

## مقاوم‌سازی خمشی ستون‌های بتن مسلح با استفاده از میلگردهای کامپوزیتی مدفون در سطح

مهدی اسفندی سرافراز<sup>۱\*</sup>، فخرالدین دانش<sup>۲</sup><sup>۱</sup> گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران غرب، تهران، ایران  
<sup>۲</sup> دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

## تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴ مرداد ۱۳۹۶  
بازنگری: ۱۱ آذر ۱۳۹۶  
پذیرش: ۲۱ آذر ۱۳۹۶  
ارائه آنلاین: ۲۶ آذر ۱۳۹۶

## کلمات کلیدی:

مقاوم‌سازی خمشی  
ستون بتن مسلح  
مواد کامپوزیت  
میلگرد مدفون در سطح  
استهلاک انرژی

**چکیده:** در چند سال اخیر استفاده از مواد کامپوزیت جهت تقویت و مقاوم سازی سازه‌های بتن مسلح رشد چشمگیری داشته است. تحقیقات بسیاری در خصوص افزایش ظرفیت باربری محوری، ظرفیت برشی و شکل‌پذیری ستون‌های بتن مسلح دور پیچ شده با الیاف کامپوزیت انجام گرفته است که همه این تحقیقات نشان از عملکرد مناسب مواد کامپوزیت در بهبود عملکرد ستون‌های بتن مسلح دارد، لکن دورپیچ کامپوزیت تأثیر چندانی بر روی افزایش ظرفیت خمشی و ظرفیت باربری جانبی ستون‌های بتن مسلح ندارد. در این مقاله از میلگردهای کامپوزیت مدفون در نزدیک سطح که (NSM (Near Surface Mounted نامیده می‌شود، جهت افزایش ظرفیت خمشی ستون‌های بتن مسلح استفاده می‌گردد. به این منظور هفت نمونه ستون بتن مسلح ساخته شده و با درصد مختلف میلگردهای NSM تقویت شده است. نمونه‌های ساخته شده، تحت بارگذاری محوری ثابت و جابجایی جانبی سیکلی قرار گرفته و نتایج آن بررسی شده است. همچنین عملکرد این روش در ترکیب با دورپیچ FRP نیز بررسی شده است. لزوم مهار انتهای میلگردهای کامپوزیت در داخل بتن بخش دیگری از این تحقیق است. نتایج آزمایشات نشان از عملکرد مناسب میلگردهای NSM در ترکیب با دورپیچ FRP در افزایش ظرفیت خمشی، سختی و میزان انرژی جذب شده توسط ستون‌های بتن مسلح دارد.

## ۱- مقدمه

عواملی از قبیل اشتباهات طراحی، اشکالات اجرا، تغییر کاربری، تغییرات دوره‌های آیین‌نامه‌های بارگذاری و طراحی، نگهداری نامناسب، شرایط نامساعد محیطی و دیگر موارد باعث می‌شوند که بسیاری از سازه‌های بتنی موجود نیازمند تقویت و بهسازی باشند. ستون‌ها مهم‌ترین بخش سازه‌های بتنی می‌باشد، بگونه‌ای که هرگونه خرابی و آسیب آن‌ها منجر به فرو ریختن و تخریب سازه می‌گردد، لذا بهسازی و تقویت ستون‌های آسیب‌پذیر در سازه‌ها از اهمیت زیادی برخوردار است [۱]. روش‌های سنتی تقویت ستون‌های بتن مسلح از قبیل زره بتنی و فلزی به دلایلی از قبیل افزایش جرم و سختی، محدود نمودن فضا و دشواری اجرا مورد قبول مهندسان نیستند.

در چند سال اخیر استفاده از مواد کامپوزیت<sup>۱</sup> (FRP) جهت تقویت اجزای سازه‌های بتن مسلح با استقبال زیادی روبرو شده‌است. دلایلی از قبیل وزن کم، مقاومت کششی زیاد، سهولت اجرا و پایداری در برابر شرایط نامساعد محیطی این مصالح را به عنوان یک ماده ایده‌آل در مقایسه با روش‌های

سنتی جهت تقویت سازه‌های بتن مسلح معرفی کرده است. تحقیقات انجام شده نشان داده است که دورپیچ کردن ستون‌های بتن مسلح با استفاده از الیاف FRP باعث افزایش چشمگیر مقاومت فشاری، مقاومت برشی و شکل‌پذیری ستون‌های بتنی می‌گردد [۲-۶]. لکن دورپیچ کردن ستون‌های بتن مسلح با الیاف FRP تأثیر چندانی بر بهبود رفتار ستون‌های تحت بار خارج از مرکز یعنی اثر هم‌زمان نیروی محوری فشاری و لنگر خمشی ندارد. به عبارت دیگر تنها در صورتی که ترکیب نیروی محوری فشاری و لنگر خمشی ستون در ناحیه کنترل شونده توسط فشار در منحنی اندرکنش ستون باشد (ناحیه بالای خط تعادل)، دورپیچ FRP باعث بهبود رفتار ستون می‌گردد و در حالتی که ترکیب نیروی محوری فشاری و لنگر خمشی در ناحیه کشش کنترل ستون باشد (ناحیه پائین خط تعادل)، دورپیچ FRP تأثیری بر بهبود رفتار ستون بتن مسلح ندارد [۷]. یعنی در حالت کلی دورپیچ FRP باعث افزایش ظرفیت خمشی ستون‌های بتن مسلح نمی‌گردد. از آنجا که در شرایط واقعی اندرکنش فشار-خمشی در ستون‌های بتن مسلح ممکن است در ناحیه کشش کنترل باشد، لذا ارائه راهکار مناسب برای تقویت این ستون‌ها از اهمیت زیادی برخوردار است.

\*نویسنده عهده‌دار مکاتبات: sarafraz.m@wtiau.ac.ir

با انجام آزمایش پارامترهایی مانند مقاومت جانبی، شکل‌پذیری و میزان جذب انرژی نمونه‌های مختلف تعیین و بررسی گردید. نتایج حاصل از آزمایش نشان داد که اگر هدف تنها افزایش ظرفیت خمشی ستون باشد استفاده از میلگرد FRP به تنهایی کفایت می‌کند ولی میلگرد FRP تأثیری بر افزایش شکل‌پذیری ستون‌ها ندارد و برای این منظور باید از روش دورپیچی استفاده شود. همچنین مشخص شد که مهار انتهایی میلگرد FRP در داخل بتن ضروری می‌باشد.

