Sharif Civil Engineering Journal (2026), **41**(4), 43-50

Sharif University of Technology

Sharif Civil Engineering Journal

https://sjce.journals.sharif.edu



Research Article

Experimental Investigation of the Bearing Capacity of a Masonry Wall Strengthened with Cold Polyurea Coating Under Out-of-Plane Loading

Ramezan Ali Izadifard* and Mohammad Ghajar

Department of Civil Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.
* corresponding author:(maroofgar@chmail.ir)

Article Info

Article history:

Received: 25 November 2024

Revised: 12 April 2025

Accepted: 20 April 2025

Keywords:

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

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 2016 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 45% and 39% increase in bearing capacity, respectively, compared to uncoated walls. Additionally, displacement in these coated walls decreased by 50%. 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.

Funding: This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

Author Contributions: All authors contributed to the reported work for conceptualization, methodology, validation, writing-review and editing, and supervision.

To Cite this article:
Izadifard, R.A and Ghajar, M. 2026. Experimental investigation of the bearing capacity of a masonry wall strengthened with cold polyurea coating under out-of-plane loading, Sharif Civil Engineering Journal, **41**(4), 43-50.
https://doi.org/10.24200/j30.2025.65130.3371

E-ISSN: 2676-4776 © 2026 The Author(s). Sharif Civil Engineering Journal, Published by Sharif University of Technology

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license.

مجله علمی مهندسی عمران شریف

https://sjce.journals.sharif.edu

مقاله‌ی پژوهشی

بررسی آزمایشگاهی ظرفیت باربری دیوار بنایی مقاوم‌شده با پوشش پلی‌اوره‌ی سرد تحت بارگذاری خارج از صفحه

رمضانعلی ایزدی فرد و محمد قاجار *

دانشکده‌ی فنی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.

*نویسنده مسئول (maroofgar@chmail.ir)

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت : ۱۴۰۳/۰۹/۰۵

تاریخ اصلاحیه : ۱۴۰۴/۰۱/۲۳

تاریخ پذیرش : ۱۴۰۴/۰۱/۳۱

واژگان کلیدی:

مقاوم‌سازی دیوار بنایی،

پوشش پلی‌اوره‌ی سرد،

آزمایش خمشی چهار نقطه‌ای،

بارگذاری خارج از صفحه.

چکیده

پس از زلزله‌ی کرمانشاه در سال ۱۳۹۶، نیاز به تقویت اعضاء غیرسازه‌ای ساختمان‌ها مشخص و پس از آن تغییرات آیین‌نامه‌ای به منظور ایمن‌ترساختن آن‌ها اعمال شده است. با وجود این، ساختمان‌هایی که پیش از اعمال تغییرات آیین‌نامه‌ای ساخته شده‌اند، نیاز به مقاوم‌سازی دارند، که استفاده از پوشش پلی‌اوره می‌تواند یکی از اقدام‌های مؤثر در این زمینه باشد. بارهای خارج از صفحه‌ای، نقش مهمی در تخریب دیوارها هنگام زلزله دارند، لذا برای بررسی تأثیر پوشش پلی‌اوره در برابر بارگذاری خارج از صفحه، از آزمایش خمشی چهارنقطه‌ای بر روی چهار نمونه دیوار بنایی با مقیاس کوچک، به‌صورت مقاوم‌نشده (دیوار مبنا) و مقاوم‌شده (با پوشش پلی‌اوره‌ی سرد به شکل کامل، ضربدری، و قابدار ضربدری) استفاده شده است. نتایج حاصل از اعمال بار استاتیکی خارج از صفحه‌ای نشان می‌دهد که ظرفیت باربری دیوارها تا بیشینه‌ی ۴۵٪ افزایش یافته و جابجایی آن‌ها تا بیشینه‌ی ۶۰٪ نسبت به حالت مبنا کاهش یافته است. همچنین از منظر مقاومت و اقتصاد، استفاده از پوشش با طرح قابدار ضربدری برای مقاوم‌سازی بارهای خارج از صفحه‌ای مناسب است.

۱. مقدمه

دیوارهایی که امروزه در ساختمان‌ها استفاده می‌شوند، از اجزاء غیرسازه‌ای یک ساختمان به حساب می‌آیند و در طراحی‌های سازه‌ای تحلیل نمی‌شوند. اگرچه آسیب‌های وارده بر دیوارها، باعث فروریختن ساختمان نمی‌شود؛ لیکن آن‌ها می‌توانند موجب ایجاد حس نگرانی دائم پیش از زمین‌لرزه‌ی احتمالی و عدم بهره‌برداری مناسب پس از وقوع زمین‌لرزه شود. علیرغم اینکه در ساختمان‌های با اهمیت بالا به منظور بهره‌برداری بی‌وقفه، تمهیداتی در طراحی سازه‌ای (اعم از کنترل جابجایی‌ها) منظور می‌شود، اما از لحاظ اقتصادی، طراحی‌های اخیر برای تمامی ساختمان‌ها به صرفه نیست و برای تأمین ایمنی اجزاء غیرسازه‌ای باید راه‌حل‌های دیگری در نظر گرفت.

دیوارهای با مصالح بنایی در برابر بارهای جانبی، مانند زلزله، انفجار، و ... مقاومت زیادی ندارند و در صورت زیادبودن بارهای جانبی، تخریب در آن‌ها صورت می‌پذیرد. مقاومت جانبی دیوارها به نوع مصالح به‌کاررفته در آن‌ها بستگی دارد، که از آن بین می‌توان به مقاومت فشاری، سبکی مصالح، مقاومت کششی، و چسبندگی بین اجزاء اشاره کرد. معمولاً برای سنجش مقاومت جانبی دیوارها از دو نوع بارگذاری درون‌صفحه‌ای و برون‌صفحه‌ای استفاده می‌شود. در حالت درون‌صفحه‌ای، بارگذاری در راستای دیوار و در حالت برون‌صفحه‌ای، بارگذاری عمود بر راستای دیوار اعمال می‌شود.

