



Strengthening the Boundary Elements of Slender Concrete Shear Walls Using FRP Composite Materials

Mehran Iranpour Mobarakeh¹, Zahra Dalili²

1- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Lanjan Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran

2- Master's Student, Department of Civil Engineering, Aghigh Higher Education Institute, Isfahan, Iran

Received: 18 December 2024; Revised: 06 January 2025; Accepted: 13 January 2025; Published: 19 February 2025

Abstract

This study investigates the effect of strengthening slender shear walls using FRP composite materials under monotonic loading. Approximately 25 numerical models were developed in ABAQUS to evaluate the nonlinear behavior of slender walls, including cracking, reinforcement yielding, and ultimate failure, while accounting for the confinement effects of FRP. The results indicate that strengthening weak walls with a single FRP layer increased load-bearing capacity by up to 25% and improved ductility by up to 40%. In walls with reduced transverse reinforcement in boundary elements, ductility was up to 30% lower compared to walls with proper seismic detailing, highlighting the critical role of these reinforcements in seismic performance. Additionally, the application of FRP to walls with proper seismic detailing showed minimal impact on load-bearing capacity but improved ductility by approximately 15%. In terms of strengthening configuration, wrapping FRP around the entire wall increased load-bearing capacity by up to 20%, though it was less effective than strengthening only the boundary elements, particularly in walls with proper seismic designs. Furthermore, FRP had little impact on increasing the yield strength of reinforcement but significantly enhanced post-yield behavior and energy absorption capacity of the walls.

Keywords:

Shear walls, reinforced concrete, FRP, confinement, ductility.

Cite this article as Iran pour mobarakeh, M. and dalili, Z. (2025). Strengthening the Boundary Elements of Slender Concrete Shear Walls Using FRP Composite Materials. *Civil and Project*, 6(12), -. [doi: 10.22034/cpj.2025.494754.1331](https://doi.org/10.22034/cpj.2025.494754.1331)

ISSN: 2676-511X / **Copyright:** © 2025 by the authors.

Open Access: This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the article's Creative Commons licence and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder. To view a copy of this licence, visit <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Journal's Note: CPJ remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

*Corresponding author E-mail address: me.iranpour@iau.ac.ir



نشریه عمران و پروژه
<http://www.cpjournals.com/>

مقاوم سازی اجزای مرزی دیوارهای برشی لاغر بتنی با استفاده از مصالح کامپوزیت FRP

مهران ایران پور مبارکه*^۱، زهرا دلیلی اسماعیل ترخانی^۲

*۱-استاد یار گروه مهندسی عمران، واحد لنجان، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه عمران، موسسه آموزش عالی عقیق، اصفهان، ایران

تاریخ دریافت: ۲۸ آذر ۱۴۰۳؛ تاریخ بازنگری: ۱۷ دی ۱۴۰۳؛ تاریخ پذیرش: ۲۴ دی ۱۴۰۳؛ تاریخ انتشار آنلاین: ۰۱ اسفند ۱۴۰۳

چکیده

این تحقیق به بررسی اثر تقویت دیوارهای برشی لاغر با استفاده از مصالح کامپوزیت FRP تحت بارگذاری یکنواخت پرداخته است. در این مطالعه، حدود ۲۵ مدل عددی با استفاده از نرم افزار آباکوس رفتار غیرخطی دیوارهای لاغر، شامل ترک خوردگی، تسلیم میلگردها، و گسیختگی نهایی، با در نظر گرفتن تأثیر محصورشدگی توسط FRP بررسی شده اند. نتایج نشان می دهند که تقویت دیوارهای ضعیف با یک لایه FRP موجب افزایش ظرفیت باربری تا ۲۵ درصد و بهبود شکل پذیری تا ۴۰ درصد می شود. در دیوارهایی که فولادهای عرضی اجزای مرزی کاهش یافته بودند، شکل پذیری دیوار تا ۳۰ درصد کمتر از نمونه های دارای طرح لرزه ای مناسب بود، که نشان دهنده اهمیت این فولادها در رفتار لرزه ای دیوارهای برشی است. همچنین، استفاده از FRP در دیوارهای با طرح لرزه ای مناسب تأثیر قابل توجهی در ظرفیت باربری نداشت، اما شکل پذیری را تا ۱۵ درصد بهبود بخشید. در مقایسه نوع تقویت، اعمال FRP به صورت دور تا دور دیوار، بهبود ظرفیت باربری تا ۲۰ درصد را نشان داد، اما در دیوارهایی با طرح لرزه ای مناسب، تأثیر آن نسبت به تقویت فقط اجزای مرزی کمتر بود. علاوه بر این، استفاده از FRP تأثیر معناداری بر افزایش بار تسلیم میلگردها نداشت، اما موجب بهبود رفتار پس از تسلیم و افزایش جذب انرژی دیوارها شد.

کلیدواژه:

دیوار برشی لاغر، تقویت با FRP، شبیه سازی عددی، آباکوس، ظرفیت باربری و شکل پذیری

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: me.iranpour@iaui.ac.ir

۱. مقدمه

دیوارهای برشی در سازه‌های بتن‌آرمه به عنوان اعضای اصلی در مقاومت سازه در برابر بارهای جانبی شناخته می‌شوند [۱]. با این حال، بسیاری از این دیوارها در کشور ما و سایر نقاط جهان به دلایل مختلفی مانند تغییرات استانداردهای آیین‌نامه‌ای، ضعف در طراحی یا اجرای ساختار، فرسایش ناشی از گذشت زمان، تأثیر عوامل محیطی و خرابی‌های ناشی از زلزله‌های قبلی یا بارهای انفجاری، نیاز به تقویت و بهسازی دارند [۲]. در سال‌های اخیر، استفاده از الیاف FRP^۱ به منظور بهبود رفتار لرزه‌ای سازه‌ها با نتایج موفقیت‌آمیز روبه‌رو بوده است. مقاومت بالای این مواد در برابر خوردگی و نسبت بالای مقاومت به وزن آن‌ها باعث شده تا FRP به عنوان یک راهکار مناسب برای تقویت سازه‌ها مطرح شود، چرا که برخلاف روش‌های سنتی مانند شاتکریت یا فروسمنت، تغییری عمده در خواص دینامیکی سازه‌ها ایجاد نمی‌کند [۳]. با این حال، تحقیقات موجود بیشتر بر تقویت ستون‌ها و شمع‌های بتن‌آرمه با پوشش FRP متمرکز بوده است و تأثیر این مواد بر ظرفیت تغییرشکل اعضای سازه تحت بارهای افقی کمتر مورد بررسی قرار گرفته است [۴]. دیوارهای برشی بتن‌آرمه، که از جنبه‌های مختلف بهسازی لرزه‌ای کمتر مورد توجه قرار گرفته‌اند، نیاز به بررسی بیشتری دارند. از سوی دیگر، مطالعات علمی در زمینه تقویت دیوارهای برشی بتن‌آرمه محدود است و بیشتر تحقیقات موجود به دیوارهای بتنی کوتاه و ضخیم مربوط می‌شود. هدف این پژوهش، بررسی رفتار دیوارهای برشی بتن‌آرمه لاغر با استفاده از نرم‌افزار آنالیز اجزای محدود و تحلیل تأثیر تقویت اجزای مرزی دیوار تحت بارهای یکنواخت می‌باشد. برخی از تحقیقات پیشین به بررسی دیوارهای لاغر تحت بار استاتیکی پرداخته‌اند. یکی از جامع‌ترین و معتبرترین مطالعات در این زمینه در آزمایشگاه تکنولوژی ساختمان انجمن سیمان پرتلند (PCA^۲) انجام شده است [۵]. این تحقیق از سال ۱۹۷۴ آغاز و تا سال ۱۹۸۳ ادامه داشته است و نتایج چشمگیری به همراه داشته است [۶-۹]. هدف اصلی این بررسی‌ها در PCA، ارزیابی ظرفیت شکل‌پذیری، اتلاف انرژی و مقاومت دیوارهای سازه‌ای برای توسعه معیارهای طراحی در برابر زلزله بوده است. در این راستا، ۲۲ دیوار با مقیاس ۱:۳ تحت بار برگشتی و یکنواخت آزمایش شدند [۱۰-۱۳]. پارامترهای کنترل‌شده شامل شکل مقطع عرضی دیوار، مقدار میلگرد خمشی اصلی در اجزای مرزی دیوار، میلگردهای عرضی دور میلگردهای خمشی، و همچنین میلگردهای افقی، برشی و فشار محوری بودند. سایر عواملی چون مقاومت بتن، تاریخچه بار، استفاده از میلگرد قطری و وصله‌ها نیز در این آزمایشات مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که تقریباً تمامی نمونه‌ها در محدوده پارامترهای انتخابی، ظرفیت تغییرشکل غیرکشسان مناسبی داشته‌اند. همه نمونه‌ها توانستند بار را تا تسلیم میلگردهای خمشی تحمل کنند و این امر منجر به تشکیل مفصل در پای دیوار شد. ظرفیت تغییرشکل غیرکشسان دو حالت شکست را تجربه کرد:

۱. خرد شدن بتن جان

۲. ترکیب خرد شدن بتن جان و شکست برشی در ناحیه فشاری.