## ۲- تست‌های آزمایشگاهی

### ۲-۱- مشخصات نمونه‌ها

برای انجام تحقیق از هفت ستون بتن مسلح با ابعاد نشان داده شده در شکل ۱ استفاده شده‌است. جهت سهولت بارگذاری، در بالای نمونه‌ها یک بلوک بتنی تعبیه شده‌است. همچنین جهت مهار میلگردهای NSM در پای ستون و نصب نمونه بر روی قاب بارگذاری، در پایین ستون نیز یک بلوک بتنی ایجاد شده‌است. نمونه‌ها دارای ابعاد  $200 \times 200 \times 1000$  mm<sup>3</sup> می‌باشد. علت انتخاب این ابعاد و اندازه برای نمونه‌ها محدودیت‌های موجود در قاب بارگذاری و ظرفیت جک‌های هیدرولیکی می‌باشد. میلگردهای اصلی نمونه‌ها به صورت چهار میلگرد آجدار به قطر ۱۴ mm و خاموت‌های آن شامل میلگردهای آجدار به قطر ۱۰ mm و به فواصل ۱۰۰ mm می‌باشد.

متغیرهای آزمایش شامل نوع تقویت (میلگرد NSM به تنهایی و یا در ترکیب با دورپیچ FRP)، درصد میلگردهای NSM و مهار انتهایی میلگرد NSM می‌باشد، لذا نامگذاری نمونه‌ها مطابق جدول ۱ و بر اساس قرارداد زیر می‌باشد: R1 نشان‌دهنده استفاده از یک میلگرد NSM در هر وجه ستون و R2 نشان‌دهنده استفاده از دو میلگرد NSM در هر وجه ستون می‌باشد. A نشان‌دهنده مهار میلگرد NSM در پای ستون و NA نشان‌دهنده عدم مهار میلگرد NSM در پای ستون است. C0 نشانه عدم وجود دورپیچ FRP و C1 نشانه وجود یک لایه دورپیچ FRP در نمونه می‌باشد. برای مهار انتهایی میلگردهای NSM، در داخل بلوک بتنی و در انتهای ستون یک سوراخ به قطر ۱۵ mm و طول ۱۰۰ mm ایجاد شده و میلگرد NSM در داخل آن کاشته می‌شود. از آنجا که یکی از اهداف این پژوهش بررسی نیاز یا عدم نیاز به مهار انتهایی میلگردهای NSM در پای ستون می‌باشد، در دو نمونه میلگردهای NSM در بلوک بتنی تحتانی مهار نمی‌شوند. هدف از این کار این است که بطور واضح مشخص شود که مهار انتهایی میلگردهای NSM در فونداسیون یا تیر در سازه واقعی مورد نیاز است یا خیر. با توجه به اینکه بررسی اندازه طول مهاری انتهایی میلگردهای NSM جزء پارامترهای مورد بررسی در این پژوهش نمی‌باشد، لذا طول مهاری انتهایی میلگرد NSM در داخل بتن ثابت در نظر گرفته می‌شود.

### ۲-۲- مشخصات مصالح

کلیه ستون‌ها، از بتنی با مقاومت مشخصه ۲۱ MPa ساخته شده‌اند.

میلگردهای کامپوزیت مدفون در نزدیک سطح که NSM<sup>۱</sup> نامیده می‌شوند روشی جایگزین برای تقویت اجزای بتن مسلح با استفاده از FRP می‌باشد. در این روش FRP بصورت میلگرد یا تسمه باریک در درون شیارهای ایجاد شده بر روی سطح بتن با استفاده از چسب‌های مخصوص نصب می‌گردد. عدم نیاز به آماده‌سازی سطح بتن و عدم جداشدگی<sup>۲</sup> از بتن، از بزرگترین مزیت‌های این روش نسبت به روش استفاده از الیاف FRP می‌باشد [۸]. این روش نخستین بار جهت تقویت خمشی تیرهای بتن مسلح استفاده شد و نتایج آزمایشات انجام گرفته نشان داد عملکرد این روش در بهبود ظرفیت خمشی تیرهای بتن مسلح بسیار مناسب است [۹-۱۴].

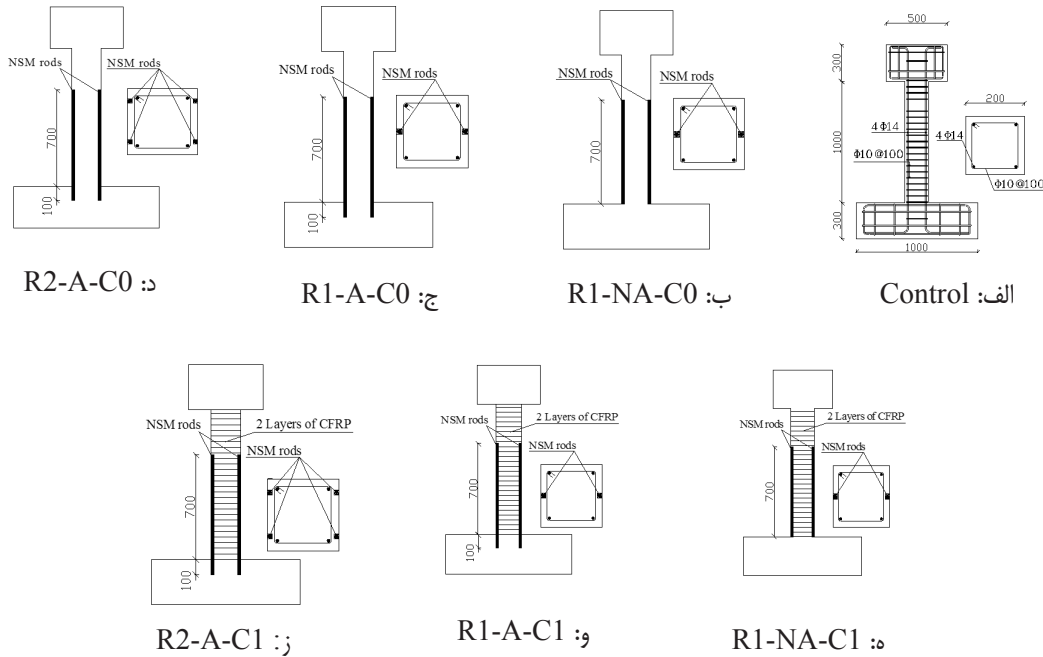
باروس و همکاران<sup>۳</sup> [۱۵ و ۱۶] مطالعاتی آزمایشگاهی بر روی تعدادی ستون بتنی تقویت شده با تسمه کامپوزیتی<sup>۴</sup> انجام دادند. نتایج حاصل از این آزمایش‌ها نشان داد که تسمه‌های CFRP تأثیر چندانی بر انرژی جذب و مستهلک شده توسط ستون‌ها ندارد. در سال ۲۰۰۹ بورناس و تریانتافیلو<sup>۵</sup> [۱۷] تعدادی ستون را با میلگرد و تسمه FRP و همچنین میلگرد فولادی تقویت کرده و مورد آزمایش قرار دادند. نتایج آزمایش نشان داد که استفاده از میلگرد FRP تأثیر بیشتری نسبت به تسمه FRP دارد. دینگ و همکاران<sup>۶</sup> [۱۸] در سال ۲۰۱۳ اثر هم‌زمان استفاده از میلگرد و الیاف دورپیچ از جنس بازالت را در افزایش ظرفیت ستون‌های بتنی بررسی کردند. نتایج حاصل از آزمایش نشان‌دهنده عملکرد مناسب استفاده هم‌زمان از میلگرد و دورپیچ بازالت در بهبود ظرفیت خمشی ستون‌ها بود. همچنین لی و همکاران<sup>۷</sup> [۱۹] مطالعات مشابهی برای ستون‌های با مقطع مستطیلی انجام دادند. در سال ۲۰۱۶ جیانگ و همکاران<sup>۸</sup> [۲۰] تحقیقاتی در خصوص تقویت پایه‌های پل تخریب شده در زلزله، با استفاده از میلگرد و دورپیچ بازالت انجام دادند. نتایج این تحقیق نشان‌دهنده عملکرد مناسب روش پیشنهادی در بازگرداندن مقاومت از دست رفته ستون‌های آسیب دیده در زلزله بوده است.

