌دهد مقاومت نهایی کامپوزیت به طور چشمگیری با مسلح کردن نمونه به نسبت پارچه کربنی، افزایش پیدا نموده و همچنین میزان توانایی تغییرشکل، ظرفیت خمشی و ظرفیت اتلاف انرژی در نمونه‌های مقاوم شده به طور چشمگیری ارتقا یافته است [۱۱]. تان^{۱۶} به بررسی رفتار خارج از صفحه‌ای دیوارهای بنایی مقاوم‌سازی شده با استفاده از FRP پرداخت. آنان از سه نوع سیستم متفاوت مقاوم‌سازی توسط FRP برای ۳۰ نمونه دیوار بنایی استفاده نموده‌اند. نتایج آزمایش افزایش قابل توجه در مقاومت خارج از صفحه‌ای دیوار در حال مقاوم شده را نشان داده است [۱۲]. گو^{۱۷} به بررسی عددی و آزمایشگاهی دیوار بنایی بازسازی پلیمری شده، تحت انفجار گاز پرداخت. نتایج نشان می‌دهد حضور پوشش پلی اوره بطور موثری سبب بهبود توانایی ضد انفجاری شدن دیوار بنایی، جلوگیری از ریزش دیوار و نگهداری قطعات خرد شده می‌شود که موجب کاهش آسیب‌ها و تلفات اقتصادی نظیر انفجار پتروشیمی می‌گردد [۱۳]. چن و همکاران به بررسی رفتار خارج از صفحه دیوار بنایی مقاوم‌سازی شده با اسپری پلی‌اوره در بارگذاری شبه استاتیک پرداختند که نتایج آزمایش از اثرگذار بودن مقاوم‌سازی حکایت دارد [۱۵]. کنگ و همکاران به بررسی رفتار مقاوم‌سازی دیوار بنایی با پوشش پلی‌اوره تحت بارگذاری خمشی پرداختند و نتایج آزمایش نشان داد میانگین مقاومت خمشی در نمونه‌های تقویت شده حدود ۱۲۷٪ بیشتر از حالت بدون تقویت شده گردید [۱۶]. چنگ و همکاران به بررسی ظرفیت نیروی دیوارهای بنایی در خمش خارج از صفحه‌ای

پرداختند، برای این منظور، مجموعه داده‌ای متشکل از ۴۶ نمونه آزمایشی از ۸ محل آزمایش بین المللی ایجاد و در نهایت برای بهبود دقت و دامنه کاربرد، فرمول‌های تحلیلی برای ارزیابی ظرفیت خمشی دیوارهای بنایی ارائه نمودند [۱۷]. در پژوهش حاضر به بررسی مقاوم‌سازی دیوار بنایی با استفاده از پوشش پلی‌اوره، در بارگذاری استاتیکی خارج از صفحه‌ای پرداخته می‌شود. در این پژوهش صرفاً از خود پلی‌اوره (بدون استفاده از الیاف‌های شیشه و کربن) به عنوان ماده مقاوم‌ساز استفاده گردیده است.

