

نقش تغییرات پوشش بتن در پارامترهای لرزه‌ی ستون‌های بتن مسلح تقویت‌شده با ورقه‌ها و میلگردهای پلیمری مسلح الیافی

یاسر مودی (دانشجوی دکتری)

سید روح الله موسوی* (دانشیار)

گروه مهندسی عمران، دانشگاه سیستان و بلوچستان

مهندسی عمران شریف، (پاییز ۱۳۹۷)
دوری ۲ - ۳۴، شماره ۱/۳، ص. ۸۳-۸۹

از جمله روش‌های مقاوم‌سازی، می‌توان به روش NSM و محصورکننده‌های FRP اشاره کرد. مطالعات نشان می‌دهند استفاده از روش NSM، علی‌رغم افزایش ظرفیت خمشی ستون‌ها، باعث کاهش شکل‌پذیری و ظرفیت اتلاف انرژی ستون‌ها می‌شود. این نقص با استفاده از ترکیب روش NSM با محصورکننده‌ی CFRP از بین می‌رود. در مطالعه‌ی حاضر، اثر پوشش بتن در ظرفیت تحمل بار، سختی اولیه، شکل‌پذیری و ظرفیت اتلاف انرژی ستون‌های بتن مسلح مقاوم‌سازی شده به روش‌های NSM-GFRP و NSM-GFRP در ترکیب با محصورکننده‌ی CFRP بررسی شد و نتایج نشان داد که با افزایش پوشش بتن از ۲۰ به ۴۰ میلی‌متر، ظرفیت تحمل بار، شکل‌پذیری و ظرفیت اتلاف انرژی به ترتیب ۱۰، ۳ و ۱۸ درصد برای نمونه‌های تقویت‌شده به روش NSM-GFRP و ۲۵، ۴۰ و ۳۳ درصد برای نمونه‌های تقویت‌شده به روش ترکیبی NSM-GFRP همراه با محصورکننده‌ی CFRP کاهش می‌یابد. بنابراین، اثر پوشش بتن در تقویت ترکیبی بیشتر است.

واژگان کلیدی: مقاوم‌سازی، محصورکننده‌ی CFRP، NSM-GFRP، بار چرخه‌بی.

۱. مقدمه

پایدار، آسان برای نصب و مقرون به صرفه در عوض روش‌های منسوخ‌شده نیاز است.^[۱]

یکی از مواد جدیدی که کاربرد وسیعی در مقاوم‌سازی ستون‌های بتن مسلح دارند، پلیمرهای مسلح الیافی (FRP) هستند. برتری این مواد نسبت به غلاف‌های فلزی، شامل: نسبت‌های زیاد مقاومت به وزن و سختی به وزن، مقاومت بالا در مقابل کنش‌های محیطی، سبکی، دوام و راحتی کاربرد آن‌هاست. از جمله روش‌های به کارگیری FRP در مقاوم‌سازی ستون‌های بتن مسلح را می‌توان روش نصب در نزدیکی سطح (NSM)^۲، روش محصور کردن^۳ ستون، و روش نصب خارجی (EBR)^۴ ذکر کرد.

ایده‌ی تقویت NSM در اواخر دهه‌ی ۱۹۴۰ در اروپا با میلگردهای فولادی متولد شد.^[۱] در سال ۲۰۰۶، اولین پژوهش روی مقاوم‌سازی خمشی ستون‌ها با روش NSM-CFRP انجام شد.^[۲] در سال ۲۰۰۸، نیز یک مطالعه‌ی آزمایشگاهی بر روی ۱۲ ستون بتن مسلح تقویت‌شده به روش NSM با استفاده از نوارهای CFRP با دو نسبت تقویت فولادی مختلف انجام و نشان داده شد که افزایش مقاومت تأمین‌شده به وسیله‌ی نوارهای CFRP برای ستون‌های با نسبت تقویت فولادی طولی کمتر، بیشتر است.^[۳] همچنین نشان داده شد که در روش مذکور،

سازه‌های بتن مسلح به دلایل مختلف، شامل: خطا در طراحی و یا ساخت، تغییر کاربری سازه، خوردگی و ... نیاز به مقاوم‌سازی دارند. به دلیل به صرفه نبودن جایگزینی سازه‌ی موجود با سازه‌ی جدید از لحاظ اقتصادی و غیرممکن بودن روش مذکور در برخی مواقع، یافتن روشی مناسب برای تقویت سازه‌های بتن مسلح بسیار چالش‌برانگیز است. ستون‌ها یکی از قسمت‌های مهم سازه‌اند که در معرض نیروی فشاری و لنگر خمشی هستند. طی دهه‌های گذشته، استفاده از غلاف بتنی و فلزی برای تعمیر و تقویت ستون‌های بتن مسلح، رواج زیادی داشته و امروزه هنوز جزء روش‌های متداول است. اگر چه روش‌های ذکر شده در افزایش ظرفیت سازه مؤثر هستند، اما نیاز به تجهیز و نیروی کار نسبتاً زیادی دارند و گاهی اوقات مشکل در پیاده‌سازی دارند. علاوه بر این، سیستم غلاف بتن مسلح متجر به یک افزایش قابل توجه در مقطع عرضی ستون می‌شود و سیستم غلاف فلزی، اغلب سنگین است و به صورت ضعیف در برابر شرایط نامطلوب محیطی عمل می‌کند. از این رو، یک سیستم مقاوم‌سازی ابتکاری،

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۶/۵/۱۳۹۵، اصلاحیه ۲۸/۸/۱۳۹۵، پذیرش ۹/۷/۱۳۹۵.

