Housing and Rural Environment

Print ISSN: 2008 - 4994 Online ISSN: 2588 - 6215

Homepage: https://jhre.ir

Economic and numerical evaluation of masonry wall retrofitting using steel strips: an application-oriented study for rural areas

Armin Memarzadeh[1], **Mohammad Reza Soghrat**[2]✉, and **Dariush Baladi**[3]

1. M.Sc., Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Mazandaran, Babolsar, Iran. Email: armin.memarzadeh95@umz.ac.ir
2. Corresponding Author, Assistant Professor, Department of Structural Retrofitting and Rehabilitation, Natural Disasters Research Institute, Tehran, Iran. Email: mr.soghrat@gmail.com
3. M.Sc., Department of Structural Engineering, Faculty of Civil Engineering, Tafresh University, Tafresh, Iran. Email: Eng.darushbaladi@gmail.com

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 11 November 2023
Received in revised form 26 September 2024
Accepted 24 May 2025
Available online 29 March 2026

Keywords:
Masonry Buildings,
Seismic Retrofitting Techniques,
Steel Strip Reinforcement,
Finite Element Analysis (FEA).

ABSTRACT

Objective: This study provides a comprehensive review of available retrofitting methods for masonry buildings and evaluates their applicability in rural areas. Traditional masonry buildings are among the most common structural types in Iran and many developing countries. Due to the absence of standard seismic-resistant systems, non-engineered construction practices, and the use of low-quality materials, these structures are highly vulnerable to seismic events, even of moderate intensity. Given Iran's high seismicity and the frequent occurrence of earthquakes across the country, improving the earthquake resistance of buildings is of critical importance. Masonry buildings, because of their large number, wide geographical distribution, and high vulnerability, require particular attention in seismic retrofitting programs. Moreover, the limited number of stories in such buildings has resulted in relatively similar construction patterns across different regions, making it possible to reduce both costs and construction time through appropriate retrofitting strategies rather than complete reconstruction.

Method: Numerous techniques have been proposed for the seismic retrofitting of masonry buildings, each with its own advantages, limitations, and implementation challenges. However, most previous studies have focused on only a limited number of methods. In this research, a broad range of retrofitting techniques was collected and analyzed. These methods were evaluated in relation to code requirements and practical implementation criteria to assess their feasibility for application in rural settings.

Results: Strengthening masonry walls using steel strips effectively prevents brittle and sudden shear failures by providing confinement to the walls. Appropriate spacing of steel strips acts as a stabilizing mechanism, enhances wall ductility, and improves structural performance. In addition, proper strip spacing helps reduce stresses caused by thermal variations and increases the energy absorption capacity of masonry walls, thereby improving their overall seismic behavior.

Conclusions: Based on the findings, the use of steel strips can be regarded as one of the most effective and practical retrofitting techniques among the methods reviewed. This approach stands out due to its ease of implementation, cost-effectiveness, and significant ability to improve the seismic performance of masonry buildings, particularly in rural areas.

Cite this article: Memarzadeh., A. Soghrat., M. R. & Baladi., D. (2026). Economic and numerical evaluation of masonry wall retrofitting using steel strips: an application-oriented study for rural areas. ***Housing and Rural Environment***, *45*(193), 33-46. https://doi.org/10.22034/45.193.33

© Author(s) retain the copyright.
Publisher: Natural Disasters Research Institute (NDRI).
DOI: https://doi.org/10.22034/45.193.33

[Downloaded from jhre.ir on 2026-11-23]
[DOI: https://doi.org/10.22034/45.193.33]

Introduction

Rural areas continue to face a wide range of social, economic, and spatial challenges that affect their development trajectories and long-term sustainability. Consequently, sustainable rural development has become a central objective of national and regional planning policies, with governments seeking to promote balanced development through the effective utilization of available resources, infrastructure, and institutional capacities. Achieving sustainable rural development requires not only improving living conditions in rural areas but also ensuring equitable access to services, economic opportunities, and social infrastructure.

In Iran, one of the major challenges confronting rural development is the imbalance in the spatial organization of rural settlements and the unequal distribution of public services and facilities. The fragmented settlement structure and disparities in service provision have contributed to uneven development patterns, reduced accessibility, and increased rural outmigration. In this context, the hierarchical organization of rural services and the rational distribution of facilities are essential for strengthening rural settlements, stabilizing population distribution, and reducing migration pressures toward urban areas.

Spatial planning and rural settlement organization plans provide an effective framework for addressing these challenges. Such plans facilitate a comprehensive understanding of regional characteristics, identify the underlying factors shaping socio-economic and spatial conditions, and establish strategic directions for future development. By forecasting demographic, economic, and functional trends over a long-term planning horizon, these plans contribute to the formulation of policies and implementation strategies aimed at achieving sustainable and balanced rural development.

Accordingly, this study seeks to evaluate the effectiveness of the rural spatial organization plan in Hamedan County by examining patterns of service provision and functional development within the rural settlement system.

Method

This study adopts a descriptive–analytical research design to evaluate the effectiveness of the rural spatial organization plan in Hamedan County, with particular emphasis on the distribution and utilization of public services and higher-order functions within rural settlements.

Data collection was conducted using documentary and library-based methods. The primary sources included settlement identification records, official statistical documents, and population and housing census data for the years 1996, 2006, and 2011. These datasets provided the basis for assessing changes in the level of public services and functional capacities of rural settlements over time.

The analytical framework of the study was based on evaluating and comparing the levels of public services and higher-order functions among rural centers during the study periods. Particular attention was given to measuring functional growth and identifying differences between designated rural centers and satellite villages within the settlement hierarchy.To

[Downloaded from jhre.ir on 2026-11-23]

[DOI: https://doi.org/10.22034/45.193.33]

examine the spatial distribution of service growth and functional development, Hot Spot Analysis (Getis–Ord Gi*) was employed within a Geographic Information System (GIS) environment. ArcGIS software was used to analyze spatial patterns, identify statistically significant clusters of growth, and visualize the spatial distribution of service and functional changes across rural settlements in Hamedan County.

Results

The analysis of changes in the general functions of rural settlements indicates that, throughout the study periods, rural districts, service complexes, and rural systems experienced substantially higher rates of functional growth than satellite villages. The spatial distribution of statistically significant hot spots further confirms this pattern. The rural systems of Hamedan, Marianaj, and Jurqan, along with the service complexes of Ebro, Abshineh, Tafrijan, and Solan, as well as the rural districts of Yekanabad, Ansar Imam, Deh Piaz, Arzanfud, and Varkaneh, exhibited the highest levels of growth in general functions.

Similarly, the analysis of higher-order functions revealed a comparable trend. The average growth rate of higher-order services and functions in rural districts, service complexes, and rural systems exceeded that of satellite villages. The most significant concentrations of growth were observed in the central part of the study area, particularly around the Abshineh service complex and the Dingleh–Kahriz rural district, as well as in the northwestern sector centered on the Solan service complex and the rural districts of Deh Piaz, Yekanabad, and Ansar Imam. In addition, the rural systems of Hamedan, Marianaj, and Jurqan demonstrated the highest levels of growth in higher-order functions, further reinforcing their role as key service centers within the regional settlement hierarchy.

Overall, the findings indicate that functional development has been concentrated in the designated rural centers, reflecting the intended spatial structure of the rural settlement organization plan.

Conclusions

The findings of the study, based on both general and higher-order functions, demonstrate the substantial advancement of the designated centers identified in the rural spatial organization plan compared with satellite villages. The observed patterns of functional growth suggest that the objectives of the spatial organization plan for rural settlements in the Central District of Hamedan County have been largely achieved during the period 1996–2011.

The significant increase in public services and higher-order functions within the designated rural centers has strengthened their position within the settlement hierarchy and enhanced their capacity to serve surrounding villages. As a result, these centers have become more effective in providing services, facilitating economic activities, and supporting local development.

Furthermore, the strengthening of rural service centers has the potential to attract and retain population within rural areas. If accompanied by the creation of sustainable and income-

[Downloaded from jhre.ir on 2026-11-23]

[DOI: https://doi.org/10.22034/45.193.33]

generating employment opportunities, these centers can help reduce rural–urban migration and function as intermediary growth poles, thereby mitigating migration pressures on large cities and metropolitan areas. Consequently, the implementation of the rural spatial organization plan can be considered an important step toward achieving balanced regional development, improving service accessibility, and promoting the long-term sustainability of rural settlements.

Funding

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

CRediT authorship contribution statement

All authors contributed equally to the conceptualization of the article and writing of the original and subsequent drafts.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, and plagiarism, and any form of misconduct.

Data availability statement

Not applicable

Acknowledgements

We would like to express our deepest gratitude to all the residents of the villages in the central part of Ardabil city, especially those who assisted us as a statistical sample.

[Downloaded from jhre.ir on 2026-11-23]

[DOI: https://doi.org/10.22034/45.193.33]

مسکن و محیط روستا
شاپا چاپی: ۴۹۹۴ - ۲۰۰۸ شاپا الکترونیکی: ۶۲۱۵ - ۲۵۸۸
Homepage: https://jhre.ir

ارزیابی اقتصادی و عددی روش مقاوم‌سازی دیوارهای بنایی با استفاده از نوار فولادی: مطالعه‌ای به‌منظور کاربرد در مناطق روستایی

آرمین معمارزاده[۱]، محمدرضا سقراط[۲]✉، داریوش بلدی[۳]

۱. کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مازندران، بابلسر، ایران. رایانامه: armin.memarzadeh95@umz.ac.ir
۲. نویسنده مسئول، استادیار، گروه مقاوم‌سازی و بازسازی سازه‌ها، پژوهشکده سوانح طبیعی، تهران، ایران. رایانامه: mr.soghrat@gmail.com
۳. کارشناسی ارشد، گروه سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تفرش، تفرش، ایران. رایانامه: Eng.darushbaladi@gmail.com

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله پژوهشی

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۸/۲۰
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۷/۰۵
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۰۳
تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۱/۰۹

کلیدواژه‌ها:
ساختمان بنایی،
روش‌های مقاوم‌سازی،
نوار بست فولادی،
نرم‌افزار اجزا محدود.