زلزله‌های اخیر از جمله زلزله‌ی کرمانشاه در سال ۱۳۹۶ نشان داد با وجود پیشرفت در محاسبات و بروزرسانی آیین‌نامه‌های طراحی، عملکرد سازه‌ای ساختمان‌ها، وضعیت مطلوبی دارند؛ اما در اعضاء غیرسازه‌ای می‌توانند آسیب‌های جبران‌ناپذیری ایجاد کنند. پس از زلزله‌ی اخیر، الزام‌ها و محدودیت‌هایی در آیین‌نامه‌ها و دستورالعمل‌ها اعمال شده است (از جمله نصب وال‌پست در دیوارهای ساختمانی)، تا از تخریب و آسیب‌های وارده بر دیوارها جلوگیری شود. اگرچه در ساختمان‌های جدیدالاحداث، اِعمال الزام‌های ذکرشده، مطلوب است؛ اما لازم است برای بسیاری از ساختمان‌ها، که پیش از ایجاد محدودیت‌های ذکرشده ساخته شده‌اند، تمهیداتی در نظر گرفته شود. لذا اهمیت بررسی مقاوم‌سازی دیوارها در برابر بارهای جانبی، بیشتر برای آن دسته از ساختمان‌هایی است که سازه‌ی آن‌ها، مقاومت لازم را دارد، ولی دیوارهای جداکننده در معرض آسیب‌های ناشی از بارهای جانبی قوی قرار دارند. بنابراین جامعه‌ی هدف، ساختمان‌های در حال بهره‌برداری هستند و به‌منظور مقاوم‌سازی از پوشش پلی‌اوره استفاده شده است.

پلی‌اوره به‌دلیل ساختار و خواص منحصر به فرد و کاربرد آسان در مکان‌های صعب‌العبور، به عنوان یک مصالح ساختمانی مدرن توجه مهندسان را جلب کرده است. پلیمر پلی‌اوره با خواصی مانند: دوام، مقاومت در برابر عوامل جوی، شیمیایی، و بیولوژیکی، تقویت مصالح، و سازه‌های ساختمانی و مقاومت در برابر

استناد به این مقاله:

ایزدی فرد، رمضانعلی و قاجار، محمد، ۱۴۰۴. بررسی آزمایشگاهی ظرفیت باربری دیوار بنایی مقاوم‌شده با پوشش پلی‌اوره‌ی سرد تحت بارگذاری خارج از صفحه. مهندسی عمران شریف، ۴۱(۴)، صص.۴۳-۵۰. https://doi.org/10.24200/j30.2025.65130.3371

شاپا الکترونیکی: ۲۶۷۶-۴۷۷۶

حق مولف © نویسندگان

ناشر: دانشگاه صنعتی شریف

خوردگی و سایش، محبوبیت زیادی پیدا کرده است. همچنین، به‌عنوان پوشش محافظ و آب‌بندی در صنعت ساختمان استفاده می‌شود. فناوری پوشش پلی‌اوره، سبز و بدون آلودگی است و استفاده از سیستم‌های کامپوزیت پلی‌اوره برای بهینه‌سازی خواص مکانیکی و حرارتی و کاهش هزینه‌ها رو به افزایش است.[۱]

۱.۱. مقاوم‌سازی دیوارها در حالت درون‌صفحه‌ای

درخصوص بررسی مقاوم‌سازی دیوارها با اعمال بار در حالت درون‌صفحه‌ای، برخی پژوهشگران آزمایش‌هایی انجام داده‌اند، که به برخی از آن‌ها اشاره شده است. افتخاری (۲۰۱۸)، از طریق اتصال صفحه‌های GFRP [1] به دیوارهای بنایی، شکل‌پذیری ظرفیت باربری آن‌ها را بررسی و از ۱۱ نمونه دیوار بنایی (تقویت‌شده و تقویت‌نشده)، تحت بارگذاری قطری (رفتار درون‌صفحه‌ای) استفاده کرده و دریافته است که شکل‌پذیری نمونه‌های تقویت‌شده نسبت به نمونه‌های تقویت‌نشده تا حدود ۱۱۰٪ افزایش یافته است.[۲] شابدین[2] و همکاران (۲۰۱۸)، برای مقاوم‌سازی دیوارهای بنایی غیرمسلح URM [3]، از الیاف شیشه‌ی پارچه‌ای[4] همراه ملات [5](TRM) بر روی ۱۰ عدد دیوار آزمایش کششی قطری (برشی) استفاده کرده‌اند، تا اثر سیستم مقاوم‌سازی دیوار آجری را بررسی کنند. نتایج آزمایش بیانگر تأثیر مقاومت دیوار در زمانی بوده است که دو طرف آن از پارچه‌های شیشه‌ای مسلح استفاده شده بود.[۳] سان[6] (۲۰۲۱)، در بررسی مقاوم‌سازی دیوارهای URM از طریق الیاف شیشه‌ای مسلح با پلی‌اوره، که مقاومت کششی و نرخ افزایش طول بالایی دارد و می‌تواند برای افزایش مقاومت درون‌صفحه‌ای و شکل‌پذیری دیوارهای غیرمسلح استفاده شود، دریافته‌اند که دیوار بنایی مقاوم‌سازی‌شده با الیاف شیشه‌ای مسلح با پلی‌اوره باعث بهبود ظرفیت باربری، شکل‌پذیری، و جذب انرژی شده است.[۴] باقری (۲۰۲۰)، در بررسی آزمایشگاهی عملکرد لرزه‌ای دیوار بنایی در حالت‌های تقویت‌شده و تقویت‌نشده از طریق روش‌های مقاوم‌سازی، شامل ترکیب فنس فلزی، صفحه‌های فولادی، و اتصال‌های صفحه‌های فولادی و پوشش پلیمری، استفاده از ترکیب مواد پلیمری و صفحه‌های فولادی را به‌عنوان روش جایگزینی جهت بهبود و رسیدن به حد نهایی مقاومت، تغییرشکل، و اتلاف انرژی معرفی کرده است. بیشینه‌ی مقاومت و جابجایی نمونه‌های تقویت‌شده به ترتیب برابر با ۱۲۲ الی ۲۷۸ درصد و ۱۱۰ الی۲۴۶ درصد بیشتر از نمونه‌های تقویت‌نشده بوده و همچنین تقویت دیوارها باعث افزایش سختی آن‌ها نشده است.[۵] یو[7] (۲۰۰۷)، در بررسی پاسخ درون‌صفحه‌ای دیوار بنایی تقویت‌شده با شبکه‌ی GFRP مسلح‌شده با پلی‌اوره، آن‌ها را تحت بارگذاری فشاری درون‌صفحه‌ای قطری قرار داده و انواع مختلفی از شکل‌های نوارهای افقی یا عمودی GFRP به‌همراه پلی‌اوره را بررسی کرده و دریافته است که مد شکست در دیوارهای تقویت‌شده به شکل و طرح مقاوم‌سازی مرتبط است. همچنین استفاده از GFRP به‌همراه پلی‌اوره از مؤثرترین روش‌ها برای تقویت دیوار است، به‌طوری که سبب افزایش ۱۰ الی۶۰ درصد در ظرفیت درون‌صفحه‌ای نسبت به دیوار تقویت‌نشده شده و نقش مؤثری در ایجاد عملکرد مناسب در زمان نصب، اجرای کار، و بهبود ظرفیت برشی داشته است.[۶] کنگ[8] (۲۰۲۳)، به بررسی نمونه‌های دیوار بنایی آجری با تقویت پلی‌اوره از طریق آزمایش فشاری خمشی و قطری پرداخته و تأثیر پوشش‌های پلی‌اوره‌ی یک طرفه و دو طرفه را در ظرفیت بار و جابجایی مطالعه کرده است. با توجه به یافته‌های آزمایش، پوشش پلی‌اوره‌ی استفاده‌شده برای تقویت دیوار، باعث افزایش قابل‌توجهی در ظرفیت بار و همچنین تغییرشکل شده است.[۷]