DOI:10.24200/J30.2018.1403

درصد افزایش انرژی تلف شده کم است و مقاوم سازی ظرفیت اتلاف انرژی را بهبود نمی دهد و اثر بار یک شدن منحنی های هیستریزس در روش تقویت مذکور مشاهده می شود. در پژوهش دیگری در سال ۲۰۱۵ نیز نشان داده شد که استفاده از روش NSM نسبت به روش EBR، ۴ مزیت دارد: ۱. کاهش در عملیات لازم برای آماده سازی، ۲. کاهش احتمال جدا شدن پیش از موعد تقویت کننده ها، ۳. محافظت بیشتر در برابر عوامل محیطی مخرب و ۴. تأثیر بصری کمتر.^[۵] همچنین در سال ۲۰۱۶^[۶] مقایسه ای بر روی روش های مقاوم سازی میلگردهای NSM و ورقه های CFRP در مورد ستون های بتن مسلح تحت بارگذاری سیکلی جانبی انجام و نشان داده شد که میلگردهای NSM، تأثیر بیشتری نسبت به ورقه های CFRP در ظرفیت تحمل بار، شکل پذیری و ظرفیت اتلاف انرژی دارند.

اولین و معتبرترین پژوهش های صورت گرفته در زمینه ی ستون های محصورشده ی FRP از سوی برخی پژوهشگران،^[۷] در سال ۱۹۹۴ در یک مطالعه ی آزمایشگاهی بر روی نمونه های بتنی پوشیده شده با ۳ نوع FRP با مقاومت معمولی تحت بارگذاری فشاری تک محوری انجام و نشان داده شد که استفاده از FRP برای محصور کردن ستون ها، مقاومت فشاری و شکل پذیری را افزایش می دهد. اما در پژوهش دیگری در سال ۲۰۰۸ نشان داده شد که محصورکننده های FRP، تأثیر کمتری تحت بارگذاری خارج از مرکز یعنی اثر توأم خمش و فشار دارد.^[۸] باید دقت شود که در شرایط عملی، ستون های بتن مسلح در معرض ترکیب بارگذاری خمشی و محوری قرار می گیرند. مطالعات مختلفی از جمله پژوهشی در سال ۲۰۰۹^[۹] برای تخمین مقاومت فشاری و کرنش نهایی بتن های محصورشده با FRP ارائه شده است.

باید دقت شود که در روش NSM از ظرفیت کامل میلگردهای NSM، به دلیل کماتش پیش از موعد میلگردها استفاده نمی شود. همچنین همان طور که ذکر شد، محصورکننده ی FRP اثر قابل توجهی در افزایش ظرفیت خمشی ستون های بتن مسلح ندارد. بنابراین برای افزایش اثر توأم خمش و فشار و همچنین استفاده از ظرفیت کامل میلگردهای NSM، در برخی مطالعه های آزمایشگاهی بر روی تقویت ستون های بتن مسلح،^[۱۰] با استفاده از ترکیب دو تقویت محصورکننده ی FRP و NSM نشان داده شد که نمونه های مذکور، حلقه های هیستریزس ثابت و توپرتر و همچنین افزایش ظرفیت بار و شکل پذیری بیشتری نسبت به نمونه های مشابه خود، که فقط با تقویت NSM مقاوم سازی شده اند، دارند. در یک مطالعه ی آزمایشگاهی دیگر (۲۰۱۲)، بر روی ستون های مقاوم سازی شده با میلگردهای NSM نشان داده شد که پوشش CFRP، شرایط اتصال و جلوگیری از کماتش تقویت کننده های NSM را بهبود و مقاومت جانبی را افزایش می دهد. همچنین، استفاده از پوشش CFRP باعث افزایش شکل پذیری می شود.^[۱۱] یکی از مطالعاتی که اثر ترکیب هم زمان دو تقویت NSM و محصورشدگی را در نظر گرفته است، در سال ۲۰۱۱ انجام شده است،^[۱۲] و در آن بار به صورت خارج از مرکز به نمونه اعمال شده است تا اثر توأم بار محوری و لنگر خمشی در نظر گرفته شود. پارامترهای مورد بررسی، خروج از مرکزیت بار، مقاومت بتن و مقدار محصورشدگی CFRP بودند. همچنین در سال ۲۰۰۹، در یک مطالعه ی آزمایشگاهی بر روی ۸ سری نمونه ی تقویت شده با روش ترکیبی، پارامترهای مقاومت فشاری بتن، نسبت میلگردهای فولادی طولی، و تعداد نوارهای NSM در هروجه بررسی شدند.^[۱۳] در سال ۲۰۱۳، نیز در یک مطالعه ی آزمایشگاهی بر روی تقویت کننده های بازالتی FRP (BFRP)،^[۱۴] متغیرهای قطر میلگردهای BFRP، طول چسبندگی میلگرد NSM در بتن، و مقدار دورپیچ های BFRP بررسی شدند.^[۱۵] همچنین یک مطالعه ی آزمایشگاهی در سال ۲۰۱۳ بر روی مقاوم سازی ستون های بتن مسلح مستطیلی با نسبت وجه بزرگ با استفاده از

کامپوزیت های فیبری به روش ترکیبی همراه با مهارهایی^[۷] برای محصورکننده ها به منظور افزایش محصورشدگی دورپیچ های FRP انجام شد.^[۱۶] یک تحلیل عددی نیز بر روی ستون های تقویت شده با استفاده از ترکیب دو تقویت محصورکننده ی FRP و NSM در سال ۲۰۱۳ انجام شد.^[۱۷] همچنین در سال ۲۰۱۶، اثر درجه حرارت های بالا در ستون های بتن مسلح مقاوم سازی شده با روش های مختلف، از جمله محصورکننده و محصورکننده ی ترکیب شده با NSM انجام شد و نتایج نشان داد که اثر دما در نمونه های محصورشده با CFRP نسبت به نمونه های مقاوم سازی شده با روش ترکیبی کمتر است.^[۱۸]