بر اساس نتایج آزمایشات PCA، لزوم محصورشدگی مناسب در اجزای مرزی دیوار به‌طور قابل‌توجهی مورد تأکید قرار گرفت. این فرآیند در چهار عملکرد اصلی مؤثر است:

۱. افزایش ظرفیت کرنش بتن

۲. حفاظت از میلگرد طولی در برابر کماتش

۳. حفظ بتن پس از ترک‌خوردگی

۴. بهبود ظرفیت برشی و سختی دیوار

مهدی جلالی‌نژاد در مهرماه ۱۳۹۵ مقاومت‌سازی دیوار برشی فولادی با استفاده از الیاف مسلح پلیمری را مورد بررسی قرار داد. در این تحقیق چند نمونه دیوار برشی فولادی در سه نوع الگو که توسط الیاف پوشش داده شده بودند، مورد تحلیل و بررسی

¹ Fiber Reinforced Polymer

² Portland Cement Association

قرار گرفت. این الگوها شامل مربعی، شطرنجی افقی و شطرنجی مورب بودند. از مقایسه این سه الگو نتیجه‌گیری شد که در هر سه الگو با افزایش نسبت مساحت ناحیه پوشش داده شده با الیاف، ظرفیت باربری دیوار برشی و میزان انرژی جذب‌شده توسط دیوار افزایش می‌یابد [۱۴].

فرهاد محمدی دارانی و عبدالرضا سروقدم در سال ۱۳۹۳ به بررسی تأثیر المان مرزی در رفتار دیوارهای برشی بتنی کوتاه پرداختند. در این تحقیق ۳۰ مدل از دیوارهای برشی کوتاه مورد تحلیل قرار گرفتند و متغیرهایی مانند نسبت ارتفاع به طول دیوار، مقدار بار محوری و تأثیر المان مرزی و ویژگی‌های دیگر آن‌ها از جمله تعداد آرماتور طولی و تعداد آرماتور عرضی، یا به عبارت دیگر، محصورشدگی بتن در رفتار این مدل دیوارها بررسی شد. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که المان مرزی با توجه به نسبت ارتفاع به طول دیوار و ویژگی‌های طراحی‌اش، تأثیر متفاوتی بر تغییرشکل‌ها و ظرفیت باربری دارد. تغییر شکل و مقاومت دیوارها در نسبت‌های ارتفاع به طول مختلف، بستگی به مقدار آرماتور طولی در المان مرزی دارد [۱۵].

علیرضا رهایی و سید هادی راشدی در سال ۱۳۹۶ به بررسی شکل‌پذیری مجموعه دیوار باربر بتنی با جزء مرزی پرداختند. در این مطالعه، سه الگوی ۱۲، ۱۶ و ۲۰ طبقه مورد بررسی قرار گرفت و نتایج نشان داد که با افزایش تعداد طبقات، سختی اولیه کاهش یافته و ظرفیت باربری جانبی افزایش می‌یابد. این کاهش سختی به دلیل افزایش زمان تناوب اصلی مود اول ارتعاشی در سازه‌های با طبقات بالاتر است. همچنین، وجود جزء مرزی در دیوارها باعث افزایش تقریباً ۱۰ تا ۴۰ درصدی در میزان برش پایه‌ها و همچنین افزایش ظرفیت باربری جانبی شد [۱۶].

در ادامه، تحقیقات متعددی در زمینه بهبود عملکرد دیوارهای برشی با استفاده از مواد مختلف تقویتی مانند FRP انجام شده است. برای مثال، مجتبی قاسم‌زاده و همکاران در سال ۱۳۹۴ به بررسی تأثیر FRP بر میزان جذب انرژی دیوار برشی فولادی با بازشو پرداختند. این پژوهش نشان داد که استفاده از صفحات FRP به صورت لایه‌های موازی در دو طرف دیوار برشی، بهترین پاسخ را در جذب انرژی ارائه می‌دهد [۱۷].

فریبرز ناطقی‌الهی و همکاران به مطالعه آزمایشگاهی سیستم دیوار برشی فولادی با ورق‌های پرکننده کامپوزیتی تحت بارگذاری چرخه‌ای پرداختند. نتایج این مطالعه نشان داد که استفاده از ورق‌های پرکننده کامپوزیتی در سیستم دیوار برشی فولادی، مقاومت تسلیم و نهایی، سختی اولیه و ثانویه را افزایش داده و جذب انرژی سیستم نیز به میزان قابل توجهی بیشتر می‌شود [۱۸]. این تحقیقات بیانگر اهمیت استفاده از تقویت‌کننده‌ها و اجزای مرزی در بهبود عملکرد دیوارهای برشی در برابر بارهای مختلف، به ویژه بارهای لرزه‌ای است. به‌طور کلی، دیوارهای برشی لاغر به دلیل رفتار خاص خود تحت تأثیر نسبت ارتفاع به طول قرار دارند و از آنجا که این دیوارها عملکردی مشابه تیر دارند، استفاده از تحلیل‌های غیرخطی و مدل‌های آسیب‌شناسی برای شبیه‌سازی رفتار آن‌ها ضروری است [۱۹، ۲۰].

مطالعات اخیر نشان داده‌اند که استفاده از FRP در تقویت دیوارهای برشی بتن‌آرمه می‌تواند بهبود قابل توجهی در ظرفیت باربری و شکل‌پذیری این دیوارها به همراه داشته باشد. در تحقیقاتی که در سال‌های اخیر انجام شده است، استفاده از FRP در سیستم‌های تقویتی برای دیوارهای برشی در شرایط بارگذاری پیچیده‌تر و شبیه‌سازی‌های آزمایشگاهی پیشرفته، نتایج مثبتی نشان داده است. در یک مطالعه جدید در سال ۲۰۲۳، محققان به بررسی تأثیر انواع مختلف الیاف FRP (الیاف کربن، شیشه و آرامید) در تقویت دیوارهای برشی بتن‌آرمه پرداختند و نشان دادند که استفاده از الیاف کربن به دلیل خاصیت‌های مکانیکی بالاتر و مقاومت بیشتر در برابر خوردگی، اثرات بهتری در بهبود رفتار لرزه‌ای دیوارهای برشی دارد [۲۱]. در سال ۲۰۲۲، تحقیقی بر روی عملکرد دیوارهای برشی بتن‌آرمه بلند که با FRP تقویت شده بودند انجام شد. نتایج این تحقیق نشان داد که FRP می‌تواند به طور قابل توجهی ظرفیت تحمل بارهای افقی و به ویژه بارهای دینامیکی ناشی از زلزله را در دیوارهای بلند افزایش دهد. همچنین این تحقیق بر این نکته تأکید داشت که استفاده از ترکیب FRP و میلگردهای پیش‌تنیده می‌تواند عملکرد دیوارهای برشی را در برابر بارهای زلزله به میزان قابل توجهی بهبود بخشد [۲۲]. در تحقیق دیگری که در سال ۲۰۲۳ انجام شد، محققان به بهینه‌سازی طراحی دیوارهای برشی بتن‌آرمه با استفاده از الگوریتم‌های هوش مصنوعی پرداخته و نشان دادند

که استفاده از روش‌های بهینه‌سازی در ترکیب با FRP می‌تواند منجر به طراحی دیوارهای با ظرفیت تحمل بار بیشتر و مصرف مواد کمتر گردد. این تحقیق در نهایت به طراحی دیوارهای برشی بهینه‌تری منجر شد که در برابر بارهای افقی و زلزله مقاوم‌تر هستند [۲۳].

۲. مدل سازی در نرم‌افزار آباکوس^۳

شکل ۱ متغیر آسیب را در نمودار تنش-کرنش تک‌محوره بتن نمایش می‌دهد. در این شکل، d_t و d_c به ترتیب متغیرهای زوال سختی اسکالر در کشش و فشار هستند، و E_0 سختی اولیه بتن را نشان می‌دهد. متغیر زوال سختی اسکالر در بازه صفر (برای ماده آسیب‌نندیده) تا ۱ (برای ماده کاملاً آسیب‌دیده) تغییر می‌کند. [۲۴]

در مدل‌سازی اجزای محدود، تعریف خصوصیات رفتاری مواد اهمیت ویژه‌ای دارد. در این بخش، چگونگی تعریف رفتار مواد بتن و فولاد به‌طور مختصر شرح داده می‌شود.