۲.۱. مقاوم‌سازی دیوارها در حالت خارج از صفحه‌ای

درخصوص بررسی مقاوم‌سازی دیوارها با اعمال بار در حالت خارج از صفحه‌ای، آزمایش‌هایی انجام شده‌اند، که به برخی از آن‌ها اشاره شده است. جانگ[9] (۲۰۲۲)، در بررسی تقویت دیوار غیرمسلح توسط الیاف شیشه‌ای مسلح‌شده با پلی‌اوره در حالت خارج از صفحه‌ای دریافته است که با افزایش درجه‌ی تقویتی دیوار، بیشینه‌ی ظرفیت باربری، شکل‌پذیری، و ظرفیت جذب انرژی افزایش می‌یابد.[۸] میرز[10] (۲۰۰۶)، در بررسی رفتار خارج از صفحه‌ای دیوار تقویت‌شده با شبکه‌ی پلیمری و سیستم پلی‌اوره، از سیستم شبکه‌ای چسبنده به‌همراه پلی‌اوره استفاده کرده است، که موجب افزایش شکل‌پذیری دیوار و کنترل بهتر مهار تکه‌های جداشده حاصل از شکست شده است. برنامه‌ی آزمایشی ایشان شامل دو فاز آزمایش بر روی دیوار بنایی URM بوده است: فاز اول، شامل ۹ دیوار URM تحت بارگذاری چهار نقطه‌ای خمشی و فاز ۲، شامل ۶ دیوار URM تحت بارگذاری شبه (استاتیکی) انفجاری بوده است. نتایج آزمایش اخیر از لحاظ میزان افزایش ظرفیت باربری نمونه‌ها نشان داده است که استفاده از شبکه‌ی FRP و پلی‌اوره در حالت‌ها و جنس مختلف دیوارها، باعث افزایش ظرفیت باربری به میزان ۲۸/۷، ۳۶/۴، و ۴۹/۵ برابر حالت دیوار تقویت‌نشده شده است.[۹] کاسول[11] (۲۰۲۱)، بر روی تقویت (بازسازی) دیوارهای URM با استفاده از چوب‌های محکم در پشت‌بند دیوار، که تحت بارگذاری خارج از صفحه قرار داشته‌اند، پرداخته است. روش تقویتی ایشان، شامل اتصال اعضاء چوبی عمودی به سطح داخلی دیوار از طریق پیچ‌کردن بوده است. برای بررسی رفتار خارج از صفحه‌ای دیوار در حالت تقویت‌شده و URM، از آزمایش کیسه‌هوا[12] در مقیاس واقعی استفاده کرده و دریافته است که ظرفیت خارج از محوریت دیوار در دو حالت تقویت‌شده‌ی مذکور، رشدی در حد ۲۵۴ و ۲۴۲ درصد نسبت به حالت بدون تقویت (URM) برای دو دیوار داشته است.[۱۰] دانگ[13] (۲۰۲۰)، در بررسی رفتار خارج از صفحه‌ای، در مقاوم‌سازی دیوار بنایی غیرمسلح با استفاده از پارچه‌ی الیافی (کربن و شیشه) به‌همراه ملات مسلح (TRM) با افزودنی الیاف کوتاه پلی‌وینیل الکل PVA[14] دریافته است که مقاومت نهایی کامپوزیت به‌طورچشمگیری با مسلح‌کردن نمونه به نسبت پارچه‌ی کربنی، افزایش پیدا کرده و همچنین میزان توانایی تغییرشکل، ظرفیت خمشی، و ظرفیت اتلاف انرژی در نمونه‌های مقاوم‌شده به‌طور چشمگیری ارتقاء یافته است.[۱۱] تان[15] (۲۰۰۴)، به بررسی رفتار خارج از صفحه‌ای دیوارهای بنایی مقاوم‌سازی‌شده با استفاده از FRP پرداخته است. وی از سه نوع سیستم متفاوت مقاوم‌سازی توسط FRP برای ۳۰ نمونه‌ی دیوار بنایی استفاده کرده و