با بررسی تحقیقات انجام شده در زمینه ی روش ترکیبی تقویت (میلگرد NSM با محصورکننده ی FRP)، اثر پوشش بتن در مطالعات ذکر شده بررسی نشده است. لذا، در مطالعه ی حاضر به بررسی تقویت ستون های بتن مسلح با استفاده از روش NSM-GFRP و روش NSM-GFRP با محصورکننده ی CFRP به منظور بررسی اثر پوشش بتن در ظرفیت تحمل بار، شکل پذیری، و ظرفیت اتلاف انرژی پرداخته شده است. بدین منظور، ۵ نمونه ستون بتن مسلح تحت بارگذاری هم زمان فشاری ثابت و بار جانبی سیکلی آزمایش شدند که شامل نمونه ی کنترل، نمونه های تقویت شده با NSM-GFRP، نمونه های تقویت شده با NSM-GFRP و محصورکننده ی CFRP با ۲ پوشش بتن ۲۰ و ۴۰ میلی متر بودند. نتایج نشان داد که اثر پوشش بتن در نمونه های تقویت شده با استفاده از ترکیب NSM-GFRP همراه با محصورکننده ی CFRP بیشتر است. به طوری که با افزایش پوشش بتن از ۲۰ میلی متر به ۴۰ میلی متر، ظرفیت تحمل بار، شکل پذیری و ظرفیت اتلاف انرژی به ترتیب ۳، ۱۰ و ۱۸ درصد برای نمونه های تقویت شده با روش NSM-GFRP و ۲۵ و ۴۰ و ۳۳ درصد برای نمونه های تقویت شده با روش ترکیبی NSM-GFRP همراه با محصورکننده ی CFRP کاهش یافته است.

۲. برنامه ی آزمایشگاهی

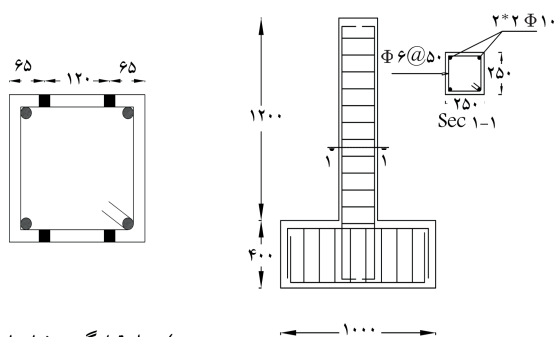
۲.۱. جزئیات نمونه ها

۵ ستون بتن مسلح مربعی به ابعاد ۱۲۰۰ × ۲۵۰ × ۲۵۰ میلی متر با مقیاس تقریبی ۱:۲/۵ آزمایش شدند. ستون ها در قسمت پایین به یک فونداسیون بتن مسلح برای اعمال بار چرخه ای جانبی و اتصال آن ها به کف صلب متصل شدند. جزئیات و ابعاد نمونه ها در شکل (الف) نشان داده شده است. کلیه ی ابعاد بر حسب میلی متر است. نمونه ها شامل ۴ آرماتور طولی فولادی با قطر ۱۰ میلی متر و خاموت های فولادی با قطر ۶ میلی متر با فاصله ی مرکز به مرکز ۵۰ میلی متر بودند.

۲. برنامه ی آزمایشگاهی

۲.۱. جزئیات نمونه ها

۵ ستون بتن مسلح مربعی به ابعاد ۱۲۰۰ × ۲۵۰ × ۲۵۰ میلی متر با مقیاس تقریبی ۱:۲/۵ آزمایش شدند. ستون ها در قسمت پایین به یک فونداسیون بتن مسلح برای اعمال بار چرخه ای جانبی و اتصال آن ها به کف صلب متصل شدند. جزئیات و ابعاد نمونه ها در شکل (الف) نشان داده شده است. کلیه ی ابعاد بر حسب میلی متر است. نمونه ها شامل ۴ آرماتور طولی فولادی با قطر ۱۰ میلی متر و خاموت های فولادی با قطر ۶ میلی متر با فاصله ی مرکز به مرکز ۵۰ میلی متر بودند.



شکل ۱. مشخصات نمونه ها.
 (الف) جزئیات و ابعاد نمونه های آزمایشگاهی؛
 (ب) محل قرارگیری شیارها در مقطع عرضی.



الف) مراحل تقویت به روش NSM؛ ب) مراحل محصور کردن ستون.

شکل ۲. چگونگی مقاوم سازی نمونه‌ها.



شکل ۳. دستگاه‌های آزمایش و سیستم اعمال بار.

و غباری که باعث جلوگیری از چسبیدن چسب در داخل شیارها می‌شود، پاک شدند. میلگردهای GFRP با طول موردنظر برش داده شدند. بعد از مخلوط کردن چسب‌های اپوکسی (با نسبت ۱:۳) شیارها تا نیمه از چسب اپوکسی پر شدند و پس از آن میلگردها در درون شیارها قرار گرفتند و سپس بقیه شیارها با چسب اپوکسی پر و سطح روی آن‌ها صاف شد (شکل ۲الف).

برای نمونه‌هایی که دورپیچ CFRP دارد، ابتدا گوشه‌های ستون برای جلوگیری از تمرکز تنش با شعاع ۱۵ میلی‌متر گرد و سپس صفحات CFRP به ابعاد موردنظر برش داده شد. برای چسباندن صفحات مذکور CFRP به ستون، از روش «چسباندن مرطوب» استفاده می‌شود. برای این منظور ابتدا با کمک کاردک سطوح موردنظر با ماده‌ی زمینه (چسب اپوکسی) پوشش داده می‌شوند و سپس الیاف کربن با فشار دست بر روی سطح قرار می‌گیرد (شکل ۲ب). طول هم‌پوشانی صفحات CFRP، ۱۰۰ میلی‌متر بود. به همین ترتیب برای لایه‌های بعدی عمل شد، به طوری که تا ارتفاع ۹۰۰ میلی‌متری ستون با صفحات CFRP پوشیده شود.

