

مقاوم‌سازی ستون‌های بتن مسلح به روش نصب نزدیک سطح و دورپچی با پلیمرهای مسلح الیافی

یاسر مودی^۱، سید روح الله موسوی^{۲*}، محمدرضا اصفهانی^۳

۱- دانشجوی دکتری عمران-سازه، دانشگاه سیستان و بلوچستان

۲- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه سیستان و بلوچستان

۳- استاد گروه مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد

*s.r.mousavi@eng.usb.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۹۵/۰۳/۱۹]

تاریخ دریافت: [۹۴/۱۰/۲۹]

چکیده

روش نصب در نزدیک سطح (NSM)، یک روش بسیار مفید در به کارگیری میلگردها و نوارهای FRP در مقاوم‌سازی ستون‌های بتن مسلح است. مطالعات انجام شده در این زمینه نشان می‌دهد که این میلگردها ظرفیت باربری خمشی ستون‌ها را افزایش می‌دهد. با وجود افزایش ظرفیت خمشی به وسیله‌ی میلگردهای NSM-GFRP، این روش تقویت باعث کاهش شکل‌پذیری و ظرفیت اتلاف انرژی ستون‌ها می‌شود. علاوه بر مشکلات گفته شده‌ی این روش، عدم استفاده کامل از ظرفیت تحمل بار میلگردهای GFRP، یکی دیگر از عیب‌های این روش است که این نقص با استفاده از ترکیب این روش با محصورکننده‌ی CFRP از بین می‌رود. نتایج مطالعات نشان می‌دهد که استفاده از ترکیب این دو باعث افزایش توأم مقاومت فشاری و خمشی ستون‌های بتن آرمه می‌شود. در این مطالعه به بررسی آزمایشگاهی دو روش ترکیبی NSM-GFRP با محصورکننده‌ی CFRP و NSM-Steel برای تقویت ستون‌های بتن آرمه تحت بارگذاری محوری ثابت و جانبی چرخه‌ای پرداخته شده است. با توجه به نتایج به دست آمده، نشان داده شد که استفاده از این دو روش تقویت ترکیبی باعث افزایش ظرفیت تحمل بار، شکل‌پذیری، ظرفیت اتلاف انرژی و سختی اولیه ستون‌ها نسبت به ستون کنترلی و ستون تقویت شده با استفاده از روش NSM-GFRP می‌شود. در همه‌ی این پارامترها نتایج نشان می‌دهد تقویت ستون‌های بتن آرمه به روش ترکیبی NSM-GFRP با NSM-Steel (با نسبت NSM-Steel به NSM-GFRP بالاتر) نسبت به روش ترکیبی NSM-GFRP با محصورکننده‌ی CFRP بهبود بیشتر می‌دهد، اما با توجه به مباحث خوردگی میلگردهای فولادی روش تقویت ترکیبی NSM-GFRP با محصورکننده‌ی CFRP به عنوان بهترین روش انتخاب می‌شود.

واژگان کلیدی: بتن آرمه، مقاوم‌سازی، محصورکننده CFRP، NSM-Steel، NSM-GFRP

۱- مقدمه

روش‌های تعمیر و مقاوم‌سازی مقرون به صرفه و قابل اعتماد

است [1].

کامپوزیت‌های پلیمری FRP با توجه به خواص بسیار مطلوبشان از جمله نرخ بالای مقاومت به وزن و سختی به وزن، مقابله با آسیب‌های محیطی، سبکی، دوام، خاصیت میرایی، قابلیت استفاده از آنها در کاربری سازه بدون افزایش قابل توجه در ابعاد سازه و راحتی کاربرد آنها به عنوان مصالح بسیار

امروزه در دنیا بسیاری از ستون‌هایی که در گذشته ساخته شده‌اند به دلایل مختلفی مانند خطا در حین ساخت، خطا در طراحی، تغییر کاربری ساختمان، تغییر در آیین‌نامه، به وجود آمدن شرایط تیر قوی-ستون ضعیف و غیره نیاز به ترمیم و تقویت دارند. از طرفی، برچیدن و ساخت دوباره آنها هزینه‌بردار و در بعضی مواقع غیرعملی است در حالی که

نشان می‌دهد، اما این تقویت اثر قابل توجه‌ای روی شکل‌پذیری نمونه ندارد. کونلیو و همکاران [10] در سال ۲۰۱۵ نشان دادند که استفاده از روش NSM نسبت به روش EBR، ۴ مزیت دارد: ۱- کاهش در عملیات لازم برای آماده‌سازی، ۲- کاهش احتمال جدا شدن پیش از موعد تقویت کننده‌ها، ۳- محافظت بیشتر در برابر عوامل محیطی مخرب و ۴- تأثیر بصری کمتر.

از جمله نخستین مطالعه‌ی آزمایشگاهی روی ترکیب دو تقویت محصورکننده‌ی FRP و NSM، به وسیله‌ی بورنس و تریتاویلا [11,12]. در سال ۲۰۰۸ انجام شد. آنها در این مطالعه نشان دادند در نمونه‌هایی که از ترکیب دو روش تقویت استفاده شده است، حلقه‌های هیستریزس ثابت و توپرتری و همچنین افزایش ظرفیت بار و شکل‌پذیری بیشتری نسبت به نمونه‌های مشابه خود که تنها با تقویت NSM مقاوم‌سازی شده‌اند، دارند. از جمله مطالعات دیگری که در زمینه‌ی ترکیب دو تقویت محصورکننده‌ی FRP و NSM انجام شده است می‌توان به مطالعات دینگ و همکاران [13] و لی و همکاران [14] در سال ۲۰۱۳ اشاره کرد. متغیرهای بررسی شده در مطالعه دینگ و همکاران [13] قطر میلگردهای BFRP، طول چسبندگی میلگرد NSM در بتن و مقدار دورپیچ‌های BFRP بود و بررسی لی و همکاران [14] روی مقاوم‌سازی ستون‌های بتن مسلح مستطیلی با نسبت وجه بزرگ با استفاده از کامپوزیت‌های فیبری به روش ترکیبی همراه با مهارهایی^۱ برای محصورکننده‌ها به منظور افزایش محصورشدگی بود.