در این تحقیق به بررسی عملکرد ستون‌های بتن مسلح تقویت شده با میلگرد FRP به روش NSM پرداخته می‌شود. به این منظور هفت نمونه ستون بتن مسلح ساخته شده و با درصد مختلفی از میلگردهای FRP تقویت و تحت اثر هم‌زمان بار محوری ثابت و تغییر مکان جانبی سیکی قرار گرفت. همچنین جهت بررسی تأثیر دورپیچ FRP، تعدادی از این نمونه‌ها علاوه بر تقویت با میلگردهای FRP، با الیاف CFRP نیز دورپیچ شده‌اند. از آنجا که از نظر اجرائی مهار انتهایی میلگرد FRP در داخل بتن فونداسیون یا تیر مشکل است، میلگرد FRP در تعدادی از نمونه‌ها در داخل بتن فونداسیون مهار نشده‌است تا لزوم مهار یا عدم مهار میلگرد FRP مشخص گردد.

- 1 Near Surface Mounted
- 2 Debonding
- 3 Barros et al.
- 4 FRP Laminated
- 5 D. Bournas and T. Triantafillou
- 6 Ding et al.
- 7 Li et al.
- 8 Jiang et al.

می‌باشد. مشخصات مکانیکی میلگردهای NSM، الیاف FRP و رزین های اپوکسی مورد استفاده بر اساس مشخصات کارخانه سازنده در جدول ۲ ارائه شده‌است. میلگردهای NSM مورد استفاده از نوع الیاف شیشه<sup>۱</sup> می‌باشند. میلگردهای NSM در شیاری با مقطع مربع و به ابعاد ۱۸×۱۸ mm که بوسیله کاتر در سطح بتن ایجاد شده اند، نصب می‌گردد.

هنگام ساخت هر ستون، سه نمونه مکعبی  $200 \times 200 \times 200 \text{ cm}^3$  جهت تعیین مقاومت مشخصه واقعی بتن اخذ و هنگام بارگذاری تحت آزمایش بارگذاری قرار گرفت که نتایج حاصل از آزمایش در جدول ۱ مشاهده می‌شود. میلگردهای فولادی بکار رفته از نوع AIII و با تنش تسلیم ۴۰۰ MPa



شکل ۱. شکل هندسی و مشخصات نمونه‌های تحت آزمایش (واحدها بر اساس میلی‌متر است)

Fig. 1. Details of reinforcement and strengthening for the specimens (Unit; mm)

جدول ۱. مشخصات نمونه‌های آزمایشگاهی و جزئیات تقویت آنها

Table 1. Properties of specimens

مقاومت مشخصه بتن MPa	تعداد لایه دورپیچ FRP	وضعیت مهار شدگی میلگرد NSM	تعداد میلگرد NSM در هر وجه از ستون	نام نمونه
۲۳/۳	-	-	-	Control
۲۲/۷	-	مهار شده	۱	R1-A-C0
۲۰/۳	۱ لایه	مهار شده	۱	R1-A-C1
۲۲/۱	-	مهار نشده	۱	R1-NA-C0
۲۴/۱	۱ لایه	مهار نشده	۱	R1-NA-C1
۲۱/۶	-	مهار شده	۲	R2-A-C0
۲۳/۱	۱ لایه	مهار شده	۲	R2-A-C1

## جدول ۲. مشخصات مکانیکی مواد کامپوزیت

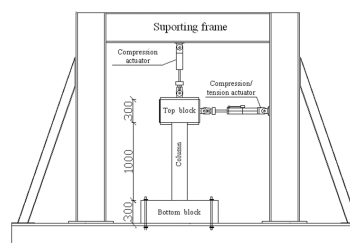
Table 2. Mechanical properties of composite materials

نوع ماده	ضخامت (میلیمتر)	قطر (میلیمتر)	مقاومت کششی (مگا پاسکال)	مدول الاستیسیته (گیگا پاسکال)	کرنش نهایی (%)
الیاف کربن (CFRP)	۱/۵۵	۲۴۰	۳۸۰۰	-	۰/۱۷۶
میلگرد NSM	۱/۶	۴۰/۸	۷۶۰	۱۰	-
خمیر اپوکسی	۱	۳	۲۷/۶	-	-
چسب اپوکسی	۲/۵	۳	۵۴	-	-

## ۲-۳- نحوه انجام آزمایش

برای انجام آزمایش از یک قاب بارگذاری و یک جک هیدرولیکی دینامیکی به ظرفیت ۲۵۰ kN برای اعمال جابجایی جانبی و یک جک هیدرولیکی به ظرفیت ۵۰۰ kN برای اعمال بار محوری فشاری استفاده شده است. چگونگی قرار گیری نمونه‌ها بر روی قاب و نحوه اتصال جک‌های هیدرولیکی طی فرآیند بارگذاری در شکل ۲ مشاهده می‌گردد. برای مدل‌سازی گیرداری پای ستون، در پایین نمونه یک بلوک بتنی ساخته شده است که این بلوک با استفاده از تعدادی پیچ پر مقاومت و دو گیره به قاب بارگذاری متصل می‌گردد. برای جلوگیری از تغییرشکلهای خارج از صفحه نمونه از یک سیستم مهار جانبی استفاده شده است.

در حین بارگذاری، ابتدا بار قائم توسط جک هیدرولیکی و بصورت نیرو کنترل به نمونه وارد می‌گردد. مقدار این نیرو برابر ۲۰۰ kN بوده که حدودا معادل بیست تا بیست و پنج درصد از ظرفیت بار محوری ستون می‌باشد. بعد از وارد نمودن بار محوری قائم، جک دینامیکی افقی بصورت جابجایی کنترل اقدام به بارگذاری نمونه می‌نماید. بر اساس آنالیزهای عددی انجام گرفته، جاری شدن اولین میلگرد طولی در نمونه Control در جابجایی جانبی حدود ۱۰ mm رخ می‌دهد که بر این اساس تغییر مکان جانبی حد الاستیک ستون ۱۰ mm تعیین می‌گردد. لذا دامنه بارگذاری جانبی در هر سیکل معادل ضربی از ۵ mm انتخاب شده و تابع تغییر مکان جانبی در هر دامنه جابجایی، سه سیکل تکرار می‌گردند.