۴.۲. نحوه‌ی بارگذاری، الگوی بارگذاری و تجهیزات

کلیه‌ی نمونه‌ها تحت بار فشاری ثابت و بار جانبی سیکلی تا شکست آزمایش شدند. اعمال بار فشاری به ستون‌ها به کمک دو میلگرد که به صورت پیش‌تیدگی است، انجام شده است. بار فشاری مذکور، ثابت و حدوداً ۱۶ تن معادل $A_g \times f'_c \times 0.18$ بود. همچنین بارگذاری سیکلی به وسیله‌ی جک افقی به ستون اعمال شد. سیستم اعمال بار ذکرشده در شکل ۳ مشاهده می‌شود. به منظور حفظ تعادل نمونه، از مهارهای فلزی مناسب در دو انتهای فونداسیون استفاده شده است، به طوری که از حرکت آن در جهت‌های جانبی جلوگیری به عمل آید. چرخه‌های بارگذاری مذکور براساس کنترل جابه‌جایی تنظیم شده و مقدار آن‌ها به ترتیب برابر $0.5\delta_y$ ، $0.8\delta_y$ ، $1.2\delta_y$ و $1.5\delta_y$ است.

جدول ۱. جزئیات نمونه‌ها.

نام	پوشش بتن (mm)	NSM FRP	تعداد لایه‌های محصورکننده
C1	۲۰	-	-
C2	۲۰	۲ × ۲φ۱۰	-
C3	۲۰	۲ × ۲φ۱۰	۲L CFRP
C4	۴۰	۲ × ۲φ۱۰	-
C5	۴۰	۲ × ۲φ۱۰	۲L CFRP

جدول ۲. مشخصات مکانیکی آرماتورهای فولادی.

نوع آرماتور	تنش جاری شدن (MPa)	تنش نهایی (MPa)
آرماتور به قطر ۶ میلی‌متر (AII)	۳۳۷	۴۷۵
آرماتور به قطر ۱۰ میلی‌متر (AIII)	۴۰۸	۶۶۰

جزئیات نمونه‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. متغیرهای آزمایش روش تقویت و پوشش بتن و نمونه‌های آن، شامل ۵ نمونه، نمونه‌ی کنترل، ۲ نمونه‌ی تقویت‌شده با ۲ میلگرد GFRP به قطر ۱۰ میلی‌متر در ۲ وجه مقابل ستون به روش NSM با پوشش‌های ۲۰ و ۴۰ میلی‌متر و ۲ نمونه‌ی تقویت‌شده به صورت حالت قبل اما با ۲ لایه ورق CFRP به‌عنوان محصورکننده بودند. طول مهارهای میلگردهای NSM در پی برای همه‌ی نمونه‌ها ثابت و برابر ۲۰ سانتی‌متر بود. آرایش میلگردهای NSM در شکل (ب) نشان داده شده است.

۲.۲. مشخصات مصالح

همه‌ی ستون‌ها و فونداسیون‌ها با استفاده از بتن آماده ساخته شده‌اند. متوسط مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن‌های پی و ستون به ترتیب ۲۴٫۵ و ۱۸٫۲ مگاپاسکال بود. از میلگردهای نوع AII برای خاموت‌ها و از میلگردهای نوع AIII برای آرماتورهای طولی استفاده شده است. مشخصات مکانیکی میلگردهای مورداستفاده در مطالعه‌ی حاضر براساس آزمون کشش بر طبق آیین‌نامه‌ی DIN EN ۱۰۰۰۲،^[۱۹] در جدول ۲ ارائه شده است.

میلگردهای FRP مورداستفاده در نمونه‌ها از نوع شیشه و به قطر ۱۰ میلی‌متر بود. مشخصات مکانیکی با استفاده از آزمون کشش، بر طبق آیین‌نامه‌ی ACI 440.3R-04^[۲۰] به‌دست آمده است. تنش‌نهایی و مدول کشسانی میلگردهای GFRP به ترتیب ۱۰۵۲ و ۴۳۸۹۰ مگاپاسکال و چسب مورد استفاده برای میلگردهای مذکور از نوع QUANTOM EPR ۳۰۱ بود.

الیاف کربنی مورداستفاده در مطالعه‌ی حاضر، از محصولات شرکت «کوانتوم» به‌صورت یک جهت و با ضخامت ۰٫۱۱۱ میلی‌متر و مقاومت نهایی و مدول کشسانی آن‌ها براساس مشخصات کارخانه به ترتیب ۴۹۵۰ و ۲۴۰۰۰۰ مگاپاسکال بوده است. چسب مورد استفاده برای صفحات مذکور نیز از نوع QUANTOM EPR ۳۰۱ است.

۳.۲. آماده‌سازی نمونه‌ها

۲۸ روز بعد از عمل‌آوری نمونه‌ها، شیارهایی به ابعاد ۲۰ × ۲۰ میلی‌متر با استفاده از دستگاه فرز در محل‌های موردنظر براساس شکل (۱ب) و تا ارتفاع ۹۰ میلی‌متری ستون‌ها ایجاد شدند. شیارها با استفاده از دستگاه باد فشار قوی از هرگونه گرد

با محصورکننده CFRP، پوشش بتن اثر بیشتری با توجه به اثر محصورکننده‌ی FRP دارد.

۲.۳. مودهای شکست و الگوهای ترک

مود شکست همگی نمونه‌ها، مود شکست خمشی بود. در نمونه‌ی C۱، اولین ریزترک‌ها در بار ۸/۸ تن ایجاد شد و با افزایش بار در سیکل‌های بعدی، تعداد ترک‌ها و عرض ترک‌ها افزایش یافت. در بار حدود ۳/۳ تن در وجه فشاری، بتن پوسته

۳، ۵ δ_y و ۶ δ_y بوده است که در آن‌ها δ_y تغییر مکان نظیر تسلیم میلگردهای طولی ستون در نمونه‌ی کنترل است.

