

رفتار تیرهای بتن مسلح تقویت شده با روش NSM-SMA/FRP

بهروز فراهی، محمدرضا اصفهانی*، جواد سبزی

گروه عمران دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۶ دی ۱۳۹۶
بازنگری: ۱۵ اسفند ۱۳۹۶
پذیرش: ۱۹ اسفند ۱۳۹۶
ارائه آنلاین: ۲۰ فروردین ۱۳۹۷

کلمات کلیدی:

تیر بتن مسلح
آلیاژهای هوشمند حافظه‌دار
میلگرد
FRP
روش تقویت نصب در نزدیک سطح
جذب انرژی
بازیابی تغییر شکل

چکیده: خاصیت بازگشت‌پذیری آلیاژهای هوشمند حافظه‌دار (SMAهای) فوق الاستیک، ویژگی منحصر به فردی است که از آن می‌توان در ساخت و تقویت اجزای بتن مسلح استفاده کرد. اجزای بتنی تقویت شده با این آلیاژها، قابلیت شکل‌پذیری و جذب انرژی بالاتری نسبت به تیرهای بتن مسلح معمولی دارند و همچنین در چرخه‌های متوالی بارگذاری و باربرداری، خسارت کمتری نسبت به تیرهای بتن مسلح رایج متحمل می‌شوند. هدف از پژوهش پیش‌رو، بررسی آزمایشگاهی رفتار تیرهای بتن مسلح تقویت شده با آلیاژهای هوشمند حافظه‌دار به روش تقویت خمشی نصب در نزدیک سطح (NSM-SMA) و مقایسه‌ی آن‌ها با تیرهای بتن مسلح معمولی و نیز تیرهای بتن مسلح تقویت شده با روش NSM-FRP است. برای دستیابی به اهداف پژوهش، ۱۱ تیر بتن مسلح به ابعاد مقطع ۲۰۰×۱۵۰ میلی‌متر و طول ۱۱۵۰ میلی‌متر ساخته شد. از میان این تیرها، ۳ نمونه بدون تقویت بودند، ۴ نمونه به وسیله روش NSM-SMA تقویت شدند و ۴ نمونه با میلگردهای GFRP و با روش NSM-FRP مورد تقویت قرار گرفتند. نمونه‌ها به صورت دو سر ساده تحت آزمایش خمش سه نقطه‌ای و بارگذاری‌های استاتیکی و بارگذاری- باربرداری قرار گرفتند. عوامل متعددی از جمله مقاومت، میزان جذب انرژی، قابلیت بازیابی تغییر شکل و توانایی بستن عرض ترک مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد تیرهای بتن مسلح تقویت شده با روش NSM-SMA تحت بار استاتیکی، تغییر مکان وسط دهانه و جذب انرژی بالاتری نسبت به سایر تیرها دارند. همچنین تحت بارگذاری- باربرداری، تیرهای تقویت شده با روش NSM-SMA خسارت کمتری نسبت به سایر تیرها داشتند.

۱- مقدمه

سازه‌های بتنی مانند پل‌ها و ساختمان‌ها به دلایل مختلفی از جمله قرار گرفتن در شرایط نامناسب و تغییر کاربری نیاز به تقویت دارند [۱]. روش‌های تقویت متداول سازه‌های بتنی شامل چسباندن ورق فولادی، ژاکت فولادی^۱، ژاکت بتنی پیش‌ساخته و پیش‌تنیدگی خارجی می‌باشند. این روش‌ها موانعی از جمله در معرض خوردگی بودن، اجرا و کارگذاری مشکل و افزایش ابعاد و وزن سازه‌های بتنی دارند [۲]. پلیمرهای الیافی تقویت‌کننده^۲ (FRP) به علت ویژگی‌های مطلوب‌شان مانند مقاومت بالا در برابر خوردگی، تنش کششی بالا و وزن کم، به طور گسترده‌ای برای ترمیم سختی و مقاومت سازه‌های بتنی مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۳]. از FRP‌ها بیش‌تر در روش تقویت خارجی^۳ (EBR) استفاده می‌شود. در این روش، به منظور تقویت سازه‌های بتنی موجود، ورق‌های FRP به سطح خارجی بتن