[1] Glass Fiber Reinforced Polymer
[2] Shabdin
[3] Un-reinforced masonry
[4] Textiles
[5] Textile reinforced mortar
[6] Son
[7] Yu
[8] Cuong
[9] Jang
[10] Myers
[11] Davide Cassol
[12] airbag
[13] Dong
[14] polyvinyl alcohol
[15] Tan

نتایج آزمایش، افزایش قابل‌توجهی را در مقاومت خارج از صفحه‌ای دیوار در حال مقاوم‌شدن را نشان داده است.[۱۲] گو[16] (۲۰۱۹)، در بررسی‌های عددی و آزمایشگاهی دیوار بنایی بازسازی پلیمری‌شده تحت انفجار گاز دریافته است که حضور پوشش پلی‌اوره، به‌طورمؤثری سبب بهبود توانایی ضدانفجاری‌شدن دیوار بنایی، جلوگیری از ریزش دیوار، و نگهداری قطعات خردشده، و کاهش آسیب‌ها و تلفات اقتصادی نظیر انفجار پتروشیمی می‌شود.[۱۳] چن و همکاران (۲۰۲۳)، در بررسی رفتار خارج از صفحه‌ی دیوار بنایی مقاوم‌سازی‌شده با اسپری پلی‌اوره در بارگذاری شبه‌استاتیک پرداخته‌اند، که نتایج آزمایش بیانگر اثرگذاربودن مقاوم‌سازی بوده است.[۱۵] کنگ[17] و همکاران (۲۰۲۳)، در بررسی رفتار مقاوم‌سازی دیوار بنایی با پوشش پلی‌اوره تحت بارگذاری خمشی دریافته‌اند که میانگین مقاومت خمشی در نمونه‌های تقویت‌شده در حدود ۱۲۷٪ بیشتر از حالت تقویت‌نشده بوده است.[۱۶] چنگ و همکاران (۲۰۲۰)، به بررسی ظرفیت نیروی دیوارهای بنایی در خمش خارج از صفحه‌ای پرداخته‌اند. برای این منظور، مجموعه‌ی داده‌ای متشکل از ۴۶ نمونه‌ی آزمایشی از ۸ محل آزمایش بین‌المللی را ایجاد و درنهایت برای بهبود دقت و دامنه‌ی کاربرد، فرمول‌های تحلیلی برای ارزیابی ظرفیت خمشی دیوارهای بنایی ارائه کرده‌اند.[۱۷]

در پژوهش حاضر، به بررسی مقاوم‌سازی دیوار بنایی با استفاده از پوشش پلی‌اوره، در بارگذاری استاتیکی خارج از صفحه‌ای پرداخته شده و فقط پلی‌اوره (بدون استفاده از الیاف‌های شیشه و کربن) به عنوان ماده‌ی مقاوم‌ساز به‌کار رفته است.

۲. آزمایش خمشی

۲. ۱. مشخصات مصالح

پارامترهای مختلفی در مقاومت دیوار بنایی تأثیرگذار هستند، که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به مقاومت برشی و کششی ملات و مصالح، سطح مقطع دیوار، ارتفاع و طول مؤثر دیوار، و شرایط تکیه‌گاهی اشاره کرد. در آزمایش حاضر، برای تمامی نمونه‌ها، پارامترهای مذکور یکسان در نظر گرفته شده‌اند. دیوار بنایی آزمایش‌شده از ترکیب آجر و ملات ماسه‌ی سیمانی ساخته شده است. ابعاد دیوار ساخته‌شده متناسب با دستگاه خمشی چهار نقطه‌ای، طراحی (۸۰ × ۵۶ سانتی‌متر) و برای رسیدن به نتایج واقعی از نسبت ابعادی (۱/۴ ابعاد دیوار واقعی) جهت ساخت دیوار استفاده شده است (ضخامت دیوار ۵/۵ سانتی‌متر). با توجه به شرط ظهور اثر قوس، که در دیوارهای معمولی نسبت ضخامت به طول دیوار برای آن‌ها بین ۰/۰۵ تا ۰/۰۶۶ است، در آزمایش حاضر این نسبت برابر با ۰/۰۶۸ بوده است (۵/۵۸۰)، لذا می‌توان از اثر قوس صرف‌نظر کرد. طرح اختلاط ملات سیمانی استفاده‌شده، نسبت ۱ به ۳ در ترکیب سیمان و ماسه داشته است، که مقاومت فشاری ۲۸ روزه‌ی آن برابر با ۱۸/۶ مگاپاسکال بوده است.