۲- آزمایش خمشی

۲-۱- مشخصات مصالح

پارامترهای مختلفی بر روی مقاومت دیوار بنایی تاثیرگذار است، که از مهمترین آن‌ها می‌توان به مقاومت برشی و کششی ملات و مصالح، سطح مقطع دیوار، ارتفاع و طول موثر دیوار و شرایط تکیه‌گاهی اشاره نمود، در آزمایش حاضر برای تمامی نمونه‌ها این پارامترها یکسان در نظر گرفته شده است. دیوار بنایی مورد آزمایش از ترکیب آجر و ملات ماسه سیمانی ساخته شده است. ابعاد دیوار ساخته شده متناسب با دستگاه خمشی چهار نقطه‌ای، طراحی شده (۸۰ در ۵۶ سانتی متر) و برای رسیدن به نتایج واقعی از نسبت ابعادی (۱/۴) ابعاد دیوار واقعی جهت ساخت دیوار استفاده شده است (ضخامت دیوار ۵.۵ سانتی متر). با توجه به شرط ظهور اثر قوس که در دیوارهای معمولی نسبت ضخامت به طول دیوار برای آن‌ها بین ۰.۰۵ تا ۰.۰۶۶ می‌باشد، در آزمایش حاضر این نسبت برابر با ۰.۰۶۸ بوده (۵.۵/۸۰) که می‌توان از اثر قوس صرف نظر نمود. طرح اختلاط ملات سیمانی مورد استفاده دارای نسبت ۱ به ۳ در ترکیب سیمان و ماسه بوده که مقاومت فشاری ۲۸ روزه آن برابر با ۱۸.۶ مگاپاسکال می‌باشد.

پلی اوره^{۱۸} PU (پلی یوریا) از پیوندهای اوره (-NHCONH-) تشکیل شده که یک الاستومری می‌باشد. این پلیمر سازگار و به طور عمده از واکنش پلی ایزوسیانات‌ها با پلی‌آمین‌ها (از جمله مخلوطی از رزین و گسترش دهنده‌های زنجیره‌ای) تشکیل شده که پیوندهای

^{۱۶} Tan

^{۱۷} M. Gu

^{۱۸} PolyUrea

^{۱۳} airbag

^{۱۴} Zhifang Dong

^{۱۵} polyvinyl alcohol

بهمنی را با استفاده از فاصله‌گذار^{۲۳} به اندازه ۲.۵ سانتی‌متر کنار هم چیده تا بتوان ملات ماسه سیمانی را در آن فاصله‌ها قرار داد. همچنین برای سبکی دیوار و جلوگیری از مسلح شدن آن، داخل سوراخ‌های آجر بهمن با مصالح سبک یونولیتی یا دانه‌های سبک لیکا یا پرلیت پُر شده است. پس از قرارگیری مناسب آجرها، ملات ماسه سیمان درون فضای بین آن‌ها ریخته شده و جهت جلوگیری از ایجاد خلل و فرج در ملات، با یک کوبه دستی ملات‌ها بخوبی فشرده می‌شوند. با توجه به اینکه قرار است در سطح دیوار پوشش پلی‌اوره قرار بگیرد، لازم است یک لایه نهایی صاف ملات ماسه سیمانی (پلاستر) روی آن پخش گردد. به منظور جلوگیری از مسلح شدن دیوارها از طریق نفوذ ملات به سوراخ‌های آجر، از یونولیت یا لیکا پُر و مطابق تصاویر زیر نمونه‌ها با ملات پلاستر پوشانده شده و جهت اجرای پوشش‌های پلی‌اوره آماده گردیدند. (شکل ۱)



شکل ۱: ساخت نمونه دیوارهای بنایی

۳-۲- اجرای طرح‌های پوشش پلی‌اوره

پس از اتمام اجرای ملات پلاستر روی دیوارها، نمونه‌ها به مدت حداقل ۲۸ روز مراحل عمل‌آوری و اعمال رطوبت را گذرانده و پس از تمیز نمودن سطح آن‌ها، جهت اجرای پوشش پلی‌اوره آماده گردیدند. در طرح حاضر از چهار نمونه دیوار در حالات مختلف جهت آزمایش خمشی استفاده شده است. دیوار نوع اول دیوار بدون