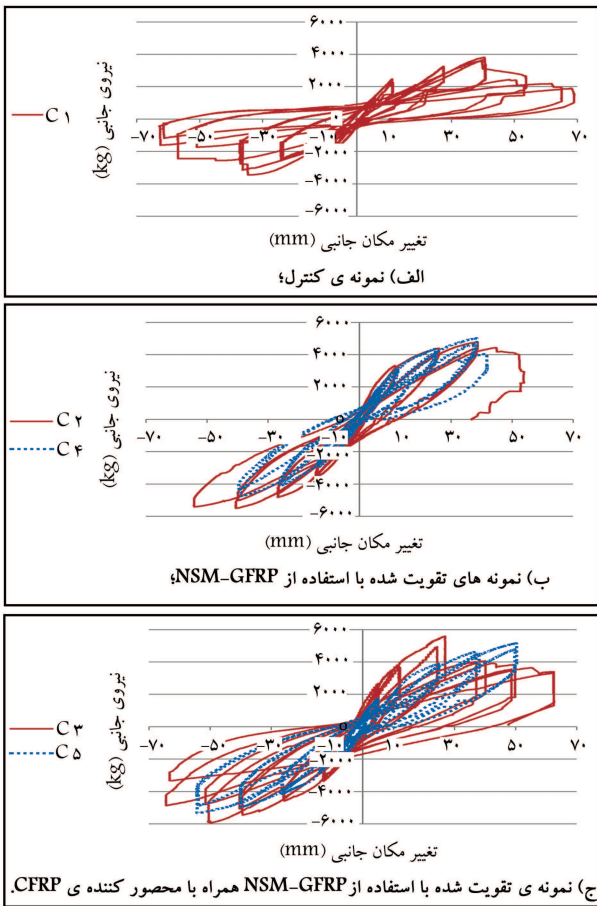
از خط‌کش‌های اندازه‌گیری تغییر مکان (LVDT)^۸ برای اندازه‌گیری جابه‌جایی افقی ستون در ترازهای ۱۱۰° و ۵۰° میلی‌متری از روی فونداسیون استفاده شد. دو نیروسنج با ظرفیت‌های ۲۰ و ۳۰ تنی به ترتیب برای اندازه‌گیری بارهای جانبی سیکلی و عمودی ستون استفاده و کلیه‌ی اطلاعات شامل: بار اعمالی، تغییر مکان وسط و انتهای ستون توسط دستگاه پردازنده اطلاعات ثبت شده است.

۳. نتایج آزمایشگاهی

کلیه‌ی نتایج آزمایشگاهی نمونه‌ها، شامل: بیشینه‌ی نیروهای قابل تحمل در فشار و کشش، جابه‌جایی جانبی در بیشینه‌ی نیروی جانبی، میانگین افزایش نیروی جانبی در کشش و فشار نسبت به نمونه‌ی کنترل، شاخص شکل‌پذیری، سختی اولیه و ظرفیت اتلاف انرژی نمونه‌ها در جدول ۳ ارائه شده است. جهت صحت‌سنجی نتایج، میانگین بیشینه‌ی نیروی جانبی نمونه‌ی کنترل با مقادیر تئوری (در نظر گرفتن تعادل در مقطع) مقایسه شدند. مقادیر آزمایشگاهی با مقادیر تئوری تقریباً ۸٪ اختلاف داشتند. در بخش‌های بعدی در مورد نتایج مذکور بحث شده است.

۱.۳. نمودارهای هیستریزیس

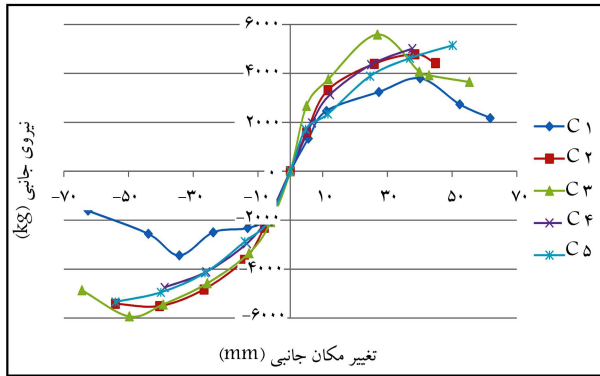
با توجه به اطلاعات به‌دست آمده از آزمایش‌ها، نمودارهای هیستریزیس بار جانبی در مقابل جابه‌جایی برای ۵ نمونه در شکل ۴ رسم شده است. نمودار نمونه‌ی کنترل به‌صورت جدا و ۴ نمونه‌ی دیگر به‌صورت دوتایی برای نشان‌دادن اثر پوشش بتن نشان داده شده است. مطابق شکل مذکور، در نمونه‌های C۱، C۲ و C۴ اثر باریک‌شدگی^۹ مشهودی قابل مشاهده است؛ ولی اثر باریک‌شدگی مذکور در نمونه‌های C۲ و C۴ که با استفاده از میلگرد NSM-GFRP تقویت شده‌اند، مشهودتر است. با دقت در شکل‌های (ب) و (پ) مشاهده می‌شود زمانی که از پوشش بتن بیشتر استفاده می‌شود، اثر باریک‌شدگی ذکر شده نسبت به پوشش بتن کمتر، بیشتر است. همچنین افزایش باریک‌شدگی ناشی از افزایش پوشش بتن برای زمانی که از تقویت NSM-GFRP همراه با محصورکننده‌ی CFRP استفاده می‌شود، بیشتر است. بنابراین زمان استفاده از روش تقویت NSM-GFRP همراه



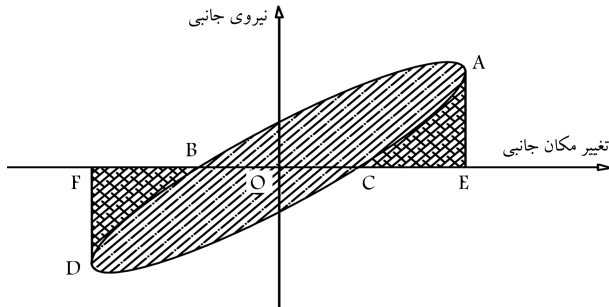
شکل ۴. نمودارهای هیستریزیس بار - تغییر مکان نمونه‌ها.

جدول ۳. خلاصه‌ی نتایج آزمایشگاهی.

