

بررسی رفتار لرزه‌ای دیوارهای برشی بتن آرمه تقویت شده با ورق‌های پلیمری مسلح شده با الیاف

رؤیا موسی پور^{*}، مصطفی رضوانی شریف، سید بهرام بهشتی اول

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۰۷/۰۸

بازنگری: ۱۳۹۸/۱۲/۰۲

پذیرش: ۱۳۹۹/۰۲/۲۴

ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۳/۰۸

کلمات کلیدی:

دیوار برشی بتن مسلح

دیوار برشی بلندمرتبه

تقویت با ورق FRP

خلاصه: دیوار برشی بتن آرمه از جمله سیستم‌های مقاوم جانبی متداول در ساختمان‌های میان مرتبه و بلندمرتبه محسوب می‌شود. بررسی رفتار ساختمان‌ها در طی زلزله‌های شدید گذشته نیز عملکرد مناسب این دیوارها را در کنترل آسیب‌های سازه‌ای و غیرسازه‌ای، به حداقل رساندن خسارات وارده و محدود کردن جابه‌جایی نسبی طبقات نشان می‌دهد. تقویت و بهسازی این عناصر می‌تواند تأثیر بسزایی در بهبود پاسخ و رفتار سازه اولیه داشته باشد. یکی از روش‌های تقویت این نوع دیوارها، استفاده از ورق‌های پلیمری مسلح شده با الیاف (FRP) است که امروزه به طور گسترده‌ای در بهسازی ساختمان‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. مرور ادبیات فنی نشان می‌دهد که مطالعه بر روی نحوه رفتار دیوارهای برشی موجود در ساختمان‌های میان مرتبه و بلندمرتبه تحت تقویت با ورق‌های FRP بسیار کمتر از دیوارهای موجود در ساختمان‌های با ارتفاع کم (دیوارهای کوتاه) مورد توجه قرار گرفته است. به این ترتیب، در این تحقیق رفتار لرزه‌ای دیوارهای برشی بتن آرمه موجود در ساختمان‌های میان مرتبه و بلندمرتبه در اثر تقویت با ورق‌های FRP مورد بررسی قرار گرفته است. دیوارهای مورد نظر این پژوهش شامل سه گروه دیوار با ارتفاع ۱۶، ۲۲/۴ و ۳۲ متری است که با استفاده از نرم‌افزار اجزاء محدود ABAQUS تحت بارگذاری محوری و جانبی یک‌طرفه مورد تحلیل قرار گرفته و رفتار آن‌ها تحت تقویت با دو نوع ورق تقویتی CFRP و GFRP و دو نوع چیدمان ضربدری و دورپیچ افقی بررسی شده است. نتایج، افزایش ظرفیت باربری و شکل‌پذیری و جذب انرژی دیوارهای برشی بتنی میان مرتبه و بلندمرتبه را در اثر تقویت با ورق‌های FRP نشان می‌دهد.

۱- مقدمه

و ایجاد پدیده‌هایی همچون خزش و خوردگی نیز باعث می‌شوند که دیوارهای برشی در ساختمان‌های موجود به تقویت و بهسازی نیاز داشته باشند. تقویت و بهسازی این عناصر سازه‌ای می‌تواند تأثیر بسزایی در بهبود پاسخ و رفتار سازه اولیه داشته باشد.

در سال‌های اخیر، مواد کامپوزیت^۱ FRP (پلیمرهای مسلح شده با الیاف)، به دلیل مزایایی که نسبت به سایر روش‌های بهسازی دارد، بسیار مورد توجه قرار گرفته است. خصوصیات مناسبی همچون سهولت کاربرد، نسبت مقاومت به وزن بالا و عدم تغییر در ظاهر و معماری اعضای سازه‌ای موجود، این مواد را از گزینه‌های اولیه پروژه‌های بهسازی نموده است. به این ترتیب، استفاده از ورق‌های

دیوارهای برشی بتن آرمه به دلیل سختی درون صفحه زیاد و ظرفیت باربری بالا یکی از سیستم‌های مقاوم جانبی متداول در سازه‌های میان مرتبه و بلندمرتبه محسوب می‌شوند. دیوارهای برشی موجود در ساختمان‌های احداث شده در دهه‌های گذشته اصولاً از ضوابط آیین‌نامه‌های کنونی فاصله دارند و در بسیاری از موارد به منظور تقویت سیستم باربر جانبی ساختمان‌های مذکور به بازنگری و طراحی مجدد این عناصر نیاز است. عوامل دیگری همچون تجربه زلزله‌های متفاوت در طول عمر سازه و ایجاد تنش‌های پسماند، تغییر ریسک خطرپذیری لرزه‌ای منطقه به دلایل مختلف، افزایش عمر سازه

1 Fiber Reinforced Polymer

^{*} نویسنده عهده‌دار مکاتبات: royamoosapoor@gmail.com

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لایسنس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لایسنس، از آدرس <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode> دیدن فرمائید.



FRP، می‌تواند یکی از بهترین روش‌ها در بهبود رفتار لرزه‌ای دیوارهای برشی باشد.

بررسی تحقیقات گذشته نشان می‌دهد مطالعه آزمایشگاهی و تحلیلی در زمینه دیوارهای برشی بلند و تقویت آن‌ها با کامپوزیت‌های FRP بسیار کم مورد توجه قرار گرفته است و بیشتر تحقیقات در زمینه تقویت دیوارهای برشی کوتاه با نسبت ابعادی کوچک‌تر از ۲ انجام گرفته است. که این امر می‌تواند به دلیل ماهیت پیچیده رفتار دیوار برشی و پیچیدگی‌های موجود در آزمایش و مدل‌سازی این عناصر باشد. در این بین مطالعات مربوط به مدل‌سازی تحلیلی یا عددی و شبیه‌سازی پاسخ لرزه‌ای به نسبت مطالعات آزمایشگاهی تعداد کمتری از تحقیقات را به خود اختصاص می‌دهد. علت این موضوع ممکن است مشکلات مدل‌سازی اجزاء محدود، شامل در نظر گرفتن رفتار بتن، مدل‌سازی رفتار اتصال بین بتن و FRP، شناسایی نوع شکست و شبیه‌سازی رفتار FRP باشد.

در این مقاله رفتار دیوارهای برشی بتن آرمه میان‌مرتبه و بلندمرتبه در حالت تقویت با ورق‌های کامپوزیتی FRP با استفاده از نرم‌افزار اجزاء محدود ABAQUS بررسی شده و میزان تأثیر این تقویت بر ظرفیت باربری، شکل‌پذیری، سختی و جذب انرژی نمونه‌ها بیان می‌شود. تمرکز اصلی این مقاله بر بررسی عملکرد دیوارهای بلند تقویتی تحت ترکیب بار محوری و بار جانبی به صورت مونوتونیک است.

مطالعات آزمایشگاهی و تحلیلی مختلفی در راستای دیوارهای برشی بتن آرمه تقویت شده با FRP با نسبت‌های ابعادی مختلف انجام شده است که در اینجا چند مورد از تحقیقات تجربی به اختصار بیان می‌شوند. استفاده از مواد مرکب FRP برای بهسازی دیوارهای برشی اولین بار در سال ۲۰۰۰ توسط لومبارد^۱ [۱] به صورت آزمایشگاهی و تحلیلی انجام شد. او و همکارانش یک دیوار برشی با نسبت ابعادی ۱/۲ را یک بار با استفاده از ورق‌های عمودی FRP و بار دیگر با استفاده از دو لایه FRP افقی و یک لایه عمودی در بین آن‌ها تقویت کرده و تحت بار چرخه‌ای مورد مطالعه قرار دادند. در این مطالعه لومبارد از سیستم مهاری نبشی فولادی برای مهار کردن ورق‌های FRP استفاده نمود. نتایج نشان داد که استفاده از ورق‌های CFRP باعث افزایش ظرفیت باربری دیوارها می‌شود. پس از لومبارد، آنتونیادس^۲ [۱] چهار

نمونه دیواربرشی کوتاه را با نسبت ابعادی ۱ به منظور افزایش هر دو ظرفیت برشی و خمشی، با استفاده از دورپیچ افقی ورق‌های FRP مورد تقویت و تعمیر قرار داد و به این نتیجه رسید که ظرفیت برشی دیوارها با دورپیچ ورق‌های FRP افزایش می‌یابد. پترسون و میشل^۳ [۲] چهار نمونه دیواربرشی با رفتار خمشی (نسبت ابعادی ۲/۷) را که با استانداردهای طراحی قدیمی طراحی شده بود، با استفاده از دورپیچ افقی ورق‌های FRP و تقویت عناصر مرزی به منظور ارتقاء شکل‌پذیری و افزایش مقاومت برشی و ظرفیت جذب انرژی نمونه‌ها تقویت نمودند. هیوتاکیس^۴ [۳] در راستای تحقیق لومبارد به بهبود سیستم مهاری FRP و کنترل بهتر تغییرشکل خارج صفحه دیوارهای نمونه پرداخت. او دیوارهای با ابعاد مشابه آزمایش لومبارد را با استفاده از ورق‌های افقی و عمودی FRP اعمالی به هر وجه نمونه، تعمیر یا تقویت و از سیستم مهاری لوله‌ای برای مهار ورق‌های FRP استفاده کرد و توانست طرح بهسازی مناسب‌تری ارائه دهد. الندی^۵ [۴] ۱۰ نمونه دیوار برشی بتنی طراحی شده با جزئیات غیرشکل‌پذیر و نسبت ابعادی ۱/۱ را با استفاده از CFRP‌های تک‌جهته و دوجهته برای جلوگیری از شکست ترد برشی و لغزشی و افزایش میزان جذب انرژی آن‌ها تقویت کرد. در سال ۲۰۱۴ شاهین^۵ [۵] پاسخ لرزه‌ای سازه‌های قدیمی با دیوار برشی را با کمبود محصورسازی و میلگردهای عرضی مورد بررسی قرار داد. او در مطالعه خود از ۹ نمونه دیوار برشی با نسبت ارتفاع به طول ۰/۶۵ تا ۱/۲ استفاده نمود که تحت بارگذاری چرخه‌ای شبه‌استاتیکی بودند و ورق‌های CFRP را در هر دو جهت طولی و عرضی به سطح نمونه‌ها اعمال کرد. نتایج تحقیق نشان داد که سیستم FRP مانع شکست ترد برشی نمونه‌ها و بهبود پاسخ لرزه‌ای آن‌ها شده و به این ترتیب رفتار خمشی دیوار را تسهیل می‌نماید. شن و یانگ^۶ [۶] رفتار لرزه‌ای دیوارهای برشی بتن مسلح تقویت شده با BFRP را تحت بار چرخه‌ای بررسی کردند. برنامه آزمایشی آن‌ها شامل ۶ نمونه دیوار برشی بتنی با نسبت ابعادی ۱/۶ است که با طرح‌های متفاوت FRP تقویت شده‌اند. نتایج مطالعه نشان داد که کاربرد BFRP عملکرد لرزه‌ای دیوار برشی را بهبود می‌بخشد و باعث افزایش سختی سکانتی نهایی و ظرفیت جذب انرژی نمونه‌ها می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود تحقیقات آزمایشگاهی عموماً به بررسی

3 Paterson & Mitchell
4 Hiotakis
5 Elnady
6 Shen, D. Yang, Q.

1 Lombard
2 Antoniadis

شیرنشان [۱۲] یک نمونه دیوار برشی بتن آرمه کوتاه بازشودار با نسبت ابعادی ۱/۵ را در حالت تقویت با ورق های CFRP در نرم افزار ABAQUS مدل سازی و تحلیل نمودند. آن ها ۴ چیدمان مختلف از ورق های تقویتی را در اطراف بازشو مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که اعمال ورق های تقویتی به اطراف بازشو می تواند تا حد زیادی ظرفیت باربری و تغییرمکان دیوار را افزایش دهد.