در سال ۲۰۱۵، جی و همکاران [15]. با انجام آزمایش‌هایی روی ۵ تیر بتن مسلح ترکیبی (BFRP و فولادی) نشان دادند با افزایش نسبت میلگرد BFRP به میلگرد فولادی (A_f/A_s) تغییر شکل خمشی افزایش می‌یابد و فاکتور کاهش سختی و شکل‌پذیری کاهش می‌یابد.

در این مطالعه به بررسی ستون‌ها تقویت‌شده با استفاده از روش‌های ترکیبی NSM-GFRP با محصورکننده‌ی CFRP و NSM-GFRP با NSM-Steel به منظور افزایش توأم ظرفیت خمشی، شکل‌پذیری و ظرفیت اتلاف انرژی پرداخته می‌شود. ۵

مناسب برای مقاوم‌سازی سازه‌های بتنی موجود معرفی شده‌اند [2].

یکی از روش‌های تقویت ستون‌ها استفاده از FRP به صورت ورق‌هایی برای محصور کردن ستون‌های بتن مسلح است. مطالعات گسترده‌ای در این زمینه روی ستون‌های بتنی انجام شده است که این تحقیق‌ها نشان می‌دهند که استفاده از FRP برای محصور کردن ستون‌ها مقاومت فشاری و شکل‌پذیری را افزایش می‌دهد [3]. اما محصورکننده‌های FRP تأثیر کمتری تحت بارگذاری خارج از مرکز یعنی اثر توأم خمش و فشار دارد [4]. باید دقت شود که در شرایط عملی، ستون‌های بتن مسلح در معرض ترکیب بارگذاری خمشی و محوری قرار می‌گیرند.

ایده تقویت NSM در اواخر دهه ۱۹۴۰ میلادی در اروپا با میلگردهای فولادی متولد شد [5]. در سال ۲۰۱۰، اتمان [6] با انجام آزمایش‌هایی روی ستون‌های بتن مسلح مستطیلی تحت بارگذاری خارج از مرکز، اثر تقویت‌های NSM-Steel را بررسی کردند و نشان دادند که استفاده از تقویت NSM-Steel ظرفیت حمل بار و شکل‌پذیری سازه را افزایش می‌دهد. باروس و همکاران [7] در سال ۲۰۰۶ پژوهشی روی مقاوم‌سازی خمشی ستون‌ها با روش NSM-CFRP انجام دادند. در سال ۲۰۰۸، یک مطالعه آزمایشگاهی روی ۱۲ ستون بتن مسلح تقویت شده به روش NSM با استفاده از نوارهای CFRP با دو نسبت آرماتور طولی مختلف به وسیله‌ی باروس و همکاران [8] انجام شده است. آنها نشان دادند افزایش مقاومت تأمین شده به وسیله نوارهای CFRP برای ستون‌ها با نسبت تقویت آرماتور طولی فولادی، بیشتر است. همچنین نشان دادند در این تکنیک مقاوم‌سازی درصد افزایش انرژی تلف شده کم است یعنی این تکنیک مقاوم‌سازی ظرفیت اتلاف انرژی را بهبود نمی‌دهد و اثر باریک شدن منحنی‌های هیستریزس در این روش تقویت دیده می‌شود. سرافراز و دانش [9] مطالعه‌ی آزمایشگاهی روی ستون‌های مقاوم‌سازی شده با میلگردهای NSM انجام دادند. نتایج این آزمایش قابل توجهی در ظرفیت حمل بار جانبی نهایی در این نوع تکنیک مقاوم‌سازی

نمونه‌ها ثابت و برابر ۲۰ سانتی‌متر بود. آرایش میلگردهای NSM برای حالت‌های ۲ و ۳ میلگرد در هر طرف به ترتیب در شکل‌های (۲-الف) و (۲-ب) نشان داده شده است.

شکل ۱. جزئیات و ابعاد نمونه‌های آزمایشگاهی.

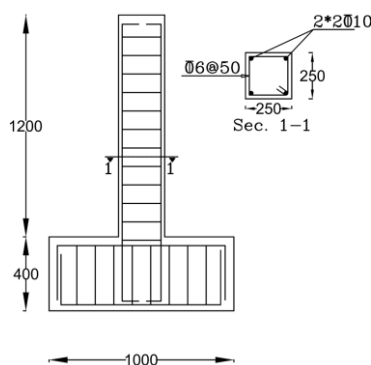


Fig. 1. Details and dimensions of Specimens

شکل ۲. محل قرارگیری شیارها در مقطع عرضی.

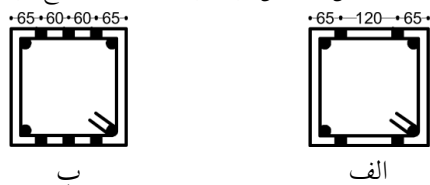


Fig. 2. The location of the grooves in the cross-section

جدول ۱. جزئیات نمونه‌ها.

Name	NSM FRP	NSM Steel	CFRP layers
C1	-	-	-
C2	2*2φ10	-	-
C3	2*2φ10	-	۲L CFRP
C4	2*2φ8	2*1φ10	-
C5	2*1φ8	2*2φ10	-

Table 1. Details of specimens

۲-۲- مشخصات مصالح

همه‌ی ستون‌ها و فونداسیون‌ها با استفاده از بتن آماده ساخته شده‌اند. متوسط مقاومت فشاری ۲۸ روزه‌ی بتن‌های پی و ستون به ترتیب ۲۴/۵ و ۱۸/۲ مگاپاسگال بود (براساس ۴ نمونه در شرایط محیطی یکسان با ستون‌ها).