شکل ۲. جزئیات قرار گیری نمونه در قاب (واحد ها بر اساس میلی‌متر است)

Fig. 2. Test set-up (Unit; mm)

## ۲-۴- ابزارهای اندازه‌گیری

برای تعیین کرنش در میلگردهای طولی فولادی از سه کرنش سنج در ابتدا، یک چهارم ارتفاع و وسط ارتفاع هر میلگرد طولی استفاده می‌شود. همچنین دو کرنش سنج نیز بر روی هر کدام از چهار خاموت پای ستون نصب می‌گردد. این کرنش‌سنجها توانایی اندازه‌گیری کرنش بعد از مرحله تسلیم را هم دارا می‌باشند. برای تعیین کرنش در میلگردهای NSM از سه کرنش سنج در ابتدا، یک چهارم ارتفاع و وسط ارتفاع هر میلگرد طولی استفاده می‌شود. شش کرنش سنج نیز بر روی سطح دورپیچ FRP نصب می‌شود. به علت رفتار الاستیک خطی مصالح کامپوزیت، کرنش‌سنجهای مورد استفاده برای آنها از نوع کرنش‌سنج خطی هستند. این کرنش‌سنجها تا مرحله تسلیم توانایی اندازه‌گیری کرنش وارده را دارند. جابجایی جانبی ستون نیز در محل اعمال جابجایی جانبی توسط جابجایی سنج متصل بر جک هیدرولیکی اندازه‌گیری می‌شود.

## ۳- نتایج آزمایش‌ها

## ۳-۱- روند خرابی

در نمونه Control اولین ترک در وجه کششی و در تغییر مکان جانبی حدود ۷ mm ایجاد شد. این ترک کششی در فاصله پنجاه میلی‌متری پای ستون قرار داشته است. در تغییر مکان جانبی حدود ۱۱ mm و ۱۵ mm نیز ترکهای جدیدی بوجود آمده و رشد کرده‌اند. هنگامیکه تغییر مکان جانبی ستون حدود ۱۹/۵ mm شد، ستون به حداکثر ظرفیت باربری جانبی خود می‌رسد. بعد از این نقطه با افزایش دامنه بارگذاری سیکلی ستون با کاهش مقاومت روبرو شد، بگونه‌ای که در تغییر مکان جانبی ۲۵ mm کاور بتن از سطح ستون جدا شده و در ادامه با کماتش میلگردهای طولی و باز شدگی و جاری شدن خاموت‌ها خرابی ستون ادامه می‌یابد. در نهایت، ستون با ترک خوردگی شدید، انهدام هسته بتن، باز شدن خاموت‌ها و کماتش میلگردهای طولی به انتهای ظرفیت باربری خود می‌رسد و بارگذاری متوقف می‌شود. در این لحظه تغییر مکان نسبی ستون معادل ۶۰ mm می‌باشد (شکل ۳-الف). در ستون R1-NA-C0 پس از اعمال نیروی محوری و در حین بارگذاری جانبی، اولین ترک در تغییر مکان جانبی حدود ۸ mm ایجاد

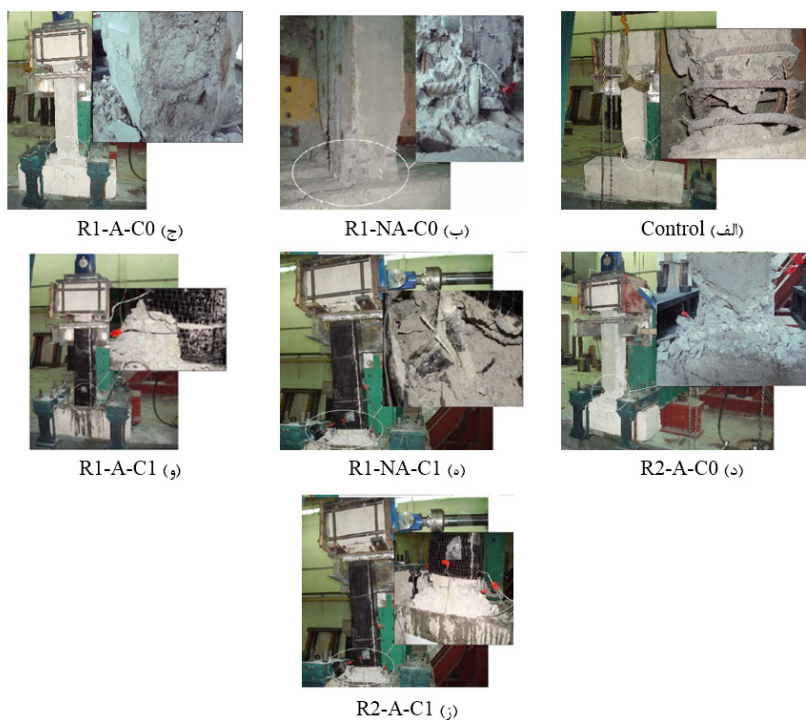
با افزایش دامنه بارگذاری سیکلی ستون با کاهش مقاومت روبرو می‌گردد. در تغییر مکان جانبی حدود ۶۰ mm مقاومت جانبی ستون به حدود چهل درصد مقاومت حداکثر می‌رسد. در این حالت بارگذاری متوقف می‌گردد (شکل ۳-د).

در ستون‌های R1-A-C1، R1-NA-C1 و R2-A-C1 به علت وجود دور پیچ CFRP امکان مشاهده توالی خرابی در نمونه‌ها وجود ندارد. در هر سه این نمونه‌ها در تغییر مکان جانبی حدود ۳۰ mm، ستون به حداکثر ظرفیت باربری جانبی خود می‌رسد. در ادامه با افزایش دامنه تغییر مکان جانبی، کاهش چندانی در مقاومت ستون مشاهده نمی‌گردد و نمونه همچنان از ظرفیت باربری قابل ملاحظه‌ای برخوردار می‌باشد بگونه‌ای که پس از گذشت چهل و دو سیکل و در تغییر مکان جانبی ۱۰۰ mm تنها حدود بیست درصد کاهش مقاومت در ستون مشاهده می‌گردد. در این حالت بارگذاری متوقف می‌گردد. پس از توقف بارگذاری، الیاف CFRP در پای ستون برداشته شده و ملاحظه گردید که در این بخش بتن کاملاً خرد گردیده است. در شکل‌های ۳-ه تا ۳-ز نمائی از تخریب پای ستون در محل مفصل پلاستیک بعد از برداشتن الیاف CFRP مشاهده می‌گردد. همچنین در نمونه R1-NA-C1 مشابه نمونه R1-NA-C0 انتهای میلگردهای تقویتی NSM دچار لهیدگی ناشی از کمانش و خرد شدگی گردیده است. علت این امر عدم مهار میلگردهای تقویتی NSM در بلوک بتنی تحتانی می‌باشد (شکل‌های ۳-ه و ۳-ب).