چکیده

هدف: در این پژوهش، به بررسی جامع روش‌های موجود برای مقاوم‌سازی ساختمان‌های بنایی و امکان‌سنجی به‌کارگیری این روش‌ها در مناطق روستایی پرداخته شده است. ساختمان‌های ساخته‌شده با مصالح بنایی سنتی یکی از متداول‌ترین انواع سازه‌ها در ایران و بسیاری از کشورهای درحال‌توسعه به شمار می‌روند. این نوع سازه‌ها به دلیل نبود سیستم‌های مقاوم لرزه‌ای استاندارد، اجرای غیرمهندسی و استفاده از مصالح با کیفیت پایین، در برابر تحریک‌های لرزه‌ای حتی با شدت متوسط نیز دچار آسیب‌های جدی می‌شوند. باتوجه‌به واقعیت لرزه‌خیز بودن کشور ایران و وقوع زلزله‌های متعدد در مناطق مختلف، افزایش مقاومت ساختمان‌ها در برابر زلزله از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این میان، ساختمان‌های بنایی به دلیل تعداد فراوان، پراکندگی جغرافیایی گسترده، و آسیب‌پذیری بالا، نیازمند توجه ویژه در حوزه مقاوم‌سازی هستند. از سوی دیگر، محدودیت در تعداد طبقات این نوع ساختمان‌ها، منجر به ایجاد الگوهای ساخت نسبتاً مشابه در مناطق مختلف شده است؛ بنابراین می‌توان با ارائه راهکارهای مقاوم‌سازی مناسب، به کاهش هزینه و زمان نسبت به بازسازی کامل سازه‌ها دست یافت.

روش پژوهش: تاکنون روش‌های متعددی برای مقاوم‌سازی ساختمان‌های بنایی پیشنهاد شده‌اند که هر یک دارای مزایا، معایب و محدودیت‌های اجرایی خاص خود هستند. بااین‌حال، اغلب پژوهش‌ها تمرکز خود را بر بررسی یک یا چند روش محدود معطوف کرده‌اند. در این تحقیق، با گردآوری و تحلیل طیف گسترده‌ای از روش‌های موجود مقاوم‌سازی، تلاش شده تا با تطبیق این روش‌ها با ضوابط آیین‌نامه‌ای و معیارهای اجرایی، امکان‌سنجی دقیق‌تری برای به‌کارگیری آن‌ها در بافت‌های روستایی انجام گیرد.

یافته‌ها: با تقویت دیوارهای بنایی ازطریق نوارهای فولادی، از وقوع شکست‌های برشی ترد و ناگهانی جلوگیری می‌شود؛ چراکه این نوارها باعث محصورشدگی دیوارها می‌شوند. فاصله‌گذاری مناسب نوارهای فولادی به‌عنوان عاملی پایدارکننده در دیوارهای بنایی عمل می‌کند. همچنین، فاصله‌گذاری مناسب نوارها موجب افزایش انعطاف‌پذیری دیوارها می‌شود. علاوه بر این، فاصله‌گذاری صحیح به کاهش تنش‌های ناشی از تغییرات حرارتی در دیوارهای بنایی کمک می‌کند. از سوی دیگر، فاصله‌گذاری مناسب باعث افزایش ظرفیت جذب انرژی در دیوارهای بنایی می‌شود.

نتیجه‌گیری: بر اساس یافته‌های این تحقیق، می‌توان نتیجه گرفت که در میان تمامی تکنیک‌های تقویت بررسی‌شده، استفاده از تسمه‌های فولادی یکی از مؤثرترین و کاربردی‌ترین روش‌ها محسوب می‌شود. این روش به دلیل سهولت اجرا، مقرون‌به‌صرفه بودن اقتصادی و توانایی قابل‌توجه در بهبود عملکرد لرزه‌ای ساختمان‌های بنایی به‌ویژه در مناطق روستایی، برجسته است.

استناد: معمارزاده، آرمین؛ سقراط، محمدرضا؛ بلدی، داریوش. (۱۴۰۵). ارزیابی اقتصادی و عددی روش مقاوم‌سازی دیوارهای بنایی با استفاده از نوار فولادی: مطالعه‌ای به‌منظور کاربرد در مناطق روستایی. *مسکن و محیط روستا*، ۴۵ (۱۹۳)، ۳۳-۴۶. https://doi.org/10.22034/45.193.33

ناشر: مؤسسه پژوهشی سوانح طبیعی.

© نویسندگان.

[Downloaded from jhre.ir on 2026-11-23]
[DOI: https://doi.org/10.22034/45.193.33]

مقدمه

ساختمان‌های بنایی یکی از متداول‌ترین انواع ساختمان‌ها در کشور هستند که قیمت پایین و در دسترس بودن مصالح آن موجب شد تا بیشتر ساختمان‌ها به این صورت ساخته شوند. به دلیل عدم آگاهی بسیاری از مردم، عدم نظارت کافی و یا عـدم توجـه بـه مـوارد ذکرشده در آیین‌نامه‌های موجود، غالباً این ساختمان‌ها فاقد سیستم لرزه‌ای جانبی هستند که همین موضوع موجب آسیب زیادی به این ساختمان‌ها در زلزله‌های گذشته شده است و بالطبع تلفات جانی زیادی نیز برجا گذاشته است. اساساً در ساخت این ساختمان‌ها، از مصالح متنوعی استفاده می‌شود و اکثراً بـه دلیـل نامناسب بودن شکل هندسی، عدم انسجام و یکپارچگی لازم، کیفیت نامطلوب مصالح مصرفی و ضعف در اجرا دچار خسارت لرزه‌ای می‌شوند. اغلب دیوارهای ساخته‌شده با مصالح بنایی، بارهای ثقلی وارده به ساختمان را به زمین منتقل می‌کنند و عموماً بدون انجام محاسبات دقیق مهندسی ساخته و بهره‌برداری می‌شوند. بنابراین اکثراً در انتقال بارهای جانبی با مشکل روبه‌رو می‌شوند. باتوجه‌به وجود تعداد زیادی از ساختمان‌های ساخته‌شده موجود در سراسر کشور و خصوصاً در شهرهای کوچک، بررسی این ساختمان‌ها و توجـه به مقاوم‌سازی آن‌ها حائز اهمیت است (Lourenco, 1997). به‌روز شدن آیین‌نامه‌ها و دستورالعمل‌ها، تغییرات کاربری، سن سازه، فرسودگی مصالح و... از دلایلی است که نیاز به مقاوم‌سازی ساختمان‌های بنایی را افزایش می‌دهد. باتوجه‌به افـزایش روزافزون روش‌های مقاوم‌سازی که همواره روبه‌پیشرفت هستند، مطالعه و تحقیق بیشتر در مورد روش‌های مختلف اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. روش‌های نوین مقاوم‌سازی سـاده‌تـر و گهگاه ارزان‌تر و سریع‌تر هستند و موجب عدم استفاده از روش‌های سنتی می‌شوند (Borah et al., 2019). هدف از این تحقیق بررسی روش‌های موجود برای مقاوم‌سازی ساختمان‌های بنایی و نیمه‌اسکلت و امکان‌سنجی به‌کارگیری آن‌ها در مناطق روستایی است. در تحقیق حاضر سعی شد ضمن تشریح روش‌های مقاوم‌سازی ساختمان‌های بنایی، معایب و محاسن هر روش موردبررسی قرار گیرد. همچنین، امکان‌سنجی به‌کارگیری این روش‌ها در مناطق روستایی مطالعه و روش‌های کاربردی مشخص شود تا انجام پروژه‌های مقاوم‌سازی با زمان کمتری ممکن گردد. در این بررسی از بین روش‌های مقاوم‌سازی موجود، روش مقاوم‌سازی با بست نوار فولادی انتخاب و مورد ارزیابی عددی قرار گرفت و بهینه‌ترین حالت شکل قرارگیری از منظر مقاومتی و اقتصادی نیز ارزیابی شد.