هیدروژنی آنها به طور قابل توجهی با زنجیره‌های پلیمری در واکنش هستند. از نظر ترکیب شیمیایی پلی‌اوره، شبیه پلی‌اورتان^{۱۹} است. به طور کلی، مواد پلی‌اورتان و پلی‌اوره با پیوند یورتان و اوره در زنجیره اصلی خود به ترتیب دارای خواص مکانیکی و مقاومت سایشی عالی، الاستیسیته بالا، مقاومت در برابر حلال و واکنش پذیری بالا هستند. فن‌آوری‌های استفاده شده بر اساس این مواد بهترین تعادل را بین هزینه و کیفیت فراهم می‌کند. پلی‌اوره نسبت به نرخ کرنش^{۲۰} بسیار حساس است و در صورت افزایش سرعت کرنش به آن پاسخ منحصر به فردی می‌دهد. این حساسیت به پدیده انتقال شیشه دینامیکی^{۲۱} آن نسبت داده می‌شود. پلی‌اوره به لطف ماهیت تقریباً غیر قابل فشرده بودن، از ظرفیت بالایی برای بهبود مقاومت در برابر تأثیر امواج انفجاری برخوردار است [۱۴]. پوشش پلی‌اوره (PU) به دو نوع سرد و گرم تقسیم می‌شود. نوع گرم آن با استفاده از دستگاه‌های مخصوص تا دمای ۷۰-۸۰ درجه سانتی‌گراد گرم شده و برای کارهای صنعتی استفاده می‌شود. پلی‌اوره‌ی سرد برای امور خانگی بوده و با ابزارهای معمولی مثل غلتک و قلمو پرداخته می‌شود. پلی‌اوره بکار گرفته شده در این آزمایش از نوع سرد و ساخت ایران بوده که دارای مقاومت چسبندگی^{۲۲} ۲.۵۶ مگاپاسکال (بر اساس استاندارد ASTM D۴۵۴۱) و مقاومت کششی ۲.۵ مگاپاسکال می‌باشد. در این آزمایش از چهار لایه پلی‌اوره بر روی دیوار استفاده شده که لایه اول از نوع پرایمر به نام ۳۳۳ بوده که نقش واسط و چسبندگی را بین لایه پلاستر سیمانی و پوشش پلی‌اوره ایفا می‌کند و سه لایه هم که پوشش اصلی پلی‌اوره بوده به رنگ طوسی مورد استفاده واقع شده است. پلی‌اوره‌ی سرد بکار گرفته شده در این آزمایش دو جزئی بوده و از یک جزء رزین و یک جزء سخت‌کننده با نسبت ترکیبی ۴ به ۱ استفاده شده و هر لایه به منظور عمل‌آوری حدود ۳۰-۴۰ دقیقه به زمان نیاز دارد.

۲-۲- ساخت نمونه‌ها

با توجه به ابعاد دیوار، قالب‌هایی بر روی زمین تهیه نموده و سپس چهار نمونه دیوار بنایی، به صورت افقی درون این قالب‌ها ساخته شده است. نحوه ساخت دیوارها بدین صورت است که آجرهای

^{۲۲} Adhesion Strength

^{۲۳} Spacer

^{۱۹} polyurethane

^{۲۰} Strain rate

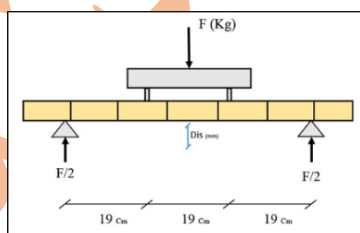
^{۲۱} dynamic glass transfer



شکل ۴: نمایی دیوار W^۴ (از چپ به راست): پوشش پرایمر؛ پرداخت پوشش اصلی با قلمو، پوشش اصلی (طوسی)

۳- نصب دستگاه آزمایش خمشی

پس از آماده نمودن نمونه‌ها، دیوارها با استفاده از بالابر به دستگاه آزمایش خمشی چهار نقطه‌ای منتقل و تکیه‌گاه‌ها و محل بارگذاری دیوار در محل خود (با فاصله ۱۹ سانتی‌متر) نصب می‌گردند. با توجه به استفاده از دو تکیه‌گاه در انتهای دیوار، توزیع نیروهای وارده بر دیوار به صورت یک طرفه انجام می‌پذیرد. به منظور اندازه‌گیری بارگذاری دستگاه بارسنج^{۲۴} ۲ تنی به محل اعمال بار نصب گردیده، همچنین از دو عدد جابجایی سنج (LVDT) به منظور اندازه‌گیری میزان جابجایی وسط دیوار استفاده شده است. دستگاه‌های اندازه‌گیری جابجایی و بارسنج به منظور ثبت داده‌ها به ثبت کننده داده (دیتالاگر)^{۲۵} متصل می‌گردند. (شکل ۵)