میلگردهای فولادی استفاده شده در نمونه‌ها، از نوع AII و AIII بوده است. از میلگردهای نوع AII فقط برای خاموت‌ها و از میلگردهای نوع AIII برای آرماتورهای طولی و تقویت

نمونه ستون بتن مسلح تحت بارگذاری هم‌زمان فشاری ثابت و بار جانبی سیکلی آزمایش شدند، که شامل نمونه کنترل، نمونه تقویت شده با NSM-GFRP، نمونه تقویت شده با NSM-GFRP و محصورکننده CFRP و نمونه‌های تقویت با NSM-GFRP و NSM-Steel بودند. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از روش‌های تقویت ترکیبی برای مقاوم‌سازی ستون‌های بتن آرمه در بهبود ظرفیت حمل بار، شکل‌پذیری و ظرفیت اتلاف انرژی بهتر عمل می‌کنند. در میان روش‌های تقویت ترکیبی روش تقویت با NSM-GFRP و NSM-Steel نتایج بهتری می‌دهد، اما در این روش مشکل خوردگی فولاد و کماتش میلگردهای NSM وجود دارد، که این مشکل در روش تقویت ترکیبی با محصورکننده CFRP وجود ندارد.

۲- برنامه آزمایشگاهی

۱-۲- جزئیات نمونه‌ها

۵ ستون بتن مسلح مربعی به ابعاد ۲۵۰×۲۵۰ میلی‌متر و طول ۱۲۰۰ میلی‌متر با مقیاس تقریبی ۱ به ۲/۵ آزمایش شدند. ستون‌ها در قسمت پایین به یک فونداسیون برای اعمال بار چرخه‌ای جانبی و اتصال آن‌ها به کف صلب متصل شدند. جزئیات و ابعاد نمونه‌ها در شکل (۱) نشان داده شده است. نمونه‌ها شامل ۴ آرماتور فولادی با قطر ۱۰ میلی‌متر و خاموت‌های فولادی با قطر ۶ میلی‌متر با فاصله مرکز به مرکز ۵۰ میلی‌متر بودند. همچنین پوشش بتنی همه‌ی نمونه‌ها ۲۰ میلی‌متر بود.

جزئیات نمونه‌ها در جدول (۱) آورده شده است. متغیرهای آزمایش روش تقویت (تقویت با NSM-GFRP، ترکیب NSM-GFRP و محصورکننده CFRP و ترکیب NSM-GFRP و NSM-Steel) و درصد فولاد و GFRP متفاوت در تقویت NSM برای نمونه‌های تقویت شده با ترکیب NSM-GFRP و NSM-Steel است. مقدار تقویت‌های GFRP و فولاد در نمونه‌های C4 و C5 طوری انتخاب شده است که نیروی کششی قابل تحمل به وسیله‌ی این میلگردها با نیروی کششی قابل تحمل به وسیله‌ی میلگردهای GFRP در نمونه ۲ به صورت تقریبی یکسان باشد. طول مهاری میلگردهای NSM برای همه

میلگردهای GFRP با طول مورد نظر برش داده شد. بعد از مخلوط کردن چسب‌های اپوکسی (با نسبت ۱:۳) شیارها تا نیمه از چسب اپوکسی پر شد و پس از آن میلگردها در درون شیارها قرار گرفت و سپس بقیه شیار با چسب اپوکسی پر شد و سطح روی آن صاف شد. این فرآیند در شکل (۳-الف) دیده می‌شود.

برای نمونه‌ای که دارای دورپیچ CFRP است، ابتدا گوشه‌های ستون برای جلوگیری از تمرکز تنش با شعاع ۱۵ میلی‌متر گرد شده، سپس صفحات CFRP به ابعاد مورد نظر برش داده شد. برای چسباندن این صفحات CFRP به ستون، از روش "چسباندن مرطوب" استفاده می‌شود. برای این منظور ابتدا با کمک کاردک سطوح مورد نظر با ماده زمینه (چسب اپوکسی) پوشش داده می‌شوند و سپس الیاف کربن با فشار دست روی سطح قرار می‌گیرد. این مراحل در شکل (۳-ب) مشاهده می‌شود. طول همپوشانی صفحات CFRP، ۱۰۰ میلی‌متر بود. به همین ترتیب برای لایه‌های بعدی عمل می‌شود به طوری که تا ارتفاع ۹۰۰ میلی‌متری ستون با این صفحات CFRP پوشیده شود.

شکل ۳. الف- مراحل تقویت به روش NSM، ب- مراحل محصور کردن ستون.



الف



ب

Fig. 3. Steps regard to two strengthening methods: (a) NSM method; (b) Confining method.

NSM-Steel استفاده شده است. مشخصات مکانیکی میلگردهای استفاده شده در این مطالعه بر اساس آزمون کشش بر طبق آیین‌نامه [16] DIN EN 10002 در جدول (۲) آورده شده است.

میلگردهای FRP مورد استفاده در نمونه‌ها از نوع شیشه بوده است. قطر این میلگردها ۸ و ۱۰ میلی‌متر است. مشخصات مکانیکی با استفاده از آزمون کشش، بر طبق آیین‌نامه الاستیسیته میلگردهای GFRP با قطر ۸ میلی‌متر به ترتیب دارای ۹۹۰ و ۴۵۳۲۰ مگاپاسگال و با قطر ۱۰ میلی‌متر به ترتیب ۱۰۵۲ و ۴۳۸۹۰ مگاپاسگال است. چسب استفاده شده برای این میلگردها از نوع QUANTOM EPR 301 بود.

جدول ۲. مشخصات مکانیکی آرماتورهای فولادی.

Bar type	Yielding stress (MPa)	Ultimate stress (MPa)
A-II bar with diameter of 6 mm	337	475
A-III bar with diameter of 10 mm	408	660

Table 2. Mechanical properties of steel reinforcement

الیاف کربنی استفاده شده در این مطالعه، از محصولات شرکت "کواتوم" است. این الیاف یک جهته و دارای ضخامت ۰/۱۱۱ میلی‌متر است. مقاومت نهایی و مدول الاستیسیته آنها بر اساس مشخصات کارخانه به ترتیب ۴۹۵۰ و ۲۴۰۰۰۰ مگاپاسگال است. چسب استفاده شده برای این صفحات از نوع QUANTOM EPR 3301 است.