پیشینه پژوهش

مطالعات انجام‌شده بر روی مقاوم‌سازی ساختمان‌های بنایی توسط محققین مختلف منجر به تهیه پایگاه داده‌ای وسیعی برای ارزیابی و اعتبارسنجی نتایج گردیده است. در طول دهه گذشته، برای تقویت دیوارهای بنایی، تحقیقات آزمایشگاهی و تحلیلی زیادی انجام گرفته است. ازجمله روش‌های تقویت، می‌توان به استفاده از الیاف (FRP[1]) بر روی سطح دیوار بنایی (Parghi & Alam, 2018)، بهره‌گیری از ژئوگرید در اتصالات بین آجرها (Sadek & Lissel, 2013)، جلوگیری از ترک‌های برشی در دیوارهای مصالح بنایی با استفاده از مهاربندهای فولادی، اجرای تزریق ملات سیمان (Doran et al., 2019)، استفاده از کامپوزیت‌های سیمانی و چسب اپوکسی (Deng et al., 2019)، اجرای شاتکریت بتنی (Gawady et al., 2006) اشاره کرد. رنجبر و همکاران (۲۰۰۸) در یک تحقیق با عنوان «بررسی روش‌های افزایش مقاومت ساختمان‌های بنایی غیرمسلح»، به بررسی انواع روش‌های افزایش مقاومت، مزایا و معایب آن‌ها، محدودیت‌ها و تأثیر تکنیک‌های افزایش مقاومت پرداخته‌اند. بوری[2] و همکاران (۲۰۰۹) در مطالعه‌ای مقاوم‌سازی ساختمان‌های بنایی را با تیر بتنـی حلقـه‌ای (کمرکش) موردمطالعه قرار دادند. این نوع مقاوم‌سازی بیشتر بـه تقویـت اتـصال سـقف بـا دیوارهای آجری می‌پردازد. آن‌ها این روش را در بسیاری موارد مؤثر دانستند اما در بعضی موارد به علت تفاوت ویژگی مـصالح آجـری بـا بـتن، وجود یک اتصال‌دهنده مناسـب را ضروری دانستند. روش‌های نوین مقاوم‌سازی نیز ازجمله کاربرد FRP به‌صورت نوار یا میلگرد نیز موضوع تحقیقات زیادی بوده که از آن جمله

1. Fibre-reinforced polymer
2. Borri

[Downloaded from jhre.ir on 2026-11-23]
[DOI: https://doi.org/10.22034/45.193.33]

می‌توان به مطالعه ترکو[3] و همکاران (۲۰۰۶) اشاره نمود که کاربرد میلگردهای پلیمری را برای بالا بردن مقاومت برشی و خمشی مصالح دیگر شرح داده است. تحقیق مذکور آزمایشگاهی بوده و با ساخت نمونه‌هایی که در داخل آن‌ها میلگردهای پلیمری قرار داده شده بود، مورد بارگذاری قرار گرفت. نتایج به‌دست‌آمده نشان‌دهنده مؤثر بودن و تقویت مقاومت مصالح با میلگردهای پلیمری بود. هدف اصلی این تحقیق بررسی روش‌های مختلف سنتی و جدید مقاوم‌سازی است و اشاره کمتری به نوع و ویژگی ساختمان‌های بنایی شده است. ازاین‌رو مستقیماً به توضیح و ارائه روش‌های مختلف مقاوم‌سازی پرداخته شده است. تعمیر سطوح، تزریق گروت یا اپوکسی، پر کردن بازشوها، تقویت اتصالات، نوارهای فولادی، اضافه کردن مهاربند و افزودن هسته‌های مرکزی ازجمله روش‌های قدیمی مقاوم‌سازی اشاره‌شده در این مطالعه است. در کنار روش‌های سنتی که به‌صورت مختصر و گذرا اشاره شده‌اند، روش‌های مقاوم‌سازی ساختمان‌های بنایی با استفاده از FRP، مسلح کردن بازشوها و ایزولاسیون پی، به‌عنوان روش‌های نوین موردبررسی قرار گرفتند.

روش‌شناسی پژوهش

در بحث ارزیابی مقاومت ساختمان بنایی در برابر زلزله، شناخت پارامترهای مؤثر در مقاومت دیوارهای بنایی بسیار لازم و ضروری است. برای شناخت این پارامترها، باید پارامترهای مؤثر در مقاومت دیوارهای بنایی در برابر بارهای ثقلی و لرزه‌ای را به‌درستی ارزیابی کرد (Parghi et al., 2018).

برای برآورد مقاومت ساختمان‌های بنایی، دیدگاه‌های مختلفی بر اساس آیین‌نامه‌های متفاوت وجود دارد. در میان استانداردها، آیین‌نامه‌ها و دستورالعمل‌های شاخص در این زمینه می‌توان به موارد زیر اشاره داشت:

- مبحث هشتم مقررات ملی ساختمان
- استاندارد ۲۸۰۰
- نشریه شماره ۳۶۰
- FEMA 356
- ASCE 41

روش‌های مقاوم‌سازی ساختمان‌های بنایی

تقویت ساختمان موجود، یا ساختمانی که براثر زلزله آسیب دیده‌اند معمولاً از منظر فنی بسیار پیچیده‌تر از طرح و اجرای ساختمان جدید است. از طرفی محدود بودن اطلاعات موردنیاز در ارتباط با اجزای سازه‌ای، نوع و مقاومت مصالح مصرف‌شده از یک‌سو و عدم تطابق ساختمان‌های بنایی موجود با مدل‌های کلاسیک سازه‌ای نظیر قاب‌های گیردار، قاب‌های بادبندی شده و غیره از سوی دیگر، تخمین مقاومت لرزه‌ای ساختمان را بسیار دشوار می‌کند (Borri et al., 2019). در ادامه روش‌های مختلف مقاوم‌سازی ساختمان‌های بنایی تشریح می‌گردند.

تعبیه دیوار برشی

به‌منظور مقاوم‌سازی به روش تعبیه دیوار برشی، ابتدا باید بخشی از یک دیوار موجود برچیده و به‌جای آن دیوار برشی بتنی مسلح ساخته و جایگزین شود. در این روش می‌توان با جایگزین کردن قسمتی از دیوار آجری موجود با دیوارهای برشی بتنی ساخته‌شده، ضعف سازه در برابر نیروهای جانبی را کاهش داد. همچنین به‌منظور اینکه دیوار برشی عملکرد مناسبی داشته باشد، نیاز به صلب کردن سقف ضروری است. ازاین‌رو ایجاد صلبیت در سقف به علت آنکه سختی دیوارها از دیوارهای اجری موجود بیشتر است از آن دیوارها باربرداری شده و تمامی نیروی جانبی توسط این دیوارهای برشی تحمل می‌شود.

استفاده از پشت‌بند

دیوارهای عمود بر دیوار برشی، پشت‌بند نامیده می‌شود که از شکست و جدا شدن دیوارهای طولانی‌تر جلوگیری می‌کند. در

3. Turco

[Downloaded from jhre.ir on 2026-11-23]

[DOI: https://doi.org/10.22034/45.193.33]

حالتی که دیوار سازه‌ای، شرایط وجود پشت‌بند را نداشته باشد و یا ازنظر مقاومت خمشی ضعیف باشد می‌توان با ایجاد پشت‌بندهای اضافه‌شده جدید و مهار آن به نحو مناسبی با دیوار سازه‌ای، طول دیوار سازه‌ای را کاهش داده تا مقاومت ساختمان تقویت شود.

مقاوم‌سازی با FRP

نسبت بالای مقاومت و سختی الیاف‌های مسلح‌کننده پلیمری نسبت به وزن مواد، آن‌ها را برای مصارف سازه‌ای به گزینه‌ای ایدئال تبدیل کرده است. در تعدادی از مطالعات اخیر، رفتار المان‌های سازه‌ای ساختمان‌های بنایی غیرمسلح مقاوم‌سازی‌شده با FRP آزمایش شده‌اند تا رفتار خارج و داخل از صفحه آن‌ها موردبررسی قرار گیرد (Turco et al., 2006). این در افزایش مقاومت برشی مؤثر بوده و سازه را در برابر بارهای جانبی مقاوم نگه می‌دارد. علاوه بر این باعث جلوگیری از فروریختن خارج از صفحه دیوارها می‌شود.

تأمین دیوار نسبی ساختمان بنایی

مقاومت برشی ساختمان بنایی با دیوارهای مصالح بنایی تأمین می‌شود، ازاین‌جهت دیوار نسبی در هر طبقه از ساختمان باید جوابگوی بارها باشد. اما امروزه در اکثر ساختمان‌های بنایی نیمه‌اسکلت این مسئله رایج است که در آن‌ها دیوارهای میانی را به کلی حذف و به‌جای آن از ستون‌های بتنی یا فولادی استفاده می‌کنند. این کار اگرچه ممکن است جوابگوی بار ثقلی باشند، اما ساختمان در برابر بارهای جانبی عملکرد ضعیفی از خود خواهد داشت. برای حل این مشکل تیغه‌های موجود در ساختمان تخریب شده و به نیاز پروژه به‌صورت دیوارهای با ضخامت بیشتر از ۲۰ سانتی‌متر ساخته خواهند شد.

تزریق گروت یا اپوکسی

تزریق گروت یکی از راه‌های متداول مقاوم‌سازی است. در این روش برای بازگرداندن مقاومت ساختمان‌های بنایی غیرمسلح، ترک‌های موجود و حفره‌های توخالی که به علت تخریب فیزیکی و شیمیایی سطح و یا فعالیت‌های مختلف مکانیکی به وجود آمده است، توسط گروت یا اپوکسی پر می‌شود. ازجمله مزایای این روش، عدم تخریب سطوح و درنتیجه حفظ زیبایی معماری و بافت تاریخی ساختمان‌های بنایی غیرمسلح است. مطالعاتی در این زمینه توسط شولر[4] و همکاران (۱۹۹۴) و شفارد و ترسلج[5] (۱۹۸۰) برای تزریق گروت در شرایط مختلف ترک‌های ایجادشده صورت گرفته است.

مهاربندی فولادی

گسیختگی دیوارهای آجری تحت تحمل نیروهای جانبی صفحه‌ای به دو صورت برشی یا خمشی رخ می‌دهد. غالباً به‌منظور مقاوم‌سازی با استفاده از مهاربند فولادی، برای افزایش مقاومت برشی از المان‌های قطری و افقی فولادی و برای افزایش مقاومت خمشی از المان‌های قائم استفاده می‌شود. این المان‌ها که می‌توانند پروفیل‌های نورد شده یا استفاده از میلگردهای فولادی باشد، در افزایش مقاومت، شکل‌پذیری دیوار و همچنین یکپارچه ساختن آن در برابر بارهای لرزه‌ای، نقش مؤثری از خود نشان می‌دهد (Abrams et al., 2007).