شکل ۵: نمایی از اجرای دستگاه خمشی چهار نقطه‌ای

۳-۱- بارگذاری و مدهای شکست

پس از جابجایی دیوار و نصب آن در تکیه‌گاه‌های دستگاه خمشی، جابجایی سنج‌ها و میله اعمال بار در وسط دیوار قرار داده می‌شوند.

پوشش پلی‌اوره (W^۱)، نوع دوم دیوار با پوشش پلی‌اوره به شکل ضربدری (W^۲) و نوع سوم دیوار با پوشش پلی‌اوره به شکل قابدار و ضربدری (W^۳) و دیوار نوع چهارم دیوار با پوشش پلی‌اوره در تمام سطح دیوار (W^۴) استفاده شده است. همانطور که بیان گردید در نمونه‌های دارای پوشش پلی‌اوره، از چهار لایه پوشش در سطح دیوار استفاده شده که یک لایه آن لایه پرایمر بوده و سه لایه دیگر پوشش پلی‌اوره اصلی که به رنگ طوسی می‌باشد. پوشش پرایمر و پلی‌اوره با استفاده از قلموی نقاشی (همانند رنگ آمیزی) بر روی سطح کار پرداخته می‌شود، لذا صاف بودن سطح کار و اجرای صحیح پلاستر سیمانی در یکپارچگی سطح نهایی تاثیرگذار خواهد بود. در شکل‌های ۲ الی ۴ انواع اشکال پوشش پلی‌اوره PU را به نمایش گذاشته است، که در مدل‌های ضربدری و قابدار ضربدری، عرض پوشش پلی‌اوره ۵ سانتی‌متر می‌باشد.



شکل ۲: نمایی از دیوار W^۳ (از چپ به راست): کادر بندی دیوار؛ پوشش پرایمر؛ پوشش اصلی (طوسی رنگ)



شکل ۳: نمایی دیوار W^۲ (از چپ به راست): کادر بندی دیوار؛ پوشش پرایمر؛ پوشش اصلی (طوسی)

^{۲۵} Data Logger

^{۲۴} Load cell

پس از آغاز آزمایش و اعمال بار، اندازگیری‌ها تا زمان شکست دیوار ادامه پیدا نموده است. در بررسی دیوارهای مقاوم شده مشاهده گردید در پوشش پلی‌اوره و مصالح دیوار، شکست همزمان رخ داده است. مدهای شکست و حداکثر بارگذاری هر نمونه به شرح ذیل ارائه می‌گردد.

برای دیوار مبنا (W_1)، پس از نصب و اعمال بارگذاری استاتیکی، شکست دیوار مطابق شکل ۶ صورت پذیرفته است. در این نمونه حداکثر بار به مقدار ۵۱۱ کیلوگرم و حداکثر جابجایی به ۰.۴۹ میلیمتر رسیده است. مطابق شکل شکست دیوار در محل ملات بین دو ردیف آجر رخ داده است.



شکل ۶: الف) نصب دیوار W_1 در دستگاه خمشی ب) شکست دیوار پس از اعمال بار ج) نمای پشت دیوار شکسته شده

برای دیوار با پوشش پلی‌اوره ضربدری (W_2)، پس از نصب و اعمال بارگذاری استاتیکی، شکست دیوار مطابق با شکل ۷ صورت پذیرفته است. در این نمونه حداکثر بار به مقدار ۵۶۱ کیلوگرم رسیده که حدود ۱۰٪ افزایش ظرفیت نسبت به دیوار W_1 و حداکثر جابجایی به ۰.۱۷ میلیمتر رسیده که حدود ۶۵٪ نسبت به دیوار W_1 جابجایی کاهش پیدا کرده که علت افزایش ظرفیت و کاهش جابجایی دیوار را می‌توان به نوعی مهاربند شدن دیوار توسط نوارهای ضربدری پلی‌اوره عنوان نمود.