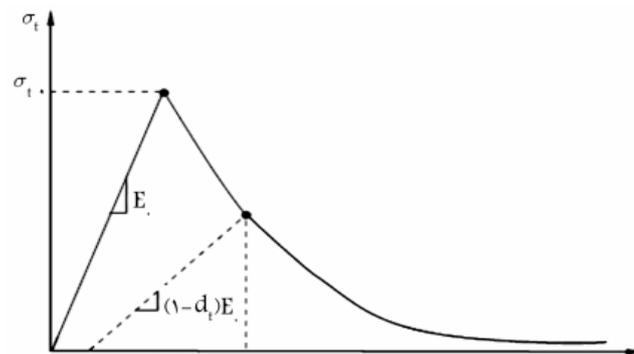
الف) معرفی ماده بتن

در این مطالعه، برای معرفی رابطه تنش-کرنش فشاری تک‌محوره بتن از رابطه هاگنستاد^۴ اصلاح‌شده استفاده شده است (شکل ۲). تحقیقات پیشین نشان داده‌اند که این رابطه پیش‌بینی بهتری از رفتار بتن به دست می‌دهد. روابط ۱ و ۲ [۲۵] شاخه صعودی این منحنی را توصیف می‌کنند [۲۵].

$$f_c = f_c'' \left[\frac{2\varepsilon_c}{\varepsilon_*} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_*} \right)^2 \right] \quad (1)$$

$$f_c'' = k_s f_c' \quad (2)$$

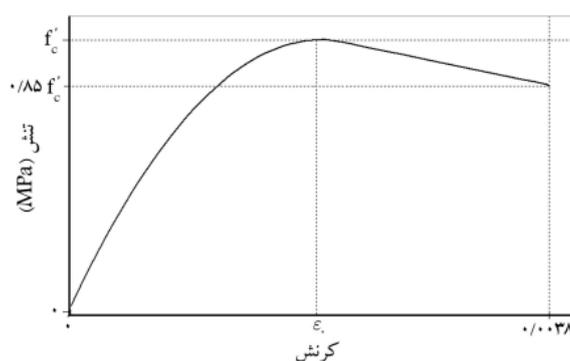
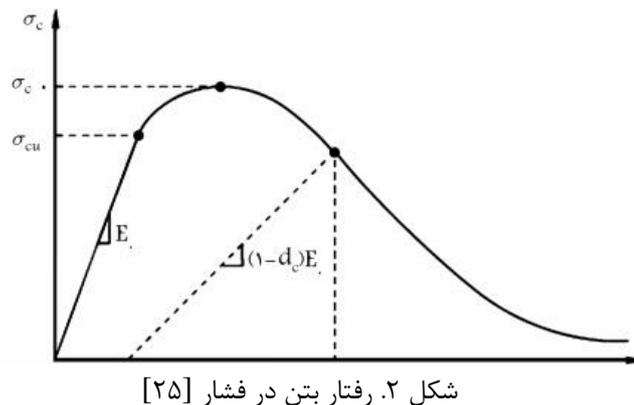
در این روابط، کرنش نظیر تنش بیشینه است که معمولاً از آزمایش به دست می‌آید [۲۵].



شکل ۱. رفتار بتن در کشش [۲۵]

³ Abaqus

⁴ Hagenstad



در این بخش، به بررسی جزئیات مدل سازی رفتار بتن و فولاد در نرم افزار آباکوس پرداخته می شود. در مورد بتن، هنگامی که تنش های فشاری بیشتر از ۳۵ مگاپاسکال باشند، مقدار ۰٫۹۲ در نظر گرفته می شود. برای مدل سازی رفتار بتن، از مدل هاگنستاد اصلاح شده استفاده می شود که ویژگی های منحنی تنش-کرنش بتن را به طور دقیق تر پیش بینی می کند. در این مدل، شاخه ی نزولی منحنی ها خطی است و از f' تا نقطه $0.85f'$ امتداد دارد. کرنش نهایی، که نشان دهنده شکست فشاری بتن است، برای نمونه های محصور نشده برابر با ۰٫۰۰۳۸ و برای نمونه های محصور شده برابر ۰٫۰۱ در نظر گرفته شده است. این مقادیر به همگرایی بهتر در آنالیز اجزای محدود کمک می کنند [۲۶]. در تحلیل تنش های کششی بتن، لازم به ذکر است که هنگامی که بتن ترک می خورد، تمام تنش های کششی در محل ترک توسط فولاد تحمل می شود. با وجود پیوستگی میان بتن و فولاد، برخی از تنش های کششی از فولاد به بتن منتقل می شود، که موجب کاهش تنش فولاد در میان ترک ها و افزایش سختی بتن در این نواحی نسبت به نواحی ترک خورده می شود. این پدیده تحت عنوان سخت شدگی کششی شناخته می شود. عواملی چون نسبت و توزیع فولاد، اندازه دانه ها، قطر میلگردها و خصوصیات بتن بر سخت شدگی کششی تأثیر دارند. در مدل سازی های این مطالعه، از مدل متعارف نرم افزار برای بررسی رفتار بتن بعد از ترک خوردگی استفاده شده است، که رفتار بتن را در این نواحی به صورت خطی و تا کرنش کششی نهایی، که ده برابر کرنش ترک خوردگی است، مدل سازی می کند. افزایش کرنش نهایی کششی به معنای استفاده بیشتر از ظرفیت بتن بعد از ترک خوردگی است.

یکی دیگر از پارامترهای مهم در مدل سازی غیرخطی، زاویه اتساع است که زاویه بین تنش انحرافی مایسز و فشار هیدروستاتیک در تنش محصورشدگی بالاست. برای نمونه های تحت خمش، زاویه اتساع ۳۶ درجه توصیه می شود که نتایج بهتری ارائه می دهد، به ویژه در نمونه های محصور شده تحت فشار. در نرم افزار آباکوس از المان هشت گره ای برای مدل سازی بتن استفاده می شود، زیرا این نرم افزار المان خاصی برای بتن ندارد. یکی از پارامترهای کلیدی در مدل سازی آسیب بتن، مدول آسیب است که به طور معمول برای شبیه سازی تغییرات خواص مکانیکی بتن در نواحی آسیب دیده و ترک خورده به کار می رود. این مدول می تواند

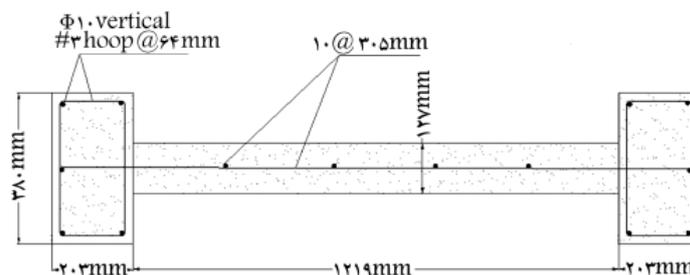
به‌طور پیوسته در طول فرآیند بارگذاری و در مناطق مختلف سازه تغییر کند. برای مدل‌سازی آسیب بتن در نرم‌افزار آباکوس، معمولاً از پارامتر آسیب^۵ استفاده می‌شود که مقادیر آن از صفر (بدون آسیب) تا یک (آسیب کامل) متغیر است. کرنش‌های بحرانی، تنش‌های کششی و فشاری و رفتار بتن پس از ترک‌خوردگی نیز از دیگر پارامترهای مهم در مدل‌سازی آسیب بتن هستند. این پارامترها به‌ویژه در سازه‌های بتن‌آرمه تحت تأثیر پارامترهایی چون نوع آرماتور، نسبت و توزیع میلگردها و نوع بتن قرار دارند. به‌طور مثال، در مدل‌سازی بتن پس از ترک‌خوردگی، رفتار بتن در نواحی آسیب‌دیده معمولاً به‌صورت خطی تا کرنش کششی نهایی مدل‌سازی می‌شود. این کرنش می‌تواند تا ده برابر کرنش ترک‌خوردگی افزایش یابد، که نشان‌دهنده استفاده بیشتر از ظرفیت بتن بعد از ترک‌خوردگی است. این ویژگی به‌ویژه در تحلیل‌های اجزای محدود برای پیش‌بینی بهتر رفتار نواحی آسیب‌دیده حائز اهمیت است.

در مدل‌سازی فولاد، اعضای یک‌بعدی به‌صورت دقیق‌جانمایی شده‌اند. برای تعریف ارتباط بین بتن و فولاد، از فید یکپارچه^۶ استفاده می‌شود که درجات آزادی المان‌های فولادی را به درجات آزادی المان‌های بتن مقید می‌کند. برای جلوگیری از ناپایداری‌های عددی در رفتار آسیب، شیب منحنی تنش-کرنش در ناحیه آسیب به‌طور مثبت و کوچک تخصیص داده می‌شود. در نرم‌افزار آباکوس، برای فولادها از المان DTRUSS^۳ استفاده شده است، زیرا رفتار فولاد طبق معیار فون میسر مدل می‌شود [۲۷].

در نهایت، مدل‌سازی رفتار بتن و فولاد به‌طور مستقل در نرم‌افزار آباکوس انجام می‌شود و اثرات درگیری بین این دو ماده مانند لغزش مهاری و عمل میخ‌پرچی فولادها از طریق سخت‌شدگی کششی بتن که پیشتر توضیح داده شد، به‌طور تقریبی معرفی می‌شوند. برای اطمینان از صحت مدل‌سازی و کالیبره کردن پارامترهای به‌کاررفته در شبیه‌سازی، دو نمونه دیوار برشی لاغر تحت بار محوری و بار جانبی با استفاده از مدل آسیب تحلیل شده‌اند.