۳-۲- آماده سازی نمونه‌ها

۲۸ روز بعد از عمل‌آوری نمونه‌ها شیارهایی به ابعاد ۲۰×۲۰ میلی‌متر با استفاده دستگاه فرز در محل‌های مورد نظر بر اساس شکل (۲-الف و ۲-ب) و تا ارتفاع ۹۰۰ میلی‌متری ستون‌ها ایجاد شدند. شیارها با استفاده از دستگاه باد فشار قوی از هرگونه گرد و غباری که باعث جلوگیری از چسبیدن چسب در داخل شیارها می‌شود پاک شدند.

۴-۲- چگونگی بارگذاری، الگوی بارگذاری و تجهیزات

کلیه نمونه‌ها تحت بار فشاری ثابت و بار جانبی سیکلی تا شکست آزمایش شدند. اعمال بار فشاری به نمونه ستون‌ها، به کمک دو میلگرد که به صورت پیش‌تیندگی است، انجام می‌شود. این بار فشاری ثابت و ۱۶ تن معادل $0.18 * F_c * A_g$ است. همچنین بارگذاری سیکلی به وسیله جک افقی به ستون اعمال می‌شود. این سیستم اعمال بار، در شکل (۴) به تصویر درآمده است. به منظور حفظ تعادل نمونه، از مهارهای فلزی مناسب در دو انتهای پی استفاده شده است، به طوری که از حرکت آن در جهت‌های جانبی جلوگیری شده است. چرخه‌های این بارگذاری بر اساس کنترل جابه‌جایی تنظیم شده است. مقدار آن‌ها به ترتیب برابر $0.5\delta_y$ ، δ_y ، $2\delta_y$ ، $3\delta_y$ ، $5\delta_y$ و $6\delta_y$ است که δ_y تغییر مکان مانند تسلیم میلگردهای طولی ستون در نمونه‌ی کنترل است.

از خط‌کش‌های اندازه‌گیری تغییر مکان (LVDT) برای اندازه‌گیری جابه‌جایی افقی ستون در ۲ ارتفاع ۱۱۰۰ و ۵۰۰ میلی‌متری از پی، استفاده شد. دو نیروسنج با ظرفیت‌های ۲۰ و ۳۰ تنی به ترتیب برای اندازه‌گیری بارهای جانبی سیکلی و عمودی ستون استفاده می‌شود. کلیه اطلاعات شامل بار اعمالی، تغییر مکان وسط و انتهای ستون به وسیله‌ی دستگاه پردازنده ثبت می‌شود.

شکل ۴. دستگاه‌های آزمایش و سیستم اعمال بار.



Fig. 4. Test setup and measuring instruments.

۳- نتایج آزمایشگاهی

آزمایش‌ها براساس فرآیند گفته شده انجام شد تا اثر تقویت‌های مختلف روی مودهای شکست، نمودارهای هیستریزس، افزایش مقاومت، شکل‌پذیری و سختی اولیه ستون‌ها بررسی می‌شوند.

۳-۱- مودهای شکست و الگوهای ترک

مود شکست تمامی نمونه‌ها مود شکست خمشی بود. در نمونه‌ی C1 اولین ریزترک‌ها در بار 0.8 تن ایجاد شد و با افزایش بار در سیکل‌های بعدی تعداد ترک‌ها و عرض ترک‌ها افزایش می‌یابد. در بار حدود 3.3 تن در وجه فشاری بتن پوسته پوسته شد و با افزایش بار خردشدن بتن در وجه فشاری را در پی داشت. در نمونه C2 که تنها با NSM-GFRP تقویت شده است، اولین ریزترک‌های کششی در باری بزرگتر نسبت به نمونه کنترل مشاهده شد. این بار ۲ تن است. در بار جانبی ۳ تن ترک‌های کششی بر روی چسب‌های میلگردهای GFRP مشاهده شده است و همچنین صدای گسترش ترک‌ها در چسب‌ها نیز به گوش می‌رسد صدا در سیکل‌های بعدی بلندتر بود. در بار 4.8 تن در وجه فشاری پوسته پوسته شدن بتن نیز دیده شده است که این مقدار بار نسبت به نمونه کنترل ۴۵٪ افزایش یافته است. ترک‌های کششی در راستای میلگردهای GFRP گسترش یافت. نوع شکست در این نمونه خرد شدن بتن و به دنبال آن کماتش میلگردهای NSM-GFRP است. در نمونه C3 با توجه به این‌که با CFRP دورپیچ شده است در این نمونه نمی‌توان ترک‌های کششی را مشخص کرد. در چرخه دوم در بار نزدیک به 3.1 تن صداهای ناشی از ترک‌خوردگی در چسب‌های اپوکسی شنیده می‌شد. در این نمونه میلگردهای GFRP پس از شکست آج‌ها، از درون فونداسیون بیرون کشیده شدند. اما هیچ اتفاقی برای دورپیچ CFRP آن ایجاد نشده است. در اثر لغزش میلگردهای NSM-GFRP بتن ستون از بتن پی به صورت مشهودی جدا شد. در نمونه C4 اولین ترک‌های کششی در بار 2.4 تن ایجاد شد و اولین ترک‌های کششی در چسب اپوکسی در بار جانبی 3.3 تن همراه با صداهای گسترش ترک‌ها ایجاد شدند. پوسته پوسته شدن بتن در سیکل چهارم

1 Linear variable displacement transducer

اتفاق افتاد که پس از آن بتن‌ها خرد شدند. در ادامه خرد شدن بتن در همان سیکل کمانش میلگردهای فولادی در بار نزدیک ۵ تن همراه بود. در سیکل بعدی کمانش میلگردهای NSM-GFRP و کاهش تحمل بار بود. در نمونه ۵ اولین ترک‌های کششی در بار نزدیک به ۲ تن در وجه کششی ایجاد شده است. در این نمونه در بار ۳/۷ تن ترک‌های کششی در چسب‌های اپوکسی مشاهده شد. در چرخه چهارم با وجود این‌که میلگردهای فولادی در سمت فشاری کمانش کرده‌اند اما همچنان نمونه توانایی تحمل بار را داشته است. در چرخه پنجم میلگرد GFRP کمانش کرده و بعد از این کمانش نمونه توانایی تحمل بار چندانی را نداشته است.