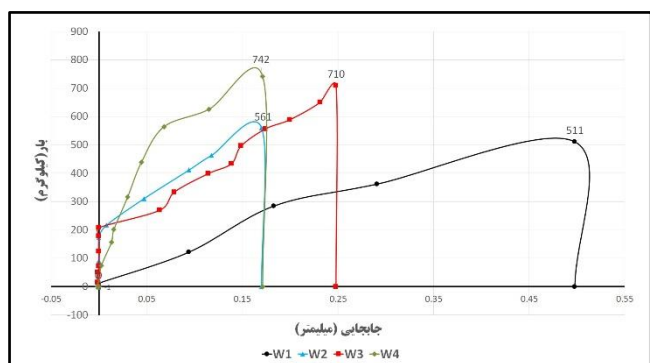
شکل ۷: تصویر شکست دیوار W_2 نمای جلو و پشت دیوار

برای دیوار پوشش پلی‌اوره قابدار ضربدری (W_3)، پس از نصب و اعمال بارگذاری استاتیکی، شکست دیوار مطابق با شکل ۸ صورت پذیرفته است. در این نمونه حداکثر بار به مقدار ۷۱۰ کیلوگرم رسیده که حدود ۳۸٪ نسبت به دیوار W_1 افزایش ظرفیت داشته و حداکثر جابجایی به ۰.۲۵ میلیمتر رسیده که حدود ۵۰٪ نسبت به دیوار W_1 کاهش جابجایی داشته است. افزایش ظرفیت بارگذاری در این حالت از دیوار W_2 بیشتر شده است که این امر می‌تواند به علت افزایش سطح پوشش پلی‌اوره نسبت به آن دیوار و بهبود عملکرد آن در مقاوم‌سازی دیوار عنوان نمود. نکته دیگری که در مد شکست دیوار W_3 رخ داده است تقارن ایجاد شده (نسبت به مرکز دیوار) است که این موضوع در دو دیوار قبلی مشاهده نمی‌گردید، علت این امر می‌تواند توزیع یکنواخت‌تر بار خمشی باشد، یعنی مهار دیوار W_3 با توجه به سطح بیشتر پوشش پلی‌اوره، باعث انسجام بیشتر در اجزای دیوار گردیده است.



شکل ۸: تصویر شکست دیوار W_3 (نمای جلو و پشت دیوار)

و در نهایت برای دیوار با پوشش کامل پلی‌اوره (W_4)، پس از نصب و اعمال بارگذاری استاتیکی، شکست دیوار مطابق با شکل ۹ صورت پذیرفته است. در این نمونه حداکثر بار به مقدار ۷۴۱ کیلوگرم رسیده که حدود ۴۵٪ نسبت به دیوار W_1 افزایش ظرفیت داشته و حداکثر جابجایی به ۰.۱۷ میلیمتر رسیده که حدود ۶۵٪ نسبت به دیوار W_1 کاهش جابجایی داشته است. ظرفیت بارگذاری در این حالت بیشترین مقدار خود را دارد که علت آن می‌تواند پوشاندن کامل دیوار از پلی‌اوره و بهبود خواص مکانیکی آن دانست. در این حالت نیز به علت توزیع یکنواخت بار بین اجزای دیوار، مد شکست به صورت متقارن در دیوار رخ داده است.