۲- روش تحلیل

در این مطالعه تحلیل استاتیکی غیرخطی (پوش اور)^۵ برای تحلیل وضعیت دیوارهای برشی مورد استفاده قرار گرفته است. در این روش، بارگذاری به صورت جابه جایی-کنترل بر نمونه ها اعمال شده است، تا جایی که نمونه دچار آسیب جدی شده و ظرفیت باربری خود را از دست دهد. در این نوع تحلیل می توان حداکثر مقاومت و ظرفیت تغییرشکل دیوار برشی را تخمین زد.

۳- مدل اجزاء محدود

در این تحقیق، تحلیل غیرخطی با استفاده از نرم افزار تحلیل اجزاء محدود ABAQUS انجام شده است. در روش حل اجزاء محدود یک عنصر پیوسته به مجموعه ای از المان های کوچک تر و با ابعاد محدود تقسیم می شود. در حل عددی با استفاده از این روش، به منظور تقسیم بندی عنصر سازه ای به مجموعه ای از عناصر محدود آن را به وسیله المان های تعریف شده در نرم افزارهای اجزاء محدود به بخش های کوچک تری تقسیم می کنند. به این ترتیب، دیوار برشی بتنی با استفاده از المان های C³D⁸R، میلگردهای تقویتی با استفاده از المان های دو بعدی T³D² که در المان های C³D⁸R مدفون هستند، مدل سازی شده اند. ورق های FRP نیز به صورت دوبعدی با استفاده از المان های پوسته ای S⁴R و با رفتار لایه ای^۶ مدل شدند. با توجه به اینکه اندازه مش (المان) مورد استفاده در اعضا، در نتایج حاصل از مدل عددی بسیار تأثیرگذار است، لازم است تحلیل حساسیت مدل عددی به مش بندی در صحت سنجی مورد توجه قرار گیرد. شرایط مرزی پای دیوار به صورت گیردار شبیه سازی شده است.

۱-۳- مشخصات مواد

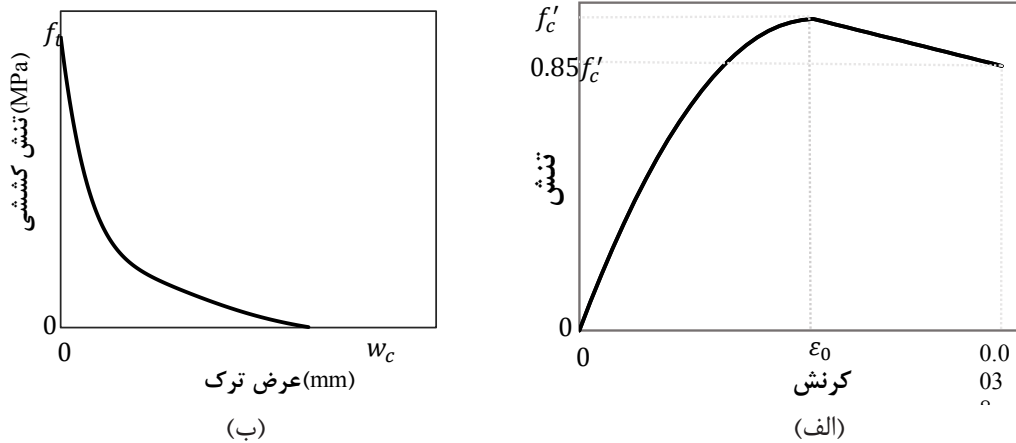
رفتار دیوارهای کوتاه تحت تقویت با ورق های FRP پرداخته اند. علت این موضوع می تواند پیچیدگی رفتار و کمبود امکانات و محدودیت های آزمایشگاهی در دیوارهای بلندمرتبه باشد.

مطالعات تحلیلی بر اعضای بتن آرمه خصوصاً دیوارهای برشی در سال های اخیر بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. با این حال هنوز هم تعداد اندکی از مطالعات موجود در ادبیات فنی را به خود اختصاص می دهد که در ادامه به تعدادی از آن ها اشاره می شود. اولین بار در سال ۲۰۰۲ بویل^۱ [۷] یک مدل دو بعدی اجزاء محدود تیر بتنی را با استفاده از یک برنامه عنصر محدود فرانسوی^۲، برای تحلیل رفتار خمشی اعضای بتنی تقویت شده با CFRP تحت بار مونوتونیک تحلیل کرد. این مدل به خوبی چسبندگی FRP را شبیه سازی کرده و نتایج آن همخوانی مناسبی با نتایج آزمایش داشت. در همین سال یوسیبو^۳ [۸] با استفاده از نرم افزار DIANA^{۲۰۰۰} یک صفحه بنایی تقویت شده با FRP را به صورت دو بعدی مدل کرد. اما افزایش مقاومت بتن ناشی از محصوریت با FRP در این مدل در نظر گرفته نشد. در ادامه لی و کنگ^۴ [۹] در سال ۲۰۰۴ یک مدل عنصر محدود سه بعدی غیرخطی را برای پیش بینی پاسخ یک دیوار برشی فلنجی I شکل با نسبت ارتفاع به طول جان ۱/۳ بررسی کردند که با پلیمر مسلح شده با الیاف شیشه تقویت شده بود و تحت بارگذاری چرخه ای معکوس شونده قرار داشت. در ادامه مستوفی نژاد و محمدی انایی [۱۰] در سال ۲۰۱۲، دو نمونه دیوار برشی بلندمرتبه با نسبت ابعادی ۳ و ۷/۴۹ را تحت تقویت با ورق های CFRP به صورت تحلیلی با استفاده از نرم افزار اجزاء محدود ABAQUS مورد بررسی قرار دادند، در این تحقیق دیوارهای برشی نمونه با مقیاس ۱/۴ مدل شده و جزء مرزی آن ها با استفاده از ورق های تقویتی با ضخامت و عرض و ارتفاع مختلف تقویت شده اند. نتایج نشان داد که استفاده از مواد FRP در تقویت اجزاء مرزی دیوارهای برشی بلند، باعث افزایش ظرفیت باربری و شکل پذیری این دیوارها می شود. شادان [۱۱] رفتار دیوار برشی بتنی کوتاه تقویت شده با FRP را با استفاده از نرم افزار اجزاء محدود DIANA مورد مطالعه قرار داد. نسبت ابعادی دیوار مورد بررسی در این تحقیق ۱/۲۸ بود. نتایج نشان داد که رفتار نمونه های تقویت شده به میزان زیادی به تقویت جان دیوار وابسته است. بهفرنیا و

- 1 Buyle-Bodin et al.
- 2 Castem2000
- 3 Eusebio
- 4 Li, Z. Kong, K.

5 Nonlinear static (Pushover) analysis

6 Lamina



شکل ۱. نمودار تنش-کرنش مورد استفاده در پژوهش. الف) حالت فشاری. ب) حالت کششی.
Fig. 1. The stress-strain curve that used in the study. a) Compression mode. b) Tension mode.

برای مدل‌سازی میلگردهای فولادی و تعریف رفتار آن‌ها، از مدل الاستوپلاستیک همراه با سخت‌شوندگی استفاده شده است. میلگردهای فولادی به طور کامل در بتن اطراف مدفون شده و اتصال کامل بین بتن و فولاد در نظر گرفته شده است. مدل‌سازی ورق‌های FRP، به صورت یک ماده با رفتار الاستیک خطی تا نقطه شکست در نظر گرفته شده و اتصال بین ورق‌های FRP و سطح بتن با استفاده از رفتار چسبنده^۶ تعریف شده است. این مدل که براساس قانون کشش-جداشدگی^۷ است، می‌تواند رفتار جداشدگی و لایه‌لایه شدن اتصال بین سطوح را مستقیماً با استفاده از مقادیر کشش-جداشدگی در جهت نرمال و دو جهت برشی سطح شبیه‌سازی کند. تنش تماسی برابر همان مقاومت کششی بتن است که در این پژوهش برابر ۲/۷۵ مگاپاسکال (معادل مقاومت کششی بتن نمونه‌ها) در نظر گرفته شده است. تنش برشی ماده چسبنده نیز با استفاده از روابط ۱ و ۲ [۱۴] محاسبه می‌شود که مقدار آن با توجه به آرایش ورق‌های FRP و عرض آن‌ها در هر نمونه متغیر است.

$$\tau_{max} = 1.5\beta_w f_t \quad (1)$$

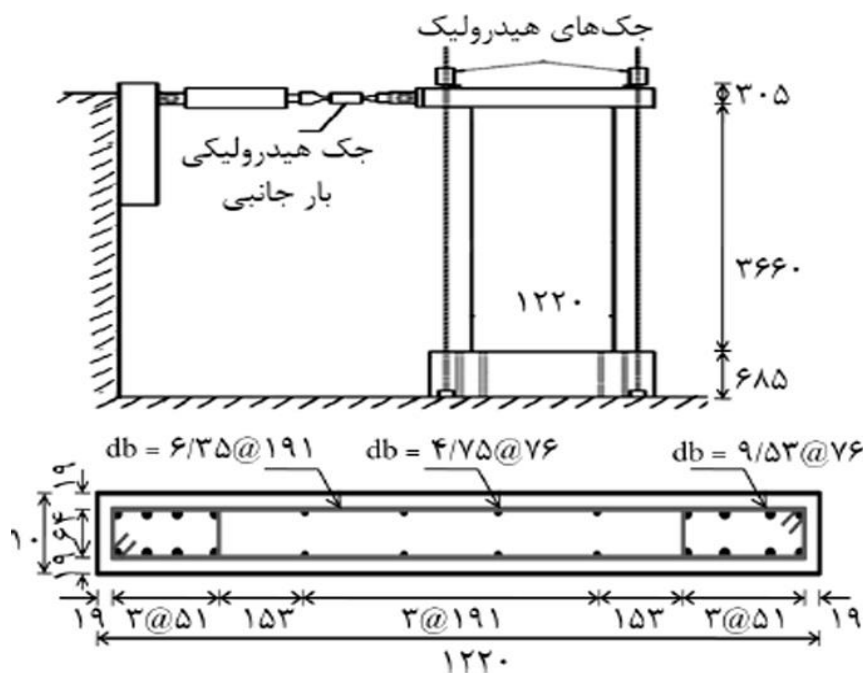
$$\beta_w = \sqrt{\frac{\left(2.25 - \frac{b_p}{b_c}\right)}{\left(1.25 + \frac{b_p}{b_c}\right)}} \quad (2)$$

بتن مسلح ماده‌ای پیچیده در مدل‌سازی اجزاء محدود است. مهم‌ترین بخش مدل‌سازی اعضای بتن آرمه در نرم‌افزار اجزاء محدود ABAQUS، معرفی رفتار غیرخطی بتن است. این نرم‌افزار برای تعریف رفتار غیرخطی مواد ترد از جمله بتن، سه نوع مدل ترک‌خوردگی را ارائه می‌دهد. این مدل‌ها شامل مدل ترک پخشی^۱، مدل شکست ترد^۲ و مدل پلاستیسیته آسیب بتن (CDP)^۳ است. در این مقاله از مدل CDP استفاده شده است. فرض اصلی این مدل، ایجاد ترک‌خوردگی کششی و خردشدگی فشاری در فرآیند گسیختگی بتن است. برای تعریف رفتار غیرخطی بتن، به رفتار تنش-کرنش آن در کشش و فشار نیاز است. برای این منظور، روابط و مدل‌های متفاوتی توسط محققان ارائه شده است. در این مطالعه برای تعریف رفتار فشاری بتن از مدل پیشنهادی اصلاح شده هاگنستاد^۴ [۱۰] و برای رفتار کششی آن از مدل عرض ترک پیشنهاد شده توسط کورنلیسن^۵ [۱۳] استفاده شد. نمودار تنش-کرنش شماتیک در هر دو حالت فشاری و کششی در شکل ۱ نشان داده شده است.

