

Seismic Performance Assessment of Rural Masonry Walls Strengthened with Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) Using Finite Element Modeling

Meghdad Samaei¹ , Ebrahim Fekri² , Reihaneh Sadat Hajmirsadeghi³ ,
Seyyed Mohammad Mahdi Ghafoori⁴

1. Corresponding Author Department of Civil Engineering, Mahallat Institute of Higher Education, Mahallat, Iran. Email: m.samaei@mahallat.ac.ir
2. Department of Civil Engineering, Islamic Azad University, Shahriar Branch, Shahriar, Iran. Email: aran.sazeh.eng@gmail.com
3. Department of architecture, Shahr.C., Islamic Azad University, Shahriar, Iran. Email: rs.hajmirsadeghi@iau.ac.ir
4. Department of Civil Engineering, Mahallat Institute of Higher Education, Mahallat, Iran. Email: ghafoori@mahallat.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:

Received

2025-09-20

Received in revised form

2025-11-24

Accepted

2025-12-13

Available online

2025-12-23

Keywords:

GFRP strengthening,
Masonry walls,
Finite element modeling,
In-plane seismic behavior,
Concrete Damage Plasticity
(CDP)

ABSTRACT

Unreinforced masonry walls are widely used in rural buildings across Iran and are highly vulnerable to seismic actions due to poor material quality and lack of confinement. Strengthening these walls using glass-fiber-reinforced polymer (GFRP) has recently gained attention as a practical and cost-effective retrofit technique. This study investigates the in-plane seismic behavior of clay brick and concrete block masonry walls, both unstrengthened and strengthened with GFRP, through nonlinear finite-element modeling in ABAQUS. Masonry behavior was simulated using the Concrete Damage Plasticity (CDP) model, and four numerical models were analyzed under nonlinear static and displacement-controlled cyclic loading. The numerical framework was validated against experimental results reported by Chen and Liu (2015).

The results indicate that GFRP strengthening primarily enhances lateral load capacity and energy dissipation, while its influence on the initial stiffness is comparatively limited. Strengthened walls exhibited delayed diagonal cracking, more stable post-peak response, and reduced displacement amplitudes in cyclic loading. Although concrete block walls demonstrated slightly higher stiffness than clay brick walls, the relative efficiency of GFRP strengthening was similar in both materials. Overall, the findings indicate that GFRP is an effective and feasible method for enhancing the seismic performance of rural masonry construction.

Cite this article: Samaei, Meghdad., Fekri, Ebrahim., HajmirSadeghi, Reihaneh Sadat., & Ghafoori, Seyyed Mohammad Mahdi. (2025). Seismic Performance Assessment of Rural Masonry Walls Strengthened with Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) Using Finite Element Modeling. *Advanced Modeling in Civil Engineering*, 2(2), 88-100.

DOI: 10.22126/amcen.2025.13324.1062



© The Author(s).

DOI: 10.22126/amcen.2025.13324.1062

Publisher: Razi University

Introduction

Masonry buildings in rural regions of Iran are among the most vulnerable structural systems due to low-quality materials, insufficient confinement, and the absence of engineered construction practices. Past earthquakes, including the 2017 Sarpol-e Zahab event, have demonstrated the extremely brittle behavior of unreinforced masonry walls, which typically fail through diagonal cracking and sudden loss of lateral resistance. Strengthening these walls using glass-fiber-reinforced polymer (GFRP) has gained considerable attention as a lightweight, cost-effective, and easily applicable technique suitable for rural construction. Despite numerous studies on FRP retrofitting, limited research has compared the seismic performance of clay brick and concrete block walls—two common rural masonry materials—within a unified numerical framework. This study addresses this gap through a comprehensive finite-element evaluation of both masonry types in unstrengthened and GFRP-strengthened configurations.

Method

A detailed nonlinear finite-element model was developed in ABAQUS to simulate the in-plane seismic response of masonry walls. The Concrete Damage Plasticity (CDP) model was employed to capture cracking, crushing, stiffness degradation, and cyclic behavior of masonry. Four models were constructed: unstrengthened and strengthened versions of clay brick and concrete block walls. GFRP was modeled as a linear elastic layer fully bonded to the wall using a surface-based Tie constraint, while frictional contact with penalty formulation represented the unit–mortar interaction. Both nonlinear static (pushover) analysis and displacement-controlled cyclic loading using the Explicit dynamic procedure were conducted. The numerical model was validated against experimental results by Chen and Liu (2015), confirming its capability to realistically simulate force–displacement behavior, cracking patterns, and ultimate strength.

Results

The analyses revealed that GFRP strengthening significantly enhances the lateral load capacity, initial stiffness, and energy dissipation of both masonry types. Strengthened walls exhibited delayed diagonal cracking, more stable post-peak response, and reduced displacement amplitudes in cyclic loading. While concrete block walls generally showed higher stiffness and smaller maximum displacements than clay brick walls, the relative efficiency of GFRP strengthening was comparable for both materials. Stress contours confirmed that GFRP distributed tensile stresses more uniformly across the wall surface, reducing stress concentrations and improving overall seismic stability.

Conclusions

The study demonstrates that GFRP is an effective and practical solution for improving the seismic performance of rural masonry walls. The finite-element model showed strong agreement with experimental data, indicating that the adopted modeling strategy is suitable for predictive assessment of FRP-strengthened masonry. Despite numerical

simplifications—such as assuming perfect bond and not explicitly modeling adhesive damage—the findings support the applicability of GFRP as a retrofit technique for vulnerable rural structures. Future work should incorporate experimental validation, bond–slip modeling, and full-scale testing to refine design guidelines and enhance the accuracy of numerical predictions.

Author Contributions

author participated in writing and revising the article.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.



تحلیل رفتار لرزه‌ای دیوارهای بنایی روستایی تقویت شده با الیاف شیشه با استفاده از مدل سازی اجزای محدود

مقداد سمائی^۱، ابراهیم فکری^۲، ریحانه سادات حاج میرصادقی^۳، سید محمد مهدی غفوری^۴

۱. نویسنده مسئول گروه مهندسی عمران، موسسه آموزش عالی محلات، محلات، ایران. رایانامه: m.samaci@mahallat.ac.ir

۲. گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد شهریار، شهریار، ایران. رایانامه: aran.sazeh.eng@gmail.com

۳. گروه معماری، واحد شهریار، دانشگاه آزاد اسلامی، شهریار، ایران. رایانامه: rs.hajmirsadeghi@iau.ac.ir