شکل ۱۰- منحنی بار-جابجایی

۳- نتیجه گیری

از آنجا که بارهای خارج از صفحه‌ای نقش مهمی در تخریب و آسیب به دیوارها دارند، برای یک بارگذاری لرزه‌ای که در زمان بسیار کوتاهی رخ می‌دهد، هر چه بتوان میزان جابجایی دیوار را کاهش و ظرفیت باربری آن را افزایش داد می‌توان عملکرد مناسبی را از دیوار مشاهده نمود. همانگونه که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود دیوارهایی که پوشش پلی‌اوره در آن‌ها استفاده شده از ظرفیت باربری بیشتری نسبت به دیوار بدون پلی‌اوره برخوردار بوده و همچنین میزان جابجایی وسط دیوار در نمونه‌های دارای پوشش، کمتر از نمونه بدون پوشش بوده که این مهم نشان دهنده عملکرد مناسب پلی‌اوره در مقاوم‌سازی دیوار بنایی می‌باشد. از طرفی مشاهده می‌گردد در دیوارهایی که از پوشش کامل پلی‌اوره و پوشش پلی‌اوره‌ی قاپدار ضربدری استفاده شده، ظرفیت باربری به ترتیب ۴۵٪ و ۳۹٪ نسبت به حالت بدون پوشش (مبنا) افزایش پیدا کرده و جابجایی در این دیوارها نیز به ترتیب ۶۶٪ و ۵۰٪ نسبت به دیوار مبنا کاهش پیدا نموده است. لذا با توجه به شرایط بهینه از منظر مقاومتی و اقتصادی توصیه می‌گردد به منظور مقاوم‌سازی دیوارهای بنایی در برابر بارهای خارج از صفحه‌ای (همچون زلزله، انفجار و ...) از پوشش پلی‌اوره به شکل قاپدار ضربدری یا پوشش کامل استفاده گردد. از طرفی با توجه به محدودیت‌های دستگاه اندازه‌گیری، دیوار مورد آزمایش به صورت مقیاسی از دیوار واقعی ساخته شده، لذا می‌توان از پوشش پلی‌اوره برای مقاوم‌سازی دیوارهای بنایی در ابعاد واقعی نیز استفاده نمود. همچنین در هنگام زلزله بار وارد شده به صورت چرخه‌ای و در مدت زمان بسیار کوتاهی وارد شده لذا با توجه به



شکل ۹: تصویر شکست دیوار W4

۲-۳- نتایج آزمایش

در شکل ۱۰ تصویر نمودارهای بار-جابجایی چهار نمونه آزمایشگاهی ارائه شده است. مطابق شکل ۱۰، در هر چهار نمونه بارگذاری شده، میزان بار و جابجایی در وسط دیوار از طریق جابجایی‌سنج و بارسنج اندازه‌گیری شده که بیشترین ظرفیت باربری مربوط به دیوار با پوشش کامل پلی‌اوره و کمترین آن برای حالت بدون پوشش بوده است. بر اساس نمودارهای نشان داده شده تمامی نمونه‌های مقاوم شده با پلی‌اوره دارای ظرفیت باربری بیشتری نسبت به نمونه‌ی مقاوم نشده، بوده‌اند که این امر می‌تواند به علت مقاومت کششی بالای پلی‌اوره که در محل اعمال نیروهای کششی ناشی از خمش (قسمت پایین نمونه) واقع شده‌اند، رخ دهد. همچنین نتایج آزمایش نشان می‌دهد افزایش سطح پلی‌اوره تا میزان مشخصی باعث افزایش ظرفیت باربری گردیده و افزایش بیشتر از آن حد، تاثیر زیادی بر ظرفیت باربری دیوار نخواهد داشت، به طوری که ظرفیت باربری نمونه با پوشش قاپدار ضربدری (سطح پوشش حدود ۴۶٪ از کل سطح دیوار) نسبت به پوشش کامل دارای ظرفیت باربری تقریباً نزدیکی می‌باشد. همچنین بر اساس شیب اولیه نمودار بار-جابجایی مشاهده می‌گردد سختی دیوارهای با پوشش پلی‌اوره به مراتب بیشتر از دیوار بدون پوشش گریده است. از طرفی به علت خواص پلیمری موجود در پلی‌اوره همچون خواص الاستومری و چسبندگی بالای آن و نحوه قرارگیری روی نمونه (ضربدری، قاپدار ضربدری و کامل) باعث گردیده به نوعی بار یکنواخت‌تر بین اجزاء دیوار توزیع شود و میزان جابجایی نهایی دیوارهای با پوشش پلی‌اوره کمتر از بدون پوشش گردد که این نشان از شکل‌پذیری کمتر این دیوارها نسبت به دیوار بدون پوشش می‌باشد. لازم به ذکر است در هیچکدام از نمونه‌های مذکور، جداشدگی بین پوشش پلی‌اوره و پلاستر سیمانی رخ نداده است.