پلی‌اوره PU[18] (پلی یوریا) از پیوندهای اوره (-NHCONH-) تشکیل شده است، که یک الاستومری است. پلیمر پلی‌اوره سازگار و به‌طورعمده از واکنش پلی ایزوسیان‌ها با پلی‌آمین‌ها (از جمله مخلوطی از رزین و گسترش‌دهنده‌های زنجیره‌ای) تشکیل شده است، که پیوندهای هیدروژنی آن‌ها به‌طور قابل‌توجهی با زنجیره‌های پلیمری در واکنش هستند. از نظر ترکیب شیمیایی، پلی‌اوره شبیه پلی‌اورتان[19] است. به طورکلی، مواد پلی‌اورتان و پلی‌اوره با پیوند یورتان و اوره در زنجیره‌ی اصلی خود به ترتیب خواص مکانیکی و مقاومت سایشی عالی، الاستیسیته‌ی بالا، مقاومت در برابر حلال، و واکنش‌پذیری بالا دارند. فن‌آوری‌های استفاده‌شده براساس مواد مذکور، بهترین تعادل را بین هزینه و کیفیت فراهم می‌کنند. پلی‌اوره نسبت به نرخ کرنش[20] بسیار حساس است و در صورت افزایش سرعت کرنش به آن، پاسخ منحصر به فردی می‌دهد. این حساسیت به پدیده‌ی انتقال شیشه‌ی دینامیکی[21] آن نسبت داده می‌شود. پلی‌اوره به لطف ماهیت تقریباً غیرقابل فشرده‌بودن، ظرفیت بالایی برای بهبود مقاومت در برابر تأثیر امواج انفجاری دارد.[۱۴] پوشش پلی‌اوره (PU) به دو نوع سرد و گرم تقسیم می‌شود: نوع گرم، با استفاده از دستگاه‌های مخصوص تا دمای ۷۰-۸۰ درجه‌ی سانتی‌گراد و برای کارهای صنعتی استفاده می‌شود. نوع سرد، برای امور خانگی است و با ابزارهای معمولی مثل غلتک و قلم‌مو پرداخته می‌شود. پلی‌اوره‌ی استفاده‌شده در آزمایش حاضر از نوع سرد و ساخت ایران بوده است، که مقاومت‌های چسبندگی[22] ۲/۵۶ مگاپاسکال (براساس استاندارد ASTM D4541) و کششی ۲/۵ مگاپاسکال داشته است. در آزمایش اخیر، از ۴ لایه‌ی پلی‌اوره بر روی دیوار استفاده شده است، که لایه‌ی اول از نوع پرایمر به نام ۳۳۳ بوده است، که نقش واسط و چسبندگی را بین لایه‌ی پلاستر سیمانی و پوشش پلی‌اوره ایفا می‌کند و سه لایه‌ی دیگر هم، که پوشش اصلی پلی‌اوره هستند، به رنگ طوسی استفاده شده‌اند. پلی‌اوره‌ی سرد استفاده‌شده در آزمایش حاضر، دو جزئی بوده و از یک جزء رزین و یک جزء سخت‌کننده با نسبت ترکیبی ۴ به ۱ استفاده شده است و هر لایه به‌منظور عمل‌آوری در حدود ۳۰ الی ۴۰ دقیقه به زمان نیاز دارد.

۲. ۲. ساخت نمونه‌ها

با توجه به ابعاد دیوار، قالب‌هایی بر روی زمین تهیه و سپس ۴ نمونه دیوار بنایی، به صورت افقی درون آن‌ها ساخته شده است. نحوه‌ی ساخت دیوارها بدین صورت بوده است که آجرهای بهمنی با استفاده از فاصله‌گذار[23] به اندازه‌ی ۲/۵ سانتی‌متر کنار هم چیده شده‌اند، تا بتوان ملات ماسه سیمانی را در آن فاصله‌ها قرار داد. همچنین برای سبکی دیوار و جلوگیری از مسلح‌شدن آن، داخل سوراخ‌های آجر بهمنی 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 و جهت جلوگیری از ایجاد خلل و فرج در ملات، با یک کوبه‌ی دستی ملات‌ها به‌خوبی فشرده شده‌اند. با توجه به اینکه قرار است در سطح دیوار، پوشش پلی‌اوره قرار بگیرد، لازم است یک لایه‌ی نهایی صاف ملات ماسه سیمانی (پلاستر) روی آن پخش شود. به‌منظور جلوگیری از مسلح‌شدن دیوارها از طریق نفوذ ملات به سوراخ‌های آجر، از یونولیت یا لیکا پُر و مطابق شکل ۱، نمونه‌ها با ملات پلاستر پوشانده و جهت اجرای پوشش‌های پلی‌اوره آماده شده‌اند.

۲. ۳. اجرای طرح‌های پوشش پلی‌اوره

پس از اتمام اجرای ملات پلاستر روی دیوارها، نمونه‌ها به مدت دست کم ۲۸ روز، مراحل عمل‌آوری و اعمال رطوبت را گذرانده و پس از تمیزکردن سطح

[16] Gu
[17] Cuong
[18] PolyUrea
[19] polyurethane
[20] Strain rate
[21] dynamic glass transfer
[22] Adhesion Strength
[23] Spacer

آن‌ها، جهت اجرای پوشش پلی‌اوره آماده شده‌اند. در طرح حاضر از ۴ نمونه دیوار در حالت‌های مختلف جهت آزمایش خمشی استفاده شده است:

دیوار نوع اول، بدون پوشش پلی‌اوره (W1)؛ دیوار نوع دوم، با پوشش پلی‌اوره به شکل ضربدری (W2)؛ دیوار نوع سوم دیوار، با پوشش پلی‌اوره به شکل قابدار و ضربدری (W3)؛ و دیوار نوع چهارم، با پوشش پلی‌اوره در تمام سطح دیوار (W4) استفاده شده است. همان‌طور که بیان شد، در نمونه‌های با پوشش پلی‌اوره، از ۴ لایه پوشش در سطح دیوار استفاده شده است، که یک لایه‌ی آن، لایه‌ی پرایمر و سه لایه‌ی دیگر، پوشش پلی‌اوره‌ی اصلی به رنگ طوسی بوده است. پوشش پرایمر و پلی‌اوره با استفاده از قلم‌موی نقاشی (همانند رنگ‌آمیزی) بر روی سطح کار پرداخته شده است، لذا صاف‌بودن سطح کار و اجرای صحیح پلاستر سیمانی در یکپارچگی سطح نهایی تأثیرگذار خواهد بود. در شکل‌های ۲ الی ۴، انواع شکل‌های پوشش پلی‌اوره (PU) مشاهده می‌شوند، که در



شکل ۱. ساخت نمونه‌ی دیوارهای بنایی.



شکل ۲. نمایی از دیوار W3 (از چپ به راست):
کادربندی دیوار؛ پوشش پرایمر؛ پوشش اصلی (طوسی رنگ).



شکل ۳. نمایی دیوار W2 (از چپ به راست):
کادربندی دیوار؛ پوشش پرایمر؛ پوشش اصلی (طوسی).



شکل ۴. نمایی دیوار W4 (از چپ به راست):
پوشش پرایمر؛ پرداخت پوشش اصلی با قلم‌مو، پوشش اصلی (طوسی).