شماره‌ی نمونه	C۱	C۲	C۳	C۴	C۵
F_{peak}^+ (ton)	۳٫۸	۴٫۸	۵٫۵۹	۵٫۰۱	۵٫۱
Δ_{peak}^+ (mm)	۴٫۰۱	۳٫۸۷	۲٫۶۹	۳٫۷۶	۵٫۰۱
F_{peak}^- (ton)	-۳٫۴	-۵٫۵	-۵٫۹۳	-۴٫۷۵	-۵٫۳۴
Δ_{peak}^- (mm)	-۳٫۴۲	-۴٫۰۴	-۴٫۹۷	-۳٫۸	-۵٫۴۰
میانگین افزایش نیروی جانبی (%)	-	۴۳	۶۰	۳۵	۴۵
سختی اولیه (ton/mm)	۰٫۲۵	۰٫۳	۰٫۴۴	۰٫۲۷	۰٫۳۳
سیکل شکست	۶	۴٫۵	۶	۴٫۵	۶
شاخص شکل‌پذیری	۱٫۸۳	۱٫۴	۲٫۵۵	۱٫۴۵	۱٫۵۴
ظرفیت اتلاف انرژی (ton.m)	۰٫۴۸	۰٫۵۶	۰٫۷۵	۰٫۴۶	۰٫۵۰



شکل ۵. منحنی پوش بار - تغییر مکان جانبی نمونه‌ها.



شکل ۶. الگوی محاسبه‌ی ظرفیت اتلاف انرژی و شاخص شکل‌پذیری.

رابطه‌ی ۱ بیان می‌شود:

$$\mu = \frac{1}{4} \left(\frac{E_{tot}}{E_{el}} + 1 \right) \quad (1)$$

که در آن، E_{tot} و E_{el} به ترتیب سطح کل زیر منحنی بارگذاری (مجموع مساحت‌های ABE و DCF در هر سیکل در شکل ۶) و سطح زیر منحنی باربرداری (مجموع مساحت‌های ACE و DBF در هر سیکل در شکل ۶) ستون هستند. مقادیر ضریب شکل‌پذیری نمونه‌های مورد بررسی در جدول ۳ ارائه شده‌اند. استفاده از تقویت NSM-GFRP نه فقط تأثیری قابل توجهی در افزایش شاخص شکل‌پذیری نمونه ندارد، بلکه استفاده از تقویت مذکور باعث کاهش شاخص شکل‌پذیری می‌شود. اما استفاده از محصورکننده‌ی CFRP در ترکیب با NSM-GFRP، شکل‌پذیری نمونه‌ها را افزایش می‌دهد. افزایش پوشش بتن در روش تقویت ترکیبی باعث کاهش ۴۰ درصدی شاخص شکل‌پذیری می‌شود. اما افزایش پوشش بتن تأثیر چندانی در شاخص شکل‌پذیری در روش تقویت NSM-GFRP ندارد.

جذب انرژی، یکی از عوامل مهم در بررسی لرزه‌ی سازه است، به طوری که هر چه مقدار مذکور بیشتر باشد، ستون عملکرد بهتری دارد. انرژی جذب شده از طریق محاسبه‌ی سطح محصورشده توسط حلقه‌های هیستریزس (مجموع مساحت‌های ABDC در هر سیکل در شکل ۶) به دست آمده است. در جدول ۳، مقدار انرژی تلف شده‌ی نهایی نمونه‌ها ارائه شده است. استفاده از روش تقویت NSM-GFRP، باعث کاهش ظرفیت اتلاف انرژی می‌شود؛ اما استفاده از محصورکننده باعث افزایش ظرفیت اتلاف انرژی می‌شود. افزایش پوشش بتن باعث کاهش ظرفیت اتلاف انرژی نمونه‌ها می‌شود، به طوری که این افزایش باعث کاهش ۱۸ درصدی ظرفیت اتلاف انرژی در روش تقویت NSM-GFRP و کاهش ۳۳ درصدی ظرفیت اتلاف انرژی در روش ترکیبی NSM-GFRP همراه با محصورکننده‌ی CFRP می‌شود.

پوسته شد و با افزایش بار، خردشدن بتن در وجه فشاری را در پی داشت. در نمونه‌ی C۲ که فقط با NSM-GFRP تقویت شده است، اولین ریزش ترک‌های کششی در باری بزرگ‌تر نسبت به نمونه‌ی کنترل مشاهده شد. این بار حدوداً ۲ تن بود. در بار جانبی حدوداً ۳ تن، ترک‌های کششی بر روی چسب‌های میلگردهای GFRP مشاهده شد و همچنین صدای گسترش ترک‌ها در چسب‌ها نیز به گوش می‌رسید و صدا در سیکل‌های بعدی بلندتر بود. در بار حدوداً ۴٫۸ تن در وجه فشاری، پوسته‌پوسته شدن بتن نیز مشاهده شد، که مقدار بار مذکور نسبت به نمونه‌ی کنترل، حدوداً ۴۵٪ افزایش یافته است. همچنین ترک‌های کششی در راستای میلگردهای GFRP گسترش یافت. نوع شکست در نمونه‌ی C۲، خردشدن بتن و به دنبال آن کماتش میلگردهای NSM-GFRP را به همراه داشت. در نمونه‌ی C۳ با توجه به اینکه با CFRP دورپیچ شده است، نمی‌توان در آن ترک‌های کششی را مشخص کرد. در چرخه‌ی دوم در بار نزدیک به ۳٫۱ تن، صداهای ناشی از ترک‌خوردگی در چسب‌های اپوکسی شنیده می‌شود. در نمونه‌ی مذکور، میلگردهای GFRP پس از شکست آج‌ها، از درون فونداسیون بیرون کشیده شدند، اما هیچ اتفاقی برای دورپیچ CFRP آن ایجاد نشد. در اثر لغزش میلگردهای NSM-GFRP، بتن ستون از بتن پی به صورت مشهودی جدا شد. نمونه‌ی C۴ در باری کمتر نسبت به نمونه‌ی C۲ (۱٫۸ تن) شروع به ترک خوردن کرد. در باری نزدیک به ۲٫۵ تن، ترک‌های کششی در چسب‌های اپوکسی میلگردها ایجاد شد که این بار هم نسبت به نمونه‌ی C۲ کمتر است. اولین پوسته شدن بتن در ناحیه‌ی فشاری در سیکل ۴ در باری کمتر از ۵ تن اتفاق افتاد. بعد از خرد شدن بتن در گوشه‌ها در سیکل ۵، جداسازی میلگردها کششی در باری نزدیک ۴ تن رخ داد و آزمایش متوقف شد. در نمونه‌ی C۵ نیز در سیکل سوم، صداهایی ناشی از ترک‌خوردگی در چسب‌ها شنیده می‌شد.