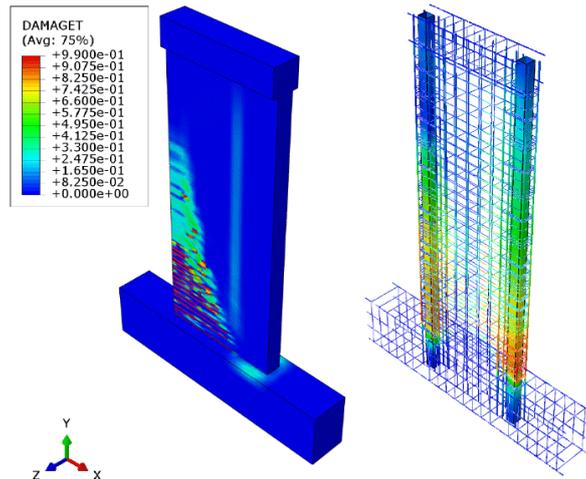
۳. صحت‌سنجی

در صحت‌سنجی اول [۱۲]، دیواری با ارتفاع ۱۲۲۰۰ میلی‌متر و نسبت ارتفاع به طول ۲/۷ مدل‌سازی شد. در شکل ۴، الگوی ترک‌خوردگی دیوار تحت بار برگشتی در آزمایشگاه با نتایج تحلیلی مقایسه شده است. ترک‌های افقی که به تدریج مورب می‌شوند، رفتار خمشی دیوار را نشان می‌دهند و نشان‌دهنده توانایی مدل اجزای محدود در شبیه‌سازی این رفتار هستند. در شکل ۵، نمودار بار-تغییر مکان جانبی برای نمونه‌های تحلیلی و آزمایشگاهی نشان داده شده است. نتایج مدل‌سازی دقت بالایی دارند و مدل تحلیلی به‌خوبی تمام مراحل رفتار غیرخطی دیوار لاغر از جمله رفتار خطی، تسلیم میلگردها و سخت‌شدگی فولادها را شبیه‌سازی می‌کند، که اعتبار مدل‌سازی را تایید می‌کند.

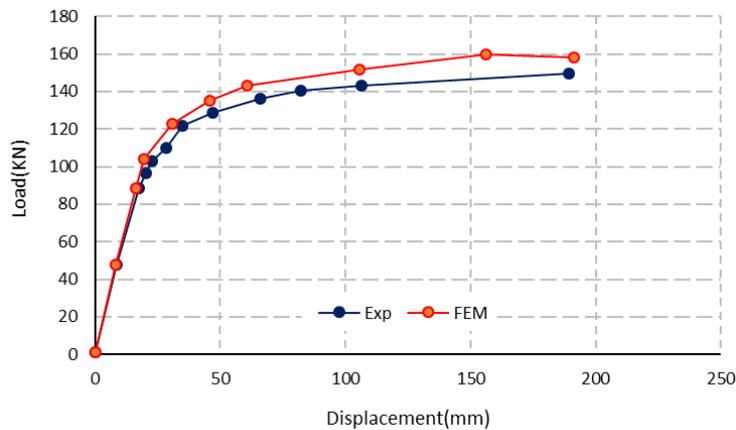


⁵ Damage Parameter

⁶ Embedded

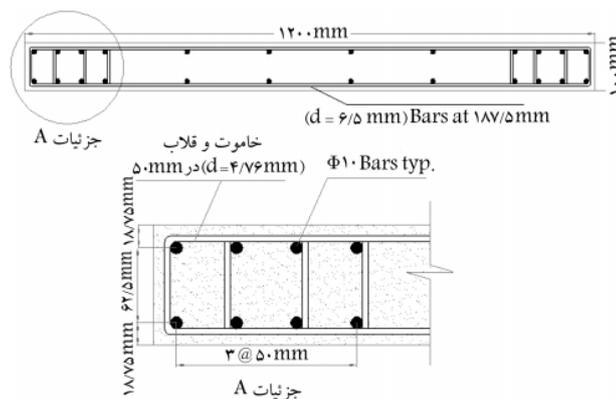


شکل ۴. نحوه ترک خوردگی در دیوار برشی

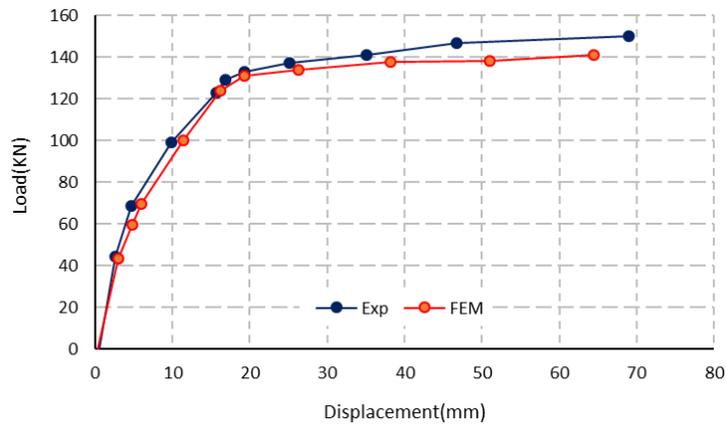


شکل ۵. مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاه [۱۲] در صحت سنجی اول

در صحت‌سنجی دوم [۱۲]، دیوار توسط محققین با استفاده از روش مبتنی بر تغییر مکان طراحی و آزمایش شده است. شکل ۶ مقطع این دیوار را نشان می‌دهد. ارتفاع دیوار ۳۶۰۰ میلی‌متر بوده و مقاومت بتن در زمان آنالیز برابر با ۳۱.۶ مگاپاسکال است. مقاومت تسلیم و نهایی فولادها به ترتیب ۴۲۰ و ۶۰۰ مگاپاسکال می‌باشند. در شکل ۶، مقطع و فولادگذاری دیوار نمایش داده شده است. در شکل ۷، منحنی بار-جابجایی دیوار با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. نتایج تحلیلی تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارند و رفتار دیوار تحت بارگذاری را به خوبی شبیه‌سازی می‌کنند، که نشان‌دهنده دقت بالای مدل‌سازی و توانایی پیش‌بینی عملکرد دیوار است.

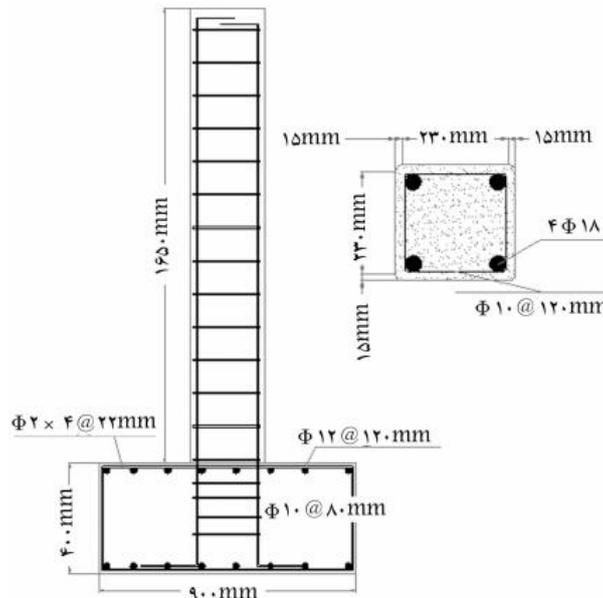


شکل ۶. مقطع دیوار صحت سنجی دوم

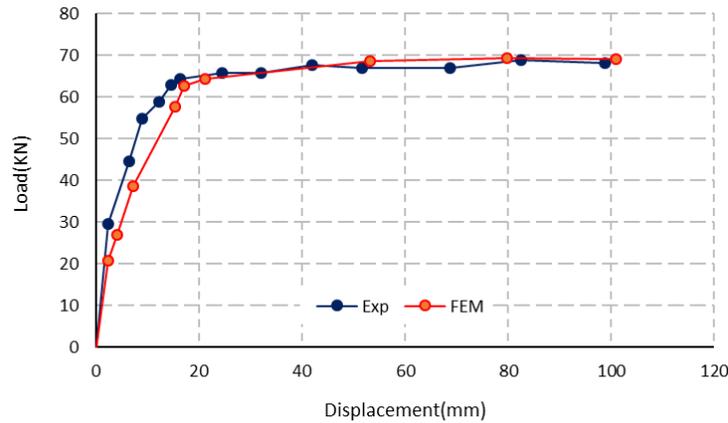


شکل ۷. مقایسه نتایج تحلیل و آزمایشگاهی صحت سنجی دوم

در صحت‌سنجی سوم [۲۸]، مدل‌سازی یک ستون مستطیلی تحت بار جانبی و بار محوری که با FRP تقویت شده است، در نرم‌افزار آباکوس انجام شده تا از توانایی شبیه‌سازی محصورشدگی اطمینان حاصل شود. انتخاب این ستون به دلیل شباهت آن به مسئله اصلی تحقیق، یعنی محصورشدگی اجزای مرزی دیوار، صورت گرفته است. این ستون در سال ۱۹۹۴ تحت آزمایش قرار گرفت و نتایج بارگذاری آن در دو حالت، بدون تقویت (CIF) و تقویت‌شده با ژاکت CFRP (WI)، ارائه شده است. در هر دو حالت، رفتار ستون در نرم‌افزار شبیه‌سازی شده است. شکل ۸ مشخصات هندسی و میلگردگذاری ستون را نشان می‌دهد. بتن مورد استفاده دارای مقاومت فشاری ۵۳ مگاپاسکال است و برای ساخت نمونه‌ها از فوق روان‌کننده استفاده شده است. نمونه‌ها به مدت ۶۰ روز در شرایط آزمایشگاهی نگهداری شدند. نمودار بار جانبی در مقابل جابه‌جایی جانبی بالای ستون در نمونه CIF، در شکل ۹، با نتایج آزمایش مقایسه شده است. نتایج شبیه‌سازی و آزمایش تطابق خوبی دارند.