مدل‌های ضربدری و قابدار ضربدری، عرض پوشش پلی‌اوره، ۵ سانتی‌متر بوده است.

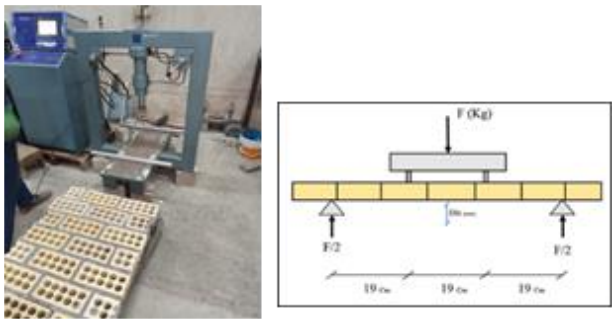
۳. نصب دستگاه آزمایش خمشی

پس از آماده‌سازی نمونه‌ها، دیوارها با استفاده از بالابر به دستگاه آزمایش خمشی چهار نقطه‌ای منتقل و تکیه‌گاه‌ها و محل بارگذاری دیوار در محل خود (با فاصله‌ی ۱۹ سانتی‌متر) نصب شده‌اند. با توجه به استفاده از دو تکیه‌گاه در انتهای دیوار، توزیع نیروهای وارده بر دیوار به‌صورت یک‌طرفه انجام شده است. به‌منظور اندازگیری بارگذاری، دستگاه بارسنج[24] دو تُنی به محل اعمال بار، نصب و از دو عدد جابجایی‌سنج (LVDT) برای اندازگیری میزان جابجایی وسط دیوار استفاده شده است. دستگاه‌های اندازگیری جابجایی و بارسنج به منظور ثبت داده‌ها به ثبت‌کننده‌ی داده (دیتالاگر)[25] متصل شده‌اند (شکل ۵).

۳. ۱. بارگذاری و مدهای شکست

پس از جابجایی دیوار و نصب آن در تکیه‌گاه‌های دستگاه خمشی، جابجایی‌سنج‌ها و میله‌ی اعمال بار در وسط دیوار قرار داده شده است. پس از آغاز آزمایش و اعمال بار، اندازگیری‌ها تا زمان شکست دیوار ادامه پیدا کرده است. در بررسی دیوارهای مقاوم‌شده مشاهده شده است که در پوشش پلی‌اوره و مصالح دیوار، شکست همزمان رخ داده است. مدهای شکست و بیشینه‌ی بارگذاری هر نمونه به این شرح ارائه شده است:

برای دیوار مبنا (W1)، پس از نصب و اعمال بارگذاری استاتیکی، شکست دیوار مطابق شکل ۶ صورت پذیرفته است. در نمونه‌ی W1، بیشینه‌ی بار به مقدار ۵۱۱ کیلوگرم و بیشینه‌ی جابجایی به ۰/۴۹ میلی‌متر رسیده است. مطابق شکل مذکور، شکست دیوار در محل ملات بین دو ردیف آجر رخ داده است.



شکل ۵. نمایی از اجرای دستگاه خمشی چهارنقطه‌ای.



شکل ۶. (الف) نصب دیوار w1 در دستگاه خمشی؛ (ب) شکست دیوار پس از اعمال بار؛ (ج) نمای پشت دیوار شکسته‌شده.

[24] Load cell

[25] Data Logger



شکل ۷. تصویر شکست دیوار W2 نمای جلو و پشت دیوار.



شکل ۸ .تصویر شکست دیوار W3 (نمای جلو و پشت دیوار).

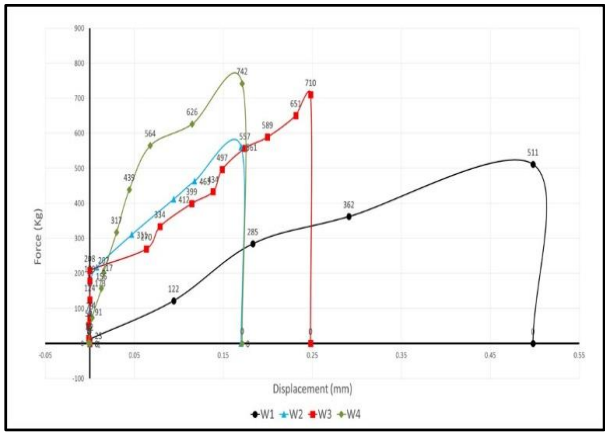


شکل ۹. تصویر شکست دیوار W4.

برای دیوار با پوشش پلی‌اوره‌ی ضربدری (W2)، پس از نصب و اعمال بارگذاری استاتیکی، شکست دیوار مطابق شکل ۷ صورت پذیرفته است. در نمونه‌ی W2، بیشینه‌ی بار به مقدار ۵۶۱ کیلوگرم رسیده است، که حدود ۱۰٪ افزایش ظرفیت نسبت به دیوار W1 و بیشینه‌ی جابجایی به ۰/۱۷میلی‌متر رسیده است، که حدود ۶۵٪ نسبت به دیوار W1 جابجایی کاهش پیدا کرده است؛ زیرا افزایش ظرفیت و کاهش جابجایی دیوار را می‌توان به نوعی مهاربندشدن دیوار توسط نوارهای ضربدری پلی‌اوره عنوان کرد.

برای دیوار پوشش پلی‌اوره‌ی قابدار ضربدری (W3)، پس از نصب و اعمال بارگذاری استاتیکی، شکست دیوار مطابق با شکل ۸ صورت پذیرفته است. در نمونه‌ی W3، بیشینه‌ی بار به مقدار ۷۱۰ کیلوگرم رسیده است، که حدود ۳۸٪ نسبت به دیوار W1 افزایش ظرفیت داشته و بیشینه‌ی جابجایی به ۰/۲۵ میلی‌متر رسیده است، که حدود ۵۰٪ نسبت به دیوار W1 کاهش جابجایی داشته است. افزایش ظرفیت بارگذاری در دیوار W3 از دیوار W2 بیشتر شده است، که این امر می‌تواند به‌علت افزایش سطح پوشش پلی‌اوره نسبت به آن دیوار و بهبود عملکرد آن در مقاوم‌سازی دیوار باشد. نکته‌ی دیگری که در مد شکست دیوار W3 رخ داده است، تقارن ایجادشده (نسبت به مرکز دیوار) است، که این موضوع در دو دیوار قبلی مشاهده نشده است. علت این امر می‌تواند توزیع یکنواخت‌تر بار خمشی باشد، یعنی مهار دیوار W3 با توجه به سطح بیشتر پوشش پلی‌اوره، باعث انسجام بیشتر در اجزاء دیوار شده است.