۳.۳. منحنی پوش و سختی اولیه

در شکل ۵، منحنی پوش بار - تغییر مکان نمونه‌ها مقایسه شده‌اند. استفاده از روش‌های تقویت باعث افزایش ظرفیت حمل بار جانبی می‌شود. همان طوری که در مطالعات پیشین ذکر شده است، استفاده از روش تقویت ترکیبی NSM-GFRP همراه با محصورکننده‌ی CFRP، باعث افزایش بیشتری در ظرفیت حمل بار جانبی نسبت به روش تقویت NSM-GFRP می‌شود. افزایش پوشش بتن باعث کاهش ظرفیت حمل بار جانبی می‌شود. این کاهش در نمونه‌های تقویت شده به روش تقویت ترکیبی NSM-GFRP همراه با محصورکننده‌ی CFRP بیشتر است (۲۵٪). این علت را می‌توان به اثر محصورکننده‌ی CFRP و ناحیه‌ی محصورشده به واسطه‌ی خاموت‌ها دانست.

در نمونه‌های تقویت شده (شکل ۵)، سختی اولیه نسبت به نمونه‌ی کنترلی بزرگ‌تر است. این افزایش سختی اولیه می‌تواند به دلیل وجود میلگردهای NSM باشد. در جدول ۳، سختی اولیه‌ی نمونه‌ها نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهند افزایش پوشش بتن باعث کاهش سختی اولیه می‌شود، به طوری که با افزایش پوشش بتن از ۲۰ میلی‌متر به ۴۰ میلی‌متر در نمونه‌های تقویت شده به روش NSM، ۱۰٪ و در نمونه‌های تقویت شده به روش ترکیبی، ۲۵٪ کاهش می‌یابد. بنابراین در مورد کاهش سختی اولیه، اثر پوشش بتن در روش تقویت ترکیبی بیشتر است.

۴.۳. شکل‌پذیری و ظرفیت اتلاف انرژی

منظور از شکل‌پذیری در پژوهش حاضر، شاخص شکل‌پذیری ارائه شده در پژوهشی در سال ۱۹۹۵ است^[۲۱] که بر پایه‌ی مفاهیم جذب انرژی بنا شده است و با

۴. نتیجه‌گیری

با انجام پژوهشی بر روی مطالعات آزمایشگاهی در زمینه‌ی تقویت ستون‌های بتن‌آرمه، با NSM و محصورکننده‌ی CFRP، استفاده از CFRP برای محصورکردن ستون‌ها، مقاومت فشاری و شکل‌پذیری را افزایش می‌دهد. اما محصورکننده‌های CFRP، تأثیر کمتری تحت بارگذاری خارج از مرکز یعنی اثر توأم خمش و فشار دارند. روش تقویت NSM به طور موفقیت‌آمیز برای بهبود ظرفیت خمشی ستون‌های بتن مسلح استفاده می‌شود. مطالعات کمی بر روی روش ترکیب تقویت NSM با محصورکننده‌ی FRP انجام شده و در میان مطالعات مذکور، مطالعه‌ی که اثر پوشش بتن را در این تقویت بررسی کند، مشاهده نشده است. پس از بررسی مطالعات انجام‌شده، در پژوهش حاضر با انجام مطالعه‌ی آزمایشگاهی به بررسی اثر پوشش بتن در رفتار و ظرفیت ستون‌های بتن‌آرمه‌ی تقویت‌شده به روش NSM-GFRP و روش ترکیب NSM-GFRP با محصورکننده‌ی CFRP پرداخته شده و این نتایج به دست آمده است:

۱. استفاده از تقویت NSM-GFRP، ظرفیت تحمل بار جانبی را افزایش می‌دهد، اما اضافه کردن محصورکننده‌ی CFRP به نمونه‌های تقویت‌شده با NSM-GFRP، باعث افزایش ۲۹ و ۴۰ درصدی ظرفیت حمل بار به ترتیب برای پوشش بتن ۴۰ و ۲۰ میلی‌متر می‌شود.

۲. روش تقویت NSM-GFRP باعث افزایش باریک‌شدگی نمودار هیستریزیس نسبت به نمونه‌ی کنترلی می‌شود. اما برخلاف آن در روش تقویت ترکیبی NSM-GFRP با محصورکننده‌ی CFRP، باریک‌شدگی مذکور کاهش می‌یابد و منحنی‌های هیستریزیس توپر و پایدارتری تولید می‌شود. همچنین، روش تقویت NSM-GFRP باعث کاهش شکل‌پذیری و ظرفیت اتلاف انرژی نمونه‌ها می‌شود، اما روش تقویت ترکیبی باعث افزایش قابل توجهی در شکل‌پذیری و ظرفیت اتلاف انرژی نسبت به نمونه‌ی کنترلی می‌شوند.

۳. همه‌ی نمونه‌های تقویت‌شده، سختی اولیه‌ی بزرگ‌تری نسبت به نمونه‌ی کنترلی دارند؛ اما نمونه‌های تقویت‌شده با روش تقویت ترکیبی، سختی اولیه‌ی بیشتری دارند.