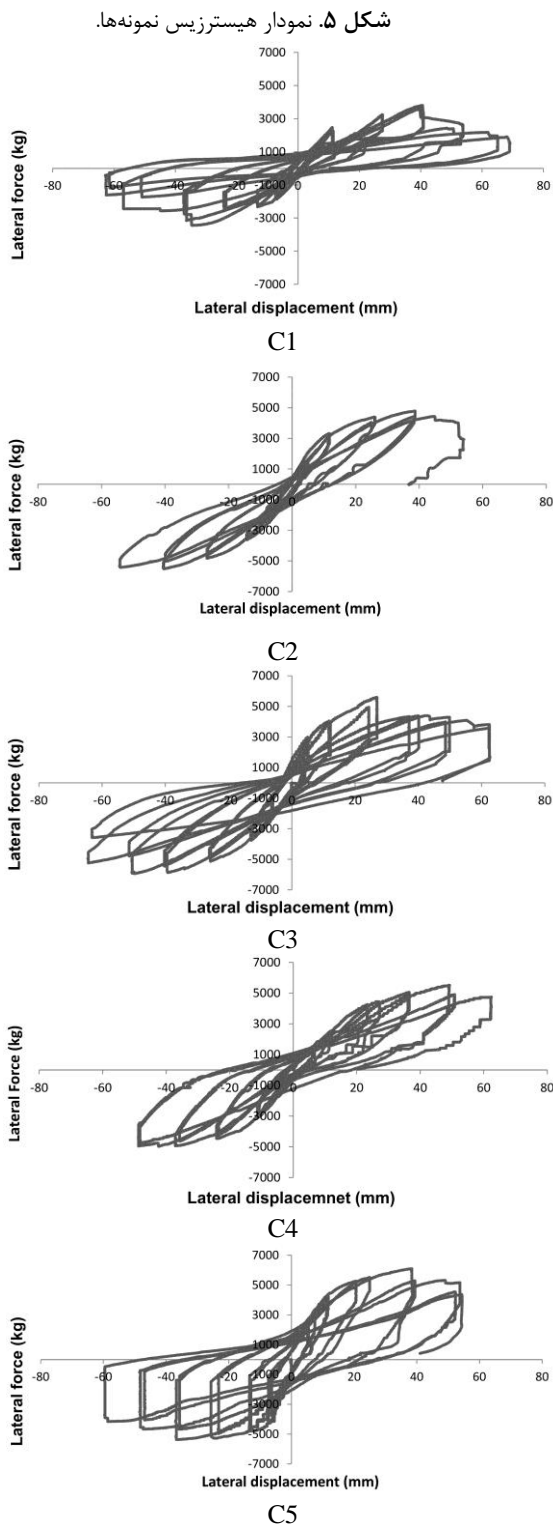


Fig. 5. Hysteresis diagrams of specimens.

۳-۲- نمودارهای هیستریزس و منحنی‌های پوش و سختی اولیه با استفاده از نتایج ثبت شده به وسیله LVDT در ارتفاع ۱/۱ متر از پای ستون و نیروی ثبت شده به وسیله نیروسنج، نمودارهای هیستریزس پنج نمونه مورد آزمایش در شکل (۵) رسم شده است. همان‌گونه که در نمودارهای هیستریزس مشاهده می‌شود، پاسخ نمونه‌ها در همه موارد به طور کامل در دو جهت بارگذاری متقارن نبوده است. این عدم تقارن کامل به دلیل وجود عدم قطعیت در سطح مقطع آرماتورها، ترک خوردگی بتن، ناهمگنی بتن و الگوی بارگذاری است. در نمونه کنترلی (C1) اثر باریک‌شدگی^۱ مشهودی قابل مشاهده است و این نشان می‌دهد که این ستون ظرفیت اتلاف انرژی زیادی ندارد. با تقویت این ستون با استفاده از دو میلگرد GFRP با قطر ۱۰ میلی‌متر این اثر باریک‌شدگی مشهودتر می‌شود، اما بیشینه نیروی قابل تحمل توسط این نمونه نسبت به نمونه کنترلی افزایش می‌یابد. در نمونه‌های تقویت شده با حالت ترکیبی NSM-GFRP با محصورکننده CFRP و NSM-GFRP با NSM-Steel علاوه بر افزایش مقاومت نسبت به نمونه کنترلی، اثر باریک‌شدگی نمودار هیستریزس را هم کاهش می‌دهد.

جدول (۳) بیشینه نیروهای قابل تحمل در فشار و کشش (۱ Pinching

مدول الاستیسیته بزرگ‌تری نسبت به میلگردهای NSM-GFRP می‌باشد. باید توجه شود که استفاده از دورپیچ CFRP نیز باعث افزایش سختی اولیه شده است.

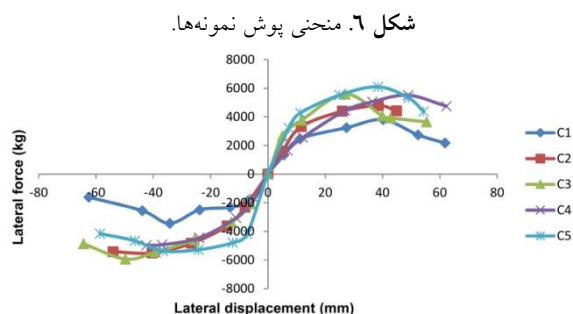


Fig. 6. Specimens load-displacement envelope curves.