مقاوم‌سازی ساختمان‌های بنایی غیرمسلح به کمک مش‌بندی پروپیلن

روشی ساده و درعین‌حال اقتصادی به‌منظور مقاوم‌سازی ساختمان‌های بنایی خصوصاً جهت جلوگیری از فروپاشی خارج از صفحه دیوارها، استفاده از بست‌های نوارپیچ پروپیلن است که امروزه به‌صورت فراگیر در جهان مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرد. مش‌های مورداستفاده که به‌صورت نوارهای عمود بر هم هستند، ساختمان‌های بنایی را در برمی‌گیرند و موجب پیشگیری از فروپاشی و ریزش دیوارها در هنگام وقوع زلزله می‌شوند.

4. Schuller
5. Sheppard & Tercelj

[Downloaded from jhre.ir on 2026-11-23]
[DOI: https://doi.org/10.22034/45.193.33]

پس تنیده کردن دیوارها

در این روش، تقویت خصوصیات لرزه‌ای دیوارهای آجری به دو صورت انجام می‌شود. روش اول پس کشیدگی درونی و روش دوم پس کشیدگی بیرونی است. پس تنیدگی عموماً به‌منظور مقاوم‌سازی ساختمان‌های آجری چندطبقه غیرمسلح به کار می‌رود.

بست نوارهای فولادی

یکی از دیگر روش‌های افزایش مقاومت دیوارهای مصالح بنایی، استفاده از بست‌های فولادی بر روی سطح دیوار با چیدمان‌های مختلف ازجمله قائم، افقی، قطری، مورب، ضربدری، شبکه‌ای است. بست‌های نواری فولادی روشی دیگر برای افزایش مقاومت دیوارهای مصالح بنایی است که نیازی به تمیز کردن کامل سطح دیوار ندارند. این بست‌ها تنها در مناطقی که قرار می‌گیرند، سطوح دیوار را تمیز می‌کنند و این عمل در کاهش هزینه‌ها به‌شدت مؤثر است. استفاده از بست‌های نواری فولادی منجر به افزایش ظرفیت باربری و بهبود عملکرد دیوارهای مصالح بنایی در مقابل بارهای جانبی درون صفحه می‌شود. همچنین، حضور بست‌های نواری فولادی بر روی دیوارها، به انسجام دیوار کمک می‌کند. مهم است به یاد داشت که پارامترهای لرزه‌ای که در عملکرد لرزه‌ای دیوارها تأثیر دارند –مانند مقاومت، انعطاف‌پذیری، و سختی– در دیوارهای مصالح بنایی غیرمسلح و تقویت‌شده با بست‌های نواری فولادی، متفاوت است. این مطالعه به بررسی و مقایسه این پارامترها پرداخته است. در پایان، یک مدل پیشنهادی برای دیوارهای مصالح بنایی غیرمسلح ارائه شده است که نتایج مطلوبی را به نشان داده است.

یافته‌های پژوهش

همان‌طور که پیشتر اشاره شد، هدف اصلی این مطالعه، بررسی عملکرد افزایش مقاومت دیوارهای مصالح بنایی با بهره‌گیری از چیدمان‌های متفاوت بست‌های نواری فولادی در دو طرف دیوار با تأکید بر جنبه‌های اقتصادی است. هر یک از این چیدمان‌ها تأثیرات متفاوتی بر مقاومت نهایی و انعطاف‌پذیری دیوارهای بنایی دارند. این تأثیرات با دوخطی‌سازی نمودارهای نیرو–جابه‌جایی نمونه‌ها مقایسه شده‌اند. به‌منظور کاربردی بودن و قابل‌اجرا بودن طرح موردبررسی در مناطق روستایی برای روستائیان و قشر آسیب‌پذیرتر جامعه، این طرح با محوریت اقتصادی موردبررسی قرار گرفته است. ازاین‌رو، در مدل‌سازی برای جلوگیری از هزینه‌های اقتصادی به‌جای استفاده از نوارهای فولادی متعدد جهت مقاوم‌سازی، از جایگذاری مناسب و بهینه به‌منظور مقاوم‌سازی استفاده شده است. این بدین معنا است که به‌جای اضافه نمودن تعداد نوارهای فولادی که امر طبیعی در جهت افزایش مقاومت و عملکرد یکپارچه دیوار بنایی است، با حفظ دو بست نوار فولادی در دو سمت دیوار، فاصله بهینه و مناسب این نوع المان‌ها حاصل شد.

مدل آزمایشگاهی اولیه به‌منظور صحت سنجی مدل

در این تحقیق، مدل آزمایشگاهی پیشنهادی توسط دربهانزی[6] و همکاران (۲۰۱۴) به‌عنوان مرجع برای اعتبارسنجی استفاده شده است. این دیوارهای بنایی با کیفیت مناسب در اجرا و استفاده از مصالح آجر و ملات ساخته شده‌اند و مشخصات مصالح آن‌ها به‌گونه‌ای تنظیم شده است که با شرایط متوسط ساختمان‌های مصالح بنایی همخوانی داشته باشد. بنابراین، نمونه‌ای از دیوار با مشخصات مختلف ابعاد، ضخامت، نسبت بار محوری و مقاومت برشی ملات طراحی شده و جزئیات دیوار مرجع در جدول ۱ ذکر شده است. به دلیل محدودیت‌های موجود در ساخت نمونه و بارگذاری در آزمایشگاه، از مقیاس ابعادی ۱:۲ استفاده شده است.

جدول ۱. مشخصات آزمایشگاهی دیوار مصالح بنایی

نمونه تقویت‌شده	طول (mm)	ضخامت (mm)	ارتفاع (mm)	تنش برشی ملات (MPa)	تنش محوری (MPa)	نمونه مرجع
RMW-1600	۱۹۰۰	۱۱۰	۱۴۰۰	۰/۲	۰/۱	URMW

دیوار بنایی غیرمسلح مرجع، با نام URMW نام‌گذاری شده است. ابعاد دیوار ۱۴۰۰ × ۱۹۰۰ × ۱۱۰ میلی‌متر است که به ترتیب بیانگر ارتفاع × طول × ضخامت است. همچنین یک تیر بتنی در بالا و پایین دیوار ساخته شده است، وجود این تیر اعمال

6. Darbhanzi

[Downloaded from jhre.ir on 2026-11-23]

[DOI: https://doi.org/10.22034/45.193.33]

یکنواخت سربار و نیز امکان اعمال بار جانبی به دیوار است، درواقع این تیر شرایط سقف را شبیه‌سازی می‌کند، و می‌توان با ایجاد ریلی روی آن سقف را صلب در نظر گرفت. همچنین در پای دیوار، تیر می‌تواند شرایط پی را شبیه‌سازی کند.

به‌منظور مقاوم‌سازی دیوارهای بنایی در دو طرف دیوار تقویت‌شده از بست نوار فولادی (عرض ۳۰ میلی‌متر و ضخامت ۳ میلی‌متر) توسط بست‌های افقی (بست نوار فولادی ۳ × ۳۰ × ۱۵۰ میلی‌متر) که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، استفاده شده است. برای مهار نوارها به دیوارها، از میله‌های مهار به قطر ۶ میلی‌متر استفاده شده است. این میله‌ها به فاصله‌های افقی و عمودی به ترتیب ۱۵ و ۲۰ سانتی‌متر از هم قرار داده شده‌اند. برای اجرای دیوار در مکان‌های موردنظر، با استفاده از مته، سوراخ‌هایی ایجاد می‌شود و میله‌های مهار به‌وسیله چسب در این سوراخ‌ها قرار داده می‌شوند. سپس بست‌های نواری در محل خود نصب شده و با استفاده از مهره به‌طور محکم ثابت می‌شوند.

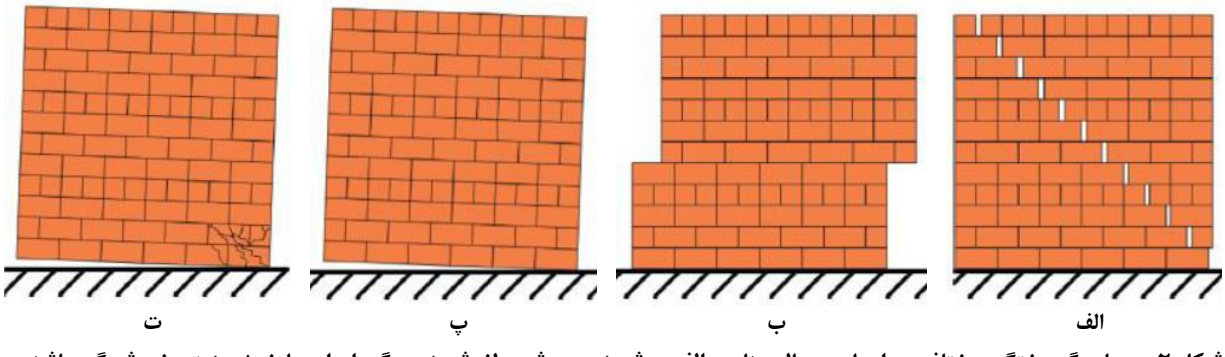


شکل ۱. مشخصات بست نوار فولادی برای مقاوم‌سازی دیوارهای مصالح بنایی(Darbhanzi et al., 2014)

معرفی مدهای گسیختگی دیوارهای مصالح بنایی

دیواره‌های آجری باتوجه‌به رفتار درون صفحه که وابسته به میزان سربار، نسبت ارتفاع به طول دیوار، مقاومت‌های برشی و فشاری و اندازه بازشو است، می‌توانند در رفتار دیوار مصالح بنایی تأثیرات متفاوتی داشته باشد که این مهم در تعیین مد اهمیت ویژه‌ای دارد.

مدهای شکست یک دیوار بنایی به دو دسته شکست درون صفحه و شکست خارج از صفحه تقسیم می‌شوند. آیین‌نامه FEMA356 چهار مد برای شکست درون صفحه در نظر گرفته است که در ادامه به آن‌ها اشاره شده است. این چهار مد عبارت‌اند از: مد برشی، مد برشی–لغزشی، مد گهواره‌ای یا خمشی، و خردشدگی پاشنه (شکل ۲).