در این پژوهش در همه نمونه‌ها بتن با مقاومت فشاری ۲۵ مگاپاسکال و فولاد با مقاومت ۴۱۲ مگاپاسکال مورد استفاده قرار گرفته است. ضمناً بتن هسته و پوشش بتنی نیز یکسان در نظر گرفته شده است.

- 1 Smeared Crack Concrete Model
- 2 Brittle Crack Concrete Model
- 3 Concrete Damaged Plasticity Model (CDP)
- 4 Hognestad
- 5 Cornelisen

6 Cohesive Behavior
 7 Traction-Separation



شکل ۲. نحوه بارگذاری و جزئیات دیوار برشی RW2 آزمایش تامسن [۱۷]
 Fig. 2. Tomson RW2 Test. "Loading and details of the shear wall".

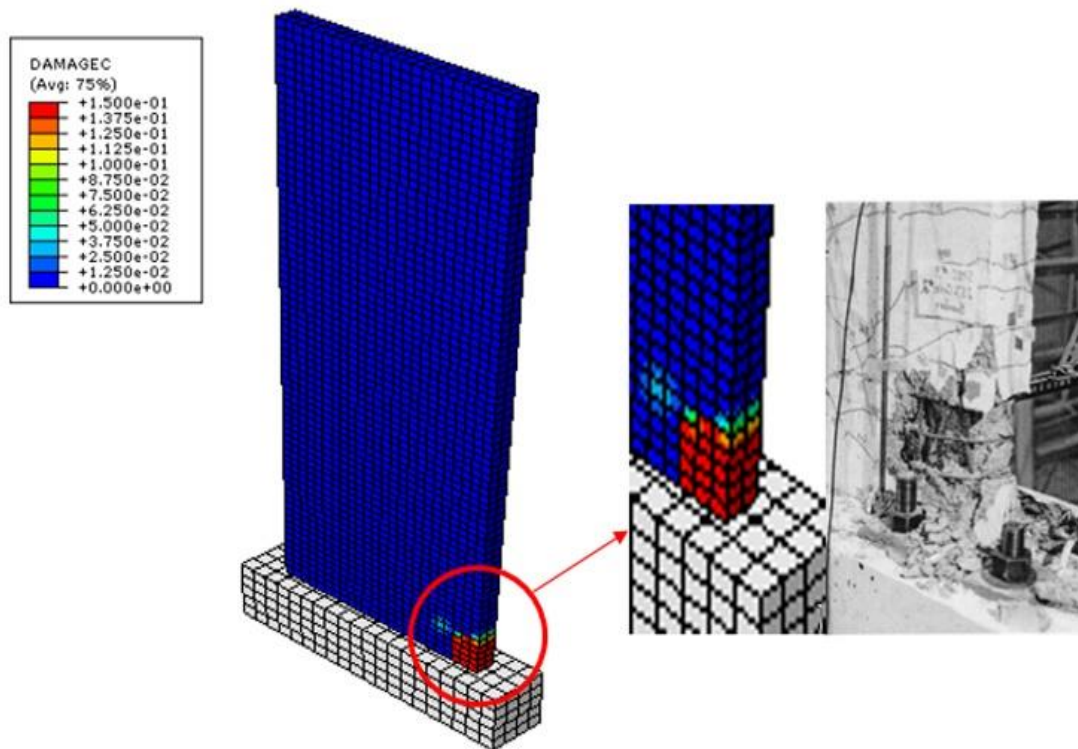
آزمایش مقایسه شود و صحت مدل سازی FRP و رفتار بین سطح بتن و FRP مورد ارزیابی قرار بگیرد. در این مقاله تنها نتیجه حالت تقویت شده ذکر می شود. تحلیل حساسیت مدل عددی به مش بندی نیز در هر دو نمونه انجام گرفته است و با توجه به نتایج خروجی نرم افزار و مقایسه آن با نتایج آزمایش ها بهترین اندازه مش در هر یک از دیوارهای مورد بررسی انتخاب شده است.

اولین دیوار مدل شده، نمونه دوم (RW2) از مدل های آزمایشگاهی تامسن است که با مقیاس $\frac{1}{4}$ تحت بارگذاری چرخه ای قرار گرفته است. جزئیات مربوط به این دیوار برشی در شکل ۲ نشان داده شده است. بتن مورد استفاده در این دیوار با مقاومت ۳۴ مگاپاسکال و مقاومت فولاد میلگردهای تقویتی ۴۱۲ مگاپاسکال است. دیوار دارای ارتفاع حدود ۳۶۶۰ میلی متر، طول ۱۲۲۰ و عرض ۱۰۲ میلی متر است. نمونه تحت اثر بار محوری ثابت به اندازه $0.7 A_g f_c$ قرار دارد و به طور همزمان بار جانبی به صورت جابه جایی-کنترل به نمونه وارد می شود. پس از تحلیل حساسیت مدل به المان بندی و تحلیل دیوار با مش های ۸۰، ۶۰ و ۵۰ میلی متری (برای بتن و میلگردهای طولی و صفحه صلب)، در نهایت مش با ابعاد ۵۰ میلی متر به دلیل نزدیکی نتایج به دست آمده با مدل آزمایشگاهی، برای بتن، میلگرد فولادی و صفحه صلب انتخاب شد.

که در آن حداکثر تنش برشی در هر دو جهت ۱ و ۲، f_t تنش کششی بتن، b_p عرض ورق FRP، b_c عرض عضو بتنی (mm) است.

۴- اعتبارسنجی و بررسی عددی

به منظور تأیید نحوه مدل سازی و اطمینان از صحت و کارایی مدل های ایجاد شده در نرم افزار، دو نمونه دیوار برشی که توسط تامسن [۱۵] و لومبارد [۱۶] مورد آزمایش قرار گرفته اند، در نرم افزار ABAQUS مدل شدند. اولین نمونه، دیوار برشی بلندمرتبه آزمایش شده توسط تامسن است که برای بررسی صحت رفتار غیرخطی بتن و فرضیات به کار رفته مدل شده است. با مرور ادبیات فنی، مطالعه تجربی دیوار برشی میان مرتبه و بلندمرتبه در حالت تقویت شده با FRP توسط نگارنده مشاهده نشده است. به این ترتیب، نمونه دوم یک دیوار برشی با نسبت ابعادی کمتر از ۲ است که توسط لومبارد و همکارانش مورد آزمایش قرار گرفته است. این دیوار ابتدا به صورت تقویت نشده در نرم افزار مدل شده تا صحت مدل رفتاری بتن بار دیگر مورد بررسی قرار بگیرد و سپس به صورت تقویت شده با FRP مورد تحلیل قرار گرفته است تا نتایج حاصل از نرم افزار با دیوار تقویت شده



شکل ۳. مقایسه خرابی دیوار برشی RW2 آزمایش تامسن در حالت آزمایشگاهی [۱۲] و تحلیلی.

Fig. 3. Comparison the damage of Tomson test RW2 shear wall in experimental and analytical mode.

خروجی‌های حاصل از نرم‌افزار و نتیجه آزمایشگاهی وجود دارد و این به معنی درستی فرضیات به کار رفته در رفتار بتن و مدل‌سازی دیوار برشی بتنی بلندمرتبه است.

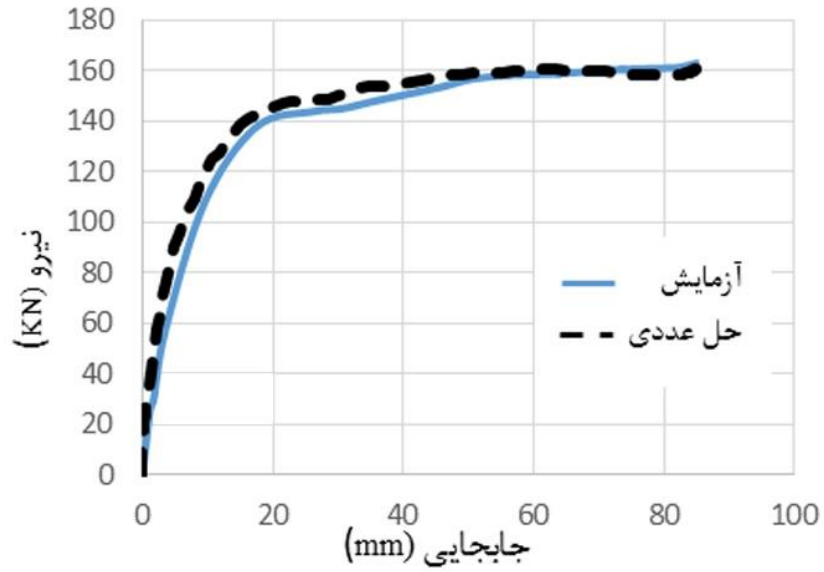
نمونه مقایسه‌ای دوم، دیوار تقویت شده آزمایش لومبارد است. ارتفاع این دیوار ۱۷۹۵ میلی‌متر، طول آن برابر ۱۵۰۰ میلی‌متر و ضخامت آن ۱۰۰ میلی‌متر است. جزئیات میلگردگذاری آن در شکل ۵ قابل مشاهده است. دیوار موردنظر، اولین نمونه تقویت شده در آزمایش لومبارد است که با استفاده از یک ورق FRP با جهت‌گیری عمودی الیاف (به صورت خمشی)، تقویت شده است. مش بندی دیوار با المان‌هایی با ابعاد ۸۰، ۶۰، ۵۰ و ۴۰ میلی‌متر انجام شد و در نهایت المان مکعبی با ابعاد ۵۰ میلی‌متر برای مدل‌سازی بتن، و المان دویبعی با طول ۵۰ میلی‌متر برای تقسیم‌بندی ورق FRP و میلگردهای فولادی و کف صلب در نظر گرفته شد.

همان‌طور که پیشتر بیان شد، در مدل‌سازی اتصال بین بتن و ورق FRP از رفتار چسبنده استفاده شده است. در این مطالعه به

بررسی ابعاد متفاوت المان‌ها در بتن و میلگردهای فولادی مدفون در آن نشان داد که در صورت یکسان بودن ابعاد مش بتن و میلگردهای فولادی علاوه بر کوتاه‌تر شدن زمان تحلیل، نتایج بهتر و نزدیک‌تری به نتایج آزمایشگاهی خواهیم داشت.