۴. گروه مهندسی عمران، موسسه آموزش عالی محلات، محلات، ایران. رایانامه: ghafoori@mahallat.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۲۹	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۹/۰۳	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۲۲	
تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۱۰/۰۲	
کلیدواژه‌ها: تقویت با الیاف شیشه، دیوارهای بنایی، مدل سازی اجزای محدود، رفتار لرزه‌ای درون صفحه‌ای، مدل پلاستیک-خسارت بتن	دیوارهای بنایی بدون تقویت یکی از رایج ترین عناصر سازه‌ای در ساختمان‌های روستایی ایران هستند که به دلیل کیفیت پایین مصالح، نبود کلاف بندی و ضعف در جزئیات اجرایی، آسیب پذیری لرزه‌ای بالایی دارند. تقویت این دیوارها با ورق های الیاف شیشه به عنوان روشی سبک، مقرون به صرفه و قابل اجرا در مناطق کم برخوردار در سال های اخیر مورد توجه قرار گرفته است. در این پژوهش، رفتار درون صفحه‌ای دیوارهای بنایی سفالی و سیمانی، در دو حالت بدون تقویت و تقویت شده با الیاف شیشه، با استفاده از مدلسازی غیرخطی در نرم افزار آباکوس بررسی شد. برای شبیه سازی رفتار مصالح، از مدل پلاستیک-خسارت بتن استفاده گردید و چهار مدل عددی تحت تحلیل استاتیکی غیرخطی و بارگذاری چرخه‌ای کنترل شده مورد ارزیابی قرار گرفتند. تطابق مناسب نتایج مدل عددی با داده‌های آزمایشگاهی گزارش شده در ادبیات، اعتبار مدل را تأیید می کند. نتایج نشان می دهد که تقویت با الیاف شیشه عمده‌تاً موجب افزایش ظرفیت باربری و انرژی جذب شده در هر دو نوع دیوار می شود، در حالی که اثر آن بر سختی اولیه محدودتر است. همچنین، مطابق منحنی های نیرو-تغییر مکان، اختلاف سختی اولیه بین دیوارهای سفالی و سیمانی در حالت بدون تقویت ناچیز بوده و در برخی موارد سختی اولیه دیوار سفالی اندکی بیشتر مشاهده می شود. این یافته ها نشان می دهد که استفاده از الیاف شیشه راهکاری مؤثر و عملی برای بهسازی لرزه‌ای ساختمان های بنایی روستایی است.

استناد: سمائی، مقداد؛ فکری، ابراهیم؛ حاج میرصادقی، ریحانه سادات؛ غفوری، سید محمد مهدی. (۱۴۰۴). تحلیل رفتار لرزه‌ای دیوارهای بنایی روستایی تقویت شده با الیاف شیشه با استفاده از مدل سازی اجزای محدود. *مجله مدل سازی پیشرفته در مهندسی عمران*، ۲(۲)، ۸۸-۱۰۰.

DOI: 10.22126/amcen.2025.13324.1062



۱. مقدمه

بخش قابل توجهی از ساختمان‌های موجود در مناطق روستایی ایران از دیوارهای مصالح بنایی تشکیل شده‌اند که عموماً بدون طراحی مهندسی و با مصالح کم‌دوام ساخته می‌شوند. مطابق استاندارد ملی ایران ۲۸۰۰ در طراحی لرزه‌ای ساختمان‌ها [۱]، ضعف‌هایی همچون نبود کلاف‌های افقی و قائم، کیفیت پایین ملات و اتصال ناکافی بین اجزا، از عوامل اصلی آسیب‌پذیری این سازه‌ها در برابر بارهای لرزه‌ای هستند. گزارش‌های میدانی زلزله‌های اخیر کشور—از جمله زلزله سرپل‌ذهاب—نیز نشان می‌دهند که عملکرد نامطلوب دیوارهای بنایی، نقش تعیین‌کننده‌ای در فروریزش ساختمان‌های روستایی داشته است [۲].

رفتار ترد و شکننده دیوارهای بنایی تحت بارهای جانبی، موجب ایجاد ترک‌های قطری، خردشدگی موضعی و کاهش سریع مقاومت می‌شود [۳]. در سال‌های اخیر، استفاده از پلیمر تقویت‌شده با الیاف^۱ به‌عنوان روشی مؤثر برای بهسازی لرزه‌ای دیوارهای بنایی مورد توجه قرار گرفته است [۴، ۵]. این مصالح به دلیل وزن کم، مقاومت بالا، دوام مناسب و سادگی اجرا، به‌ویژه در مناطق کم‌برخوردار، گزینه‌ای مطلوب محسوب می‌شوند. مطالعات آزمایشگاهی و عددی نیز نشان می‌دهند که استفاده از پلیمر تقویت‌شده با الیاف شیشه^۲ (از این پس به اختصار الیاف شیشه) می‌تواند موجب افزایش سختی اولیه، ارتقای مقاومت برشی، کنترل گسترش ترک‌ها و افزایش ظرفیت اتلاف انرژی شود [۶-۸].

از سوی دیگر، ماهیت ناهمگن مصالح بنایی و رفتار غیرخطی پیچیده آن‌ها ایجاب می‌کند که مدل‌سازی عددی با استفاده از روش‌های پیشرفته اجزای محدود انجام گیرد [۹]. نرم‌افزار آباکوس^۳ به‌عنوان یکی از ابزارهای معتبر در تحلیل رفتار غیرخطی سازه‌های بنایی شناخته می‌شود [۱۰]. مدل پلاستیک-خسارت بتن، که توسط لی و فنوس^۴ ارائه شده است [۱۱]، قادر به شبیه‌سازی رفتار کششی-فشاری، ترک‌خوردگی و خردشدگی مصالح بوده و در مطالعات متعدد به‌ویژه در مدل‌سازی دیوارهای بنایی مورد استفاده قرار گرفته است [۱۲، ۱۳].

با وجود پیشرفت‌های قابل توجه در حوزه مقاوم‌سازی بناهای بنایی با استفاده از پلیمر تقویت‌شده با الیاف، پژوهش‌های اندکی به مقایسه سیستماتیک عملکرد لرزه‌ای دیوارهای سفالی و سیمانی—که دو مصالح رایج در ساخت‌وساز روستایی ایران هستند—در دو حالت تقویت‌شده و بدون تقویت پرداخته‌اند. همچنین تعداد محدودی از مطالعات، رفتار این دیوارها را تحت ترکیب تحلیل استاتیکی غیرخطی و تحلیل دینامیکی صریح^۵ در آباکوس بررسی کرده‌اند [۱۳، ۱۴]. پژوهش حاضر با هدف پرکردن این خلأ، به ارزیابی عددی رفتار لرزه‌ای دیوارهای بنایی سفالی و سیمانی با و بدون تقویت با الیاف شیشه می‌پردازد.

۲. پیشینه پژوهش

رفتار لرزه‌ای دیوارهای بنایی و روش‌های مقاوم‌سازی آن‌ها طی دو دهه گذشته موضوع پژوهش‌های گسترده‌ای بوده است. مطالعات اولیه عمدتاً بر مدل‌سازی عددی رفتار غیرخطی مصالح بنایی تمرکز داشته‌اند. لورنسو^۶ [۹] یکی از نخستین چارچوب‌های جامع برای تحلیل سازه‌های بنایی را ارائه کرد و پیچیدگی‌های ناشی از رفتار کششی-فشاری غیرخطی، وجود درزهای ملات و ناهمگنی مصالح را تشریح نمود. توسعه مدل‌های پلاستیک-خسارت بتن، از جمله مدل لی و فنوس [۱۱]، امکان تحلیل واقع‌بینانه‌تر رفتار این سازه‌ها تحت بارهای چرخه‌ای را فراهم ساخته است. این مدل در بسیاری از پژوهش‌های مرتبط با مدل‌سازی غیرخطی دیوارهای بنایی مورد استفاده قرار گرفته است [۱۲، ۱۳].