شکل ۲. مدهای گسیختگی مختلف دیوارهای مصالح بنایی. الف. برشی؛ ب. برشی-لغزشی؛ پ. گهواره‌ای یا خمشی؛ ت. خردشدگی پاشنه

روش‌های مدل‌سازی دیوار مصالح بنایی

برای مدل‌سازی و صحت سنجی نمونه‌های آزمایشگاهی، از نرم‌افزار تحلیل اجزای محدود ABAQUS استفاده شده است. این نرم‌افزار چندین نوع المان را دارا است، برای هر مدل باید المان متناسب انتخاب کرد تا نتایج حاصل قابل‌اطمینان باشد. برای مدل‌سازی دیوارهای مصالح بنایی، سه رویکرد (۱) مدل‌سازی رویکرد همگن یا ماکرو (درشت بینانه) (۲) رویکرد غیرهمگن یا میکرو (ریز بینانه) (۳) رویکرد مزو (بین مقیاس ماکرو و میکرو است) وجود دارد.

[Downloaded from jhre.ir on 2026-11-23]

[DOI: https://doi.org/10.22034/45.193.33]

لازم به ذکر است رویکرد مزو ازلحاظ سطح دقت و تعداد محاسبات و مدل‌سازی بین تحلیل در مقیاس میکرو و ماکرو قرار دارد. در این روش، ملات عملاً نقشی ندارد و نقش اصلی را المان منشور بنایی (حدفاصل المان بنایی) ایفا می‌کند.

در مطالعه و تحلیل سازه‌های مصالح بنایی، دو نوع تحلیل معمولاً استفاده می‌شود که شامل تحلیل صریح و تحلیل غیرصریح شناخته می‌شوند. برخی محققین از تحلیل غیرصریح برای شبیه‌سازی رفتار دیوارهای بنایی استفاده می‌کنند؛ اگرچه این آنالیزهای اجزای محدود نگرش مناسب و قابل قبولی از رفتار دیوارها از خود نشان می‌دهد، اما به‌شدت زمان آنالیز را بالا می‌برد و برای آنالیزهای پیچیده، عملاً غیرقابل استفاده هستند. ازاین‌رو، برای حل این مشکل از روش مدل‌سازی اجزای محدود صریح استفاده می‌شود. در این پژوهش از روش دینامیکی صریح استفاده شده است.

معرفی مصالح در نرم‌افزار

برای تعریف مصالح دیوار بنایی از بتن آسیب‌دیده پلاستیک استفاده شده است، که برای مصالح ترد و شکننده (همچون بتن) تحت بارگذاری یکنواخت و رفت و برگشتی استفاده می‌شود. این موضوع باتوجه‌به نوع دیوار انتخاب شده و شرایط بارگذاری در این مسئله گزینه مناسبی است. این مدل در هر دو نوع تحلیل استاتیکی و دینامیکی مورداستفاده قرار می‌گیرد.

در این مدل فرض می‌شود که ترک کششی و خردشدگی فشاری دو جنبه اصلی مکانیسم گسیختگی بتن را در برمی‌گیرد. ازاین‌رو، به‌منظور معرفی رفتار کامل منشور بنایی علاوه بر پارامترهای الاستیک، مقدار عددی زاویه اتساع، خروج از مرکزیت و دیگر پارامترهای معرف رفتار منشور بنایی در کشش و فشار نیز باید برای نرم‌افزار به‌صورت مجزا تعریف شود. در این پژوهش به‌منظور مدل‌سازی دیوار مصالح بنایی در نرم‌افزار اجزای محدود ABAQUS رویکرد مزو استفاده شده است که ملات در آن به‌صورت مستقیم مدل‌سازی نشده است؛ بلکه تنها تأثیرات آن (اصطکاک و چسبندگی) در قالب تعریف اندرکنش بین آجرها مدل‌سازی شده است. رفتار اندرکنش بین آجرها دارای دو خاصیت رفتاری هستند که عبارت‌اند از: (۱) چسبندگی در بخش‌های کششی و برشی (۲) اصطکاک در بخش برشی. به‌این‌ترتیب، مقاومت فشاری ملات و تأثیر ترکیبی آن بر روی منشور بنایی به‌صورت جداگانه در نظر گرفته نمی‌شود. برای در نظر گرفتن این تأثیر، باید به‌جای تعریف ویژگی‌های مکانیکی آجرها، ویژگی‌های مکانیکی منشور بنایی تعریف شوند. این نکته در اغلب تحقیقات، خصوصاً پژوهش‌های صورت‌گرفته در داخل کشور، در نظر گرفته نمی‌شود. باتوجه‌به اینکه برای صحت سنجی مدل‌سازی تحلیلی، از نتایج آزمایشگاهی استفاده می‌شود، خواص مصالح در جدول ۲ ذکر شده است.

جدول ۲. خصوصیات مکانیکی مصالح بنایی و بتنی

	مقاومت فشاری	ضریب پواسون	مدول الاستیسیته	چگالی
	(MPa)		(N/mm^2)	(Ton/mm^3)
منشور بنایی	۸/۷	۰/۱۵	۴۷۸۵	۱۸۰۰×۱۰^{-۱۲}
تیر بتنی	–	۰/۳	۲۱۰۰۰	۲۴۰۰×۱۰^{-۱۲}

صحت‌سنجی مدل تحلیلی

در ابتدا به بررسی چگونگی عملکرد رفتار دیوارهای مصالح بنایی غیرمسلح ساخته‌شده در آزمایشگاه تحت بار پوش آور یک‌طرفه پرداخته می‌شود. پس‌ازآن مدل‌سازی در نرم‌افزار و مقایسه نتایج آزمایشگاهی با نتایج نرم‌افزاری در جهت صحت‌سنجی مدل ارائه می‌شود. در این صحت‌سنجی به بررسی نمونه دیوار مصالح بنایی مرجع URMW و نمونه مرجع تقویت‌شده با استفاده از بست نوار فولادی به نام RMW-1600 پرداخته شد (Darbhanzi et al., 2014).

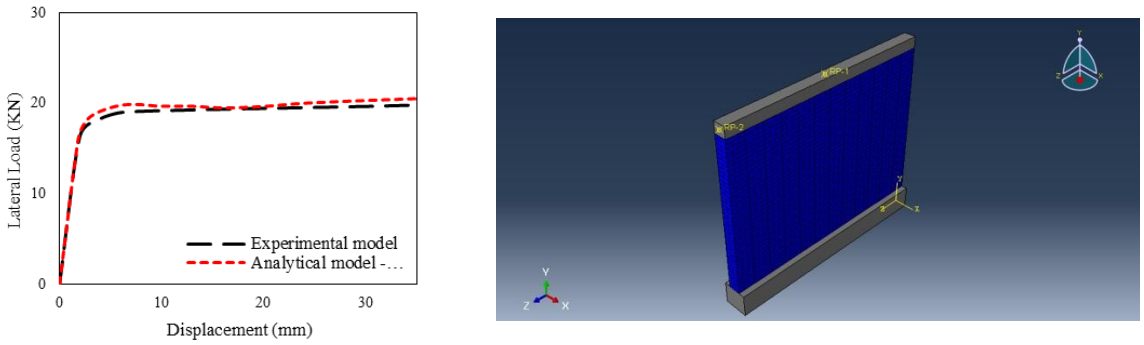
به‌منظور مقایسه نتایج حاصل از کار عددی با نتایج آزمایشگاهی و مدل‌ها در نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس، با تحلیل صریح مدل‌ها آنالیز شده است. نتایج نشان‌دهنده تطابق قابل‌قبولی هستند (شکل ۴). نمونه‌های مصالح بنایی رفتار پیچیده‌ای از قبیل تفاوت در خواص مکانیکی آجر و ملات و همچنین پیچیدگی رفتار برهم‌کنش ملات و آجر، رفتار غیرهمسان و ناهمگن نشان می‌دهند. همچنین رفتار غیرخطی هندسی و فیزیکی آن‌ها، مدل‌سازی عددی این سازه‌ها را بسیار پیچیده می‌کند.

[Downloaded from jhre.ir on 2026-11-23]

[DOI: https://doi.org/10.22034/45.193.33]

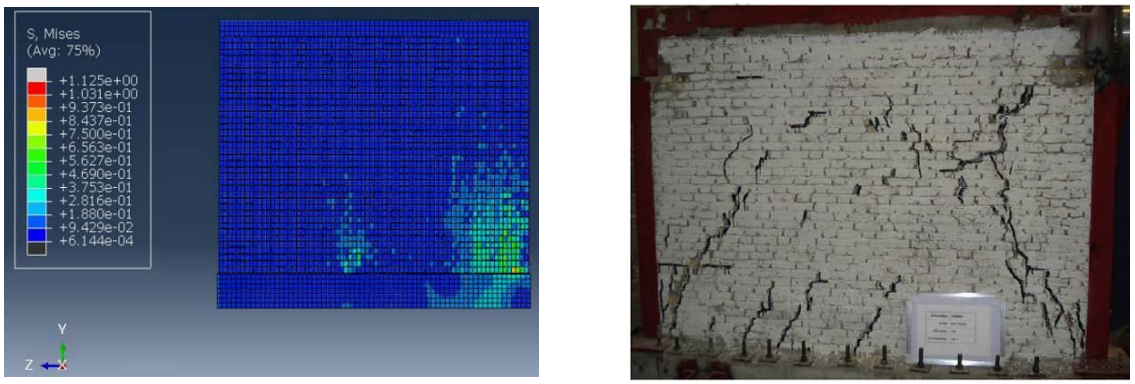
صحت‌سنجی نمونه‌های مدل‌سازی‌شده

در شکل ۴ –الف، نمونه مرجع آزمایشگاهی در URMW در نرم‌افزار ABAQUS مدل‌سازی شده است. در شکل۴–ب، تفاوت زیر سطح نمودار نیرو–جابه‌جایی نمونه URMW آزمایشگاهی به نزدیکی یک درصد مشاهده می‌شود. مقاومت نهایی در نمونه آزمایشگاهی ۱۸ کیلونیوتن، سختی مؤثر ۸/۵ کیلونیوتن بر میلی‌متر و شکل‌پذیری ۱۵ است؛ در نمونه تحلیلی مقاومت نهایی ۱۹ کیلونیوتن، سختی مؤثر ۸/۸ کیلونیوتن بر میلی‌متر و شکل‌پذیری ۱۶/۸ است. درصد اختلاف پارامترهای موردنظر در هر یک به ترتیب برابر با ۵/۵، ۳/۵ و ۱۲ درصد است. همچنین، در شکل ۵–الف، مد گسیختگی حاکم در نمونه مرجع URMW در جابه‌جایی نسبی ۱/۱ درصد مد لغزشی است که در آزمایشگاه مشاهده شده است و در نمونه تحلیلی شکل ۵ –ب، مد گسیختگی نیز همان‌طور لغزشی است.