شد. هنگامیکه تغییر مکان جانبی ستون به حدود ۱۹/۹ mm رسید، ستون به حداکثر ظرفیت باربری جانبی خود می‌رسد. بعد از این نقطه با افزایش دامنه بارگذاری سیکلی ستون با خرابی شدید و کاهش مقاومت روبرو گردید. در این لحظه بارگذاری متوقف می‌گردد. در لحظه خرابی ستون تغییر مکان جانبی ستون معادل ۶۰ mm اندازه‌گیری شد. پس از پایان بارگذاری، باقیمانده کاور بتن از روی ستون برداشته شده و مشاهده گردید که انتهای میلگردهای NSM تحت تشبهای فشاری دچار لهیدگی شده و خرد گردیده است. علت این امر عدم مهار میلگردهای NSM در داخل فونداسیون می‌باشد (شکل ۳-ب).

در ستون R1-A-C0 هنگامیکه تغییر مکان جانبی ستون به حدود ۲۴/۴ mm رسید ستون به حداکثر ظرفیت باربری جانبی خود می‌رسد. بعد از این نقطه با افزایش دامنه بارگذاری سیکلی ستون با کاهش مقاومت روبرو می‌گردد، بگونه‌ای که در تغییر مکان جانبی ۳۰ mm کاور بتن از سطح ستون جدا گردید. زمانیکه تغییر مکان جانبی ستون به حدود ۴۰ mm رسید، یک ترک طولی از پای ستون و در امتداد محل کاشت ایجاد شده و به تدریج رشد کرده است. زمانیکه تغییر مکان جانبی ستون حدود ۶۰ mm رسید، مقاومت جانبی ستون به حدود چهل درصد مقاومت حداکثر می‌رسد. در این حالت بارگذاری متوقف می‌گردد (شکل ۳-ج).

در ستون R2-A-C0 اولین ترک در تغییر مکان جانبی حدود ۲۵/۳ mm ایجاد شد. هنگامیکه تغییر مکان جانبی ستون به حدود ۲۵/۳ mm رسید ستون به حداکثر ظرفیت باربری جانبی خود می‌رسد. بعد از این نقطه



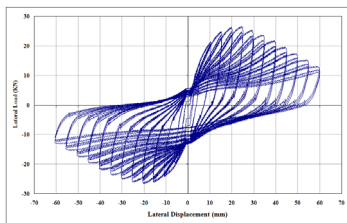
شکل ۳. روند خرابی نمونه‌ها در پایان آزمایش

Fig. 3. Failure mode of specimens

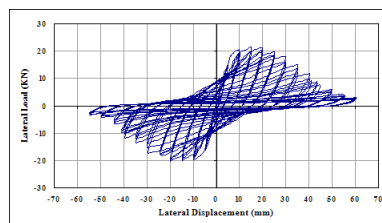
۳-۲- نمودار نیرو - جابه‌جایی

داده شده‌است، مشخص است که کاهش سختی در این نمونه‌ها کم بوده و در نتیجه حلقه‌های هیستریزس چاق هستند. همچنین کاهش مقاومت در حلقه‌های هیستریزس ناچیز بوده و قابلیت جذب انرژی در آن‌ها بالا می‌باشد، لذا در صورت استفاده از دورپیچ FRP تعداد سیکل‌های بارگذاری قابل تحمل توسط نمونه به نحو قابل توجهی افزایش می‌یابد. نتایج تحقیقات انجام شده در مراجع [۶-۷] نیز مؤید این موضوع است. با بررسی منحنی هیستریزس نمونه R1-NA-C0 در شکل ۴-ب مشخص می‌شود که هیچ تفاوت معناداری بین منحنی هیستریزس این نمونه با نمونه Control وجود ندارد، لذا علیرغم استفاده از میلگردهای تقویتی NSM، به علت عدم مهار انتهای این اجزای تقویتی در بتن فونداسیون از ظرفیت این میلگردهای تقویتی استفاده نمی‌گردد.

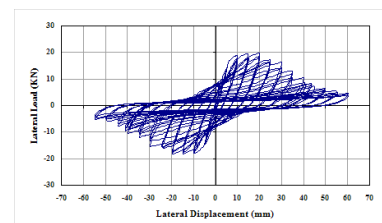
در شکل ۴ منحنی هیستریزس نیروی جانبی-جابه‌جایی جانبی نمونه‌ها مشاهده می‌گردد. با توجه به شکل ۴-الف مشخص است که نمونه Control در سیکل‌های بارگذاری دچار کاهش سختی می‌شود. همچنین بعد از رسیدن به حداکثر ظرفیت باربری جانبی، نمونه با کاهش شدید مقاومت روبرو می‌شود. این پدیده که به لهشستگی حلقه‌های هیستریزس مشهور بوده و ناشی از باز و بسته شدن ترک‌ها از حالت باربرداری به بارگذاری می‌باشد. همچنین با توجه به شکل ۴-ب مشخص می‌گردد که رفتار این نمونه مشابه نمونه R1-NA-C0 می‌باشد. با توجه به منحنی هیستریزس نمونه‌های دورپیچ شده با FRP که در شکل‌های ۴-و، ۴-ز و ۴-ح مشاهده می‌گردد.



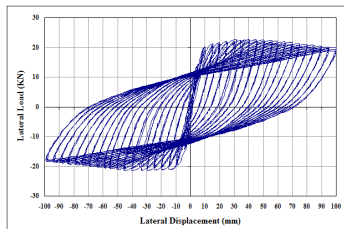
R1-A-C0 (ج)



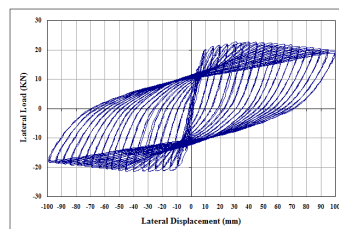
R1-NA-C0 (ب)



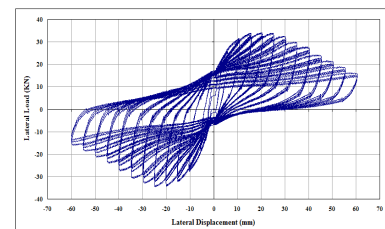
Control (الف)