در حوزه مدل‌سازی رفتار درون‌صفحه‌ای دیوارهای میانقاب و دیوارهای باربر، مطالعات مهمی توسط استاوریدیس و شینگ^۷ [۳] و همچنین چن و لیو^۸ [۱۳] انجام شده است. این پژوهش‌ها با استفاده از تحلیل اجزای محدود، الگوهای ترک‌خوردگی، نقش بازشوها و مکانیسم‌های شکست را بررسی کرده‌اند. آستریس^۹ و همکاران [۱۲] نیز یک مرور جامع از روش‌های مدل‌سازی میانقاب‌ها ارائه کرده‌اند که نشان می‌دهد مدل‌های ماکرو-میکرو

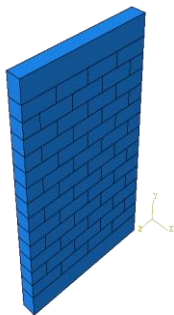
^۵ Explicit^۶ Lourenço, P.B^۷ Stavridis, A. & Shing, P.B.^۸ Chen, X. & Liu, Y.^۹ Asteris, P.G.^۱ FRP^۲ GFRP^۳ ABAQUS^۴ Lee, J. & Fenves, G.L.

دیوارهای بنایی به‌خوبی مورد بررسی قرار گرفته است، اما مقایسه هم‌زمان رفتار لرزه‌ای دیوارهای سفالی و سیمانی در حالت‌های تقویت‌شده و بدون تقویت، در قالب یک مدل عددی یکپارچه و تحت ترکیب تحلیل استاتیکی غیرخطی و تحلیل دینامیکی صریح در نرم‌افزار آباکوس، هنوز به‌طور محدود مورد توجه قرار گرفته است. پژوهش حاضر در جهت پرکردن این خلأ، به ارائه یک مقایسه نظام‌مند از عملکرد لرزه‌ای این دو نوع دیوار می‌پردازد.

۳. روش‌شناسی پژوهش

در این پژوهش، رفتار لرزه‌ای دیوارهای بنایی روستایی با دو نوع مصالح آجر سفالی و بلوک سیمانی، در دو حالت بدون تقویت و تقویت‌شده با الیاف شیشه، با استفاده از مدل‌سازی اجزاء محدود در نرم‌افزار آباکوس مورد بررسی قرار گرفت. هندسه اصلی دیوار شامل طول ۲ متر، ارتفاع ۳٫۲ متر و ضخامت ۲۵ سانتی‌متر است. یک کلاف بتنی در بالا و پایین دیوار با ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد تا شرایط ساخت‌وساز واقعی در ساختمان‌های روستایی شبیه‌سازی شود. شکل ۱ نمایی از هندسه و ابعاد مدل دیوار را نشان می‌دهد.

با توجه به نبود داده‌های آزمایشگاهی مستقیم برای مقاومت کششی مصالح بنایی مورد استفاده، این مقادیر بر اساس دامنه گزارش‌شده در ادبیات فنی و به‌صورت محافظه‌کارانه انتخاب شده‌اند تا رفتار ترد مصالح بنایی به‌درستی بازنمایی شود. خواص مکانیکی مصالح مورد استفاده شامل مدول الاستیسیته، مقاومت فشاری، چگالی و مقاومت کششی در جدول ۱ ارائه شده است. نمونه‌های آجر سفالی و بلوک سیمانی نماینده مصالح متداول در ساخت‌وساز روستایی هستند.



شکل ۱. هندسه مدل دیوار بنایی

ترکیبی می‌توانند رفتار دیوارهای بنایی را با دقت مناسبی توصیف کنند.

هم‌زمان با پیشرفت روش‌های مدل‌سازی، تحقیقات گسترده‌ای درباره تقویت دیوارهای بنایی با استفاده از پلیمر تقویت‌شده با الیاف انجام شده است. تریانتافیلو^{۱۰} [۴] از نخستین پژوهشگران این حوزه بود که نشان داد استفاده از پلیمر تقویت‌شده با الیاف می‌تواند ظرفیت برشی و سختی دیوارهای بنایی را به‌طور چشمگیری افزایش دهد. مطالعات میدانی و آزمایشگاهی پس از زلزله آمریکا-مارک نیز اثربخشی این روش‌های تقویتی را تأیید کرده‌اند [۸].

در سال‌های اخیر، توجه ویژه‌ای به استفاده از الیاف شیشه در تقویت دیوارهای بنایی معطوف شده است. کنعانی‌کاشانی و همکاران [۵] نشان دادند که استفاده از میلگردهای الیاف شیشه پیش‌تنیده نصب‌شده در نزدیکی سطح، موجب افزایش قابل‌توجه ظرفیت چرخه‌ای و انرژی جذب‌شده دیوارهای بنایی می‌شود. همچنین المسلم و السلوم^{۱۱} [۱۴] رفتار درون‌صفحه‌ای دیوارهای بنایی تقویت‌شده با الیاف پلیمری را تحت بارگذاری لرزه‌ای بررسی کرده و بهبود مقاومت و شکل‌پذیری را گزارش کرده‌اند. نتایج مطالعات عددی پیشرفته‌تر نیز نشان می‌دهد که تقویت با پلیمر تقویت‌شده با الیاف می‌تواند الگوی گسیختگی را تغییر داده و از تمرکز ترک‌های قطری جلوگیری کند [۱۵].

علاوه بر پلیمر تقویت‌شده با الیاف، روش‌های نوین مقاوم‌سازی نظیر استفاده از ملات‌های مسلح‌شده با الیاف نیز مورد توجه قرار گرفته‌اند. کوتاس، بournاس و تریانتافیلو^{۱۲} [۱۶] در یک مطالعه آزمایشگاهی، عملکرد لرزه‌ای میانقاب‌های بنایی تقویت‌شده با ملات مسلح‌شده با الیاف (TRM) را بررسی کرده و روابط طراحی پیشنهادی ارائه داده‌اند. همچنین الوتزی، تیناتزی و مودنا^{۱۳} [۱۷] نشان دادند که رفتار برشی دیوارهای بنایی تقویت‌شده با پلیمر تقویت‌شده با الیاف به‌شدت به کیفیت چسبندگی، ناهمگنی مصالح و شرایط سطحی دیوار وابسته است.

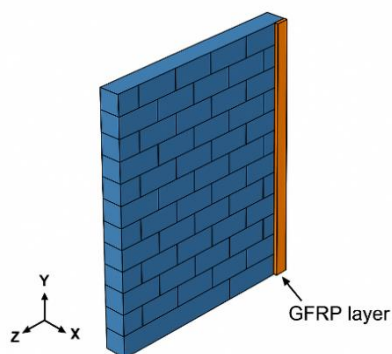
در مجموع، مرور پژوهش‌های گذشته نشان می‌دهد که اگرچه عملکرد پلیمر تقویت‌شده با الیاف و الیاف شیشه در تقویت

¹⁰ Triantafillou, T.C.,

¹¹ Almusallam, T.H., & Al-Salloum, Y.A

¹² Koutas, L.N., Bournas, D.A., & Triantafillou, T.C.