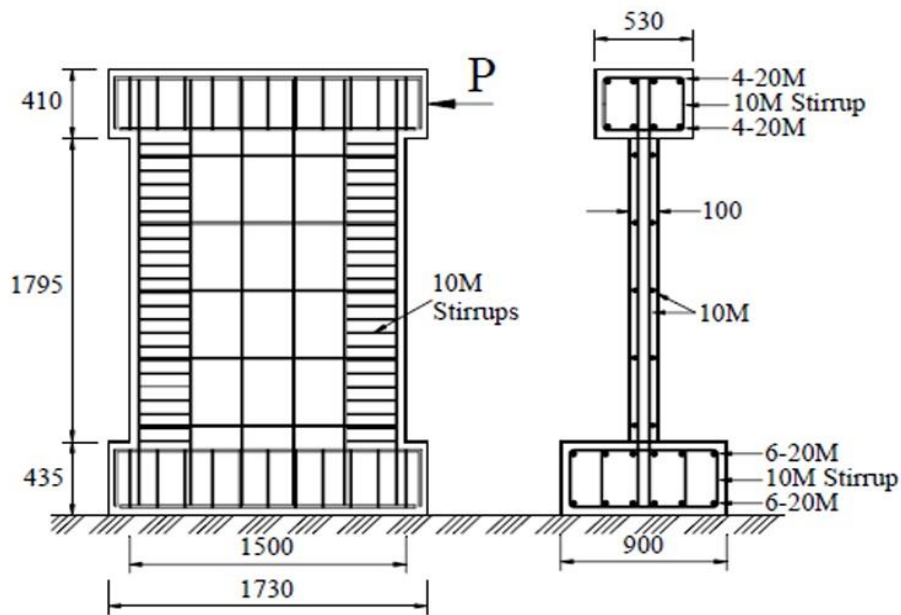
خرابی نهایی دیوار به صورت خردشدگی بتن در پای دیوار و در بخش فشاری آن است. مقایسه خرابی رخ داده در نمونه آزمایشگاهی با نمونه مدل شده در نرم‌افزار در شکل ۳ قابل مشاهده است. مطابق شکل مذکور، نمونه مدل شده در نرم‌افزار به خوبی خرابی رخ داده در دیوار را شبیه‌سازی کرده است.

نمودار نیرو-تغییر مکان شکل ۴ مقایسه نتایج حاصل از حل اجزاء محدود و آزمایش را نشان می‌دهد. بیشترین اختلاف بین دو نمودار در جابه‌جایی ۳۴/۶ میلی‌متر بوده و نیروی قابل تحمل دیوار مدل‌سازی شده به میزان ۲/۸ درصد از نمونه آزمایشی بیشتر است. این میزان اختلاف با توجه به پیچیدگی‌های مدل‌سازی بتن مقداری ناچیز و قابل قبول است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، تطابق بسیار خوبی بین



شکل ۴. مقایسه نمودار نیرو-تغییر مکان دیوار برشی RW2 آزمایش تامسن در حالت آزمایشگاهی و تحلیلی

Fig. 4. Comparison of load-displacement curve of shear wall in experimental and analytical mode in Tomson test RW2.



شکل ۵. جزئیات میلگردگذاری دیوار برشی آزمایش لومبارد [۱۸]

Fig. 5. Rebar Details of shear wall in Lombard test.

جدول ۱. مشخصات ابعادی دیوارهای برشی نمونه

Table 1. Dimension characteristic of sample shear walls.

نسبت ابعادی (L_w/H_w)	ضخامت دیوار برشی (t_w)	طول دیوار برشی (L_w)	ارتفاع دیوار برشی (H_w)	تعداد طبقات ساختمان
۲/۸۶	۰/۳ متر	۵/۶ متر	۱۶ متر	۵
۴	۰/۳ متر	۵/۶ متر	۲۲/۴ متر	۷
۵/۷۱	۰/۳۵ متر	۵/۶ متر	۳۲ متر	۱۰

به این ترتیب در هر دو نمونه، اعتبار مدل‌های رفتاری مورد استفاده برای بتن، فولاد و FRP با مقایسه نتایج تحلیل مدل‌ها توسط نرم‌افزار و نتایج حاصل از آزمایش تأیید شد. نتایج نشان می‌دهد که مدل عددی، پاسخ دیوارهای مرجع را با دقت قابل قبولی شبیه‌سازی می‌کند.

۵- مشخصات مدل‌های طراحی شده

پس از اطمینان از صحت مدل‌سازی و درستی نتایج خروجی از نرم‌افزار، نمونه‌های تحلیلی موردنظر تعریف و مدل می‌شوند. دیوارهای موردنظر، دیوارهایی ضعیف با شکل‌پذیری کم هستند که در نرم‌افزار ETABS و بر اساس آیین‌نامه ۳۱۸-ACI-۹۹ [۱۹] طراحی شده و الزامات مبحث نهم مقررات ملی ایران را نیز برآورده می‌کنند. بارگذاری ثقلی مطابق مبحث ششم مقررات ملی ساختمان ایران و بارگذاری جانبی بر اساس ویرایش دوم استاندارد ۲۸۰۰ ایران انجام شده است (از آنجا که در این مطالعه فرض شده است که نمونه‌ها در یک ساختمان قدیمی قرار دارند که نیاز به بهسازی دارد، برای طراحی نمونه‌ها از ویرایش دوم استفاده شده است). این دیوارها دارای مقطع مستطیلی و نسبت ابعادی بزرگتر از ۲ بوده و در سه گروه با ارتفاع‌های متفاوت مطابق جدول ۱ طراحی شدند.

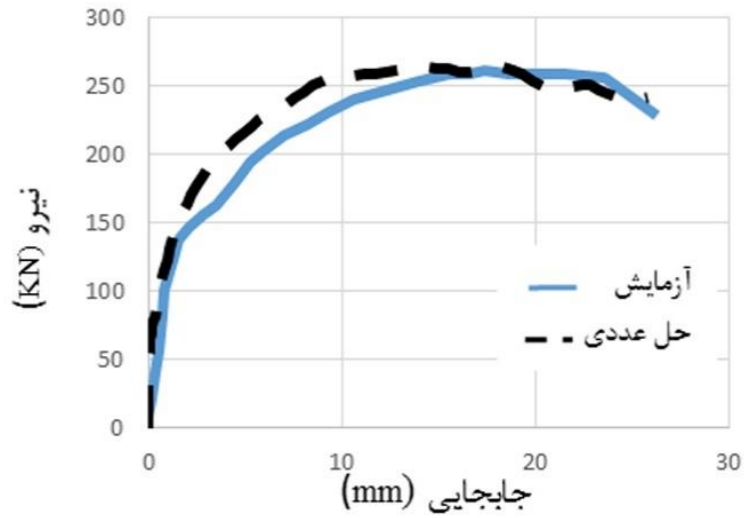
ساختمان‌های موردنظر، از نوع فولادی و با قاب ساده ساختمانی هستند که سیستم مقاوم جانبی آن‌ها مطابق ویرایش دوم استاندارد ۲۸۰۰، دیوارهای برشی بتن آرمه معمولی است. پلان در هر سه ساختمان مشابه بوده و در شکل ۸ نشان داده شده است. ارتفاع تمام طبقات ۳/۲ متر و ضخامت دال کف برابر ۰/۲ متر است. بارگذاری موجود و مصالح مصرفی در جدول‌های ۲ و ۳ نشان داده شده‌اند.

دلیل مدل‌سازی نمونه‌ها با ابعاد اصلی آن‌ها، در صورت مدل‌سازی چسب و اعمال المان‌های کوهسیو (المان‌های مربوط به ماده چسبنده مانند رزین یا چسب)، مدل نهایی پیچیده و سرعت تحلیل به شدت کاهش می‌یافت.

از طرفی ضخامت چسب کم بوده و هدف بررسی رفتار دقیق چسب و جداسازی بین سطح بتن و FRP نیست. بنابراین، به جای مدل‌سازی چسب از تعریف رفتار چسبنده در سطح تماس بتن و ورق FRP استفاده شد و همان‌طور که نتیجه صحت‌سنجی نشان می‌دهد استفاده از این روش توانسته تا حد زیادی رفتار مدل آزمایشگاهی را به درستی شبیه‌سازی کند.

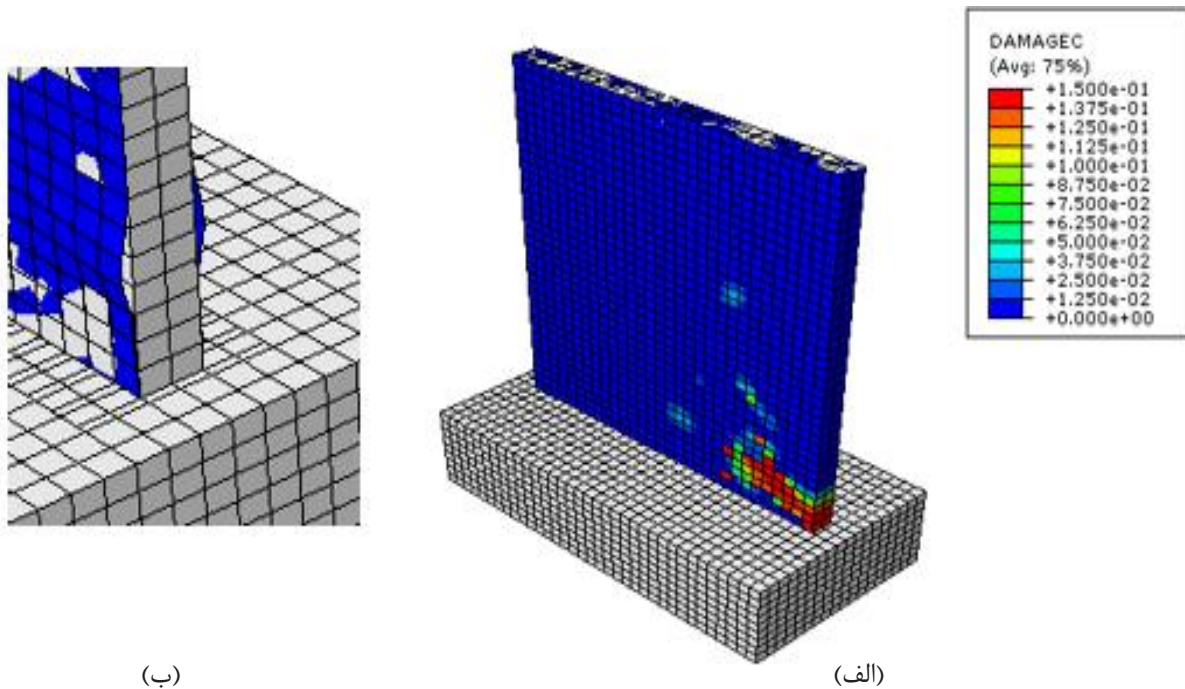
با توجه به نمودار نیرو-تغییر مکان نمونه تقویتی (شکل ۶)، بار نهایی قابل تحمل دیوار مدل‌سازی شده در نرم‌افزار برابر ۲۶۳/۴ کیلونیوتن است و حداکثر جابه‌جایی آن ۲۵ میلی‌متر است. حداکثر بار قابل تحمل دیوار در حالت آزمایشگاهی ۲۵۸ کیلونیوتن و حداکثر جابه‌جایی آن ۲۶ میلی‌متر است. بیشترین اختلاف بین دو نمودار حدود ۷/۵۳ درصد است که به دلیل پیچیدگی رفتاری بتن و کامپوزیت‌های FRP و نیز در نظر گرفتن فرضیات ساده کننده در مدل‌سازی، این مقدار خطا قابل توجیه و صرف‌نظر کردن است. به این ترتیب، خروجی به دست آمده نشان‌دهنده تطابق مناسب داده‌های تجربی با خروجی تحلیل است.