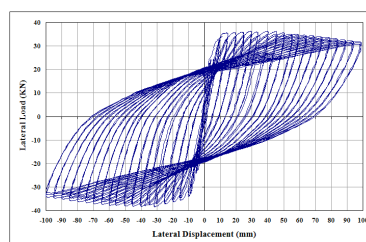
R1-A-C1 (و)



R1-NA-C1 (ه)



R2-A-C0 (د)



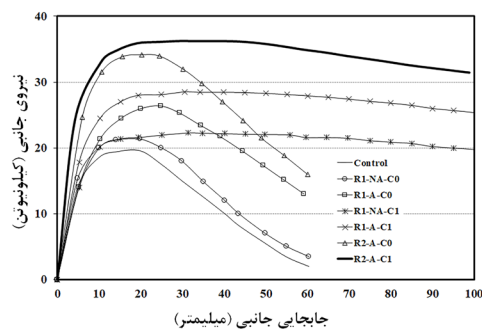
R2-A-C1 (ز)

شکل ۴. منحنی هیستریزس نیروی جانبی-تغییر مکان جانبی نمونه‌ها (الف) نمونه CONTROL (ب) نمونه R1-NA-C0 (ج) نمونه R1-A-C1 (د) نمونه R2-A-C0 (ه) نمونه R1-NA-C1 (و) نمونه R1-A-C1 (ز) نمونه R2-A-C1

Fig. 4. Hysteresis curves for specimens

افزایش ظرفیت خمشی ستون‌ها مؤثر است. این موضوع نشانگر این است که در صورت عدم وجود مهار انتهایی، این روش تقویت توانایی چندانی در افزایش ظرفیت باربری جانبی ستون‌ها نداشته، لذا مهار انتهایی میلگرد تقویتی NSM در داخل فونداسیون یا سقف ضروری است.

همچنین با مقایسه میزان افزایش ظرفیت باربری جانبی در بین نمونه‌های دور پیچ شده با FRP مشخص می‌گردد که ظرفیت باربری جانبی نمونه‌های دور پیچ FRP، حدود شش درصد نسبت به نمونه‌های مشابه فاقد دور پیچ FRP افزایش می‌یابد. علت این امر اثر محصورکنندگی دور پیچ FRP بر بتن در ناحیه مفصل پلاستیک و افزایش کرنش حد نهایی بتن می‌باشد. با توجه به اینک در صورت دورپیچ نمودن ستون‌ها با استفاده از الیاف FRP، ظرفیت خمشی ستون بصورت ناچیز افزایش می‌یابد، مشخص است که استفاده از میلگرد تقویتی NSM نسبت دور پیچ FRP در افزایش ظرفیت باربری جانبی (ظرفیت خمشی) مؤثرتر است.



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

Fig. 5. Envelope curves

در شکل ۵ منحنی های پوش نیروی جانبی-تغییر مکان جانبی برای تمامی نمونه‌های آزمایشگاهی مشاهده می‌شود. منحنی پوش بر اساس منحنی‌های هیستریزس نیرو-جابجایی تهیه شده‌است. همچنین در جدول ۳ خلاصه نتایج آزمایشات شامل حداکثر ظرفیت باربری جانبی و جابجایی متناظر با آن مشاهده می‌گردد. با مقایسه حداکثر نیروی قابل تحمل توسط نمونه Control با سایر نمونه‌ها مشخص می‌گردد که در صورت استفاده از میلگردهای تقویتی NSM، ظرفیت باربری جانبی ستون (ظرفیت خمشی ستون) افزایش می‌یابد. این افزایش ظرفیت در نمونه R2-A-C0 که با دو میلگرد در هر وجه ستون تقویت شده‌است برابر با ۷۸ درصد افزایش نسبت به نمونه Control و در نمونه R1-A-C0 که با یک میلگرد در هر وجه ستون تقویت شده‌است، حدود سی و شش درصد افزایش نسبت به نمونه Control می‌باشد. این موضوع نشاندهنده تاثیر مقدار میلگرد تقویتی NSM در افزایش ظرفیت خمشی و باربری جانبی ستون و نشانگر عملکرد مناسب این سیستم تقویت می‌باشد. نتایج تحقیقات انجام شده توسط باروس و همکاران نیز مشابه نتایج اخذ شده در این بخش می‌باشد [۱۵ و ۱۶].

همچنین با مقایسه حداکثر نیروی قابل تحمل توسط نمونه R1-A-C0 با نمونه R1-NA-C0 که هر دو دارای یک مقدار میلگرد تقویتی NSM بوده و تفاوت آن‌ها در مهار شدگی انتهایی میلگرد NSM است، مشخص می‌گردد که میزان افزایش ظرفیت در نمونه R1-NA-C0 که در آن انتهایی میلگردهای NSM مهار نشده‌است نسبت به ستون Control بسیار جزئی می‌باشد (حدود هفت درصد) ولی میزان افزایش ظرفیت در نمونه R1-A-C0 که در آن انتهایی میلگردهای NSM مهار شده‌است، حدود ۳۶ درصد می‌باشد. یعنی مهار انتهایی میلگردهای NSM پنج برابر بیشتر در

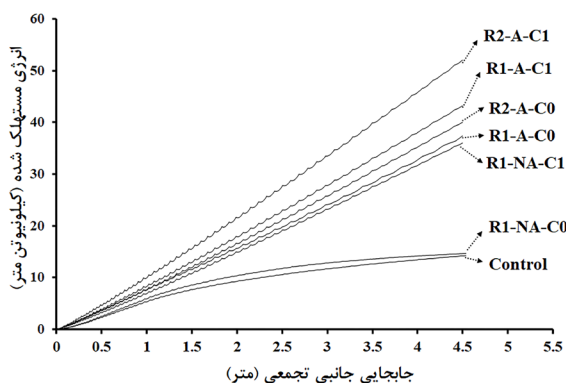
جدول ۳. خلاصه نتایج آزمایش‌ها

Table 3. Summary of test results

نمونه	Negative Peak Point		Positive Peak Point		میزان افزایش ظرفیت باربری (%)	شکل پذیری	میزان افزایش شکل پذیری (%)	استهلاک انرژی (KN.m)	افزایش استهلاک انرژی (%)
	$\Delta^-_{peak}$	$F^-_{peak}$	$\Delta^+_{peak}$	$F^+_{peak}$					
	(mm)	(KN)	(mm)	(KN)					
CONTROL	-۱۹/۷	-۱۸/۳	۱۹/۸	۱۹/۵	-	۲/۹	-	۱۴/۱	-
R1-NA-C0	-۱۹/۸	۲۰-	۱۹/۹	۲۱/۳	٪۷	۳/۲	٪۱۰/۳	۱۵	٪۵/۶
R1-A-C0	-۲۴/۳	-۲۶/۶	۲۴/۴	۲۶/۶	٪۳۶	۳/۵	٪۲۰/۶	۳۶/۲	٪۱۵۵
R2-A-C0	-۲۴/۴	-۳۴/۶	۲۵/۳	۳۴/۷	٪۷۸	۳/۳	٪۱۳/۷	۳۷/۵	٪۱۶۴
R1-NA-C1	-۲۹/۳	-۲۱/۴	۳۰/۳	۲۲/۷	٪۱۶	۶/۸	٪۱۳۴	۳۹/۹	٪۱۸۰
R1-A-C1	-۲۹/۲	-۲۷/۱	۳۰/۱	۲۸/۶	٪۴۷	۶/۹	٪۱۳۷	۴۳/۸	٪۲۰۸
R2-A-C1	-۲۹/۷	-۳۸/۴	۲۹/۲	۳۶/۳	٪۸۶	۶/۵	٪۱۲۴	۵۱/۳	٪۲۶۱