<https://doi.org/10.28991/cej-2021-03091782>

۵. Bagheri, B., Lee, J.H., Kim, H.G. and Oh, S.H., ۲۰۲۰. Experimental evaluation of the seismic performance of retrofitted masonry walls. *Composite Structures*, 240, p. ۱۱۹۹۷. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.111997>
۶. Yu, P., Silva, P. and Nanni, A., ۲۰۰۷. In-plane response of urm walls strengthened with gfrp grid reinforced polyurea. In *10th North American Masonry Conference*. pp. ۴۶۶-۷۷. <https://hdl.handle.net/11588/120096>.
۷. Cuong, N.H., Luat, N.V., Gayoon, L., An, H., Han, S.W. and Lee, K., ۲۰۲۳. Experimental and dem numerical analyses of the flexural and diagonal compression behavior of masonry reinforced with polyurea coating. In *Structures 54*, pp. ۱۰۷۸-۱۰۹۲. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.05.051>
۸. Jang, H.S., An, J.H., Song, J.H., Son, S.H., Hong, Y.S. and Eun, H.C., ۲۰۲۲. Out-of-plane strengthening of unreinforced masonry walls by glass fiber-reinforced polyurea. *J. Of Civil Engineering*, 8(1), pp. ۱۴۵-۱۵۴. <https://10.28991/CEJ-2022-08-01-011>.
۹. Myers, J.J. and Hrynyk, T.D., ۲۰۰۶. Out of plane behavior of masonry infill walls retrofitted with a reinforced polymer grid and polyurea system. *Structural Faults and Repairs*. https://scholarsmine.mst.edu/civarc_enveng_facwork/199/.
۱۰. Cassol, D., Giongo, I., Ingham, J. and Dizhur, D., ۲۰۲۱. Seismic out-of-plane retrofit of urm walls using timber strong-backs. *Construction and Building Materials*, 269, p. ۱۲۱۲۳۷. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121237>
۱۱. Dong, Z., Deng, M., Zhang, Y., Zhang, C. and Ma, P., ۲۰۲۰. Out-of-plane strengthening of unreinforced masonry walls using textile reinforced mortar added short polyvinyl alcohol

مقاومت مناسب بارگذاری استاتیکی و افزایش ظرفیت باربری دیوار، انتظار می‌رود دیوار مقاوم شده با پوشش پلی‌اوره، به علت چسبندگی و توزیع مناسب نیروها بین اجزای دیوار، در هنگام زلزله به صورت یکپارچه عمل نماید که این امر باعث جلوگیری از تخریب و آسیب جدی به ساختمان می‌گردد و برای ساختمان‌هایی که در آن‌ها از قوانین مهار دیوار (همچون وال‌پست) بکار گیری نشده است می‌تواند روش مناسبی باشد. لازم به ذکر است برای سازه‌های بنایی با توجه به باربر بودن دیوارها، ملاحظات و آزمایشات دیگری همچون افزودن نیروی ثقلی بر دیوارها و انجام آزمایش میز لرزان مورد نیاز می‌باشد. همچنین در آزمایشات صورت گرفته صرفاً اثرگذاری پوشش پلی‌اوره و مقایسه اشکال مختلف پوشش در مقاوم‌سازی دیوار مدنظر بوده و برای بررسی بارهای لرزه‌ای و چرخه‌ای بهتر است از آزمایش میز لرزان استفاده گردد.