طبق نتیجه آزمایش لومبارد، خرابی نهایی در این دیوار به صورت خردشدگی فشاری بتن و جداسازی مهار فولادی و ورق FRP از سطح بتن در پای دیوار است. در شکل ۷ خرابی ایجاد شده در مدل تحلیلی نشان داده شده است. با توجه به شکل، نرم‌افزار به خوبی توانسته مد خرابی دیوار را شبیه‌سازی نماید.



شکل ۶. مقایسه نمودار نیرو-تغییر مکان دیوار برشی تقویت شده آزمایش لومبارد در حالت آزمایشگاهی و تحلیلی

Fig. 6. Comparison of load-displacement curve of shear wall in experimental and analytical mode in Lombard test rehabilitated.

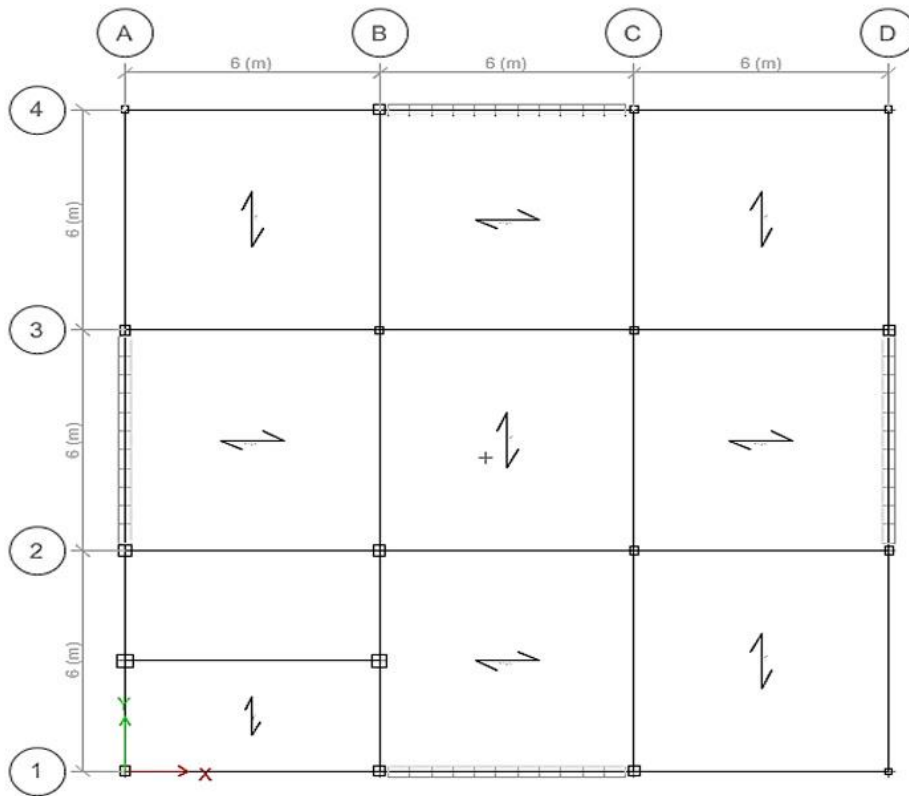


(ب)

(الف)

شکل ۷. حالت خرابی دیوار برشی تقویت شده آزمایش لومبارد در حالت تحلیلی. الف) خرابی دیوار در حالت فشاری. ب) جداشدگی ورق‌های FRP از سطح بتن در پای دیوار.

Fig. 7. Damage mode of Lombard test rehabilitated shear wall in analytical mode. a) Damage in compression mode. b) FRP sheets debonding from concrete surface at the base of the shear wall.



شکل ۸. پلان تیب ساختمان‌های ۵، ۷ و ۱۰ طبقه

Fig. 8. The typical plan of the buildings for 5, 7 and 10-story.

جدول ۲. بارگذاری موجود ساختمان‌ها (کیلو نیوتن بر متر مربع)

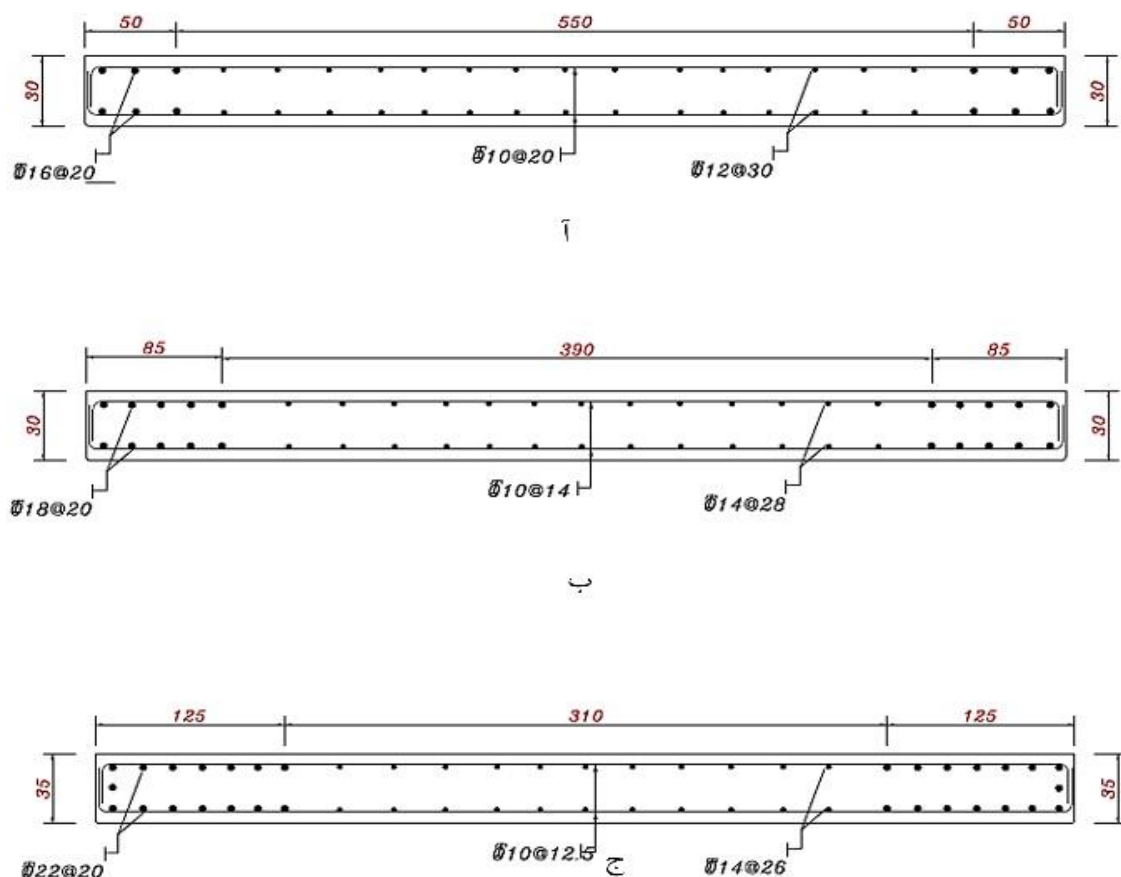
Table 2. Existing loading model of buildings (KN/m²).

بار زنده	بار مرده	تراز
۲	۶/۸۲	طبقات
۱/۵	۵/۸۵	بام

جدول ۳. مشخصات مصالح مصرفی در ساختمان‌ها

Table 3. Building's Material specifications

مقدار (مگاپاسکال)	پارامتر
$2/1 \times 10^5$	E_s
۴۱۲	f_y
$2/5 \times 10^4$	E_c
۲۵	f'_c



شکل ۹. جزئیات مقطع: الف) دیوار برشی ساختمان ۵ طبقه، ب) دیوار برشی ساختمان ۷ طبقه، ج) دیوار برشی ساختمان ۱۰ طبقه

Fig. 9. Cross sections detail: a) 5-story building shear wall, b) 7-story building shear wall, c) 10-story building shear wall

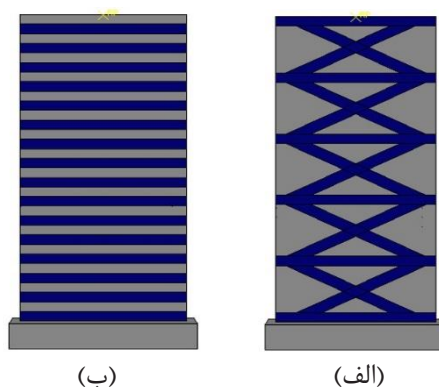
هدف، بر اساس آیین‌نامه UBC1۹۹۷ برابر با ۲٪ ارتفاع کلی سازه در نظر گرفته شده است. تحلیل تا جایی ادامه می‌یابد که تغییر شکل زیاد و افت ناگهانی در مدل یا نمودار نیرو-تغییر مکان نمونه مشاهده شود [۲۰].

به منظور مطالعه تأثیر چیدمان‌های متفاوت FRP روی رفتار دیوارهای میان‌مرتبه و بلندمرتبه، دو آرایش متفاوت FRP در هر سه گروه دیوار انجام می‌شود. جزئیات این نمونه‌های تقویتی به صورت زیر است:

تقویت با ورق‌های FRP تک‌جهته به صورت ضربدری در جهت قطر دیوارها همراه با ورق‌های افقی در پای دیوار و فاصله بین تراز طبقات در هر وجه دیوار مطابق شکل ۱۰-الف.

دیواربرشی موجود در محور ۱ پلان، به عنوان دیوار نمونه در نظر گرفته می‌شود. به دلیل سختی زیاد دیوار برشی در برابر قاب فولادی از تأثیر قاب فولادی صرف‌نظر کرده و با بیرون کشیدن این دیوار از ساختمان، مطالعه بر روی آن به صورت جداگانه و بدون در نظر گرفتن تأثیر بقیه اجزای ساختمان بر عملکرد دیواربرشی انجام می‌گیرد. جزئیات مقاطع دیوارهای طراحی شده در شکل ۹ قابل مشاهده است. واحدها بر اساس سانتی‌متر می‌باشند.

در این مطالعه نمونه‌ها تحت ترکیب بار محوری و جانبی قرار دارند که به منظور مقایسه فرض می‌شود، همه آن‌ها تحت بار محوری $0.1 A_g f'_c$ قرار دارند. اعمال بار جانبی به بالاترین نقطه دیوارهای نمونه با استفاده از روش جابه‌جایی-کنترل انجام می‌شود. جابه‌جایی



شکل ۱۰. مدل دیوار تقویت شده: الف) با ورق ضربدری و افقی، ب) با ورق افقی به صورت دورپیچ.

Fig. 10. Rehabilitated shear wall model: a) With horizontal and cross-shape sheets, b) With horizontal spirally sheets.

جدول ۴. خصوصیات مصالح CFRP و GFRP به کار رفته در تحلیل.

Table 4. CFRP and GFRP material's properties which is used in the analysis.