۴. در بیشتر پارامترهای مورد بررسی در مطالعه‌ی حاضر، از جمله ظرفیت تحمل نیروی جانبی، سختی اولیه، و ظرفیت اتلاف انرژی، نمونه‌های با پوشش بتن کمتر در هر نوع تقویت، عملکرد بهتری داشته‌اند. در مورد شاخص شکل‌پذیری پوشش بتن، فقط در مورد نمونه‌های تقویت‌شده با استفاده از روش ترکیبی تأثیر داشته است.

۵. پوشش بتن در نمونه‌های تقویت‌شده با استفاده از روش ترکیبی، تأثیر بیشتری نسبت به نمونه‌های تقویت‌شده با استفاده از روش NSM-GFRP دارد. که علت آن را می‌توان نسبت ناحیه‌ی محصورشده توسط CFRP و ناحیه‌ی محصورشده توسط خاموت‌ها دانست.

پانویس‌ها

1. fiber reinforced polymer
2. near surface mounted
3. confinement
4. externally bounded reinforcement
5. near surface mounted - carbon fiber reinforced polymer
6. basalt fibre reinforced polymer
7. anchor
8. linear variable displacement transducer (LDVT)
9. pinching

منابع (References)

1. Fam, A.Z. and Rizkalla, S.H. "Behavior of axially loaded concrete-filled circular fiber-reinforced polymer tubes", *ACI Structural Journal*, **98**(3), pp. 280-289 (2001).
2. Asplund, S.O. "Strengthening bridge slabs with grouted reinforcement", *ACI Structural Journal*, **45**(1), pp. 397-406 (1949).
3. Barros, J.A.O., Ferreira, D.R.S.M., Fortes, A.S. and et al. "Assessing the effectiveness of embedding CFRP laminates in the near surface for structural strengthening", (Elsevier Ltd)", *Construction and Building Materials*, **20**(7), pp. 478-491 (2006).
4. Barros, J.A.O., Varma, R.K., Sena-Cruz, J.M. and et al. "Near surface mounted CFRP strips for the flexural

strengthening of RC columns: Experimental and numerical research", *Engineering Structures*, **30**(12), pp. 3412-3425 (2008).

5. Coelho, M.R.F., Sena-Cruz, J.M. and Neves, L.A.C. "A review on the bond behavior of FRP NSM systems in concrete", *Construction and Building Materials*, **93**, pp. 1157-1169 (2015).
6. Hasan, Q.F., Tekeli, H. and Demir, F. "NSM rebar and CFRP laminate strengthening for RC columns subjected to cyclic loading", *Construction and Building Materials*, **119**, pp. 21-30 (2016).
7. Nanni, A. and Bradford, N.M. "FRP jacketed concrete uniaxial compression", *Construction and Building Materials*, **9**(2), pp. 115-124 (1995).
8. Parvin, A. and Schroeder, J.M. "Investigation of eccentrically loaded CFRP-confined elliptical concrete columns, (ASCE)", *Journal of Composites For Construction*, **12**(1), pp. 93-101 (2008).
9. Kheyroddin, A., Naderpour, H. and Hoseini Vaez, S.R. "Proposing a relationship for calculating the strength of confined concrete for bridge RC columns strengthened with FRP", *Journal of Transportation Engineering*, **1**(1), pp. 37-53 (2009).
10. Bournas, D.A. and Triantafillou, T.C. "Flexural strengthening of RC columns with near surface mounted FRP or stainless steel reinforcement: Experimental investigation", *14th World Conference on Earthquake Engineering*, Beijing (2008).

11. Bournas, D.A. and Triantafillou, T.C. "Flexural strengthening of RC columns with near surface mounted FRP or stainless steel reinforcement", *ACI Structural Journal*, **106**(4), pp. 495-505 (2009).
12. Sarafraz, M. and Danesh, F. "Experimental study on flexural strengthening of RC columns with near surface mounted FRP bars", *Journal of Seismology and Earthquake Engineering*, **12**(1), pp. 39-50 (2010).
13. El-Maaddawy, T. and El-Dieb, S. "Near-Surface-Mounted composite system for repair and strengthening of reinforced concrete columns subjected to axial load and biaxial bending, (ASCE)", *Journal of Composites for Construction*, **15**(4), pp. 602-614 (2011).
14. Perrone, M., Barros, J.A.O. and Aprile, A. "CFRP-Based strengthening technique to increase the flexural and energy dissipation capacities of RC columns, (ASCE)", *Journal of Composites for Construction*, **13**(5), pp. 372-383 (2009).
15. Ding, L., Wu, J., Yang, S. and et al. "Performance advancement of RC column by applying Basalt FRP composites with NSM and confinement system", *World Scientific Journal of Earthquake and Tsunami*, **7**(2), pp. 1350007-1-1350007-20 (2013).
16. Li, X., Lv, H.L., Zhang, G.C. and et al. "Seismic retrofitting of rectangular reinforced concrete columns using fiber composites for enhanced flexural strength, (SAGE)", *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, **32**(9), pp. 619-630 (2013).
17. Barkhordar, M.A., Dayhim, N., Nicknam, A. and et al. "Numerical modeling of reinforced concrete columns strengthened with composite material", *Asian Journal of Civil Engineering*, **14**(4), pp. 1-16 (2013).
18. Al-Salloum, Y.A., Almusallam, T.H., Elsanadedy, H.M. and et al. "NSM rebar and CFRP laminate strengthening for RC columns subjected to cyclic loading", *Construction and Building Materials*, **115**, pp. 345-361 (2016).
19. *DIN EN 10002: Tensile Testing of Metallic Materials-Part 1: Method of Test at Ambient Temperature*, DIN-Adopted European Standard (1991).
20. *ACI 440.3R: Guide Test Methods for Fiber-Reinforced Polymers (FRPs) for Reinforcing or Strengthening Concrete Structures*, American Concrete Institute, Farmington Hills (2004).
21. Naaman, A.E. and Jeong, S.M. "Structural ductility of concrete beams prestressed with FRP tendons, Non-metallic (FRP) reinforcement for concrete structures", *Proceeding of the 2nd International RILEM Symposium (FRPRCS-2)*, London,UK, pp. 379-386 (1995).