درنهایت، برای دیوار با پوشش کامل پلی‌اوره (W4)، پس از نصب و اعمال بارگذاری استاتیکی، شکست دیوار مطابق با شکل ۹ صورت پذیرفته است. در نمونه‌ی W4، بیشینه‌ی بار به مقدار ۷۴۱ کیلوگرم رسیده است، که حدود ۴۵٪ نسبت به دیوار W1 افزایش ظرفیت داشته است. همچنین بیشینه‌ی جابجایی به ۰/۱۷ میلی‌متر رسیده است، که حدود ۶۵٪ نسبت به دیوار W1 کاهش جابجایی داشته است. ظرفیت بارگذاری در حالت W4، بیشترین مقدار



شکل ۱۰. منحنی بار- جابجایی.

خود را داشته است، که علت آن می‌تواند پوشاندن کامل دیوار از پلی‌اوره و بهبود خواص مکانیکی آن دانست. در این حالت نیز به‌علت توزیع یکنواخت بار بین اجزاء دیوار، مد شکست به‌صورت متقارن در دیوار رخ داده است.

۳. ۲. نتایج آزمایش

در شکل ۱۰، تصویر نمودارهای بار- جابجایی چهار نمونه‌ی آزمایشگاهی مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، در هر چهار نمونه‌ی بارگذاری‌شده، میزان بار و جابجایی در وسط دیوار از طریق جابجایی‌سنج و بارسنج اندازگیری شده است، که بیشترین ظرفیت باربری مربوط به دیوار با پوشش کامل پلی‌اوره و کمترین آن برای حالت بدون پوشش بوده است. براساس نمودارهای نشان داده‌شده، تمامی نمونه‌های مقاوم‌شده با پلی‌اوره، ظرفیت باربری بیشتری نسبت به نمونه‌ی مقاوم‌نشده داشته‌اند، که این امر می‌تواند به علت مقاومت کششی بالای پلی‌اوره رخ دهد، که در محل اعمال نیروهای کششی ناشی از خمش (قسمت پایین نمونه) واقع شده‌اند. همچنین نتایج آزمایش نشان می‌دهند افزایش سطح پلی‌اوره تا میزان مشخصی باعث افزایش ظرفیت باربری شده و افزایش بیشتر از آن حد، تأثیر زیادی در ظرفیت باربری دیوار نداشته است، به‌طوری که ظرفیت باربری نمونه با پوشش قابدار ضربدری (سطح پوشش حدود ۴۶٪ از کل سطح دیوار) نسبت به پوشش کامل، ظرفیت باربری تقریباً نزدیکی داشته است. همچنین براساس شیب اولیه‌ی نمودار بار- جابجایی مشاهده می‌شود که سختی دیوارهای با پوشش پلی‌اوره به مراتب بیشتر از دیوار بدون پوشش شده است. از طرفی، به‌علت خواص پلیمری موجود در پلی‌اوره، مانند خواص الاستومری و چسبندگی بالای آن و نحوه‌ی قرارگیری روی نمونه (ضربدری، قابدارضربدری، و کامل) باعث شده است که به نوعی بار یکنواخت‌تر بین اجزاء دیوار توزیع شود و میزان جابجایی نهایی دیوارهای با پوشش پلی‌اوره کمتر از بدون پوشش شود، که نشانگر شکل‌پذیری کمتر دیوارهای مذکور نسبت به دیوار بدون پوشش است. شایان ذکر است در هیچکدام از نمونه‌های اخیر، جداشدگی بین پوشش پلی‌اوره و پلاستر سیمانی رخ نداده است.

۳. نتیجه‌گیری

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 از دیوار را مشاهده کرد. مطابق شکل ۱۰ مشاهده می‌شود دیوارهای با پوشش پلی‌اوره، ظرفیت باربری بیشتری نسبت به دیوار بدون پلی‌اوره داشته و همچنین میزان جابجایی وسط دیوار در نمونه‌های با

پوشش کمتر از نمونه‌ی بدون پوشش بوده است، که این مهم بیانگر عملکرد مناسب پلی‌اوره در مقاوم‌سازی دیوار بنایی است. از طرفی مشاهده می‌شود در دیوارهایی که در آن‌ها از پوشش کامل پلی‌اوره و پوشش پلی‌اوره‌ی قابدار ضربدری استفاده شده است، ظرفیت باربری به ترتیب ۴۵ و ۳۹ درصد نسبت به حالت بدون پوشش (مبنا) افزایش پیدا کرده و جابجایی در آن‌ها نیز به ترتیب ۶۶ و ۵۰ درصد نسبت به دیوار مبنا کاهش پیدا کرده است. لذا با توجه به شرایط بهینه از منظر مقاومتی و اقتصادی توصیه می‌شود به‌منظور مقاوم‌سازی دیوارهای بنایی در برابر بارهای خارج از صفحه‌ای (مانند زلزله، انفجار، و ...) از پوشش پلی‌اوره به شکل قابدار ضربدری یا پوشش کامل استفاده شود. از طرفی، با توجه به محدودیت‌های دستگاه اندازگیری، دیوار آزمایشی به‌صورت مقیاسی از دیوار واقعی ساخته شده است، لذا می‌توان از پوشش پلی‌اوره برای مقاوم‌سازی دیوارهای بنایی در ابعاد واقعی نیز استفاده کرد.