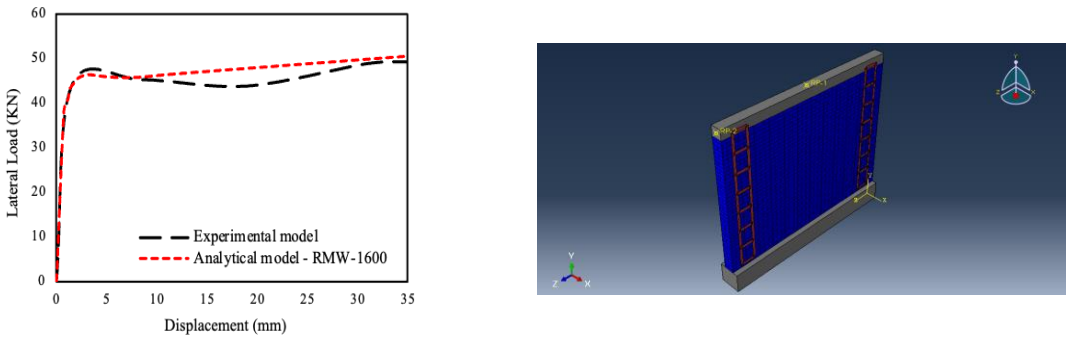
ب الف

شکل ٤. الف. مدل‌سازی نمونه شاهد URMW، ب. نمودار نیرو–جابه جایی نمونه تحلیلی و نمونه شاهد آزمایشگاهی



ب. تنش ون میسز الف. خرابی آزمایشگاهی (Panto et al., 2019)

شکل ۵. خرابی نمونه مرجع آزمایشگاهی و نمونه تحلیلی URMW



ب الف

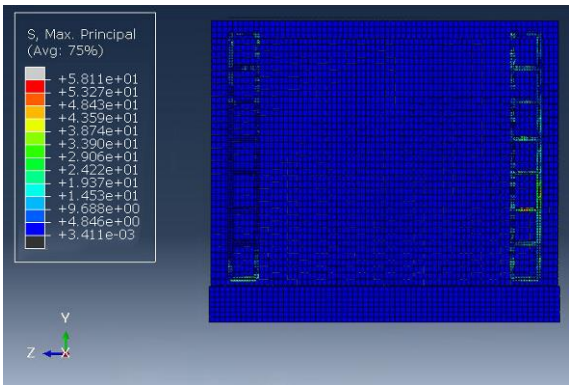
شکل ٦. الف. مدل‌سازی اجزا محدودی نمونه مرجع RMW-1600، ب. نمودار نیرو–جابه‌جایی نمونه تحلیلی و نمونه مرجع آزمایشگاهی

[Downloaded from jhre.ir on 2026-11-23]

[DOI: https://doi.org/10.22034/45.193.33]



الف. خرابی آزمایشگاهی (Darbhanzi et al., 2014)



ب. تنش ون میسز

شکل ۷. خرابی نمونه مرجع آزمایشگاهی و نمونه تحلیلی RMW-1600

در شکل ۶ –الف، نمونه تقویت‌شده آزمایشگاهی RMW-1600 در نرم‌افزار ABAQUS مدل‌سازی شده است. شکل ۶ – ب، نمودار نیرو–جابه‌جایی مدل آزمایشگاهی و تحلیلی را نشان می‌دهد. در نمونه RMW-1600، تفاوت سطح زیر هر نمودار پوش‌آور آزمایشگاهی با نمودار پوش‌آور تحلیلی ۱/۹ درصد است. مقاومت نهایی در نمونه آزمایشگاهی ۴۷ کیلونیوتن، سختی مؤثر ۵۱ کیلونیوتن بر میلی‌متر و شکل‌پذیری ۱۱ است؛ در نمونه تحلیلی مقاومت نهایی ۴۸/۵ کیلونیوتن، سختی مؤثر ۵۲/۵ کیلونیوتن بر میلی‌متر و شکل‌پذیری ۱۰ است. درصد اختلاف پارامترهای موردنظر در هرکدام به ترتیب برابر با ۲/۳ درصد، ۳ درصد و ۹ درصد است. باتوجه‌به شکل ۷–الف، مد گسیختگی حاکم در نمونه مرجع RMW-1600 در جابه‌جایی نسبی ۳/۴ درصد مد چرخشی–لغزشی است. همچنین، در نمونه تحلیلی شکل ۷ –ب، مد گسیختگی چرخشی–لغزشی است. باید توجه داشت که تشکیل ترک‌ها در مدل‌های تحلیلی ارائه‌شده ممکن است با نمونه‌های آزمایشگاهی متفاوت باشد که این به دلیل تفاوت بارگذاری در آزمایشگاه و شبیه‌سازی آن در نرم‌افزار ABAQUS است. در جدول ۳، پارامترهای مقاومت نهایی، سختی مؤثر، شکل‌پذیری و سطح زیر نمودار نیرو–جابه‌جایی نمونه‌های مرجع آزمایشگاهی و نمونه‌هایی که در نرم‌افزار ABAQUS مدل‌سازی و تحلیل شده‌اند، آورده شده است. همچنین، درصد اختلاف هر پارامتر بین نمونه آزمایشگاهی و نمونه تحلیلی محاسبه شده است.

جدول ۳. مقایسه نمونه مرجع آزمایشگاهی و نمونه تحلیلی

نام نمونه	نوع نمونه	مقاومت نهایی	اختلاف	سختی مؤثر	اختلاف	شکل‌پذیری	اختلاف	سطح زیر نمودار	اختلاف
		(KN)	(%)	(KN/mm)	(%)		(%)	(mm^2)	(%)
URMW	آزمایشگاهی	۱۸	۵/۵	۸/۵	۳/۵	۱۵	۱۲	۶۴۵	۰/۷۸
	تحلیلی	۱۹		۸/۸		۱۶/۸		۶۵۰	
URMW-1600	آزمایشگاهی	۴۷	۳/۲	۵۱	۳	۱۱	۹	۱۶۱۶	۱/۹

مدل‌های مقاوم‌سازی شده با بست نوار فولادی

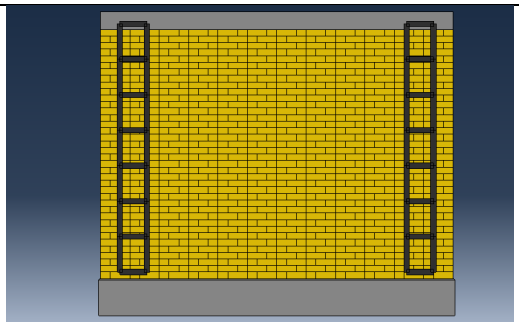
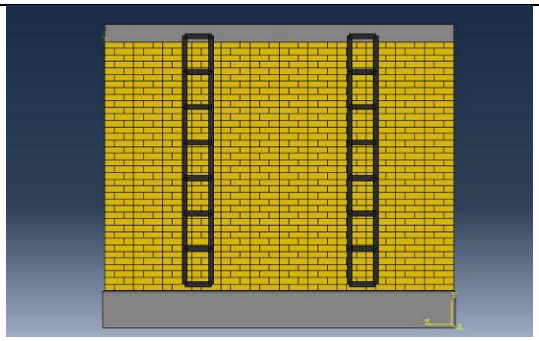
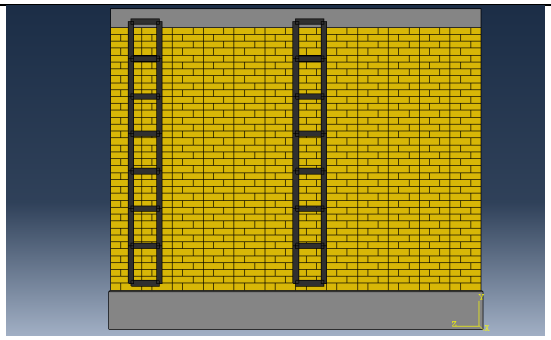
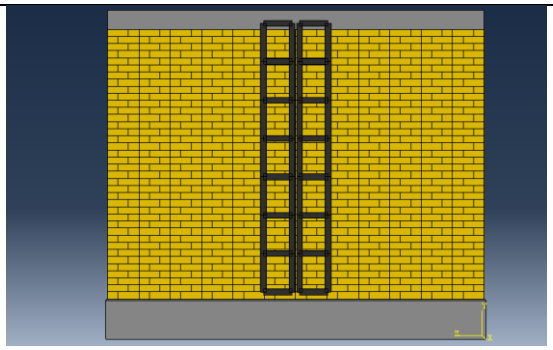
بررسی رفتار دیوارهای بنایی تقویت‌شده با بست نوار فولادی از اهداف اصلی این مطالعه است. مقاوم‌سازی با بست نوار فولادی به علت سهولت در اجرا و عدم نیاز به تمیز کردن سطح دیوار، موجب کاهش در هزینه‌ها می‌شود. از طرف دیگر نیز، نیاز به نیروی متخصص ندارد و همچنین رفتار و درگیری خرابی بتن با آجر باعث تقویت دیوارهای باربر با بست نوار فولادی می‌شود. نمونه‌های مقاوم‌سازی با شمای قرارگیری بست نوار فولادی و نام‌گذاری نمونه‌ها در جدول ۴ نشان داده شده است. در این نمونه‌ها با بست نوار فولادی به‌صورت دو طرف دیوار قرار گرفته است. نمونه‌های تحلیلی بر اساس نام‌گذاری و نحوه مدل‌سازی جدول ۴، در نرم‌افزار اجزای محدود ABAQUS مدل‌سازی شدند. اعداد درج‌شده پس از عبارت RMW به معنای میزان فاصله آکس به آکس بست‌ها از یکدیگر است و عبارت 1D در نمونه RMW-1D نشان‌دهنده یک بست قرار دادن در دیوار است. در