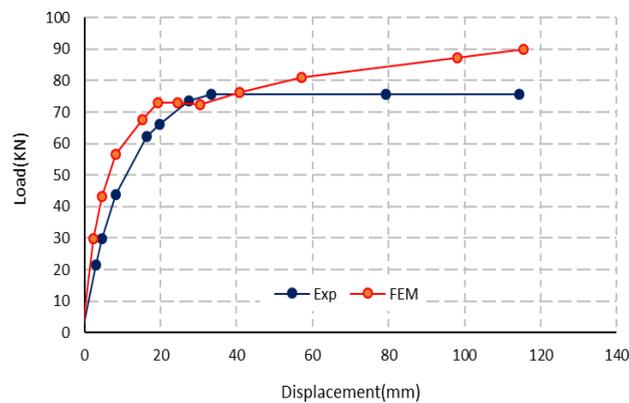


شکل ۸. مشخصات هندسی و میلگردگذاری ستون [۲۸]



شکل ۹. مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی صحت سنجی سوم

در صحت‌سنجی چهارم [۲۹]، شبیه‌سازی نمونه چهارم با مدل «آسیب برای بتن» انجام شده است. در این مدل، رابطه تنش- کرنش بتن محصور نشده وارد نرم‌افزار شده و محصورشدگی به‌خوبی شبیه‌سازی می‌شود. کرنش نهایی بتن محصور شده ۰.۰۰۱ در نظر گرفته شده و پارامترهای آسیب فشاری و زاویه اتساع به‌دقت تعریف شده‌اند. نتایج شبیه‌سازی با آزمایش‌ها تطابق خوبی دارند، با این حال، مدل تحلیلی بار نهایی بیشتری نسبت به نمونه آزمایشگاهی نشان می‌دهد، که ممکن است به رفتار سخت‌شدگی فولادها و مشکلات عددی مرتبط باشد [۲۹]. این نشان می‌دهد که مدل آسیب به‌خوبی محصورشدگی را شبیه‌سازی می‌کند. در شکل ۱۰، مقایسه نتایج آزمایش و شبیه‌سازی برای نمونه چهارم نشان داده شده است. این نمودار، تطابق خوب بین رفتار آزمایشگاهی و شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد و همچنین مود شکست پوشش FRP در شبیه‌سازی (که در کرنش کمتر از نصف کرنش شکست واقعی FRP اتفاق می‌افتد) مشابه نتایج آزمایش‌ها است.



شکل ۱۰. مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی نمونه چهارم [۱۰]

۴. مدلسازی

در این بخش، پارامترهای مورد مطالعه شامل بررسی اثر میلگردهای عرضی موجود در اجزای مرزی و اعمال تقویت FRP به‌طور کامل تشریح خواهند شد. یکی از جنبه‌های مورد بررسی، اثر کاهش میلگردهای عرضی در محل اجزای مرزی بر رفتار دیوار است. در این مطالعه، فاصله خاموت‌ها در اجزای مرزی دیوارها به ۲ و ۴ برابر مقدار آن در دیوار طراحی‌شده تغییر داده شده است. در این تحقیق، دو نمونه دیوار برشی بررسی شده‌اند:

نمونه اول، دیوار برشی ۱۳ طبقه‌ای از یک مجتمع مسکونی واقع در اصفهان است که با استفاده از آیین‌نامه ACI ۳۱۸ طراحی شده است. این مدل‌سازی با مقیاس یک‌چهارم انجام شده است (شکل ۱۱).

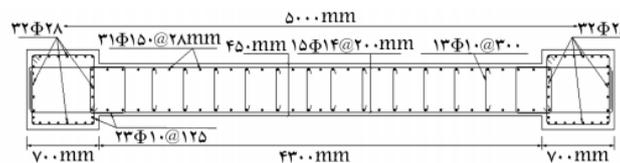
نمونه دوم، دیوار آزمایش شده به روش مبتنی بر تغییر مکان طراحی شده است.

۱-۴ اثر میلگردهای عرضی در اجزای مرزی

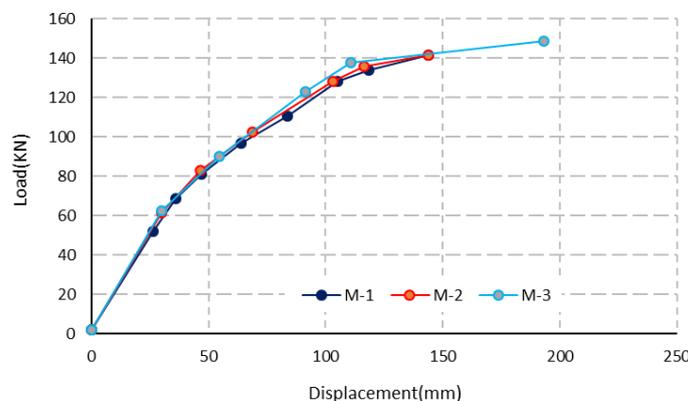
در شکل‌های ۱۲ و ۱۳، نمونه‌های مختلف دیوارهای برشی مورد مطالعه نشان داده شده است. در این شکل‌ها، نمونه ۱۰۰-۱۳ نمایانگر نمونه استاندارد طراحی شده طبق آیین‌نامه است. نمونه‌های M-1 و M-2 به ترتیب دیوارهایی هستند که در آن‌ها فاصله فولادهای عرضی جزء مرزی به دو و چهار برابر مقدار آیین‌نامه‌ای افزایش یافته است. همچنین، نمونه M-3 در شکل ۱۲ دیواری را نمایش می‌دهد که در آن از فولاد عرضی در اجزای مرزی استفاده نشده و طرح لرزه‌ای ندارد. این مدل‌سازی‌ها به بررسی تأثیر افزایش فاصله میلگردهای عرضی در اجزای مرزی بر رفتار دیوار می‌پردازد.

نتایج نشان‌دهنده این است که افزایش فاصله میلگردهای عرضی جزء مرزی منجر به کاهش جابه‌جایی دیوار و کاهش ظرفیت شکل‌پذیری آن می‌شود. در شرایطی که فاصله میلگردها به دو برابر مقدار آیین‌نامه‌ای افزایش یافته باشد، در داده‌های شکل ۱۲، برای نمونه M-1 کاهش جابه‌جایی برابر ۲۱ درصد نسبت به نمونه استاندارد (۱۰۰-۱۳) مشاهده می‌شود. برای نمونه M-2، که فاصله میلگردها چهار برابر مقدار آیین‌نامه‌ای است، کاهش جابه‌جایی برابر ۱۲ درصد در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود. در دیوار M-3 که فاقد فولاد عرضی در اجزای مرزی است، جابه‌جایی نهایی به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد (کاهش ۳۵ درصدی نسبت به دیوار استاندارد) زمانی که فاصله میلگردها به چهار برابر مقدار آیین‌نامه‌ای افزایش یابد.

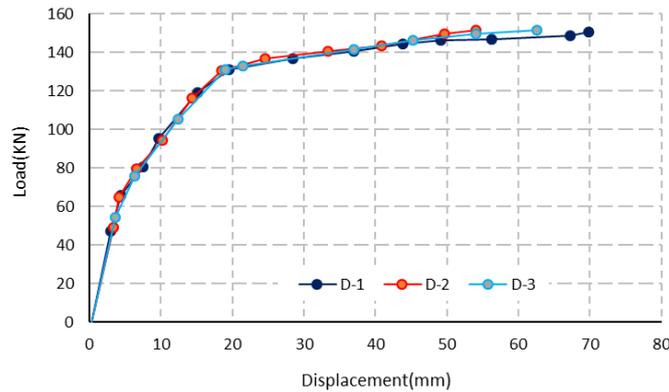
داده‌های مربوط به جابه‌جایی‌ها در شکل ۱۲ و ۱۳ این نتایج را تأیید می‌کنند. برای نمونه M-1 در شکل ۱۲، جابه‌جایی‌ها از ۲۶،۲۹۷۶ میلی‌متر در بار ۰،۲۷۵۸۶۲ بار تا ۱۴۳،۹۴۵ میلی‌متر در بار ۴۹،۱۰۳۴ بار به میزان ۲۱ درصد کاهش می‌یابد. همچنین در نمونه M-2، جابه‌جایی‌ها از ۲۹،۷۵۷۸ میلی‌متر تا ۱۴۳،۹۴۵ میلی‌متر در بار مشابه ۴۹،۱۰۳۴ بار، کاهش ۱۲ درصدی را نشان می‌دهند. در نمونه M-3، در همان بازه بارگذاری، جابه‌جایی‌ها به‌طور قابل توجهی کاهش یافته و تغییرات جابه‌جایی‌ها به‌طور کامل در داده‌ها قابل مشاهده است، که نشان‌دهنده کاهش ۳۵ درصدی است. این نتایج نشان می‌دهند که افزایش فاصله میلگردهای عرضی و کاهش تراکم فولادهای عرضی تأثیر زیادی بر رفتار دینامیکی دیوار دارد و ممکن است منجر به کاهش ظرفیت دیوار برای تحمل جابه‌جایی‌های بزرگ و ظرفیت شکل‌پذیری شود.