¹³ Valluzzi, M.R., Tinazzi, D., & Modena, C.



شکل ۲. شکل شماتیک الیاف شیشه روی دیوار

برای شبیه‌سازی رفتار غیرخطی مصالح بنایی از مدل پلاستیک-خسارت بتن استفاده شد. این مدل قادر است رفتار کششی-فشاری، ترک‌خوردگی و خردشدگی مصالح را به‌طور هم‌زمان مدل کند و در مطالعات معتبر مرتبط با تحلیل دیوارهای بنایی مورد استفاده قرار گرفته است [۱۱-۱۳]. پارامترهای رفتاری شامل زاویه اتساع، ضریب ویسکوزیته، گریز از مرکزیت و نسبت f_{b0}/f_{c0} مطابق توصیه‌های پژوهش‌های پیشین انتخاب شد. رفتار تماس میان واحدهای بنایی و ملات از نوع سطح به سطح با قانون Penalty و ضریب اصطکاک ۰٫۷ مدل شد.

پارامترهای رفتاری مدل پلاستیک-خسارت بتن مورد استفاده در این پژوهش بر اساس توصیه‌های ارائه‌شده در مطالعات پیشین و مقادیر متداول برای مصالح شبه‌بنایی انتخاب شده‌اند. این پارامترها به‌منظور افزایش شفافیت و امکان بازتولیدپذیری نتایج، در جدول ۲ ارائه شده‌اند.

جدول ۲. مشخصات مدل‌های عددی مورد استفاده در تحلیل

پارامتر	نماد	مقدار
زاویه اتساع	ψ	36°
نسبت تنش فشاری دوماحوری به تک‌محوری	f_{b0}/f_{c0}	۱٫۱۶
پارامتر شکل سطح تسلیم	K	۰٫۶۶۷
پارامتر ویسکوزیته	μ	۰٫۰۰۰۵
نوع سخت‌شوندگی	-	ایزوتروپیک

مش‌بندی مدل با استفاده از المان‌های C3D8R انجام شد. اندازه متوسط المان برابر ۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شد و در نواحی

جدول ۱. خواص مکانیکی مصالح مورد استفاده در مدل‌سازی عددی

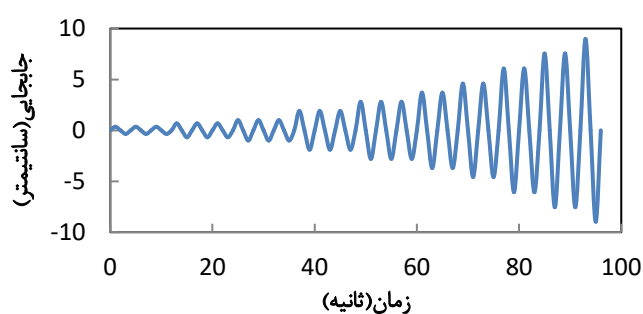
نوع مصالح	مدول الاستیسیته (MPa)	مقاومت فشاری (MPa)	مقاومت کششی (MPa)	چگالی (kg/m^3)	مقاومت کششی (MPa)	توضیحات
آجر سفالی	۱۸۴۸	۲٫۶	۰٫۲۵	۱۳۰۰	—	میانگین نمونه‌های متداول روستایی
بلوک سیمانی	۲۲۵۰	۳٫۰	۰٫۳	۱۰۰۰	—	میانگین نمونه‌های متداول روستایی
ملات بنایی	۱۵۰۰	۱٫۰	۰٫۱	۱۸۰۰	—	ملات ماسه سیمان ضعیف
ورق GFRP	۷۰۰۰	—	۱۹۰۰	۲۵۵۰	۱۹۰۰	یک لایه، یک طرف دیوار
چسب اپوکسی	۳۵۰۰	—	۳۰	۱۲۰۰	۳۰	برای اتصال GFRP

برای مدل‌سازی لایه الیاف شیشه ضخامت ورق برابر ۱ میلی‌متر لحاظ شد و رفتار آن مطابق خواص درج‌شده در جدول ۱ تعریف گردید. اتصال بین ورق و سطح دیوار با استفاده از قید Tie از نوع سطح به سطح مدل شد تا انتقال کامل نیروهای برشی و کششی تضمین شود. فرض اتصال کامل بین الیاف شیشه و دیوار، یک ساده‌سازی عددی است که به‌عنوان یکی از محدودیت‌های مدل در نظر گرفته شده و ممکن است منجر به برآورد خوش‌بینانه ظرفیت نهایی شود. لایه چسب اپوکسی نیز به‌صورت یک لایه با سختی بالا مدل شد تا برهم‌کنش یکپارچه میان دیوار و الیاف شیشه فراهم شود؛ رویکردی که در بسیاری از مطالعات عددی مشابه مورد استفاده قرار گرفته است. چیدمان و محل قرارگیری لایه الیاف شیشه بر روی سطح دیوار در شکل ۲ نشان داده شده است.

در مرحله دوم، تحلیل دینامیکی با استفاده از روش صریح انجام شد. انتخاب این روش به دلیل توانایی بالای آن در شبیه‌سازی رفتارهای ترد، گسترش ناگهانی ترک‌ها، تماس، جدایش و ناپایداری‌های موضعی است که در دیوارهای بنایی تحت بارگذاری چرخه‌ای به‌طور گسترده رخ می‌دهد. در مقایسه با روش ضمنی، روش صریح در مواجهه با مشکلات همگرایی ناشی از ترک‌خوردگی شدید و تماس‌های پیچیده، از پایداری عددی بیشتری برخوردار است [۱۰، ۱۲].

به‌منظور حفظ ماهیت شبه‌استاتیکی بارگذاری و جلوگیری از بروز اثرات اینرسی ناخواسته، سرعت اعمال جابجایی به‌گونه‌ای انتخاب شد که انرژی جنبشی سیستم در تمام مراحل تحلیل در مقایسه با انرژی داخلی ناچیز باقی بماند. بدین ترتیب، پاسخ سازه عمدتاً تحت کنترل رفتار غیرخطی مصالح بوده و اثرات دینامیکی ناخواسته به حداقل کاهش یافته است. در این تحلیل، بارگذاری چرخه‌ای شبه‌دینامیکی در قالب جابجایی کنترل‌شده با افزایش تدریجی دامنه سیکل‌ها اعمال شد. الگوی بارگذاری در شکل ۴ ارائه شده است.

برای ارزیابی صحت مدل‌سازی، منحنی نیرو-تغییرمکان حاصل از مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی گزارش‌شده توسط چن و لیو [۱۳] مقایسه شد. همان‌طور که در شکل ۵ دیده می‌شود، سختی اولیه، مقاومت نهایی و روند کلی پاسخ دو منحنی تطابق قابل قبولی دارند. این تطابق نشان می‌دهد که مدل حاضر از دقت کافی برای تحلیل رفتار دیوارهای بنایی و اثر تقویت الیاف شیشه برخوردار است.