۳-۳- شاخص شکل‌پذیری

منظور از شکل‌پذیری در این تحقیق، شاخص شکل‌پذیری نمان و جئونگ [18] است که بر پایه مفاهیم جذب انرژی بنا شده است. این شاخص با رابطه زیر بیان می‌شود:

$$\mu = \frac{1}{2} \left(\frac{E_{tot}}{E_{el}} + 1 \right) \quad (1)$$

در این رابطه، E_{el} و E_{tot} به ترتیب، سطح کل زیر منحنی بارگذاری (مجموع مساحت‌های ABE و DCF در هر سیکل در شکل ۷) و سطح زیر منحنی باربرداری (مجموع مساحت‌های ACE و DBF در هر سیکل در شکل ۷) ستون هستند. مقادیر ضریب شکل‌پذیری نمونه‌های مورد بررسی در جدول (۳) نشان داده شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد استفاده از تقویت NSM-GFRP نه تنها تأثیری قابل توجهی بر روی افزایش شکل‌پذیری نمونه ندارد، بلکه استفاده از این نوع تقویت باعث کاهش شکل‌پذیری می‌شود. اما استفاده از تقویت‌کننده‌های ترکیبی شکل‌پذیری نمونه‌ها را افزایش می‌دهد. به طوری که در نمونه‌ی C3 که با ترکیب تقویت NMS با محصورکننده‌ی CFRP تقویت شده است شاخص شکل‌پذیری ۱/۴ برابر می‌شود. استفاده از تقویت NSM-GFRP در ترکیب با NSM-Steel با افزایش شکل‌پذیری نسبت به نمونه C2 همراه می‌شود. بزرگترین شاخص شکل‌پذیری نیز مربوط به نمونه با تقویت NSM-Steel و NSM-GFRP با نسبت فولاد به GFRP بیشتر

جدول ۳. خلاصه نتایج آزمایش.

Specimen	C1	C2	C3	C4	C5
F_{peak}^+	3.8	4.8	5.59	5.5	6.1
Δ_{peak}^+	40.13	38.7	26.95	48.9	38.42
F_{peak}^-	-3.4	-5.5	-5.93	-4.9	-5.4
Δ_{peak}^-	-34.2	-40.4	-49.7	-42.4	-36.55
Improve- ment (%)	-	43	60	44	60
Ductility index	1.83	1.4	2.55	1.78	4.07
Initial stiffness (kN/mm)	2.54	3.02	4.38	3.04	5.05
Failure Cycle	6	4.5	6	5.5	5.5
energy dissipation capacity (KN.m)	4.8	5.5	7.4	5.8	12.7

Table 3. Summary results

همان‌طوری که در جدول (۳) مشاهده می‌شود، با تقویت نمونه کنترل ظرفیت تحمل بار ۴۰ تا ۶۰ درصد افزایش می‌یابد. این افزایش در نمونه‌های تقویت شده با حالت تقویت ترکیبی NSM-GFRP با محصورکننده CFRP و NSM-GFRP با NSM-Steel (نسبت به تقویت با NSM-GFRP بیشتر است، به طوری که اضافه کردن محصور کننده CFRP در نمونه C3 و یا استفاده از میلگرد فولادی معادل در عوض میلگرد GFRP در نمونه‌ی C5 باعث افزایش حدود ۱۲ درصدی ظرفیت حمل بار نسبت به نمونه‌ی C2 می‌شود. با افزایش نسبت میلگردهای فولادی NSM به میلگردهای GFRP (نمونه‌ی C5 نسبت به C4) نیروی قابل تحمل ستون افزایش می‌یابد.

در شکل (۶) منحنی پوش بار-تغییر مکان نمونه‌ها مقایسه می‌شوند. سختی اولیه به صورت میانگین نسبت بیشینه بار در سیکل اول (رفت و برگشت) به جابه‌جایی‌های متناظر آن تعریف می‌شود. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود در نمونه‌های تقویت‌شده سختی اولیه نسبت به نمونه کنترلی بزرگتر است. این افزایش سختی اولیه می‌تواند به دلیل وجود میلگردهای NSM باشد. در جدول (۳) سختی اولیه نمونه‌ها نشان داده شده است. بزرگترین سختی اولیه مربوط به نمونه C5 می‌باشد. این به دلیل استفاده از میلگردهای NSM-Steel با

۴- نتیجه گیری

مطالعه‌ای روی پژوهش‌های آزمایشگاهی و تحلیلی در زمینه‌ی تقویت ستون‌های بتن آرمه با NSM و محصورکننده FRP انجام شد. استفاده از FRP برای محصور کردن ستون‌ها مقاومت فشاری و شکل‌پذیری را افزایش می‌دهد. اما محصورکننده‌های FRP تأثیر کمتری تحت بارگذاری خارج از مرکز یعنی اثر توأم خمش و فشار دارد. تکنیک تقویت NSM به طور موفقیت‌آمیز برای بهبود ظرفیت خمشی ستون‌های بتن مسلح استفاده می‌شود. مطالعات کمی روی روش ترکیب تقویت NSM با محصورکننده FRP انجام شده است و همچنین مطالعه‌ای که روی تقویت ستون‌های بتن آرمه با استفاده از روش ترکیبی NSM-GFRP با NSM-Steel انجام شده باشد مشاهده نشد. پس از بررسی این مطالعات، در این پژوهش به بررسی رفتار و ظرفیت ستون‌های بتن آرمه تقویت شده به روش NSM-GFRP و روش‌های ترکیب NSM-GFRP با محصورکننده CFRP و NSM-GFRP با NSM-Steel پرداخته شد تا با مقایسه آنها روش تقویت مناسب انتخاب شود. روش تقویت مناسب با توجه به ظرفیت حمل بار، شکل‌پذیری و ظرفیت اتلاف انرژی انتخاب می‌شود.

براساس مشاهده آزمایشگاهی در این پژوهش نتایج زیر به دست آمده است:

۱. استفاده از تقویت NSM-GFRP ظرفیت تحمل بار جانبی را افزایش می‌دهد، اما روش‌های تقویت ترکیبی NSM-GFRP با محصورکننده CFRP و NSM-GFRP با NSM-Steel در مقایسه با تقویت NSM-GFRP روی ظرفیت حمل بار جانبی تأثیر بیشتری می‌گذارد.