شکل ۱۱. جزئیات مقطع دیوار مدل D



شکل ۱۲. تأثیر میلگردهای عرضی در اجزای مرزی دیوار مدل M



شکل ۱۳. تأثیر کاهش میلگردهای عرضی در اجزای مرزی دیوار مدل D

۴-۲ اثر FRP در اجزای مرزی

این مطالعه به بررسی تأثیر تقویت دیوارهای برشی با استفاده از مواد FRP در اجزای مرزی می‌پردازد. دیوارهای برشی معمولاً برای مقاومت در برابر بارهای جانبی در سازه‌های بتنی استفاده می‌شوند و به دلیل ضعف‌هایی در طراحی، مانند فاصله زیاد میلگردهای عرضی در اجزای مرزی، ممکن است رفتار لرزه‌ای نامطلوبی داشته باشند. در این تحقیق، دو مدل از دیوارها در نظر گرفته شده‌اند:

مدل M: دیواری با فاصله میلگردهای عرضی در اجزای مرزی که دو برابر مقدار آیین‌نامه‌ای است. این دیوار به‌عنوان نمونه‌ای با ضعف لرزه‌ای در نظر گرفته می‌شود. هدف از این مطالعه بررسی تأثیر تقویت با FRP در اصلاح رفتار دیوار است.
مدل D: دیواری با طراحی استاندارد که در آن میلگردهای عرضی به‌طور مناسب و مطابق با آیین‌نامه‌ها در اجزای مرزی قرار دارند. این دیوار برای مقایسه رفتار دیوارهای تقویت‌شده با FRP در نظر گرفته شده است.
در این مطالعه، برای بررسی اثرات مختلف تقویت دیوارها با FRP، سه ارتفاع مختلف برای پوشش‌دهی FRP در نظر گرفته شد: برای مدل M: سه ارتفاع مختلف برای تقویت FRP در نظر گرفته شدند:

ارتفاع برابر با ارتفاع مفصل سه طبقه اول: این ارتفاع نمایانگر ناحیه‌ای است که بیشترین تغییر شکل‌ها و آسیب‌ها در آن مشاهده می‌شود. با تقویت این بخش، هدف افزایش شکل‌پذیری و کاهش آسیب در مفصل است.
ارتفاع برابر با طول افقی دیوار: این تقویت به‌منظور افزایش مقاومت در برابر بارهای جانبی بر روی دیوار در نظر گرفته شده است.
ارتفاع برابر با نصف طول افقی دیوار: این حالت برای بررسی تأثیرات تقویت نیمی از دیوار و مقایسه آن با دو حالت قبلی انتخاب شده است.

در شکل ۱۴، نتایج نشان می‌دهند که با افزایش ارتفاع تقویت‌شده با FRP، رفتار دیوار به‌طور قابل توجهی به رفتار دیوار استاندارد نزدیک می‌شود. در دیوار M، اضافه کردن یک لایه FRP به دیوار ضعیف موجب افزایش جابه‌جایی دیوار و بهبود ظرفیت شکل‌پذیری آن می‌شود. این بهبود در دیوارهای تقویت‌شده نسبت به دیوارهای غیرتقویت‌شده مشهود است.

برای مدل D: در این مدل، سه ارتفاع مختلف به‌منظور بررسی تأثیر FRP بر رفتار دیوار در نظر گرفته شده‌اند: تقویت تمام ارتفاع دیوار (۳۶۰۰ میلی‌متر): تقویت این بخش تأثیر عمده‌ای در بهبود عملکرد دیوار در برابر بارهای جانبی دارد. تقویت ارتفاع برابر با طول افقی دیوار (۱۲۰۰ میلی‌متر): این تقویت موجب بهبود شکل‌پذیری دیوار در نواحی حساس می‌شود. تقویت با ارتفاع نصف طول افقی دیوار: در این حالت، تقویت محدود به بخش‌های خاصی از دیوار انجام می‌شود و هدف بررسی اثرات تقویت جزئی است.

در شکل ۱۵، مشاهده می‌شود که در دیوار D، افزودن یک لایه FRP تأثیر قابل توجهی در بهبود رفتار دیوار ندارد. این امر می‌تواند به دلیل وجود خاموت و محصورشدگی مناسب در بخش‌های مرزی دیوار باشد که باعث می‌شود این بخش‌ها از نظر سازه‌ای تقویت‌شده به‌طور طبیعی مقاوم‌تر باشند.

برای بررسی تأثیر تعداد لایه‌های FRP در افزایش ظرفیت باربری و شکل‌پذیری دیوارها، تنها ناحیه مفصل دیوارها در نظر گرفته شده است. به‌طور خاص، ارتفاع ۳۵۰۰ میلی‌متر در مدل M و ارتفاع ۶۰۰ میلی‌متر در مدل D به‌عنوان نواحی تقویت‌شده با FRP انتخاب شدند.

در شکل‌های ۱۶ و ۱۷، مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد لایه‌های FRP در این نواحی، ظرفیت شکل‌پذیری و باربری دیوار افزایش می‌یابد. به‌طور خاص، استفاده از پنج لایه کامپوزیت در دیوار M موجب افزایش ۳۰ درصدی جابه‌جایی نسبت به دیوار استاندارد و در دیوار D، افزایش ۶۷ درصدی جابه‌جایی نسبت به حالت بدون تقویت مشاهده می‌شود. این نتایج نشان می‌دهند که استفاده از FRP در دیوارهای ضعیف می‌تواند عملکرد دیوارها را به‌طور قابل توجهی بهبود بخشد.

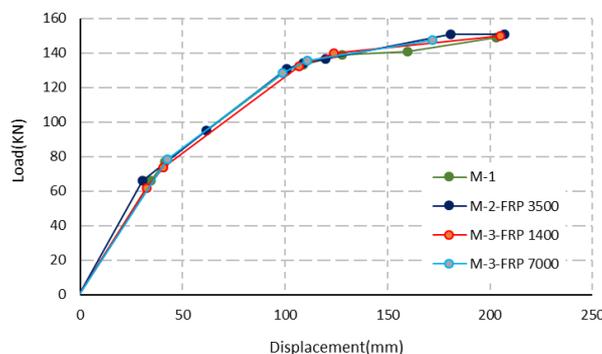
مقایسه تقویت اجزای مرزی با تقویت تمام طول افقی دیوار

در شکل ۱۸، مقایسه‌ای بین دو نوع تقویت انجام شده است. در نمونه M، تنها اجزای مرزی دیوار در ناحیه مفصل تقویت شده‌اند، در حالی که در نمونه D، تمام طول افقی دیوار با FRP محصور شده است.

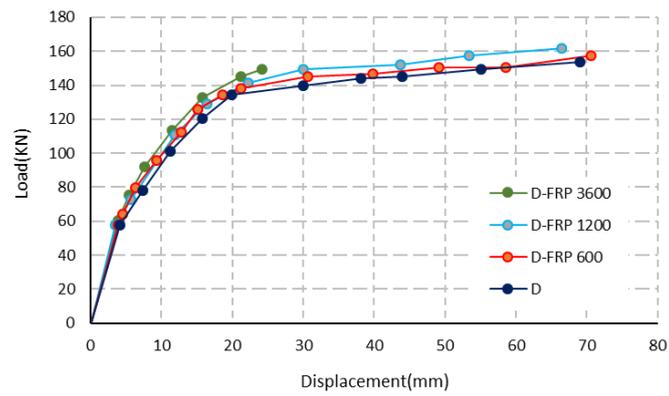
نتایج نشان می‌دهند که تقویت تمام طول افقی دیوار با دور پیچ FRP نسبت به تقویت تنها بخش‌های مرزی، موجب افزایش شکل‌پذیری دیوار نمی‌شود. با این حال، استفاده از دور پیچ کامپوزیتی به‌صورت کامل اطراف دیوار، ظرفیت باربری دیوار را افزایش می‌دهد. این افزایش در نمونه D بیشتر است و حدود ۲۰ درصد می‌باشد. بنابراین، در حالی که تقویت بخش‌های مرزی می‌تواند به‌طور مؤثر شکل‌پذیری و مقاومت در برابر تغییر شکل‌ها را بهبود بخشد، تقویت تمام طول دیوار به‌ویژه در افزایش ظرفیت باربری مؤثر است.

در شکل ۱۹، مقایسه عملکرد دو نوع تقویت در دیوار D نشان می‌دهد که تقویت کامل طول دیوار با FRP نسبت به تقویت فقط اجزای مرزی، در بهبود شکل‌پذیری دیوار تأثیر کمتری دارد، ولی در ظرفیت باربری تأثیر قابل توجهی دارد. افزایش ۲۰ درصدی در ظرفیت باربری دیوار به‌طور واضح نشان می‌دهد که تقویت کامل طول دیوار با FRP می‌تواند به‌ویژه در سازه‌هایی که نیاز به تحمل بارهای جانبی زیاد دارند، مفید باشد.