سیکل‌های قبلی می‌باشد. مقدار انرژی مستهلک شده تجمعی تا پایان سیکل سی و ششم (جابجایی جانبی شصت میلی‌متر) در جدول ۳ ارائه شده است. در شکل ۶ میزان انرژی مستهلک شده تا پایان آزمایش مشاهده می‌شود. نقاط دندانه‌ای شکل در شکل ۶ ناشی از آزاد شدن انرژی الاستیک در سیکل‌های باربرداری می‌باشد.

با بررسی جدول ۳ و شکل ۶ مشخص می‌گردد که نمونه‌های تقویت شده با میلگرد NSM از قابلیت استهلاک انرژی بیشتری نسبت به نمونه Control برخوردار هستند. لذا مشخص است که این روش تقویت در بهبود رفتار لرزه‌ای ستون‌ها مؤثر است. هم‌چنین مشخص می‌گردد که نمونه R2-A-C0 که با دو میلگرد NSM در هر وجه ستون تقویت شده است دارای هشت درصد استهلاک انرژی بیشتری نسبت به نمونه R1-A-C0 که با یک میلگرد NSM در هر وجه ستون تقویت شده است، می‌باشد. این موضوع به این معناست که افزایش مقدار میلگردهای تقویتی NSM باعث افزایش میزان جذب و استهلاک انرژی می‌گردد. هم‌چنین مشخص می‌گردد که دورپیچ کردن ستون‌ها با FRP باعث افزایش قابل توجهی در ظرفیت استهلاک انرژی می‌گردد. به طوری‌که در نمونه با یک میلگرد NSM در هر وجه، دورپیچ کردن ستون‌ها با FRP باعث افزایش سی و پنج درصدی و در نمونه با دو میلگرد NSM در هر وجه، دورپیچ کردن ستون‌ها با FRP باعث افزایش حدود پنجاه درصدی انرژی مستهلک شده می‌گردد. نتایج ارائه شده در مراجع شماره [۱۷] نیز مؤید این مطلب است. هم‌چنین در نمونه R1-NA-C0 هیچگونه تغییری در میزان انرژی جذب و مستهلک شده مشاهده نمی‌گردد که نشان‌دهنده مؤثر نبودن میلگردهای تقویتی NSM در صورت عدم مهار در پای ستون می‌باشد.



شکل ۶. انرژی مستهلک شده نمونه‌ها

Fig. 6. Energy dissipation of specimens

### ۳-۳- کرنش در اجزای نمونه‌ها

با توجه به بررسی نتایج حاصل از کرنش سنج‌ها مشخص می‌گردد که در تمام نمونه‌ها میلگردهای طولی جاری می‌شوند. خاموت‌ها فقط در نمونه‌های دور پیچ شده با FRP جاری نمی‌شوند که علت این امر اثر محصورکنندگی الیاف FRP است. در تمام نمونه‌ها، میلگردهای NSM و الیاف FRP در حد الاستیک باقی مانده و کرنش در آن‌ها حدود پنجاه درصد کرنش حد نهایی می‌باشد.

### ۳-۴- شکل پذیری

شکل‌پذیری نشان‌دهنده توانایی یک عضو در جذب و استهلاک انرژی در اثر تغییرشکل‌های غیرخطی می‌باشد. زیاد بودن شکل‌پذیری به معنای عملکرد مناسب آن عضو در تحمل نیروهای وارده تحت بارهای سیکلی و لرزه‌ای می‌باشد. شکل‌پذیری با  $\mu$  نشان داده شده و از رابطه  $\Delta y / \Delta u = \mu$  تعیین می‌گردد. که  $\Delta y$  تغییر شکل حد جاری شدن<sup>۱</sup> عضو می‌باشد و  $\Delta u$  تغییر شکل نهایی<sup>۲</sup> عضو است که اصولاً برابر با تغییر مکان معادل هشاد تا هشاد و پنج درصد مقاومت حداکثر در شاخه نزولی کاهش مقاومت<sup>۳</sup> در نظر گرفته می‌شود. از آنجا که در نمونه‌های R1-A-C1 و R2-A-C1 پس از پایان آزمایش کاهش بیست درصدی در مقاومت مشاهده نمی‌شود، لذا تغییر مکان نهایی برابر با تغییر مکان معادل نود درصد در شاخه کاهش مقاومت در نظر گرفته می‌شود.

مقادیر  $\Delta y$ ،  $\Delta u$  و  $\mu$  تمام نمونه‌ها در جدول ۳ ارائه شده است. با مقایسه مقدار شکل‌پذیری در نمونه‌های R1-A-C0 و R2-A-C0 بر اساس جدول ۳ مشخص است که شکل‌پذیری ستون R1-A-C0 از ستون R2-A-C0 بیشتر است. علت این امر بیشتر بودن درصد میلگردهای تقویتی NSM در ستون R2-A-C0 نسبت به ستون R1-A-C0 می‌باشد. لذا مشخص می‌گردد که افزایش درصد میلگردهای NSM باعث کاهش شکل‌پذیری نمونه‌ها می‌گردد. هم‌چنین همانطور که انتظار می‌رفت که دورپیچ کردن ستون‌های بتن مسلح با استفاده از الیاف FRP باعث افزایش شکل‌پذیری آنها می‌شود. نتایج ارائه شده در مراجع شماره [۱۵ و ۱۶] نیز مؤید این مطلب است. هم‌چنین در نمونه R1-NA-C0 هیچگونه افزایش معناداری در شکل‌پذیری مشاهده نمی‌گردد که نشان‌دهنده مؤثر نبودن میلگردهای تقویتی NSM در صورت عدم مهار در پای ستون می‌باشد.