همچنین در هنگام زلزله، بار واردشده به صورت چرخه‌ای و در مدت زمان بسیار کوتاهی وارد می‌شود، لذا با توجه به مقاومت مناسب بارگذاری استاتیکی و افزایش ظرفیت باربری دیوار انتظار می‌رود دیوار مقاوم‌شده با پوشش پلی‌اوره، به‌علت چسبندگی و توزیع مناسب نیروها بین اجزاء دیوار، در هنگام زلزله به صورت یکپارچه عمل کند، که این امر باعث جلوگیری از تخریب و آسیب جدی به ساختمان می‌شود و برای ساختمان‌هایی که در آن‌ها از قوانین مهار دیوار (همچون وال‌پست) استفاده نشده است، می‌تواند روش مناسبی باشد. این تذکر لازم است که برای سازه‌های بنایی با توجه به باربربودن دیوارها، ملاحظات و آزمایش‌های دیگری همچون افزودن نیروی ثقلی بر دیوارها و انجام آزمایش میزلرزان لازم است. همچنین در آزمایش‌های صورت‌گرفته، فقط اثرگذاری پوشش پلی‌اوره و مقایسه‌ی شکل‌های مختلف پوشش در مقاوم‌سازی دیوار مدنظر بوده است و بهتر است برای بررسی بارهای لرزه‌ای و چرخه‌ای از آزمایش میزلرزان استفاده شود.

References- منابع

1. Shojaei, B., Najafi, M., Yazdanbakhsh, A., Abtahi, M. and Zhang, C., 2021. A review on the applications of polyurea in the construction industry. *Polymers For Advanced Technologies, 32(*8*),* pp. 2797-2812. https://doi.org/10.1002/pat.5277
2. Eftekhar, M. and Emami, M., 2018. Investigation the different methods of connecting gfrp sheets to ductility and in-plane behavor of masonry walls. *Ferdowsi Civil Engineering*. *31*, pp. 57-73 [In Persian]. DOI: 10.22067/civil.v31i2.56881
3. Shabdin, M., Zargaran, M. and Attari, N.K., 2018. Experimental diagonal tension (shear) test of un-reinforced masonry (urm) walls strengthened with textile reinforced mortar (trm). *Construction and Building Materials, 164*, pp.704-715. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.234.
4. Son, S.H., An, J.H., Song, J.H., Hong, Y.S., Jang, H.S. and Eun, H.C., 2021. In-plane strengthening of unreinforced masonry walls by glass fiber-reinforced polyurea. *J. of Civil Engineering, 7(*12*),* pp.2119-2129. https://doi.org/10.28991/cej-2021-03091782
5. Bagheri, B., Lee, J.H., Kim, H.G. and Oh, S.H., 2020. Experimental evaluation of the seismic performance of retrofitted masonry walls. *Composite Structures, 240*, p.111997. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.111997
6. Yu, P., Silva, P. and Nanni, A., 2007. In-plane response of urm walls strengthened with gfrp grid reinforced polyurea. *In 10th North American Masonry Conference.* pp. 466-77. https://hdl.handle.net/11588/120096.
7. Cuong, N.H., Luat, N.V., Gayoon, L., An, H., Han, S.W. and Lee, K., 2023. Experimental and dem numerical analyses of the flexural and diagonal compression behavior of masonry reinforced with polyurea coating. *In Structures 54*, pp. 1578-1592. Elsevier. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.05.051
8. Jang, H.S., An, J.H., Song, J.H., Son, S.H., Hong, Y.S. and Eun, H.C., 2022. Out-of-plane strengthening of unreinforced masonry walls by glass fiber-reinforced polyurea. *J. Of Civil Engineering, 8(*1*),* pp.145-154. https://10.28991/CEJ-2022-08-01-011.
9. Myers, J.J. and Hrynyk, T.D., 2006. 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/197/.
10. Cassol, D., Giongo, I., Ingham, J. and Dizhur, D., 2021. Seismic out-of-plane retrofit of urm walls using timber strong-backs. *Construction and Building Materials, 269*, p.121237. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121237
11. Dong, Z., Deng, M., Zhang, Y., Zhang, C. and Ma, P., 2020. Out-of-plane strengthening of unreinforced masonry walls using textile reinforced mortar added short polyvinyl alcohol fibers. *Construction and*

Building Materials, *260*, p.119910. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119910

12. Tan, K.H. and Patoary, M.K.H., 2004. Strengthening of masonry walls against out-of-plane loads using fiber-reinforced polymer reinforcement. *J. of Composites for Construction*, *8(*1*)*, pp.79-87. https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(2004)8:1(79)
13. Gu, M., Ling, X., Wang, H., Yu, A. and Chen, G., 2019. Experimental and numerical study of polymer-retrofitted masonry walls under gas explosions. *Processes*, *7(*12*)*, p.863. https://doi.org/10.3390/pr7120863
14. Shojaei, B., Najafi, M., Yazdanbakhsh, A., Abtahi, M. and Zhang, C., 2021. A review on the applications of polyurea in the construction industry. *Polymers for Advanced Technologies*, *32(*8*)*, pp.2797-2812. https://doi.org/10.1002/pat.5277
15. Chen, D., Wu, H., Fang, Q., Wei, J.S. and Xu, S.L.. 2023. Out-of-plane behaviors of unreinforced and spray polyurea retrofitted one-way masonry infilled walls. *J. of Building Engineering*, *67*, p.106006. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106006
16. Cuong, N.H., Luat, N.V., Gayoon, L., An, H., Han, S.W. and Lee, K., 2023. Experimental and dem numerical analyses of the flexural and diagonal compression behavior of masonry reinforced with polyurea coating. *In Structures*, *54*, pp. 1578-1592. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.05.051
17. Chang, L.Z., Messali, F. and Esposito, R., 2020. Capacity of unreinforced masonry walls in out-of-plane two-way bending: a review of analytical formulations. *In Structures*, *28*, pp. 2431-2447. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.10.060