۲. مشاهده نشان می‌دهد روش تقویت NSM-GFRP باعث افزایش باریک‌شدگی نمودار هیستریزس نسبت به نمونه کنترلی می‌شود. اما برخلاف آن در روش تقویت ترکیبی NSM-GFRP با محصورکننده CFRP و NSM-GFRP با NSM-Steel این باریک‌شدگی کاهش می‌یابد و منحنی‌های هیستریزس توپر و پایداری تولید می‌شود.

است، در این نمونه شکل‌پذیری ۲/۲۲ برابر نسبت به نمونه کنترلی می‌شود. باید توجه کرد که استفاده از تقویت ترکیبی NSM-GFRP با NSM-Steel نسبت به تقویت NSM-GFRP با محصورکننده CFRP تأثیر بیشتری در افزایش شکل‌پذیری نمونه‌ها دارد (زمانی که نسبت تقویت NSM-Steel بیشتر باشد).

۳-۴- ظرفیت اتلاف انرژی

جذب انرژی یکی از فاکتورهای مهم در بررسی لرزه‌ای سازه است، به طوری که هرچه این مقدار بیش‌تر باشد، ستون دارای عملکرد بهتری است. انرژی جذب شده از طریق محاسبه سطح محصورشده به وسیله‌ی حلقه‌های هیستریزس (مجموع مساحت‌های ABDC در هر سیکل در شکل ۷) به دست آمده است. جدول (۳) این مقدار انرژی تلف‌شده نهایی نمونه‌ها را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد استفاده از تقویت NSM-GFRP به صورت تنها، باعث افزایش اندکی در ظرفیت اتلاف انرژی می‌شود، اما نمونه‌هایی که با استفاده از روش‌های ترکیبی تقویت شده‌اند ظرفیت اتلاف انرژی چند برابر نمونه کنترلی خود دارند و بیشترین ظرفیت اتلاف انرژی به نمونه تقویت شده با NSM-FRP و NSM-Steel مربوط می‌شود، به گونه‌ای که ظرفیت اتلاف انرژی این نمونه ۲/۶ برابر نمونه کنترلی است. در مورد ظرفیت اتلاف انرژی مانند شکل‌پذیری، زمانی که NSM-Steel بیشتر است، استفاده از NSM-Steel باعث افزایش بیشتری در ظرفیت اتلاف انرژی نسبت به محصورکننده CFRP می‌شود.

شکل ۷. الگوی محاسبه ظرفیت اتلاف انرژی و شاخص شکل‌پذیری.

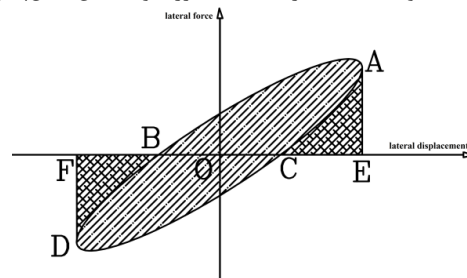


Fig. 7. Schematic of energy dissipation and ductility calculation.

loading. *Concrete Research Letters*, **1**(2), 45-59.

[7] Barros J. A. O., Ferreira D. R. S. M. Fortes A. S. & Dias S. J. E. 2006 Assessing the Effectiveness of Embedding CFRP Laminates in the Near Surface for Structural Strengthening. *Construction and Building Materials*, **20**(7), 478-491.

[8] Barros J. A. O., Varma R. K., Sena-Cruz J. M. & Azevedo A. F. M. 2008 Near surface mounted CFRP strips for the flexural strengthening of RC columns: experimental and numerical research. *Engineering Structures*, **30**(12), 3412-3425.

[9] Sarafraz M. & Danesh F. 2010 Experimental Study on Flexural Strengthening of RC Columns with Near Surface Mounted FRP Bars. *Journal of Seismology and Earthquake Engineering*, **12**(1), 39-50.

[10] Coelho M. R. F., Sena-Cruz J. M. & Neves L. A. C. 2015 A review on the bond behavior of FRP NSM systems in concrete. *Construction and Building Materials*, **93**, 1157-1169.

[11] Bournas D. A. & Triantafillou T. C. 2008 Flexural strengthening of RC columns with near surface mounted FRP or stainless steel reinforcement: experimental investigation. *14th World Conference on Earthquake Engineering*, Beijing.

[12] Bournas D. A. & Triantafillou T. C. 2009 Flexural strengthening of RC columns with near surface mounted FRP or stainless steel reinforcement. *ACI Structural Journal*, **106**(4), 495-505.

[13] Ding L., Wu J., Yang S. & Wu Z. 2013 Performance advancement of RC column by applying Basalt FRP composites with NSM and confinement system. *World Scientific Journal of Earthquake and Tsunami*, **7**(2), 1-20.

[14] Li X., Lv H. L., Zhang G. C., Sha, S. Y. & Zhou S.C. 2013 Seismic retrofitting of rectangular reinforced concrete columns using fiber composites for enhanced flexural strength. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, **32**(9), 619-630.

[15] Ge W., Zhang J., Cao D. & Tu Y. 2015 Flexural behaviors of hybrid concrete beams reinforced with BFRP bars and steel bars. *Construction and Building Materials*, **87**(12), 28-37.

[16] DIN EN 10002. 1991 Tensile Testing of Metallic Materials- Part 1: Method of Test at Ambient Temperature. *DIN- Adopted European Standard*.

[17] ACI 440.3R. 2004 Guide Test Methods for Fiber-Reinforced Polymers (FRPs) for Reinforcing or Strengthening Concrete Structures. *American Concrete Institute*, Farmington Hills.

[18] 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 Second International RILEM Symposium (FRPRCS-2), London, UK, 1995, pp. 379-386.

۳. هر سه روش تقویت انتخاب شده در این پژوهش باعث افزایش سختی اولیه نسبت به نمونه کنترلی می‌شوند اما به نظر می‌رسد بیشترین افزایش سختی اولیه مربوط به روش ترکیبی NSM-GFRP با NSM-Steel است.