منابع

۱. Shojaei, B., Najafi, M., Yazdanbakhsh, A., Abtahi, M. and Zhang, C., ۲۰۲۱. A review on the applications of polyurea in the construction industry. *Polymers For Advanced Technologies*, ۳۲(۸), pp. ۲۷۹۷-۲۸۱۲. <https://doi.org/10.1002/pat.5277>
۲. Eftekhari, M. and Emami, M., ۲۰۱۸. Investigation the different methods of connecting gfrp sheets to ductility and in-plane behavior of masonry walls. *Ferdowsi Civil Engineering*. 31, pp. ۵۷-۷۳ [In Persian]. DOI: [10.22067/civil.v31i2.56881](https://doi.org/10.22067/civil.v31i2.56881)
۳. Shabdin, M., Zargarani, M. and Attari, N.K., ۲۰۱۸. Experimental diagonal tension (shear) test of unreinforced masonry (urm) walls strengthened with textile reinforced mortar (trm). *Construction and Building Materials*, 164, pp. ۷۰۴-۷۱۵. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.234>.
۴. Son, S.H., An, J.H., Song, J.H., Hong, Y.S., Jang, H.S. and Eun, H.C., ۲۰۲۱. In-plane strengthening of unreinforced masonry walls by glass fiber-reinforced polyurea. *J. of Civil Engineering*, 7(12), pp. ۲۱۱۹-۲۱۲۹.

fibers. *Construction and Building Materials*, 260, p.119910.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119910>

۱۲. Tan, K.H. and Patoary, M.K.H., ۲۰۰۴. Strengthening of masonry walls against out-of-plane loads using fiber-reinforced polymer reinforcement. *J. of Composites for Construction*, 8(1), pp.۷۹-۸۷.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-۰۲۶۸\(2004\)8:1\(79\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-۰۲۶۸(2004)8:1(79))
۱۳. Gu, M., Ling, X., Wang, H., Yu, A. and Chen, G., ۲۰۱۹. Experimental and numerical study of polymer-retrofitted masonry walls under gas explosions. *Processes*, 7(12), p.۸۶۳.
<https://doi.org/10.3390/pr712۰۸۶۳>
۱۴. Shojaei, B., Najafi, M., Yazdanbakhsh, A., Abtahi, M. and Zhang, C., ۲۰۲۱. A review on the applications of polyurea in the construction industry. *Polymers for Advanced Technologies*, ۳۲(۸), pp.۲۷۹۷-۲۸۱۲.
<https://doi.org/10.1002/pat.۵۲۷۷>
۱۵. Chen, D., Wu, H., Fang, Q., Wei, J.S. and Xu, S.L., ۲۰۲۳. Out-of-plane behaviors of unreinforced and spray polyurea retrofitted one-way masonry infilled walls. *J. of Building Engineering*, 67, p.1۰۶۰۰۶.
<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106006>
۱۶. Cuong, N.H., Luat, N.V., Gayoon, L., An, H., Han, S.W. and Lee, K., ۲۰۲۳. Experimental and dem numerical analyses of the flexural and diagonal compression behavior of masonry reinforced with polyurea coating. *In Structures*, 54, pp. ۱۵۷۸-۱۵۹۲.
<https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.05.0۰۱>
۱۷. Chang, L.Z., Messali, F. and Esposito, R., ۲۰۲۰. Capacity of unreinforced masonry walls in out-of-plane two-way bending: a review of analytical formulations. *In Structures*, 28, pp. ۲۴۳۱-۲۴۴۷.
<https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.10۰۶۰>