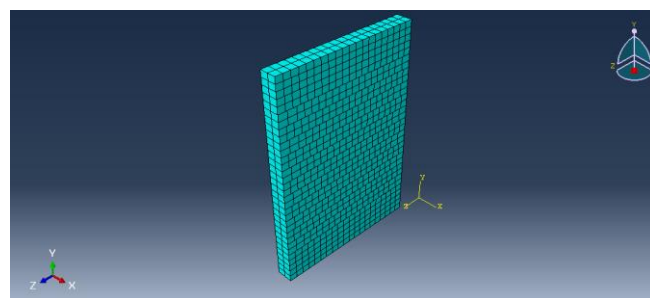


شکل ۴. تاریخچه بارگذاری اعمال شده

در مجموع، ترکیب هندسه واقع‌گرایانه، مدل رفتاری معتبر پلاستیک-خسارت بتن، مش‌بندی مناسب، تعریف دقیق تماس مصالح و بارگذاری استاتیکی و دینامیکی، چارچوبی مناسب برای

حساس به ترک‌خوردگی، اندازه مش تا ۲ سانتی‌متر کاهش یافت. این رویکرد مطابق توصیه‌های مطالعات گذشته در تحلیل غیرخطی دیوارهای بنایی است [۱۲]. شکل ۳ مش‌بندی مدل را نشان می‌دهد. تعداد المان‌ها بسته به نوع مصالح و وجود یا عدم وجود تقویت در بازه ۳۵۰۰ تا ۴۲۰۰ المان بوده است. چهار مدل عددی ساخته‌شده در جدول ۳ خلاصه شده‌اند.

برای اعمال شرایط مرزی، پایه دیوار به‌صورت گیردار کامل مدل شد و بارهای ثقلی متداول به کلاف فوقانی اعمال گردید. بارگذاری جانبی در دو مرحله انجام شد. ابتدا تحلیل استاتیکی غیرخطی (Pushover) صورت گرفت که طی آن بار جانبی به‌صورت افزایشی تا زمان کاهش شدید سختی یا فروپاشی اعمال شد. این روش یکی از رویکردهای رایج برای بررسی عملکرد درون‌صفحه‌ای دیوارهای بنایی است [۴، ۸].

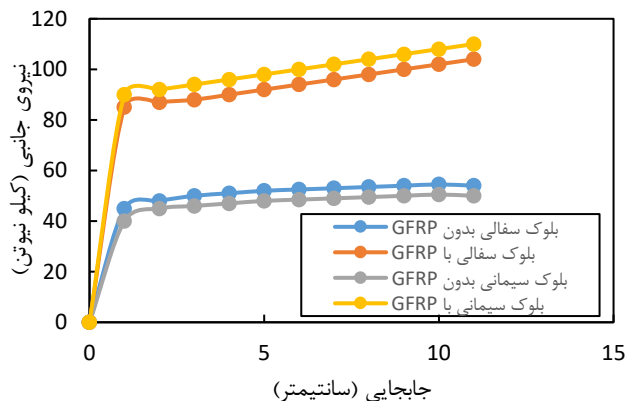


شکل ۳. شبکه‌بندی مدل (Mesh)

جدول ۳. مشخصات مدل‌های عددی مورد استفاده در تحلیل

نام مدل	نوع مصالح	وضعیت تقویت	تعداد المان‌ها	نوع تحلیل
M1	آجر سفالی	بدون تقویت	≈۳۵۰۰	استاتیکی غیر خطی + دینامیکی صریح
M2	بلوک سیمانی	بدون تقویت	≈۳۶۰۰	استاتیکی غیر خطی + دینامیکی صریح
M3	آجر سفالی	تقویت شده با الیاف شیشه	≈۴۰۰۰	استاتیکی غیر خطی + دینامیکی صریح
M4	بلوک سیمانی	تقویت شده با الیاف شیشه	≈۴۲۰۰	استاتیکی غیر خطی + دینامیکی صریح

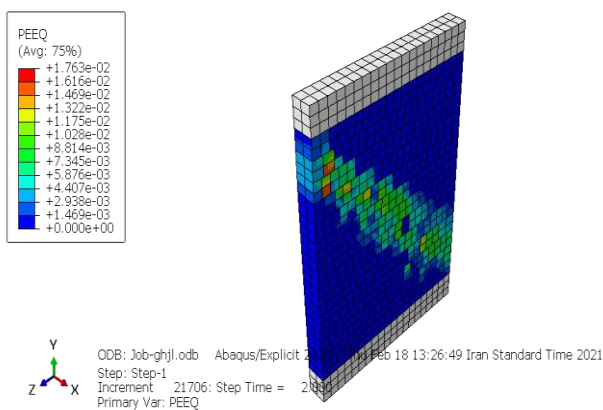
مشابه است، اما ورق الیاف شیشه موجب محدودسازی گسترش ترک و تأخیر در گسیختگی شده است. این اثر در دیوارهای بلوک سیمانی برجسته‌تر است و بیانگر تعامل بهتر لایه الیاف شیشه با مصالح یکپارچه‌تر بلوک سیمانی است.



شکل ۶. مقایسه منحنی نیرو-تغییر مکان چهار مدل دیوار بنایی با و بدون تقویت با الیاف شیشه

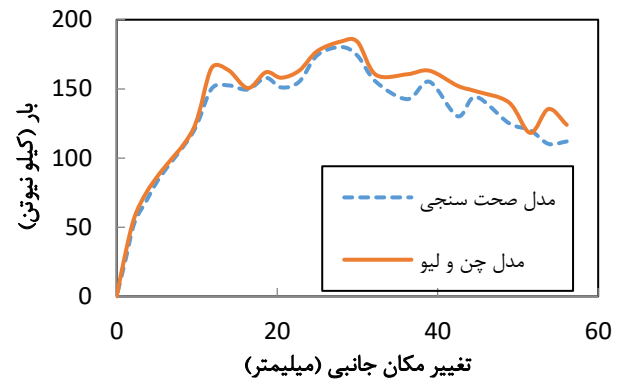
جدول ۴. خلاصه کمی نتایج تحلیل عددی

تغییر انرژی جذب‌شده	تغییر سختی اولیه	تغییر مقاومت نهایی	مدل
↑ قابل توجه	↑ محدود (کمتر از ۱۵٪)	↑ حدود ۶۰٪	M3 نسبت به M1
↑ قابل توجه	↑ محدود (کمتر از ۱۵٪)	↑ حدود ۶۵٪	M4 نسبت به M2



شکل ۷. توزیع کرنش پلاستیک معادل (PEEQ) در دیوار بنایی بدون تقویت تحت بارگذاری چرخه‌ای

تحلیل اثر تقویت الیاف شیشه بر عملکرد لرزه‌ای دیوارهای بنایی فراهم کرده است.