۴. بر خلاف روش تقویت NSM-GFRP که تأثیر چندانی روی شکل‌پذیری و ظرفیت اتلاف انرژی سازه ندارد، به نظر می‌رسد دو روش تقویت ترکیبی باعث افزایش قابل توجهی در شکل‌پذیری و ظرفیت اتلاف انرژی نسبت به نمونه کنترلی می‌شوند، به طوری که وقتی از تقویت NSM-Steel استفاده می‌شود این کمیت‌ها چندین برابر نمونه‌ی کنترلی و نمونه‌ی تقویت شده با NSM-GFRP می‌شود.

۵. در تمام پارامترهای بررسی شده در این مطالعه نمونه‌ی تقویت شده به روش ترکیبی NSM-GFRP با NSM-Steel جواب‌های بهتری نسبت به بقیه نمونه‌ها دارد و روش ترکیبی NSM-GFRP با محصورکننده CFRP نتایجی نزدیک به آن را می‌دهد. اما روش ترکیبی NSM-GFRP با محصورکننده CFRP به دلایل جلوگیری از کماتش میلگردها در فشار و مباحث خوردگی میلگردهای فولادی با عدم نفوذ عوامل خوردگی از اطراف شکافت‌ها بهترین روش تقویت ستون‌های بتنی در این مطالعه است.

References

۵- مراجع

- [1] Ahmad S. H., Khaloo A. R. & Irshaid A. 1991 Behavior of concrete spirally confined by fiberglass filaments. *Magazine of Concrete Research*, **43**(156), 143-148.
- [2] Khaloo A. R., Javid Y. & Tazarv M. 2008 Experimental Study of the Internal and External (FRP) Confinement Effect on Performance of Compressive Concrete Members. *14th World conference on Earthquake Engineering*, Beijing.
- [3] Nanni A. & Bradford N. M. 1995 FRP jacketed concrete uniaxial compression. *Construction and Building Materials*, **9**(2), 115-124.
- [4] Parvin A. & Schroeder J. M. 2008 Investigation of Eccentrically Loaded CFRP-Confined Elliptical Concrete Columns. *ASCE, Journal of Composites for Construction*, **12**(1), 93-101.
- [5] Asplund S. O. 1949 Strengthening Bridge Slabs with Grouted Reinforcement. *ACI Structural Journal*, **45**(1), 397-406.
- [6] Etman E. S. 2010 Experimental study on the behavior of slender rectangular columns under eccentric

Strengthening of Concrete Columns by Near Surface Mounted Method with Different Material Bars in Combination with CFRP Wrapping

Y. Moodi¹, S.R. mousavi^{2*}, M.R. Esfahani³

1- PhD Student, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Sistan and Baluchestan

2- Assist. Prof., Dept. of Civil Engineering, Univ. of Sistan and Baluchestan

3- Prof., Dept. of Civil Engineering, Ferdowsi University of Mashhad

* s.r.mousavi@eng.usb.ac.ir

Abstract:

In recent years, Fiber-reinforced polymer (FRP) materials are increasingly used for strengthening and retrofitting reinforced concrete structures. Fiber-reinforced polymers in the form of jackets with the fibers typically in the columns' circumferential direction, are quite effective in carrying shear and in providing confinement. In addition, previous studies show that FRP jacket can greatly enhance the energy dissipation capacity and ductility of reinforced concrete columns. However, FRP jackets are not effective for strengthening columns in flexure. To overcome difficulties associated with FRP jacketing, recent research efforts have focused on the use of near surface mounted (NSM) FRP or stainless steel reinforcement through a combination of externally bonded (EBR) FRP sheets and anchors for the flexural strengthening of columns. NSM strengthening technique consists of FRP rods embedded in grooves made on the surface of the concrete and bonded in place with epoxy. The NSM technique is not effective in terms of enhancing the energy dissipation capacity of RC columns. Therefore, by combining NSM technique with FRP confinement sheets, a high effective technique (hybrid FRP-based strengthening technique) can be obtained. FRP and steel bars have been used for reinforcing the concrete beams in previous studies. However, the combination of both materials for strengthening of reinforced concrete columns is not common. The present paper experimentally investigates the effects of combined NSM-GFRP bars with the CFRP confinement sheets and also NSM-GFRP bars with NSM-Steel rods on strengthening of reinforced concrete columns. It should be noted that in combinatory method of NSM-GFRP with NSM-Steel, NSM-Steel to NSM-GFRP ratio is different.

The experimental program includes five square columns with a cross section of 250*250 mm and the length of 1200 mm. The columns were loaded up to failure by applying simultaneous constant axial compressive and increasing cyclic lateral loading. According to the results, it is indicated that using these two combinatory reinforcing methods cause an increase in load-bearing capacity, ductility, dissipated energy and initial stiffness of columns in comparison with the control column and also columns reinforced by using NSM-GFRP bars. Furthermore, NSM-GFRP technique increases the load capacity by 43 percent in comparison with the control specimen. In the case of combined retrofitting methods, load capacity increased up to 60 percent. Also, using NSM-GFRP reinforcement causes 7 percent increase in ductility and 6 percent decrease in energy dissipation capacity. In contrast, in the specimens reinforced by the combinatory methods, the ductility parameter and dissipation capacity increased by 3 to 150 percent and 24 to 133 percent, respectively. In addition, hysteretic diagrams corresponding to specimens strengthened by combinatory methods has less pinching effect than those of the control specimen. Experimental results indicate that the reinforced concrete column strengthened by combinatory method of NSM-GFRP with NSM-Steel is a viable solution toward enhancing the behavior of RC columns subjected to simultaneous axial and seismic loads. This is especially the case when the retrofitting scheme contains higher NSM-Steel to NSM-GFRP ratio. Finally, due to corrosion of steel reinforcement, NSM-GFRP bars combined with CFRP confining sheets is selected as the best choice of strengthening.

Keywords: Reinforced concrete, Strengthening, CFRP confinement, NSM-GFRP, NSM-Steel