[Downloaded from jhre.ir on 2026-11-23]

[DOI: https://doi.org/10.22034/45.193.33]

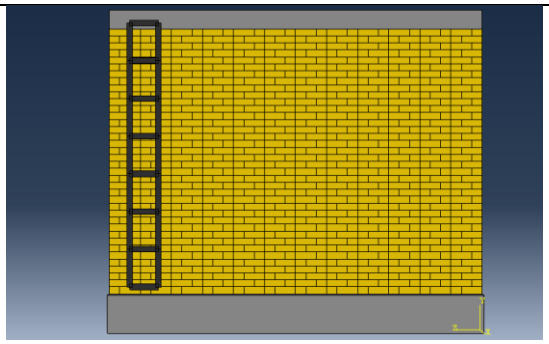
شکل ۸، تمام نمودارهای مرتبط با نمونه‌های مقاوم‌سازی‌شده با بست نوار فولادی در روی دیوار RMW-1600 نشان داده شده، که تغییرات و آثار بست نوار فولادی بر روی دیوار مصالح بنایی قابل‌مشاهده است.

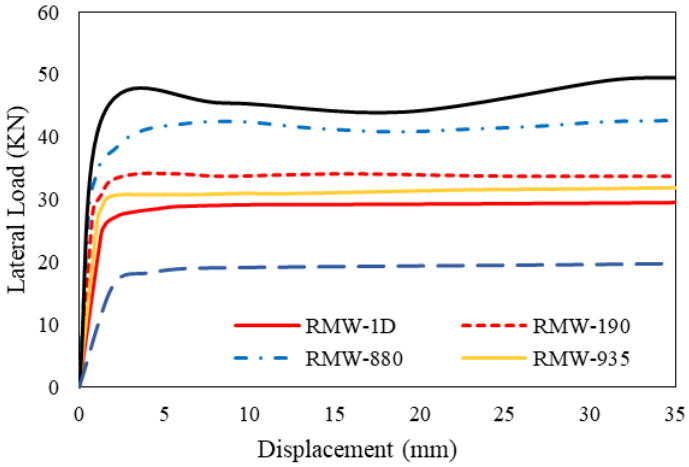
جدول ٤. نام‌گذاری و شکل نمونه‌های مقاوم‌سازی شده با بست نوار فولادی

نام نمونه	شمای قرارگیری بست نوار فولادی
RMW-1600	
RMW-935	
RMW-880	
RMW-190	

[Downloaded from jhre.ir on 2026-11-23]

[DOI: https://doi.org/10.22034/45.193.33]

	RMW-1D

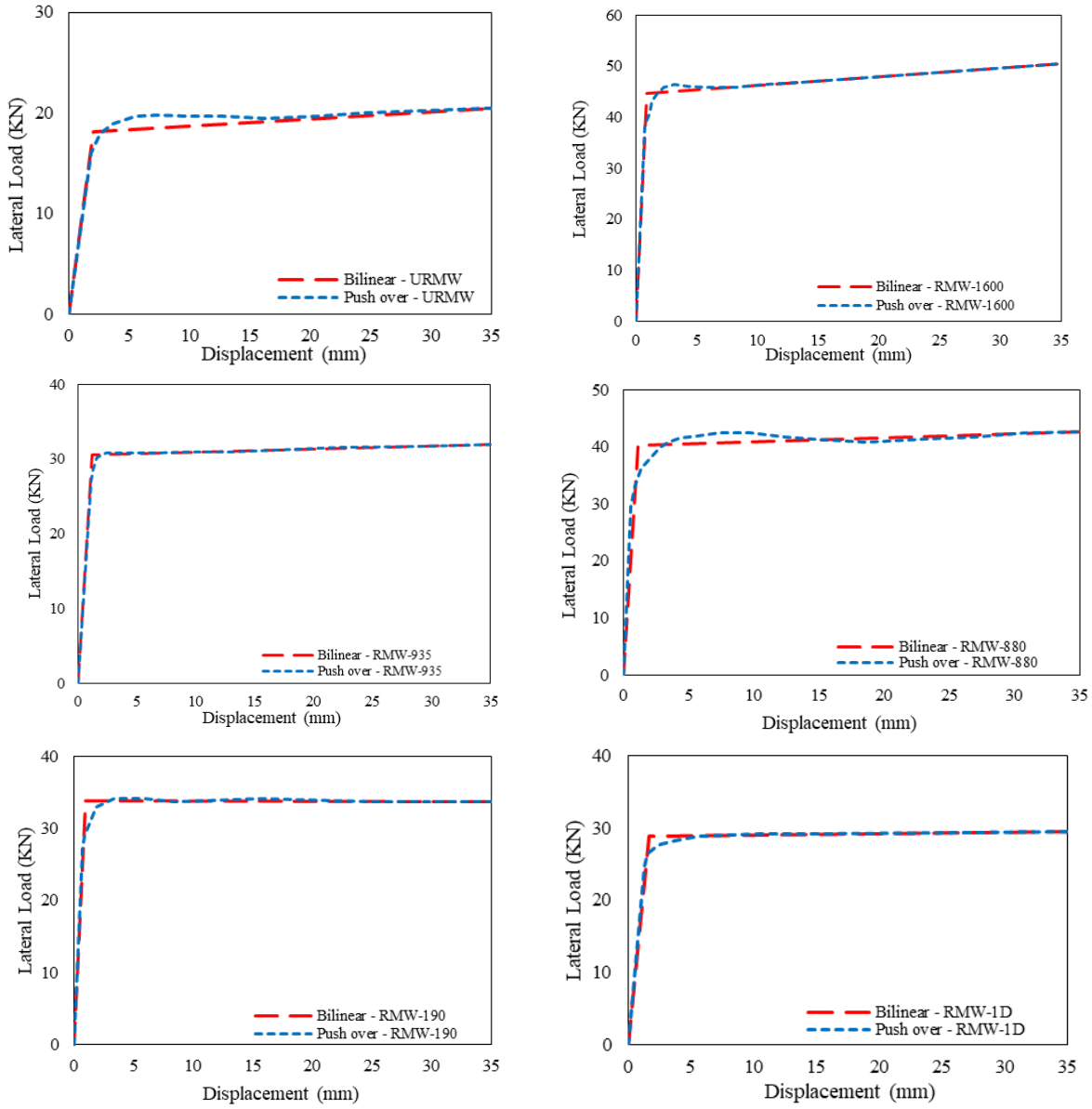


شکل ۸. نمودار نیرو–جابه جایی نمونه‌های مقاوم‌سازی‌شده

برای دوخطی کردن نمودارهای نیرو–جابه‌جایی از روشی که FEMA356 برای سازه‌های بنایی پیشنهاد داده، استفاده شد. در شکل ۹ تمام نمودارهای دوخطی رسم‌شده برای تمام حالت‌های مختلف بست نوار فولادی نشان داده شده است. برای جلوگیری از هزینه‌های اقتصادی به‌جای استفاده از نوارهای فولادی متعدد جهت مقاوم‌سازی، از جایگذاری مناسب و بهینه به‌منظور مقاوم‌سازی استفاده شده است. این بدین معنا است که به‌جای اضافه نمودن تعداد نوارهای فولادی که امر طبیعی در جهت افزایش مقاومت و عملکرد یکپارچه دیوار بنایی است، با حفظ دو بست نوار فولادی در دو سمت دیوار، فاصله بهینه و مناسب این نوع المان‌ها را دریافتیم. از مهم‌ترین آثاری که بر بهبود عملکرد لرزه‌ای دیوار بنایی، می‌توان به این مورداشاره نمود: که در نمونه RMW-1600در دیوارهای مصالح بنایی، افزایش مقاومت به میزان ۱۵۵ درصد نسبت به دیوار تقویت نشده است. این میزان در دیوار RMW-935، RMW-880، RMW-190 و RMW-1D به ترتیب ۱۲۴، ۶۶، ۷۹ و ۵۲ درصد است. نتایج صراحتاً نشان می‌دهد حضور بست فولادی در حالت‌های مختلف و در فواصل گوناگون به‌شدت بر ظرفیت دیوار تأثیر می‌گذارد. حتی این موضوع با ارائه یک بست در دیوار نیز (همانند نمونه RMW-1D) مقاومت دیوار را تا بیش از۵۰ درصد افزایش می‌دهد. نکته جالب‌توجه این است که، RMW-190 که کمترین فاصله آکس به آکس بست‌ها را دارد به علت اندرکنش تشدیدیافته به جهت نزدیک بودن بست‌ها به یکدیگر، عملکرد بهتری از نمونه RMW-880 از خود نشان داد.