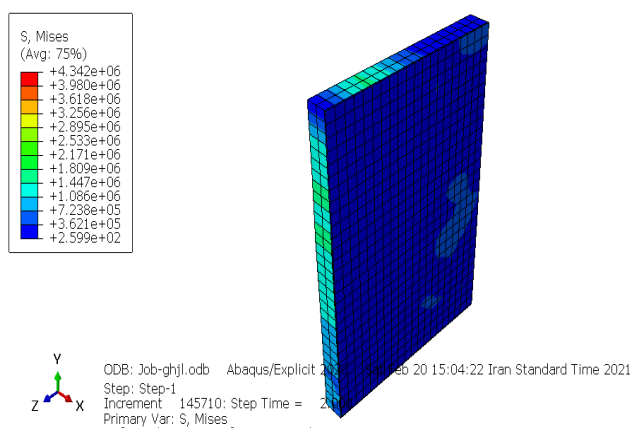
شکل ۵. مقایسه منحنی نیرو-تغییر مکان بین مدل عددی حاضر و نتایج آزمایشگاهی چن و لیو [۱۴]

۴. یافته‌های پژوهش

نتایج حاصل از تحلیل استاتیکی غیرخطی (Pushover) برای چهار مدل عددی در شکل ۶ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که مدل‌های تقویت‌شده M3 و M4 از افزایش قابل توجه ظرفیت باربری برخوردارند، در حالی که تغییرات سختی اولیه نسبتاً محدود است. این افزایش ظرفیت باربری را می‌توان ناشی از انتقال مؤثرتر نیروهای کششی در سطح دیوار دانست، به‌طوری‌که ورق الیاف شیشه با محدودسازی کرنش‌های کششی و کنترل گسترش ترک‌های قطری، نقش مؤثری در بهبود رفتار غیرخطی دیوار ایفا می‌کند. به منظور ارائه مقایسه‌ای کمی از اثر تقویت با الیاف شیشه، شاخص‌های اصلی عملکرد لرزه‌ای شامل مقاومت نهایی، سختی اولیه و انرژی جذب‌شده برای چهار مدل عددی در جدول ۴ خلاصه شده‌اند. مطابق این جدول، تقویت با الیاف شیشه منجر به افزایش قابل توجه مقاومت نهایی و انرژی جذب‌شده در هر دو نوع دیوار بنایی شده است، در حالی که تغییرات سختی اولیه نسبتاً محدود باقی مانده است.

الگوهای ترک‌خوردگی در شکل‌های ۷ و ۸ نشان داده شده‌اند. در دیوارهای بدون تقویت، ترک قطری مشخص از گوشه تحت فشار به گوشه تحت کشش شکل گرفته و منجر به گسیختگی برشی می‌شود. تمرکز کرنش کششی عمدتاً در محل تماس واحدهای بنایی با ملات رخ داده است. در مدل‌های تقویت‌شده، اگرچه مسیر ترک اولیه

مقایسه کلی چهار مدل عددی نشان می‌دهد که افزودن الیاف شیشه سبب افزایش قابل توجه مقاومت نهایی و انرژی جذب شده و در عین حال تغییرات سختی اولیه محدود باقی می‌ماند. در حالی که اختلاف عملکرد میان دیوار سفالی و دیوار سیمانی محدود است، اثر تقویت با الیاف شیشه بسیار محسوس‌تر بوده و بیشترین افزایش در ظرفیت باربری و جذب انرژی مربوط به مدل‌های M3 و M4 است. به‌طور خاص، مساحت زیر منحنی نیرو-تغییرمکان در مدل‌های تقویت شده تقریباً دو برابر مدل‌های بدون تقویت است که بیانگر افزایش چشمگیر انرژی اتلافی و بهبود رفتار چرخه‌ای است.



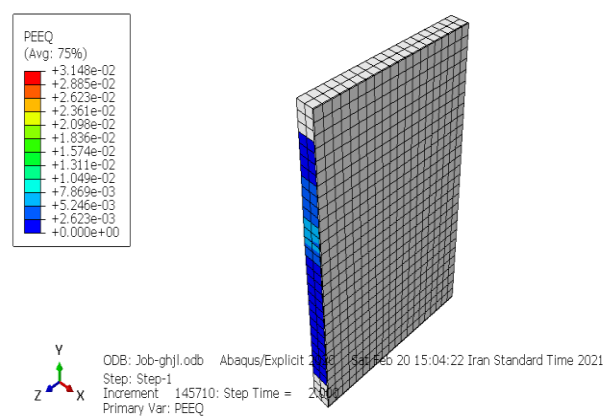
شکل ۱۰. توزیع تنش فون مایز (S, Mises) در دیوار بنایی تقویت شده با الیاف شیشه تحت بارگذاری چرخه‌ای

این نتایج تأیید می‌کنند که استفاده از لایه الیاف شیشه می‌تواند نقش تعیین‌کننده‌ای در بهبود عملکرد لرزه‌ای دیوارهای بنایی داشته باشد و رفتار نمونه‌های تقویت شده از پایداری و شکل پذیری بیشتری برخوردار است.

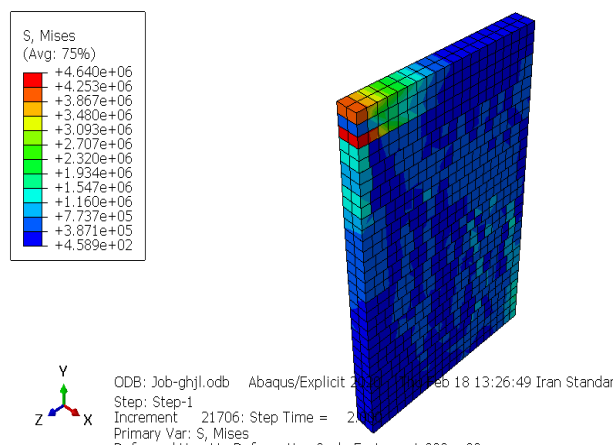
۵. بحث

نتایج حاصل از تحلیل‌های عددی نشان می‌دهد که استفاده از لایه الیاف شیشه تأثیر چشمگیری بر رفتار لرزه‌ای دیوارهای بنایی دارد. همان‌گونه که در منحنی‌های نیرو-تغییرمکان ارائه شده در شکل ۶ مشاهده می‌شود، پاسخ لرزه‌ای دیوارهای تقویت شده و بدون تقویت تفاوت‌های مشخصی از نظر مقاومت و سختی نشان می‌دهد. بر اساس این منحنی‌ها، افزایش مقاومت نهایی در مدل‌های تقویت شده محسوس‌تر از تغییرات سختی اولیه است؛ بنابراین نقش

نتایج تحلیل دینامیکی صریح نیز در شکل‌های ۹ و ۱۰ ارائه شده است. دیوارهای بدون تقویت تحت بارگذاری چرخه‌ای جابجایی‌های بزرگ‌تری را تجربه کرده و تمرکز تنش‌ها در نواحی کششی بیشتر مشاهده می‌شود. در مقابل، وجود لایه الیاف شیشه موجب کاهش دامنه جابجایی‌ها و یکنواخت‌تر شدن توزیع تنش‌ها شده است که نشان‌دهنده افزایش سختی مؤثر و کاهش احتمال ایجاد نواحی تمرکز تنش است. دیوارهای سیمانی در مقایسه با دیوارهای سفالی تغییرمکان کمتری داشته و پایداری بیشتری از خود نشان داده‌اند.



شکل ۸. توزیع کرنش پلاستیک معادل (PEEQ) در دیوار بنایی تقویت شده با الیاف شیشه تحت بارگذاری چرخه‌ای



شکل ۹. توزیع تنش فون مایز (S, Mises) در دیوار بنایی بدون تقویت تحت بارگذاری چرخه‌ای.