### ۳-۵- ظرفیت استهلاک انرژی

استهلاک انرژی یکی از مهمترین پارامترها در رفتار سازه هنگام وقوع زلزله است. انرژی مستهلک شده در هر سیکل برابر مساحت بین منحنی هیستریزس نیروی جانبی- تغییر مکان جانبی در آن سیکل می‌باشد [۱]. انرژی مستهلک شده تجمعی برابر مجموع انرژی مستهلک شده در تمامی

- 1 Yield Displacement
- 2 Ultimate Displacement
- 3 Softening Branch



## ۴- نتیجه‌گیری

هدف از انجام این پژوهش بررسی امکان افزایش ظرفیت خمشی ستون‌های بتن مسلح توسط میلگردهای NSM می‌باشد. برای انجام این کار هفت نمونه ستون بتن مسلح ساخته شده و در آزمایشگاه تحت نیروی محوری ثابت و جابجایی جانبی سیکلی قرار گرفته و نتایج آزمایش بررسی شد. در ادامه به بررسی نتایج حاصل از این پروژه تحقیقاتی پرداخته می‌شود.

- استفاده از میلگردهای تقویتی NSM باعث افزایش ظرفیت باربری جانبی و ظرفیت خمشی ستون‌های بتنی می‌گردد، بگونه‌ای که با افزایش درصد میلگردهای NSM ظرفیت خمشی نیز افزایش می‌یابد.

- جهت افزایش ظرفیت خمشی ستون‌های بتنی با میلگردهای NSM، مهار این میلگردها در داخل فونداسیون، تیر یا دال سقف ضروری می‌باشد.

- استفاده از میلگردهای تقویتی NSM به علت افزایش ظرفیت باربری جانبی و تأخیر در خرابی ستون، باعث افزایش محدود شکل‌پذیری نمونه‌های تقویت شده می‌گردد. هم‌چنین شکل‌پذیری در ستون‌های با حجم کمتر NSM نسبت به ستون‌های با حجم بیشتر NSM، از افزایش بیشتری برخوردار می‌باشد. نمونه‌های دارای دورپیچ الیاف FRP از بیشترین مقدار شکل‌پذیری برخوردار هستند.

- استفاده از میلگردهای تقویتی NSM باعث افزایش ظرفیت جذب و استهلاک انرژی در ستون‌های بتن مسلح می‌گردد، بطوریکه با افزایش درصد حجمی میلگردهای NSM، میزان استهلاک انرژی بیشتر می‌شود.

- ترکیب میلگردهای تقویتی NSM با دورپیچ الیاف FRP باعث افزایش چشمگیر ظرفیت جذب و استهلاک انرژی در ستون‌های بتن مسلح می‌گردد.

## مراجع

- [1] R. Park, Improving the resistance of structures to earthquakes, Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering, 34(1) (2001) 1-39.
- [2] H. Saadatmanesh, M. R. Ehsani, and L. Mu-Wen, Strength and ductility of concrete columns externally reinforced with fiber composite straps, ACI Structural Journal, 91(4) (1994) 434-447.
- [3] H. Saadatmanesh, M. R. Ehsani, and L. Mu-Wen, Seismic strengthening of circular bridge pier models with fiber composites, ACI Structural Journal, 93(6) (1996) 639-738.
- [4] F. Seible, M. N. Priestley, G. A. Hegemier, and D. Innamorato, Seismic retrofit of RC columns with continuous carbon fiber jackets, Journal of composites for construction, 1(2) (1997) 52-62.
- [5] A. Mirmiran, M. Shahawy, M. Samaan, H. E. Echary, J. C. Mastrapa, and O. Pico, Effect of column parameters on FRP-confined concrete, Journal of Composites for construction 2(4)(1998) 175-185.
- [6] M. Saafi, H. Toutanji, and Z. Li, Behavior of concrete columns confined with fiber reinforced polymer tubes, ACI Materials Journal, 96(4) (1999) 500-509.
- [7] ACI Committee 440, Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures, American Concrete Institute, 2017.
- [8] R. El-Hacha, and S. Rizkalla, Near-surface-mounted fiber-reinforced polymer reinforcements for flexural strengthening of concrete structures, ACI Structural Journal, 101(5) (2004) 717-726.
- [9] L. De Lorenzis, and A. Nanni, Bond between NSM fiber-reinforced polymer rods and concrete in structural strengthening, ACI Structural Journal, 99(2) (2002) 123-132.
- [10] J. Sena Cruz, and J. A. O. Barros, Bond between near-surface mounted carbon-fiber-reinforced polymer laminate strips and concrete, Journal of composites for construction, 8(6) (2004) 519-527.
- [11] L. De Lorenzis, Anchorage length of near-surface mounted fiber-reinforced polymer rods for concrete strengthening—Analytical modeling, ACI Structural Journal, 101(3) (2004) 375-386.
- [12] L. De Lorenzis, K. Lundgren, and A. Rizzo, Anchorage length of near-surface mounted fiber-reinforced polymer bars for concrete strengthening-experimental investigation and numerical modeling, ACI Structural Journal, 101(2) (2004) 269-278.
- [13] H. Tarek, and S. Rizkalla, Bond mechanism of NSM FRP bars for flexural strengthening of concrete structures, ACI Structural Journal, 101(6) (2004) 830-839.
- [14] I. S. Liu, D. J. Oehlers, and R. Seracino, Tests on the ductility of reinforced concrete beams retrofitted with FRP and steel near-surface mounted plates, Journal of Composites for Construction, 10(2) (2006) 106-114.
- [15] J. A. O. Barros, D. Ferreira, A. S. Fortes, and S. Dias, Assessing the effectiveness of embedding CFRP laminates in the near surface for structural strengthening, Construction and Building Materials, 20(7) (2006) 478-491.
- [16] J. A. O. Barros, K. V. Rajendra, J. Sena-Cruz, and A. Azevedo, Near surface mounted CFRP strips for the flexural strengthening of RC columns: Experimental and numerical research, Engineering Structures, 30(12) (2008) 3412-3425.
- [17] D. A. Bournas, and T. C. Triantafyllou, Flexural strengthening of RC columns with NSM FRP or stainless steel, ACI Structural Journal, 106(4) (2009) 495-505.

- [20] S. F. Jiang, X. Zeng, S. Shen, and X. Xu, Experimental studies on the seismic behavior of earthquake-damaged circular bridge columns repaired by using combination of near-surface-mounted BFRP bars with external BFRP sheets jacketing, *Engineering Structures*, 106 (2016) 317-331.
- [18] L. Ding, G. Wu, S. Yang, and Z. Wu, Performance advancement of RC columns by applying basalt FRP Composites with NSM and confinement system, *Journal of Earthquake and Tsunami*, 7(2) (2013) 1-20.
- [19] X. Li, H. L. Lv, G. C. Zhang, S. Y. Sha, and S. C. Zhou, Seismic retrofitting of rectangular reinforced concrete columns using fiber composites for enhanced flexural strength, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 32(9) (2013) 619-630.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

M. Esfandi Sarafraz, F. Danesh, Use NSM FRP Rebars for Flexural Strengthening of RC Columns, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 51(1) (2019) 119-128.

DOI: 10.22060/ceej.2017.13230.5351