جنس ورق	ضخامت (mm)	مقاومت کششی طولی (MPa)	مدول برشی (GPa)	نسبت پواسون	مدول الاستیسیته (GPa)
CFRP	۰/۲	۳۷۰۰	۳/۲۷	۰/۲۲	۲۳۱
GFRP	۰/۲	۱۶۶۷/۷	۲/۶۵	۰/۲۱۷	۶۹/۶۵

جدول ۵. پارامترهای مورد استفاده پژوهش در روابط رفتار چسبنده

Table 5. Cohesive behavior parameters used in the study.

ضخامت رزین (mm)	مدول برشی رزین (GPa)	ضخامت بتن (cover) (mm)	مدول برشی بتن (GPa)
۱	۰/۶۶۵	۲۵	۱۰/۸

میلی‌متر در نظر گرفته شده است. مشخصات ورق‌های تقویتی به کار رفته در این مطالعه در جدول ۴ نشان داده شده است.

در این مطالعه برای تعریف رفتار چسبنده در سطح تماس بتن و ورق FRP، از مشخصات موجود در جدول ۵ استفاده شده است. به منظور المان‌بندی نمونه‌های پژوهش، تحلیل حساسیت نمونه به ابعاد المان به این صورت انجام گرفت که ابتدا دیوارهای نمونه با مش‌بندی ریز مدل‌سازی و تحلیل شدند. سپس مرحله به مرحله ابعاد مش افزایش یافت و نتایج به دست آمده با هم مقایسه شد تا در نهایت

تقویت به صورت ورق‌های افقی دورپیچ به فاصله ۵۰۰ میلی‌متر از هم مطابق شکل ۱۰-ب.

نمونه‌ها ابتدا با استفاده از ورق‌های CFRP و با دو آرایش ذکر شده تقویت می‌شوند، پس از بررسی نتایج، چیدمان بهینه از بین دو چیدمان مذکور انتخاب شده و دیوار با چیدمان بهینه بار دیگر با استفاده از ورق‌های GFRP تقویت می‌شود. در همه نمونه‌ها، عرض ورق‌های تقویتی برابر ۵۰۰ میلی‌متر بوده و به منظور ایجاد شرایط یکسان برای مقایسه، در هر دو جنس کامپوزیت ضخامت ۰/۲

۶-۲- سختی اولیه

برای محاسبه سختی اولیه، لازم است شیب اولیه نمودار نیرو-تغییرمکان در هر نمونه محاسبه شود. به این ترتیب، میزان سختی اولیه با استفاده از رابطه (۴) محاسبه می‌شود:

$$\kappa = \frac{F_i}{\Delta_i} \quad (4)$$

که در آن F میزان نیروی جانبی نمونه در نقطه i و Δ_i جابه‌جایی معادل نیروی جانبی F در نقطه i است.

۶-۳- انرژی جذب شده

میزان انرژی جذب شده توسط نمونه‌ها با استفاده از محاسبه سطح زیر نمودار نیرو-تغییرمکان قابل محاسبه است.

۶-۴- تحلیل و بررسی نتایج

پاسخ نیرو-جابه‌جایی دیوارهای نمونه در هر سه گروه دیوار برشی در حالت تقویت با ورق CFRP در شکل ۱۱ و در حالت تقویت شده با GFRP در شکل ۱۲ نشان داده شده است.

به نامگذاری دیوارها دقت کنید. دیوارهای کنترلی به صورت CSW و دیوارهای تقویت شده به صورت SSW نامگذاری شده‌اند. عدد کنار حروف مخفف به معنی حالت تقویت است که به صورت ضربدری یا دورپیچ است (۱ تقویت ضربدری و ۲ تقویت دورپیچ). حرف C به معنی تقویت شده با ورق CFRP و حرف G به معنی تقویت شده با

بهترین اندازه المان انتخاب شد. ابعاد المان‌ها تا جایی افزایش یافته که نتایج تحلیل در هر مرحله تغییر محسوس نداشتند. در این پژوهش با توجه به مدل‌سازی کامل دیوارها بدون مقیاس بندی، سعی شد تا جایی که نتایج دست خوش تغییر نمی‌شوند، اندازه المان‌ها افزایش یابد تا به این ترتیب، تحلیل علاوه بر دقت لازم سرعت معقولی نیز داشته باشد. به این ترتیب، ابعاد 150×150 برای بتن و ابعاد 150 برای میلگردهای فولادی، ورق‌های FRP و صفحه صلب بارگذاری در نظر گرفته شد.

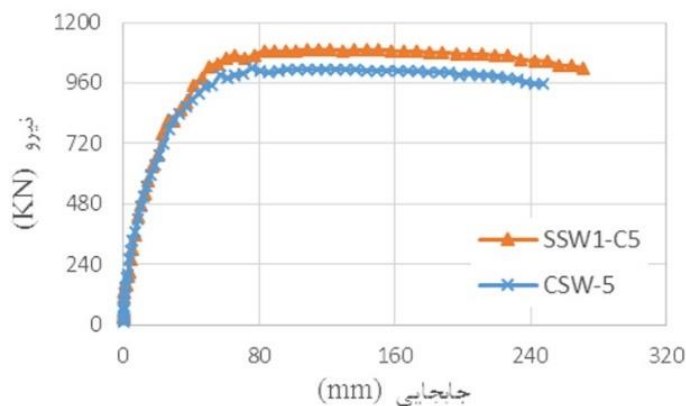
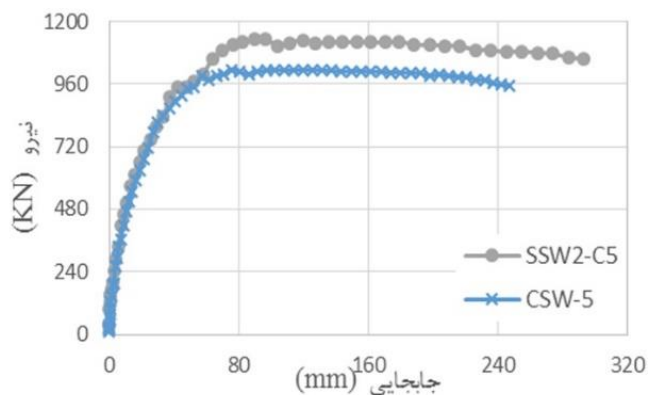
۶- نتایج و بحث

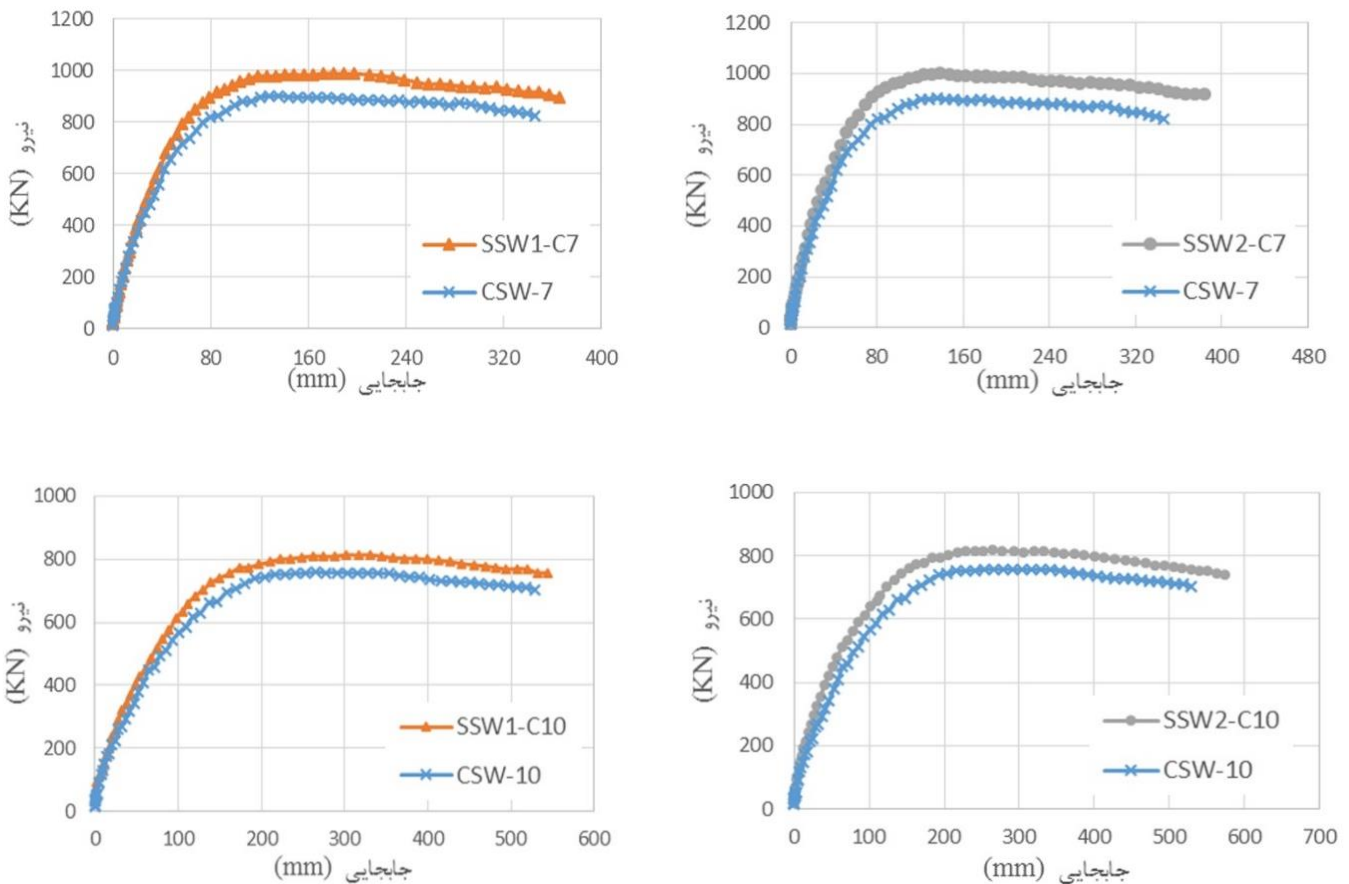
به منظور تحلیل نتایج ابتدا لازم است مفاهیم شکل‌پذیری، سختی اولیه و جذب انرژی معرفی شود. در ادامه موارد مذکور را بررسی نموده، سپس به تحلیل و بررسی نتایج خواهیم پرداخت.

۶-۱- شکل‌پذیری

برای محاسبه شکل‌پذیری لازم است با ایده‌آل نمودن منحنی نیرو-تغییرمکان، جابه‌جایی نهایی (Δ_u) و جابه‌جایی تسلیم (Δ_y) نمونه‌ها محاسبه شود. سپس با استفاده از رابطه (۳) ضریب شکل‌پذیری هر نمونه تعیین می‌شود. در این مطالعه، نمودار نیرو-جابه‌جایی بر اساس روش پیشنهادی نشریه ۳۶۰ [۲۱] دوخطی (ایده‌آل) شده است.

$$\mu = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \quad (3)$$





شکل ۱۱. پاسخ نیرو-تغییر مکان دیوارهای تقویتی با ورق CFRP در مقایسه با دیوارهای کنترلی هر گروه.

Fig. 11. Compared load-displacement responses of the CFRP-sheets rehabilitated shear walls with the control walls for each group.