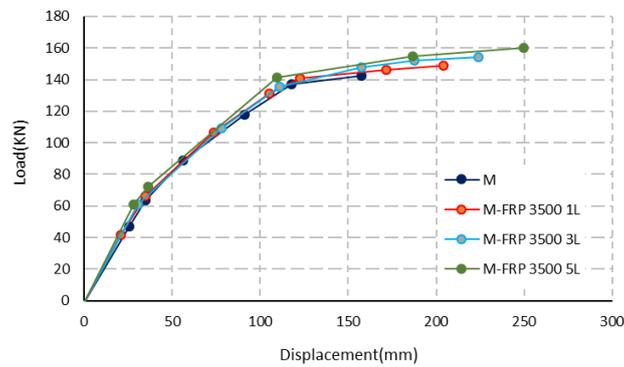
تقویت دیوارهای برشی با استفاده از FRP می‌تواند به‌طور مؤثر عملکرد دیوارها را بهبود بخشد. در دیوارهایی که میلگردهای عرضی در اجزای مرزی به‌درستی قرار ندارند، تقویت با FRP می‌تواند ظرفیت شکل‌پذیری و باربری را افزایش دهد. همچنین، تقویت تمام طول دیوار با FRP، علی‌رغم اینکه شکل‌پذیری دیوار را به میزان قابل توجهی افزایش نمی‌دهد، در افزایش ظرفیت باربری دیوار مؤثر است. استفاده از تعداد لایه‌های بیشتر FRP نیز باعث افزایش قابل توجه جابه‌جایی و بهبود عملکرد دیوار در برابر بارهای جانبی و محوری می‌شود.



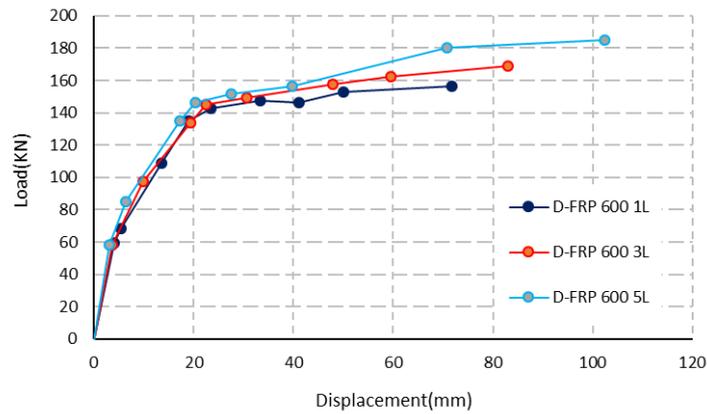
شکل ۱۴. تغییر ارتفاع دیوار مورد تقویت عرضی مدل M



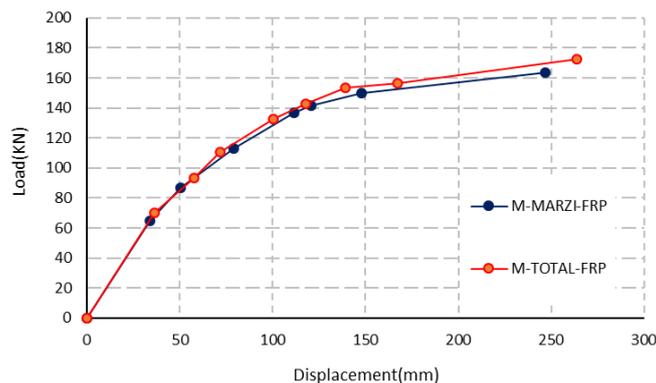
شکل ۱۵. تغییر ارتفاع دیوار مورد تقویت عرضی مدل D



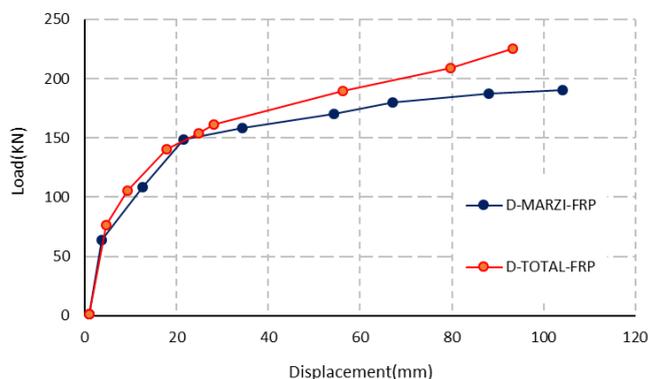
شکل ۱۶. اثر تعداد لایه ها در تقویت المان های مرضی مدل M



شکل ۱۷. اثر تعداد لایه ها در تقویت المان های مرضی مدل D



شکل ۱۸. مقایسه تقویت اجزای مرزی با حالتی که دورتادور دیوار با FRP تقویت شده در مدل M



شکل ۱۹. مقایسه تقویت اجزای مرزی با حالتی که دورتادور دیوار با FRP تقویت شده در مدل D

۵. نتایج

۱- اثر تقویت با FRP بر مدل M (دیواری ضعیف):

تقویت مدل M با استفاده از FRP باعث افزایش ۳۰ درصدی جابه‌جایی در مقایسه با دیوار استاندارد شده است. این افزایش جابه‌جایی نشان‌دهنده بهبود قابل توجه در ظرفیت شکل‌پذیری دیوار است، که به دلیل ضعف در ظرفیت باربری و عدم وجود محصورشدگی مناسب در اجزای مرزی دیوار می‌باشد. در این مدل، استفاده از FRP توانسته این کمبودها را جبران کرده و عملکرد دیوار را بهبود بخشد.

۲- اثر تقویت با FRP بر مدل D (دیواری با طراحی مناسب):

در مدل D، که دارای طراحی استاندارد و خاموت‌های کافی در اجزای مرزی است، تغییرات در شکل‌پذیری و جابه‌جایی‌ها مشاهده نمی‌شود. علت این عدم تغییرات به وجود محصورشدگی مناسب و ظرفیت باربری بالا در بخش‌های مرزی دیوار است. در این دیوار، افزودن FRP تنها افزایش ۲۰ درصدی ظرفیت باربری را به همراه دارد، اما تأثیر زیادی در شکل‌پذیری ندارد.

۳- اثر ارتفاع تقویت‌شده با FRP:

- در هر دو مدل M و D، سه ارتفاع مختلف برای تقویت با FRP در نظر گرفته شده‌اند.
- در مدل M، افزایش ارتفاع تقویت‌شده به‌ویژه در ناحیه مفصل موجب بهبود چشمگیری در رفتار دیوار می‌شود.
- در مدل D، به دلیل طراحی مناسب، اثر تقویت در بخش‌های مختلف دیوار کمتر مشهود است.

۴- اثر افزایش تعداد لایه‌های FRP:

- در هر دو مدل، افزایش تعداد لایه‌های FRP از یک لایه به پنج لایه موجب بهبود قابل توجه در ظرفیت باربری و شکل‌پذیری دیوارها می‌شود.
 - در مدل M، افزایش تعداد لایه‌ها باعث افزایش ۳۰ درصدی جابه‌جایی و بهبود عملکرد دیوار در برابر تغییر شکل‌ها می‌شود.
 - در مدل D، افزایش لایه‌ها باعث افزایش ۶۷ درصدی جابه‌جایی و بهبود ظرفیت شکل‌پذیری می‌شود، ولی تأثیر کمتری در افزایش باربری دارد.
- ۵- اثر تقویت تمام طول دیوار VS تقویت بخش‌های مرزی:

- تقویت تمام طول دیوار با FRP موجب افزایش ۲۰ درصدی ظرفیت باربری در مدل D می‌شود، زیرا تمام طول دیوار تحت تقویت قرار می‌گیرد و ظرفیت باربری کلی دیوار افزایش می‌یابد.
- تقویت فقط اجزای مرزی دیوار تأثیر کمتری در افزایش شکل‌پذیری دیوار دارد و بیشتر بر بخش‌های خاصی از دیوار اثرگذار است.

۶. نتیجه‌گیری

نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که تقویت دیوارهای برشی با استفاده از میلگردهای عرضی و FRP تأثیر قابل توجهی بر رفتار لرزه‌ای و شکل‌پذیری دیوارها دارد. در ابتدا، افزایش فاصله میلگردهای عرضی در اجزای مرزی به‌طور مستقیم بر کاهش جابه‌جایی دیوار و کاهش ظرفیت شکل‌پذیری آن تأثیر می‌گذارد. در دیوارهایی که میلگردهای عرضی در اجزای مرزی کاهش یافته‌اند، شاهد کاهش قابل توجهی در جابه‌جایی‌ها و ظرفیت تحمل دیوارها در برابر بارهای جانبی هستیم. به‌ویژه، دیوارهایی که فاقد میلگردهای عرضی در اجزای مرزی هستند، جابه‌جایی‌های بیشتری را تجربه می‌کنند که نشان‌دهنده ضعف در ظرفیت شکل‌پذیری دیوار می‌باشد.

در مورد اثر تقویت با FRP، نتایج نشان می‌دهند که تقویت دیوارهای ضعیف با استفاده از FRP باعث افزایش قابل توجه ظرفیت شکل‌پذیری و جابه‌جایی‌ها می‌شود، به‌ویژه در دیوارهایی که میلگردهای عرضی به‌طور مناسب در اجزای مرزی قرار ندارند. استفاده از FRP در مدل M موجب افزایش ۳۰ درصدی جابه‌جایی و بهبود عملکرد دیوار در برابر بارهای جانبی و محوری می‌شود. در حالی که در مدل D که دارای طراحی استاندارد است، تأثیر تقویت با FRP بر جابه‌جایی‌ها و شکل‌پذیری دیوار کمتر مشهود است، اما همچنان افزایش ۲۰ درصدی در ظرفیت باربری دیوار مشاهده می‌شود.