در تحلیل دینامیکی صریح مشاهده شد که توزیع تنش در دیوارهای تقویت‌شده یکنواخت‌تر بوده و کاهش انرژی اعمالی در سیکل‌های بارگذاری از طریق رفتار کشسان-ویسکوز لایه الیاف جذب می‌شود. این پدیده، که در مطالعات عددی و آزمایشگاهی پیشین درباره دیوارهای بنایی تقویت‌شده با الیاف گزارش شده است [۱۵]، موجب کاهش پراکندگی ترک‌ها و افزایش پایداری پاسخ چرخه‌ای می‌شود. محدود شدن جابجایی‌های ماکزیمم و کاهش تمرکز تنش در گوشه‌های کششی دیوار تقویت‌شده، نشان می‌دهد که الیاف توانسته است مکانیزم شکست را از «گسیختگی ترد قطری» به «رفتار نیمه‌چسبیده و پایدار» تغییر دهد.

از مقایسه انرژی جذب‌شده می‌توان نتیجه گرفت که به‌رغم اختلاف محدود میان مصالح سفالی و سیمانی، نقش الیاف شیشه بسیار تعیین‌کننده‌تر است. درحالی‌که مقاومت نهایی مدل‌های سیمانی کمی بیشتر از سفالی است، افزایش ظرفیت انرژی جذب‌شده در هر دو نوع مصالح تقریباً مشابه و نزدیک به دو برابر مدل‌های بدون تقویت است. این موضوع نشان می‌دهد که الیاف شیشه نه تنها مقاومت را افزایش می‌دهد، بلکه شکل‌پذیری و توان جذب انرژی را نیز به‌طور هم‌زمان بهبود می‌بخشد — ویژگی‌ای که برای سازه‌های بنایی در مناطق لرزه‌خیز اهمیت ویژه دارد.

با وجود دقت مدل‌سازی و تطابق قابل‌قبول نتایج با داده‌های آزمایشگاهی چن و لیو [۱۳]، باید توجه داشت که شرایط واقعی ساخت‌وساز روستایی ممکن است پیچیدگی‌هایی مانند کیفیت پایین ملات، ناهمگنی مصالح یا چسبندگی ناکامل لایه الیاف پلیمری داشته باشد که در محیط عددی قابل مدل‌سازی دقیق نیست. همچنین استفاده از مدل پیوسته برای ناحیه اتصال الیاف پلیمری-بنایی، هرچند از نظر عددی پایدار است، می‌تواند منجر به خوش‌بینی نسبی در تخمین ظرفیت نهایی شود.

در مجموع، تحلیل‌ها نشان می‌دهد که تقویت الیاف شیشه یک راهکار مؤثر برای بهبود رفتار لرزه‌ای دیوارهای بنایی است و با وجود تفاوت‌های مصالح سفالی و سیمانی، اثر تقویت در هر دو نوع مشابه و قابل‌اتکا است. بررسی میدانی و آزمایشگاهی بیشتر می‌تواند به توسعه دستورالعمل‌های طراحی مناسب برای کاربردهای روستایی کمک کند.

اصلی الیاف شیشه در کنترل ترک و بهبود پاسخ پس از رسیدن به مقاومت بیشینه تفسیر می‌شود. افزایش ظرفیت باربری در مدل‌های تقویت‌شده (M3) و (M4) نسبت به نمونه‌های بدون تقویت کاملاً محسوس است، در حالی‌که تغییرات سختی اولیه محدودتر بوده و اختلاف آن در مراحل ابتدایی بارگذاری چندان چشمگیر نیست. این افزایش مقاومت را می‌توان ناشی از انتقال مؤثرتر نیروهای کششی در سطح دیوار دانست، به‌طوری‌که ورق الیاف شیشه با محدودسازی کرنش‌های کششی و کنترل گسترش ترک‌های قطری، نقش یک المان مقاوم در برابر گسیختگی ترد را ایفا می‌کند. این رفتار منجر به بهبود پاسخ پس‌ازحداکثر و افزایش پایداری چرخه‌ای دیوارهای تقویت‌شده می‌شود. این مشاهده با نتایج گزارش‌شده در مطالعات پیشین همخوانی دارد [۴، ۵، ۸، ۱۵].

الگوی ترک‌ها در دیوارهای بدون تقویت بیانگر رفتار کلاسیک دیوارهای بنایی تحت بار جانبی است که معمولاً به‌صورت ترک قطری از گوشه تحت فشار به گوشه تحت کشش ظاهر می‌شود. حضور لایه الیاف شیشه مسیر ترک را تغییر نمی‌دهد، اما رشد آن را کند کرده و تمرکز کرنش کششی را کاهش می‌دهد. این موضوع نشان می‌دهد که الیاف شیشه در کنترل گسترش ترک و افزایش شکل‌پذیری نقش مؤثری دارد. این رفتار با یافته‌های والوتزی و مودنا^{۱۴} درباره کنترل ترک در سازه‌های بنایی تقویت‌شده [۱۷] و همچنین تایید مطالعات عددی پیشین درباره بهبود شکل‌پذیری دیوارهای تقویت‌شده هم‌خوانی دارد [۱۵].

مقایسه عملکرد مصالح نشان داد که اختلاف رفتاری بین دیوارهای سفالی و سیمانی کمتر از اثر تقویت است. دیوارهای سیمانی به دلیل چگالی پایین‌تر، یکپارچگی بلوک‌ها و رفتار نسبتاً همگن، سختی اولیه بیشتری داشته و در تحلیل‌های دینامیکی تغییرمکان کمتر و توزیع تنش یکنواخت‌تری نشان دادند. این ویژگی در دیوارهای سفالی کمتر دیده شد و حساسیت مصالح سفالی به تنش‌های موضعی بیشتر است. با وجود این تفاوت، تقویت با الیاف شیشه در هر دو نوع مصالح اثر مشابهی بر افزایش مقاومت و کاهش دامنه تغییرمکان‌ها دارد.

¹⁴ Valluzzi, M.R. & Modena, C.

مدل‌سازی صریح آسیب و لغزش در ناحیه چسب، می‌تواند منجر به برآوردی نسبتاً خوش‌بینانه از ظرفیت نهایی سازه شود.

بر این اساس، پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده موارد زیر مورد توجه قرار گیرد:

۱. مدل‌سازی صریح رفتار غیرخطی چسب و امکان لغزش و جدایش بین الیاف شیشه و دیوار بنایی؛

۲. بررسی پارامتریک اثر ضخامت لایه تقویت، الگوی نصب و تقویت یک‌طرفه در مقایسه با دوطرفه؛

۳. ارزیابی عملکرد دیوارهای تقویت‌شده دارای بازو تحت بارگذاری چرخه‌ای؛

۴. انجام مطالعات آزمایشگاهی در مقیاس دیوار و سازه برای بهبود قابلیت تعمیم نتایج عددی.