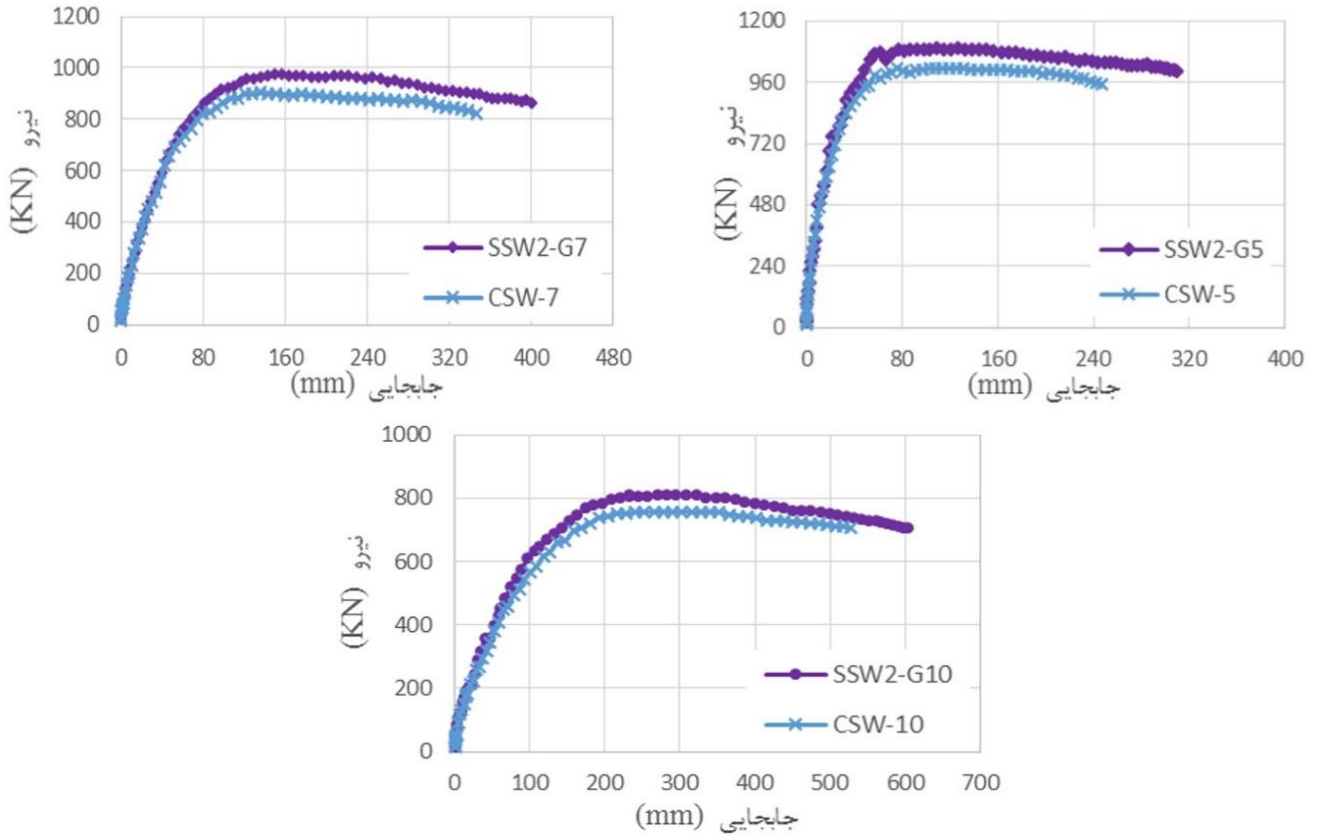
افقی به دلیل ایجاد محصوریت، بیشتر از حالت ضربدری می‌تواند در بهبود رفتار لرزه‌ای دیوارها مؤثر باشد. به این ترتیب چیدمان بهینه در حالت تقویت با ورق CFRP، آرایش دوم (دورپیچ افقی) نمونه‌ها می‌باشد. حداکثر میزان افزایش ظرفیت باربری به میزان ۷/۰۱ درصد در نمونه SSW1-C5 مشاهده می‌شود.

با توجه به جدول ۷، حداکثر میزان افزایش شکل‌پذیری در نمونه‌های SSW2-G5، SSW2-G7 و SSW2-G10 مشاهده می‌شود. نمونه‌های مذکور با ورق‌های افقی GFRP و به صورت دورپیچ تقویت شده‌اند. علت افزایش شکل‌پذیری نمونه‌های تقویت شده با GFRP نسبت به نمونه‌های تقویت شده با CFRP، می‌تواند کرنش گسیختگی بالاتر پلیمرهای مسلح شده با الیاف شیشه نسبت به CFRPها باشد. این موضوع در نمودار شکل ۱۳ نشان داده شده است (به کرنش نهایی CFRP و GFRP توجه کنید). حداکثر میزان افزایش شکل‌پذیری

GFRP است. عدد انتهایی نام هر دیوار تعیین‌کننده گروه ارتفاعی آن است (عدد ۵ به معنی دیوار مربوط به ساختمان ۵ طبقه).

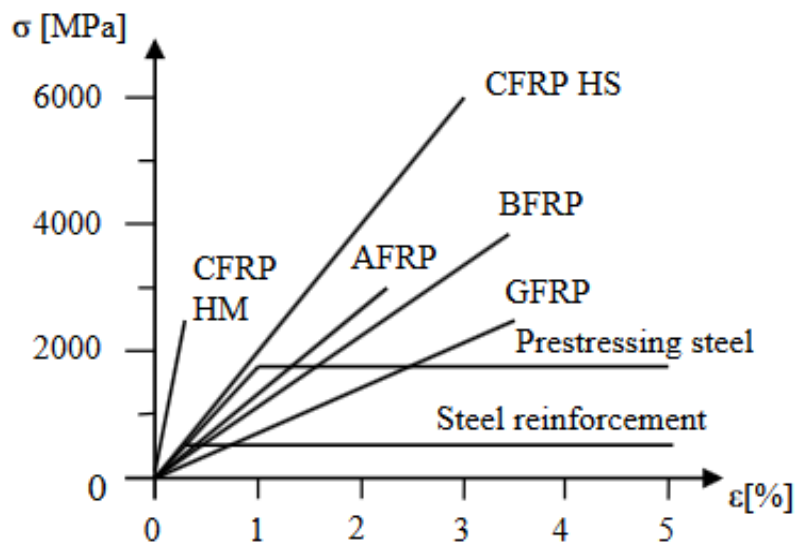
با توجه به شکل‌های مذکور مشاهده می‌شود که تقویت دیوارها با ورق‌های FRP، باعث افزایش ظرفیت باربری نمونه‌ها می‌شود. بر اساس مقادیر موجود در جدول ۶ حداکثر میزان افزایش ظرفیت باربری، مربوط به نمونه‌های SSW2-C5، SSW2-C7 و SSW2-C10 است. این دیوارها با ورق‌های CFRP به صورت دورپیچ افقی تقویت شده‌اند. به این ترتیب، چیدمان با دورپیچ افقی و از جنس ورق CFRP بیشترین تأثیر را بر افزایش ظرفیت باربری نمونه‌ها دارد.

این مقایسه نشان می‌دهد که در دیوارهای تقویت شده به صورت دورپیچ افقی، ظرفیت باربری، جذب انرژی و سختی بالاتری نسبت به دیوارهای تقویت شده با ورق‌های ضربدری (SSW1-C5، SSW1-C7، SSW1-C10)، مشاهده می‌شود. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت دورپیچ



شکل ۱۲. پاسخ نیرو-تغییر مکان دیوارهای تقویتی با ورق GFRP در مقایسه با دیوارهای کنترلی هر گروه.

Fig. 12. Compared load-displacement responses of the GFRP-sheets rehabilitated shear walls with the control walls for each group.



شکل ۱۳. مقایسه نمودار تنش-کرنش کامپوزیت‌های مختلف و مقایسه آن‌ها با فولاد [۲۲]

Fig. 13. Comparison the stress-strain curves of different composites with steel.

مربوط به دیوار با ارتفاع ۲۲/۴ متر (SSW2-G7) و به میزان ۲۱/۹ درصد است.

افزایش ارتفاع و نسبت ابعادی دیوارها، با میزان افزایش ظرفیت باربری و شکل‌پذیری آن‌ها نسبت عکس دارد. در واقع با افزایش ارتفاع شاهد کاهش تأثیر ورق‌های تقویتی در بهبود رفتار لرزه‌ای دیوارهای نمونه هستیم. علت این موضوع می‌تواند افزایش سختی دیوارها در ارتفاع‌های بالاتر باشد. به طوری که کمترین میزان افزایش ظرفیت باربری مربوط به نمونه SSW2-G10 (دیوار با ارتفاع ۳۲ متری و تقویت شده با دورپیچ ورق‌های GFRP) با ۲ درصد افزایش است. کمترین افزایش شکل‌پذیری نیز در نمونه SSW1-C10 و به میزان ۰/۴ درصد مشاهده می‌شود. به این ترتیب در بلندترین دیوار تأثیر ورق‌های تقویتی در حال کاهش است. بنابراین، استفاده از یک لایه ورق تقویتی در نسبت‌های ابعادی بالا تأثیر بسیار اندکی بر ظرفیت باربری دیوارها داشته است. برای رسیدن به ظرفیت باربری موردنظر می‌توان ضخامت و تعداد لایه‌ها یا عرض ورق‌ها را افزایش داد.

۷- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، رفتار لرزه‌ای دیوارهای برشی بتن مسلح میان‌مرتبه و بلندمرتبه در اثر تقویت با ورق‌های FRP، با استفاده از نرم‌افزار اجزاء محدود ABAQUS مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور سه نمونه دیوار برشی با ارتفاع‌های ۱۶، ۲۲/۴ و ۳۲ متر با دو آرایش متفاوت ورق‌های کامپوزیتی از جنس CFRP و GFRP تقویت شده‌اند. این دیوارها با استفاده از روش استاتیکی غیرخطی مورد تحلیل قرار گرفته‌اند که نتایج حاصل از آن به شرح زیر است:

• هر دو چیدمان و هر دو جنس ورق تقویتی، ظرفیت باربری دیوارهای نمونه را افزایش داده‌اند، گرچه این مقدار با استفاده از یک لایه ورق تقویتی اندک است. نمونه C5-SSW۲ با افزایش ۷/۰۱ درصدی و نمونه G1۰-SSW۲ با افزایش ۲ درصدی، به ترتیب، حداکثر و حداقل تأثیر را بر بهبود باربری دیوارهای نمونه داشته‌اند.

• شکل‌پذیری دیوار در همه نمونه‌های تقویت شده افزایش یافته است. حداکثر میزان افزایش شکل‌پذیری در نمونه‌های تقویت شده با دورپیچ ورق‌های GFRP مشاهده شده است که علت آن می‌تواند بالاتر بودن کرنش گسیختگی این ورق‌ها نسبت به

ورق‌های CFRP باشد. بیشترین میزان بهبود شکل‌پذیری به میزان ۲۱/۹ درصد در دیوار ساختمان ۷ طبقه (SSW۲-G۷) با چیدمان دورپیچ افقی GFRP و کمترین میزان بهبود با ۰/۴ درصد در دیوار موجود در ساختمان ۱۰ طبقه (SSW1-C10) و با چیدمان ضربدری ورق CFRP مشاهده شده است.