چسبانده می‌شوند، اگرچه جدایش زودرس^۴ و شکست گسیختگی^۵ توسط بسیاری از پژوهشگران مشاهده شده است [۴-۹]. روش تقویت کارگذاری در سطح^۶ (NSM)، فناوری نسبتاً جدیدی در ترمیم و تقویت سازه‌های بتنی است که به دلیل نداشتن بسیاری از مشکلات روش EBR، بسیار مورد توجه قرار گرفته است [۱۰-۱۴]. در روش NSM، ابتدا شیارهایی طولی بر روی پوشش عضو بتنی ایجاد می‌گردد، سپس میلگردها و یا نوارهای تقویتی توسط چسب یا ملات سیمانی در داخل شیار چسبانده می‌شوند. روش NSM به آماده‌سازی سطحی و عمل‌آوری کم‌تری نیاز دارد و از مصالح تقویت‌کننده در برابر شرایط محیطی و عوامل مخرب مکانیکی محافظت می‌نماید.

یکی از مهم‌ترین عواملی که بر کارآمدی روش NSM تأثیر می‌گذارد، پیوستگی بین تقویت‌کننده‌ی NSM و بتن است [۱۵]. مطالعه‌های گذشته نشان می‌دهد میلگردها و ورق‌های FRP، به علت ضعف در پیوستگی نمی‌توانند به مقاومت نهایی خود برسند [۱۶]. همچنین مصالح FRP رفتاری خطی و الاستیک با کرنش نهایی محدود دارند. در نتیجه سازه‌های تقویت شده با FRP ممکن است شکل‌پذیری کافی نداشته باشند [۱۷]. پیش‌تنیده

*نویسنده عهده‌دار مکاتبات: esfahani@um.ac.ir

4 Premature Debonding
5 Rapture Failure
6 Near Surface Mounted1 Steel Jacketing
2 Fiber Reinforced Plymers
3 Externally Bonded Reinforcement

موقتی به وسیله‌ی سیم‌های SMA ایجاد کردند تا تقویت دائمی را که به وسیله‌ی ورق‌های CFRP^۸ انجام می‌شد تسهیل نمایند. آن‌ها مشاهده نمودند سیم‌های SMA به صورت مؤثری می‌توانند کرنش پسماند تیرها را بعد از گرما دادن کاهش دهند. ویرشم و اندروس^۹ [۲۳] مصالح تسلیح کننده کامپوزیتی SMA-FRP برای سازه‌های بتنی ابداع کردند. این مصالح کامپوزیتی با هدف بهبود شکل‌پذیری و ظرفیت میرایی میلگردهای FRP ساخته شد. نتایج آزمایشگاهی نشان داد با جایگزین کردن ۲۵٪ حجم الیاف شیشه توسط سیم‌های SMA، شکل‌پذیری ۶۴٪ افزایش یافت و انرژی جذب شده نسبت به حالت FRP، ۲/۶ برابر شد. چادرسی و همکاران^{۱۰} [۲۴] پژوهشی انجام دادند که در آن از سیم‌های Ni-Ti برای تسلیح خمشی تیرهای بتنی استفاده شد. با تغییر دما در سیم‌های SMA که توسط مقاومت الکتریکی انجام گرفت، سختی و مقاومت تیر بتنی قابل تغییر بود. به دلیل این که SMAها رسانا هستند، این مصالح را می‌توان به طور مستقیم توسط جریان الکتریکی گرما داد [۲۵]. از نوارهای SMA با خاصیت حافظه‌شکلی می‌توان در تقویت اجزای بتنی با روش NSM استفاده کرد، زیرا پیش‌تینده کردن این سیم‌ها نیاز به جک مکانیکی و یا مهار ندارد [۱۸]. استفاده از SMAهای با خاصیت فوق الاستیک در تقویت به روش NSM می‌تواند مزایای دیگری داشته باشد. SMAهای فوق الاستیک می‌توانند کرنش‌هایی برابر با ۰/۰۶ تا ۰/۰۸ را حین باربرداری به طور کامل بازیابی کنند و همچنین کرنش نهایی معادل با ۰/۱۰ تا ۰/۱۲ را تحمل نمایند [۲۴ و ۲۶]. به دلیل این که مسیر بارگذاری و باربرداری این آلیاژها با هم تداخلی ندارد، قادر به جذب انرژی هستند. استفاده از SMAهای دارای خاصیت فوق الاستیک در اعضای بتنی به عنوان تقویت کننده با روش NSM، باعث بهبود عملکرد این اعضا می‌گردد. به عنوان مثال، اعضای تقویت شده به وسیله میلگردهای فوق الاستیک SMA که با روش NSM تقویت شده‌اند، می‌توانند تغییر مکان نسبی بالایی را تحمل کنند، جذب انرژی بالایی داشته باشند و توانایی منحصر به فردی در بازگشت به حالت اولیه از خود نشان دهند. این ویژگی‌ها باعث می‌شود که اعضای مذکور عملکرد بهتری پس از زلزله داشته باشند [۱۷].