مقایسه اثر تقویت تمام طول دیوار با FRP و تقویت اجزای مرزی نشان می‌دهد که تقویت تمام طول دیوار، ظرفیت باربری دیوار را بیشتر افزایش می‌دهد، در حالی که تقویت اجزای مرزی بیشتر بر بهبود شکل‌پذیری و مقاومت در برابر تغییر شکل‌های موضعی تأثیرگذار است. این نتایج نشان می‌دهند که انتخاب نوع و میزان تقویت با FRP باید بر اساس نیازهای خاص سازه و نوع بارگذاری انتخاب شود.

در مجموع، تقویت با FRP در دیوارهای ضعیف و به‌ویژه در دیوارهایی که میلگردهای عرضی به‌طور مناسب در اجزای مرزی قرار ندارند، می‌تواند به‌طور مؤثری عملکرد دیوار را بهبود بخشد. در عین حال، در دیوارهایی که طراحی مناسب دارند، تأثیر تقویت با FRP در افزایش شکل‌پذیری و جابه‌جایی‌ها محدودتر است، اما در افزایش ظرفیت باربری مؤثر است.

۷. پیشنهادات برای تحقیقات آینده

- اثرات مختلف FRP در دیوارهای با طراحی‌های لرزه‌ای مختلف

با توجه به این که FRP تأثیرات مختلفی در دیوارهای با طراحی‌های متفاوت دارد، تحقیقاتی که به بررسی اثرات FRP بر دیوارهایی با طراحی‌های مختلف لرزه‌ای پرداخته و بهینه‌سازی نوع و تعداد لایه‌های FRP برای این طراحی‌ها را هدف قرار دهند، می‌تواند به بهبود عملکرد سازه‌ها کمک کند.

- تأثیر FRP در دیوارهای برشی با بارگذاری دینامیکی

تحقیقات آینده می‌توانند به بررسی تأثیر تقویت با FRP در دیوارهای برشی تحت بارهای دینامیکی و زلزله‌ای بپردازند. این مطالعات می‌توانند به‌ویژه برای دیوارهای ضعیف یا غیرلرزه‌ای اهمیت داشته باشند.

- مطالعه بر روی تأثیر FRP بر دیوارهای مرکب

بررسی تأثیر FRP بر دیوارهای مرکب، شامل دیوارهای با پوشش‌های مختلف یا ترکیبی از مصالح تقویتی، می‌تواند به توسعه روش‌های نوین تقویت سازه‌ها کمک کند.

منابع

1. Kheyroddin, A., & Naderpour, H. (2016). *Nonlinear finite element analysis of R/C shear walls retrofitted using externally bonded steel plates and FRP sheets*. 1st International Structural Specialty Conference, 23–26, May.
2. Lombard, J.C. (1997). *Seismic strengthening and repair of reinforced concrete shear walls using externally bonded carbon fiber tow sheets* (Ph.D. thesis). Carleton University.
3. Hiotakis, S., Lau, D.T., & Londono, N. (2014). *Research on seismic retrofit and rehabilitation of reinforced concrete shear walls using FRP materials*. Carleton University, Ottawa, Canada.
4. Salonikios, T.N., Kappos, A.J., Tegos, L.A., & Penelis, G.G. (2020). *Cyclic load behavior of low-slenderness reinforced concrete walls: Failure modes, strength and deformation analysis, and design implications*. *ACI Structural Journal*, 97(1), Jan.–Feb.
5. Aejaz, A. (1990). *Reinforced concrete structural walls with staggered door opening configurations under reversed cyclic loading* (Ph.D. thesis). University of Michigan.
6. Oesterle, R.G., & Fiorato, A.E. (1980). *Free vibration tests of structural concrete walls*. Report to the National Science Foundation, Portland Cement Association.
7. Oesterle, R.G., Fiorato, A.E., Aristizábal-Ochoa, J.D., & Corley, W.G. (1980). *Hysteretic response of reinforced concrete structural walls*. In *Reinforced Concrete Structures Subjected to Wind and Earthquake Forces* (Special Publication No. 63, pp. 243–274). American Concrete Institute.
8. Oesterle, R.G., Fiorato, A.E., & Corley, W.G. (1980). *Reinforcement details for earthquake-resistant structural walls*. *Concrete International*, American Concrete Institute, 2(12), 55–66.
9. Aejaz, A., & Wirth, J.K. (1991). *R/C structural walls with staggered door openings*. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 117(5), 1514–1531.
10. Tasnimi, A.A. (2020). *Strength and deformation of mid-rise shear walls under load reversal*. *Engineering Structures*, 22, 311–322.
11. Su, R.K.L., & Wong, S.M. (2017). *Seismic behavior of slender reinforced concrete shear wall under high axial load ratio*. *Engineering Structures*, 29, 1957–1965.
12. Thomsen, J.H., & Wallace, J.W. (1995). *Displacement-based design of R/C structural walls: An experimental investigation of walls with rectangular and T-shaped cross-sections*. Report to the National Science Foundation, Clarkson University.
13. Perry, A., Ahmed, M.M., & Bryson, M. (2017). *Test of high-rise core wall: Effective stiffness for seismic analysis*. *ACI Structural Journal*, 104(5), 549–559.

۱۴. جلالی نژاد، مهدی. «مقاوم سازی دیوار برشی فولادی با استفاده از الیاف مسلح پلیمری» نوآوری در علوم و تکنولوژی. ۴۲۳-۴۱۲، ۲۳ مهرماه ۹۵.
۱۵. حمدی دارانی، فرهاد. سروقدمقدم، عبدالرضا. «بررسی تاثیر مشخصات المان مرزی در رفتار دیوارهای برشی بتنی کوتاه» مهندسی عمران شریف. دوره ی ۲-۳۰، شماره ۱/۱، ص ۱۱۹-۱۲۷، بهار ۱۳۹۳.
۱۶. رهایی، علیرضا. راشدی، سیدهادی. «بررسی شکل پذیری مجموعه دیوار باربر بتنی با جزء مرزی» نشریه مهندسی عمران امیر کبیر. دوره ۴۹، شماره ۱، ۱۳-۲۱، ۱۳۹۶.
۱۷. قاسم زاده، مجتبی. قلعه نوی، منصور. بحر پیما، عبدالحمید. «بررسی تاثیر FRP بر میزان جذب انرژی دیوار برشی فولادی به همراه بازشو» نشریه ی علمی - پژوهشی مهندسی سازه و ساخت. سال دوم، شماره ۱، ۳۴-۴۵، ۱۳۹۴.
۱۸. ناطقی الهی، فریبرز. خزایی پول، مسعود. «مطالعه ی آزمایشگاهی سیستم دیوار برشی فولادی با ورق های پرکننده کامپوزیتی تحت بارگذاری چرخه ای» نشریه ی مهندسی عمران فردوسی. سال بیست و هفتم، شماره ی یک، ۱۶۹-۱۵۶، ۱۳۹۴.
۱۹. ولی زاده، حامد. قلعهکی، مجید. «طراحی براساس عملکرد پلاستیک دیواربرشی فولادی در قاب بتن آرمه» نشریه ی علمی - پژوهشی مهندسی سازه و ساخت. دوره ۸، شماره ی ۴، ۲۱۴-۲۳۷، ۱۴۰۰.
۲۰. مستوفی نژاد، داود. سعادت مند، حسن. «پیش بینی رفتار بتن محصور در کامپوزیت FRP به روش اجزای محدود» نشریه ی بین المللی علوم مهندسی دانشگاه علم و صنعت ایران. شماره ۲، جلد ۱۸، ۶۴-۵۵، ۱۳۸۶.
21. Zhang, X., Liu, S., & Li, Y. (2023). "Performance of Concrete Shear Walls Strengthened with Carbon FRP under Lateral Loading." *Journal of Structural Engineering*, 149(5), 04023034.
22. Wang, Y., Chen, J., & Zhang, Z. (2022). "Seismic Performance of High-Rise Concrete Shear Walls Strengthened with FRP." *Journal of Composites for Construction*, 26(2), 04022043.
23. Liu, W., Zhang, P., & Li, X. (2023). "Optimization of FRP Reinforced Concrete Shear Wall Design Using Artificial Intelligence." *Computational Materials Science*, 207, 111214.
24. Ahmed, M.M. (2020). *Linear and nonlinear flexural stiffness models for concrete walls in high-rise buildings* (Ph.D. thesis). University of British Columbia.
25. Abaqus Inc. (2017). *Abaqus/Theory User Manual, Version 6.7*.
۲۶. مستوفی نژاد، داود. (۱۳۹۰). *سازه های بتن آرمه - جلد اول*. چاپ ۲، انتشارات ارکان دانش.
27. Paulay, T. (1980). *Earthquake-resisting shear walls: New Zealand design trends*. *ACI Structural Journal*, 77(3), 144-152.
28. Horrigmoe, G., Sather, I., & Sand, B. (2017). *Validation of nonlinear finite element modeling of reinforced concrete structures attacked by corrosion*. Report of Sustainable Development Global Change and Ecosystems Integrated Project.
29. Hosseini, A., Khaloo, A.R., & Fadaee, S. (2015). *Seismic performance of high-strength concrete square columns confined with carbon fiber reinforced polymers (CFRPs)*. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 32(3).