به‌طور کلی، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که تقویت دیوارهای بنایی با الیاف شیشه می‌تواند راهکاری مؤثر، مقرون‌به‌صرفه و قابل اجرا برای بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌های روستایی باشد. توسعه دستورالعمل‌های طراحی مبتنی بر شواهد عددی و آزمایشگاهی می‌تواند گام بعدی در کاربرد عملی این روش تقویتی باشد.

References

- [1] Building and Housing Research Center (BHRC). (2014). Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings – Standard No. 2800 (4th Edition). Tehran, Iran. (in Persian)
- [2] International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES). (2017). Field report on the 2017 Sarpol-e Zahab earthquake: Damage to rural masonry buildings. Tehran, Iran. (in Persian)
- [3] Stavridis, A., & Shing, P.B. (2020). Finite-element modeling of nonlinear behavior of masonry-infilled RC frames. *Journal of Structural Engineering*, 146(3), 04020008. doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.1
- [4] Triantafillou, T.C. (1998). Strengthening of masonry structures using epoxy-bonded FRP laminates. *Journal of Composites for Construction*, 2(2), 96–104. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)10900268\(1998\)2:2\(96\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)10900268(1998)2:2(96))
- [5] Kanani Kashani, H., Shakiba, M., Bazli, M., Hosseini, S.M., Mortazavi, S.M.R., & Arashpour,

اگرچه در این پژوهش مقایسه مستقیم با حدود آیین‌نامه‌ای انجام نشده است، افزایش قابل توجه ظرفیت باربری و پایداری چرخه‌ای در مدل‌های تقویت‌شده نشان می‌دهد که استفاده از الیاف شیشه می‌تواند نقش مؤثری در نزدیک کردن رفتار دیوارهای بنایی روستایی به الزامات عملکردی آیین‌نامه لرزه‌ای ایران (استاندارد ۲۸۰۰) ایفا کند.

۶. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، رفتار لرزه‌ای دیوارهای بنایی سفالی و سیمانی در دو حالت بدون تقویت و تقویت‌شده با الیاف شیشه با استفاده از مدل‌سازی عددی در نرم‌افزار آباکوس بررسی شد. نتایج تحلیل‌های استاتیکی غیرخطی و دینامیکی صریح نشان می‌دهد که استفاده از الیاف شیشه تأثیر قابل توجهی بر بهبود عملکرد لرزه‌ای دیوارهای بنایی دارد. افزودن این لایه عمدتاً موجب افزایش ظرفیت باربری و انرژی جذب‌شده شده و با بهبود پاسخ پس‌ازحداکثر، از افت ناگهانی مقاومت پس از رسیدن به حد نهایی جلوگیری می‌کند، در حالی که تأثیر آن بر سختی اولیه محدود باقی می‌ماند. بررسی الگوهای ترک‌خوردگی نیز نشان داد که الیاف شیشه ضمن حفظ مسیر ترک غالب در دیوارهای بنایی، رشد و گسترش ترک‌های قطری را کنترل کرده و توان دیوار را برای تحمل تغییرمکان‌های بزرگ‌تر افزایش می‌دهد.

اختلاف رفتاری میان دو نوع مصالح سفالی و سیمانی، هرچند قابل مشاهده است، اما در مقایسه با اثر تقویت الیاف شیشه کمتر ارزیابی می‌شود. دیوارهای سیمانی سختی اولیه بالاتری نشان داده و تحت بارگذاری چرخه‌ای جابجایی‌های کوچک‌تری را تجربه کردند؛ با این حال، میزان بهبود ناشی از تقویت با الیاف شیشه در هر دو نوع مصالح تقریباً مشابه و قابل اتکا بود. این موضوع بیانگر آن است که این روش تقویتی می‌تواند برای طیف گسترده‌ای از دیوارهای بنایی روستایی قابل استفاده باشد.

اعتبارسنجی مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی موجود تطابق مناسبی را نشان داد که بیانگر توانایی مدل در پیش‌بینی رفتار کلی دیوارهای بنایی در حالت تقویت‌شده و بدون تقویت است. با این وجود، برخی محدودیت‌های عددی از جمله فرض پیوستگی کامل بین الیاف شیشه و سطح دیوار، یکنواخت فرض کردن خواص مصالح و عدم

- Construction, 11(3), 308–318.
- [15] Zhang, S., Yang, D., Sheng, Y., Garrity, S.W., & Xu, L. (2017). Numerical modelling of FRP-reinforced masonry walls under in-plane seismic loading. *Construction and Building Materials*, 134, 649–662.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.091>
- [16] Koutas, L.N., Bournas, D.A., & Triantafyllou, T.C. (2014). Seismic strengthening of masonry-infilled RC frames with TRM: Experimental study. *Journal of Composites for Construction*, 18(4), 04014001.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000507](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000507)
- [17] Valluzzi, M.R., Tinazzi, D., & Modena, C. (2002). Shear behavior of masonry panels strengthened by FRP laminates. *Construction and Building Materials*, 16(7), 409–416.
[https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(02\)00043-0](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(02)00043-0)
- M. (2023). The structural response of masonry walls strengthened using prestressed near-surface mounted GFRP bars under cyclic loading. *Materials and Structures*, 56, 112.
<https://doi.org/10.1617/s11527-023-02201-0>
- [6] Asteris, P.G., Cavaleri, L., Di Trapani, F., & Sarhosis, V. (2016). A macro-modelling approach for the analysis of infilled frame structures considering the effects of openings and vertical loads. *Structure and Infrastructure Engineering*, 12(12), 1441–1459.
<https://doi.org/10.1080/15732479.2015.1030761>
- [7] Lee, T.H., Kim, J.W., Lee, S., & Kim, J.H.J. (2025). Numerical simulation and experimental validation of masonry walls strengthened with stiff-type polyurea under seismic loads. *Applied Sciences*, 15(12), 6912.
<https://doi.org/10.3390/app15126912>
- [8] Corradi, M., Borri, A., & Vignoli, A. (2002). Strengthening techniques tested on masonry structures struck by the Umbria–Marche earthquake of 1997. *Construction and Building Materials*, 16(4), 229–239.
[https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(02\)00014-4](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(02)00014-4)
- [9] Lourenço, P.B. (1996). Computational strategies for masonry structures. PhD Thesis, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands.
- [10] Dassault Systèmes. (2017). ABAQUS Theory Manual. Simulia Corporation, Providence, RI, USA.
- [11] Lee, J., & Fenves, G.L. (1998). Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures. *Journal of Engineering Mechanics*, 124(8), 892–900.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(1998\)124:8\(892\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1998)124:8(892))
- [12] Asteris, P.G., Cotsovos, D.M., Chrysostomou, C.Z., Mohebbkhah, A., & Al-Chaar, G.K. (2013). Mathematical micromodeling of infilled frames: State of the art. *Engineering Structures*, 56, 1905–1921.
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2013.08.010>
- [13] Chen, X., & Liu, Y. (2015). Numerical study of in-plane behaviour and strength of concrete masonry infills with openings. *Engineering Structures*, 82, 226–235.
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.10.042>
- [14] Almusallam, T.H., & Al-Salloum, Y.A. (2007). Behavior of FRP strengthened infill walls under in-plane seismic loading. *Journal of Composites for*