[Downloaded from jhre.ir on 2026-11-23]

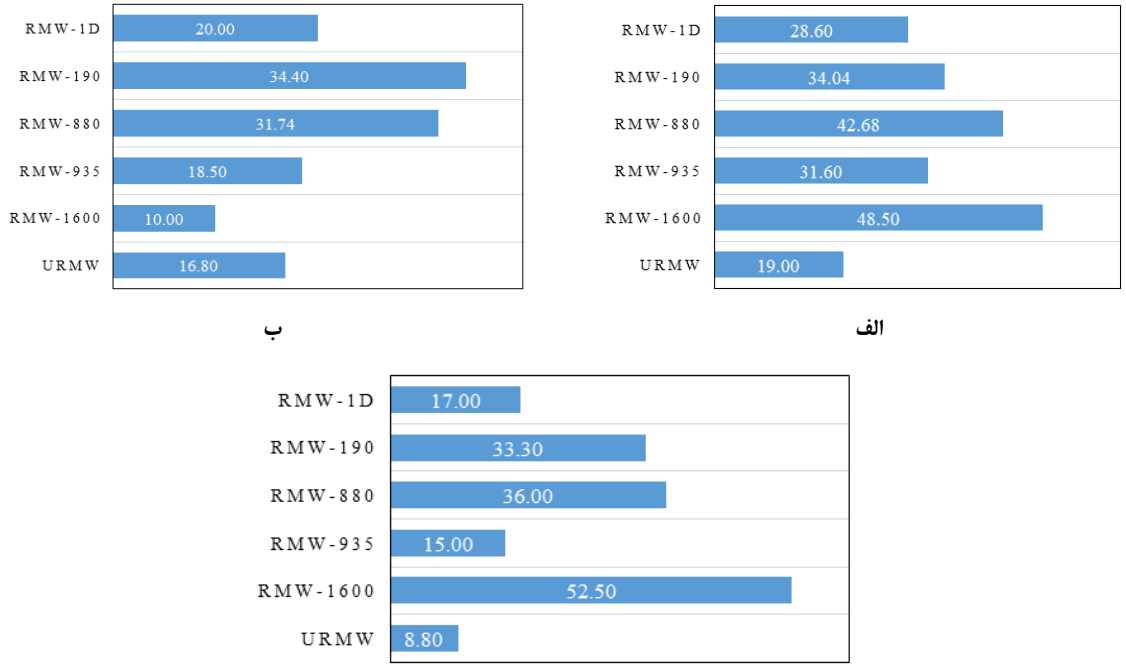
[DOI: https://doi.org/10.22034/45.193.33]



شکل ۹. نمودار دوخطی نمونه‌های تحلیلی تقویت‌شده

با مقاوم کردن دیوار مصالح بنایی با استفاده از بست نوارهای فولادی به دلیل محبوس شدن دیوارها در داخل بست نوارهای فولادی شکست برشی ترد و ناگهانی نبوده است و از وقوع شکست زودهنگام جلوگیری به عمل می‌آید. در شکل ۱۰ به ترتیب مقاومت نهایی، شکل‌پذیری و سختی مؤثر نشان برای تمام نمونه‌ها به‌صورت گراف نمایش داده شده است.

[Downloaded from jhre.ir on 2026-11-23]
[DOI: https://doi.org/10.22034/45.193.33]



شکل ۱۰. نمودار مقایسه (الف) مقاومت نهایی (ب) شکل‌پذیری و (ج) سختی مؤثر نمونه‌های موردبررسی

نتیجه‌گیری

باتوجه‌به خطرات لرزه‌ای در کشور و وجود ساختمان‌های مصالح بنایی، مقاوم‌سازی و بهسازی از بهترین راهکارها برای جلوگیری از خسارات مالی و جانی است. در این مطالعه، برای بهسازی دیوارهای بنایی غیرمسلح با نسبت ارتفاع به طول ۰/۷، از روش مقاوم‌سازی با استفاده از بست نوار فولادی در دو طرف دیوار استفاده شده است. با استفاده از بست نوار فولادی، انجام تحلیل‌های مختلف با فواصل مختلف بست‌های فولادی و شبکه در دو طرف دیوار غیرمسلح انجام شده است. هرکدام از این چیدمان‌ها تأثیرات متفاوتی بر مقاومت نهایی و شکل‌پذیری دیوار بنایی دارند و با ترسیم نمودارهای نیرو–جابه‌جایی و مقایسه آن‌ها، این تأثیرات با یکدیگر مورد مقایسه قرار گرفته‌اند.

ازاین‌رو مهم‌ترین آثاری که بست نوار فولادی بر بهبود عملکرد لرزه‌ای دیوار بنایی دارد، می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

۱. در مدل‌سازی برای جلوگیری از هزینه‌های اقتصادی به‌جای استفاده از نوارهای فولادی متعدد جهت مقاوم‌سازی، از جایگذاری مناسب و بهینه به‌منظور مقاوم‌سازی استفاده شده است.

۲. از مهم‌ترین آثاری که بر بهبود عملکرد لرزه‌ای دیوار بنایی، می‌توان به این مورداشاره نمود: که در نمونه RMW-1600 در دیوارهای مصالح بنایی، افزایش مقاومت به میزان ۱۵۵ درصد نسبت به دیوار تقویت نشده است. این میزان در دیوار RMW-935، RMW-880، RMW-190 و RMW-1D به ترتیب ۱۲۴، ۶۶، ۷۹ و ۵۲ درصد است.

۳. نتایج صراحتاً نشان می‌دهد حضور بست فولادی در حالت‌های مختلف و در فواصل گوناگون به‌شدت بر ظرفیت دیوار تأثیر می‌گذارد. حتی این موضوع با ارائه یک بست در دیوار نیز (همانند نمونه RMW-1D) مقاومت دیوار را تا بیش از ۵۰ درصد افزایش می‌دهد.

۴. نتایج نشان داد، نمونه RMW-190 که کمترین فاصله آکس به آکس بست‌ها را دارد به علت اندرکنش تشدید یافته ناشی از نزدیک بودن بست‌ها به یکدیگر، عملکرد بهتری از نمونه RMW-880 از خود نشان داد.

[Downloaded from jhre.ir on 2026-11-23]

[DOI: https://doi.org/10.22034/45.193.33]

References

Abrams D, Smith T, Lynch J, Franklin S. (2007). Effectiveness of rehabilitation on seismic behavior of masonry piers. *Journal of Structural Engineering*. 2007; 133:32-43.

Borah B, Singhal V, Kaushik HB. (2019). Sustainable housing using confined masonry buildings. *SN Applied Sciences*. 2019; 1:983.

Borri A, Castori G, Grazini A. (2009) Retrofitting of masonry building with reinforced masonry ring-beam. *Construction and Building Materials*. 2009; 23:1892-901.

Borri A, Corradi M, Castori G, Molinari A. (2019) Stainless steel strip–A proposed shear reinforcement for masonry wall panels. *Construction and Building Materials*. 2019; 211:594-604.

Darbhanzi, A., Marefat, M., Khanmohammadi, M. (2014). Investigation of in-plane seismic retrofit of unreinforced masonry walls by means of vertical steel ties. *Construction and Building Materials*. 2014; 52:122-9.

Deng, M., Dong, Z., Ma, P. (2019). Cyclic loading tests of flexural-failure dominant URM walls strengthened with engineered cementitious composite. *Engineering Structures*. 2019; 194:173-82.

Doran, B., Yuzer, N., Aktan, S., Oktay, D., Ulukaya, S. (2019). Numerical modeling of traditional masonry walls strengthened with grout injection. *International Journal of Architectural Heritage*. 2019.

ElGawady, M., Lestuzzi, P., Badoux, M. (2006). Retrofitting of masonry walls using shotcrete. 2006 NZSEE Conference, Paper2006.

Lourenco, PJBB. (1997). Computational strategies for masonry structures.

Panto, B., Silva, L, Vasconcelos, G., Lourenço, PB. (2019). Macro-modelling approach for assessment of out-of-plane behavior of brick masonry infill walls. *Engineering Structures*. 2019; 181:529-49.

Parghi, A., Alam, MS. (2018). A review on the application of sprayed-FRP composites for strengthening of concrete and masonry structures in the construction sector. *Composite Structures*. 2018; 187:518-34.

Ranjbar M, Sadri Nejad I, Mousavi S Y, Mousavi S Y.(2008). Investigation of Retrofitting Methods for Unreinforced Masonry (URM) Buildings. 3rd National and 1st International Conference on Retrofitting and Strengthening. (In Persian)

Sadek, H., Lissel, S. (2013). Seismic performance of masonry walls with GFRP and Geogrid Bed joint reinforcement. *Construction and Building Materials*. 2013; 41:977-89.

Schuller, M., Atkinson, R.H., Borgsmiller, J. (1994). Injection grouting for repair and retrofit of unreinforced masonry. Proceedings of the 10th International Brick and Block Masonry Conference1994.

Sheppard, P., Tercelj, S. (1980). The effect of repair and strengthening methods for masonry walls. 7th world conference on earthquake engineering1980. p. 255-62.

Turco, V., Secondin, S., Morbin, A., Valluzzi, M., Modena, C. (2006). Flexural and shear strengthening of un-reinforced masonry with FRP bars. *Composites Science and Technology*. 2006; 66:289-96.

DOI: https://doi.org/10.22034/45.193.33

[Downloaded from jhre.ir on 2026-11-23]

[DOI: https://doi.org/10.22034/45.193.33]