• کاربرد ورق‌های FRP در دیوارهای مورد مطالعه، باعث افزایش اندکی در سختی نمونه‌ها شده است. این مقدار از ۰/۳ تا ۱۰/۶ درصد افزایش را نسبت به دیوارهای کنترلی نشان داد که به ترتیب در نمونه‌های G10-SSW2 و C7-SSW2 رخ داده است.

• استفاده از ورق‌های FRP باعث افزایش انرژی جذب شده نمونه‌ها شده است. این مقدار از ۸/۵ تا ۲۹/۰۶ درصد نسبت به دیوارهای کنترلی متفاوت است که به ترتیب در دیوار SSW1-C10 و SSW2-G5 مشاهده شده است. حداکثر میزان افزایش جذب انرژی در همه نمونه‌ها مربوط به دیوار تقویتی با دورپیچ افقی GFRP است.

• در صورتی که در یک طرح بهسازی افزایش ظرفیت باربری نمونه‌ها مدنظر باشد می‌توان از کامپوزیت‌های CFRP استفاده نمود. در حالی که اگر افزایش شکل‌پذیری عضو نسبت به افزایش ظرفیت باربری آن ارجحیت داشته باشد، استفاده از ورق‌های GFRP می‌تواند مفید واقع شود و به دلیل ارزان‌تر بودن نسبت به CFRP، از نظر اقتصادی نیز به صرفه است.

• با بررسی کلی نتایج حاصل از سه گروه دیوار برشی می‌توان گفت، با افزایش ارتفاع تأثیر یک لایه ورق تقویتی بر رفتار لرزه‌ای دیوارهای برشی بتن مسلح کاهش می‌یابد. این موضوع می‌تواند به علت افزایش سختی دیوارهای برشی با افزایش ارتفاع باشد.

فهرست علائم

علائم انگلیسی

K	سختی اولیه، kN/mm
F	نیرو، Kn

علائم یونانی

Δ_i	جابه‌جایی معادل نیروی F در نقطه i ، mm
m	ضریب شکل‌پذیری
Δ_y	جابه‌جایی تسلیم، mm

جدول ۶. مقایسه ظرفیت باربری، سختی و جذب انرژی نمونه‌ها در حالات مختلف تقویت

Table 6. Comparison of load capacity, stiffness and energy absorption of samples for different reinforcement modes.

نام دیواربرشی نمونه	ظرفیت باربری (KN)	درصد افزایش ظرفیت باربری	ظرفیت جذب انرژی (KN.MM)	درصد افزایش جذب انرژی	سختی (KN/MM)	درصد افزایش سختی
CSW-5	۱۰۵۸/۹۴	—	۲۴۰۴۳۳/۷۱	—	۷۴/۸۶	—
SSW1-C5	۱۰۹۳/۷۴	۳/۳	۲۷۲۰۷۸/۲۵	۱۳/۱۶	۷۵/۷۴	۱/۲
SSW2-C5	۱۱۳/۱۸	۷/۰۱	۳۰۲۱۲۵/۶۹	۲۵/۶۶	۷۷/۶۸	۳/۸
SSW2-G5	۱۰۹۳/۴۱	۳/۲	۳۱۰۳۱۶/۳۸	۲۹/۰۶	۷۵/۶۳	۱/۰۲
CSW-C7	۹۴۷/۸	—	۲۸۹۸۱۳/۱۳	—	۳۳/۳۵	—
SSW1-C7	۹۸۸/۹	۴/۳۴	۳۱۹۹۴۵/۲۸	۱۰/۴	۳۶/۵۱	۹/۴
SSW2-C7	۱۰۰۴/۴	۶	۳۴۱۷۹۸/۶۰	۱۷/۹۴	۳۶/۹۱	۱۰/۶
SSW2-G7	۹۷۲/۹۸	۲/۶	۳۴۳۱۹۹/۹۷	۱۸/۴۲	۳۵/۳۱	۵/۹
CSW-10	۷۹۶/۷۴	—	۳۶۲۶۳۳/۶۹	—	۲۲/۸۴	—
SSW1-C10	۸۱۴/۳۸	۲/۲	۳۹۳۴۳۳/۱۹	۸/۵	۲۳/۰۶	۰/۹۶
SSW2-C10	۸۱۹/۵۳	۲/۸۶	۴۱۱۸۵۴/۳۱	۱۳/۵۷	۲۴/۳۹	۶/۸
SSW2-G10	۸۱۲/۸۷	۲	۴۲۳۳۴۳/۷۹	۱۶/۷۴	۲۲/۹۱	۰/۳

جدول ۷. مقایسه شکل پذیری نمونه‌ها در حالات مختلف تقویت

Table 7. Comparison of samples ductility in different reinforcement modes.

نام دیواربرشی نمونه	جابه‌جایی نهایی قابل تحمل (Δ_u) (MM)	جابه‌جایی تسلیم (Δ_y) (MM)	شکل پذیری (Δ_u/Δ_y)	درصد افزایش شکل پذیری
CSW-5	۲۴۷/۴۳	۲۶/۷۱	۹/۲۶	—
SSW1-C5	۲۷۱/۴	۲۸/۸۳	۹/۴۱	۱/۶۲
SSW2-C5	۲۹۳/۲۵	۲۹/۸۱	۹/۸۴	۶/۲۶
SSW2-G5	۳۰۹/۰۴	۲۸/۷۱	۱۰/۷۶	۱۶/۱۹
CSW-7	۳۴۶/۰۵	۵۸/۶۹	۵/۸۹	—
SSW1-C7	۳۶۵/۴۱	۵۶/۸۲	۶/۴۳	۹/۱۶
SSW2-C7	۳۸۳/۳۴	۵۴/۸۹	۶/۹۸	۱۸/۵
SSW2-G7	۴۰۰/۰۵	۶۲/۷۱	۷/۱۸	۲۱/۹
CSW-10	۵۲۸/۲۷	۱۰۳/۳۹	۵/۱۰	—
SSW1-C10	۵۴۳/۵۷	۱۰۶/۲۱	۵/۱۲	۰/۴
SSW2-C10	۵۷۴/۱	۹۸/۲۳	۵/۸۴	۱۴/۵
SSW2-G10	۶۰۴/۵۵	۱۰۱/۲۵	۵/۹۷	۱۷/۰۵

- 1127-1136.
- [11] Mostofinejad, D. and M.M. Anaei, Effect of confining of boundary elements of slender RC shear wall by FRP composites and stirrups. *Engineering Structures*, 2012. 41: p. 1-13.
- [12] Shadan, F., A. Khaloo, and P. Shadan, NUMERICAL STUDY ON FLEXURAL STRENGTHENING OF SQUAT RC SHEAR WALL USING FRP LAMINATES (RESEARCH NOTE). 2015.
- [13] Behfarnia, K. and A. Shirneshan, A numerical study on behavior of CFRP strengthened shear wall with opening. *Comput Concrete*, 2017. 19(2): p. 179-189.
- [14] Cornelissen, H., D. Hordijk, and H. Reinhardt, Experimental determination of crack softening characteristics of normalweight and lightweight. *Heron*, 1986. 31(2): p. 45-46.
- [15] Lu, X., et al., Bond-slip models for FRP sheets/plates bonded to concrete. *Engineering structures*, 2005. 27(6): p. 920-937.
- [16] Thomsen IV, J.H. and J.W. Wallace, Displacement-based design of slender reinforced concrete structural walls—experimental verification. *Journal of structural engineering*, 2004. 130(4): p. 618-630.
- [17] Hashemi.S.H, Z.e.C.H., Vaghefi.M, Nonlinear Seismic Analysis of reinforced concrete shear wall with considering the effect of the interaction between concrete and rebar. *Journal of Seismology and earthquake engineering*, 2015. 18(2): p. 69-79. (in Persian).
- [18] Khomwan, N. and S. Foster, FE MODELLING OF FRP-STRENGTHENED RC SHEAR WALLS SUBJECTED TO REVERSE CYCLIC LOADING. *Proceedings of the International Symposium on Bond Behaviour of FRP in Structures (BBFS 2005)*, 2005.
- [19] ACI-318-99, Building code requirements for structural concrete and commentary. American Concrete Institute; Detroit (MI), USA., 1999.
- [20] Mohammadi Vojdan, B. and R. Aghayari, Investigating the seismic behavior of RC shear walls with openings strengthened with FRP sheets using different schemes.
- [1] Lombard, J., et al. Seismic strengthening and repair of reinforced concrete shear walls. in *Proc., 12th World Conf. on Earthquake Engineering*. 2000.
- [2] Antoniadis, K.K., T.N. Salonikios, and A.J. Kappos, Cyclic tests on seismically damaged reinforced concrete walls strengthened using fiber-reinforced polymer reinforcement. *ACI Structural Journal*, 2003. 100(4): p. 510-518.
- [3] Paterson, J. and D. Mitchell, Seismic retrofit of shear walls with headed bars and carbon fiber wrap. *Journal of Structural Engineering*, 2003. 129(5): p. 606-614.
- [4] Hiotakis, S., Repair and strengthening of reinforced concrete shear walls for earthquake resistance using externally bonded carbon fibre sheets and a novel anchor system. 2004, Carleton University.
- [5] Elnady, M.M.E., Seismic Rehabilitation of RC Structural Walls, in *Department of Civil and Environmental Engineering*. 2008, PhD Thesis, McMaster University.
- [6] Shaheen, I.K., Seismic Retrofit and Strengthening of Deficient Reinforced Concrete Shear Walls Using Externally Bonded Fibre Reinforced Polymer Sheets. 2014, Carleton University.
- [7] Shen, D., et al., Experimental investigations on reinforced concrete shear walls strengthened with basalt fiber-reinforced polymers under cyclic load. *Construction and Building Materials*, 2017. 136: p. 217-229.
- [8] Buyle-Bodin, F., E. David, and E. Ragneau, Finite element modelling of flexural behaviour of externally bonded CFRP reinforced concrete structures. *Engineering Structures*, 2002. 24(11): p. 1423-1429.
- [9] M. Eusebio, P.P., F. Lozza, G. Manfredi, Numerical Modelling of Masonry Panels Strengthened Using FRPs. *Third DIANA World Conference, Tokyo, Japan 9-11 October 2002 (Finite Elements in Civil Engineering Applications) 2002*: p. 295-303.
- [10] Kong, K., K. Tan, and T. Balendra, Retrofitting of shear walls designed to BS 8110 for seismic loads using FRP, in *Fibre-Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures: (In 2 Volumes)*. 2003, World Scientific. p.

- [22] Sonnenschein, R., K. Gajdosova, and I. Holly, FRP Composites and their Using in the Construction of Bridges. *Procedia Engineering*, 2016. 161: p. 477-482.
- [21] President Deputy of Strategic Planning and Control., Instruction for Seismic Rehabilitation of Existing Building. No.360, Published 2014. (In Persian). 2014.
- Scientia Iranica, 2017. 24(4): p. 1855-1865.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

R. Mousapour, M. Rezvani Sharif, S.B. Beheshti Aval, (2021). Investigation of Seismic Behavior of Reinforced Concrete Shear Walls Rehabilitated whit Fiber Reinforced Polymer Sheets. *Amirkabir J. Civil Eng.*, 53(5): 1781-1800

DOI: [10.22060/ceej.2020.17091.6472](https://doi.org/10.22060/ceej.2020.17091.6472)