در تمامی پژوهش‌های مورد اشاره، محقق‌ها تنها به بررسی تقویت تیرهای بتن مسلح توسط میلگردهای (NSM-FRP) پرداخته‌اند و فقط تعداد معدودی از آنان رفتار تیرهای بتن مسلح تقویت شده با آلیاژهای هوشمند حافظه‌دار به روش تقویت خمشی نصب در نزدیک سطح (-NSM) را نیز مورد بررسی قرار داده‌اند. در تحقیق حاضر رفتار تیرهای بتن مسلح تقویت شده با آلیاژهای هوشمند حافظه‌دار و مقایسه آن‌ها با تیرهای بتن مسلح معمولی و نیز تیرهای بتن مسلح تقویت شده با میلگردهای FRP تحت بارگذاری‌های استاتیکی و بارگذاری-باربرداری مورد بررسی قرار گرفت.

8 Carbon Fiber Reinforced Polymer
9 Andrawes and Wierschem
10 Czaderski et al.

کردن مصالح FRP در روش تقویت NSM نیز روشی پیچیده به شمار می‌آید، زیرا فضای موجود در داخل شیار برای گیردار کردن میلگرد تقویتی بسیار کوچک است. در دانشگاه کلگری، روشی برای پیش‌تینده کردن میلگردهای FRP ابداع گردید [۱۸]، اگرچه این روش هنوز در صنعت اجرایی نشده است. پیش‌تینده کردن این مزیت را دارد که تغییر شکل‌ها و عرض ترک‌های موجود را کاهش می‌دهد و در نتیجه باعث افزایش خدمت‌پذیری و ماندگاری سازه می‌گردد [۱۹].

العبدی^۱ [۲۰] آزمایش خمش چهار نقطه‌ای را بر روی ۹ تیر با درصد تسلیح مختلف که با میلگردهای CFRP با اندازه‌های متفاوت به روش NSM تقویت شده بودند، انجام داد. او مشاهده کرد که مود گسیختگی نمونه‌ها عموماً جداسدگی میله‌های CFRP به همراه قسمتی از پوشش بتن بود. همچنین، تقویت نمونه‌هایی که درصد میلگردهای کششی پایین‌تری داشتند تأثیر بیش‌تری نسبت به نمونه‌های تقویت شده با درصد میلگرد کششی بالاتر دارد.

اخیراً گروه جدیدی از آلیاژها با نام آلیاژهای هوشمند حافظه‌دار^۲ در پژوهش‌های سازه‌ای مورد استفاده قرار گرفته‌اند. SMAها گروهی از آلیاژهای فلزی هستند که قادر به بازیابی شکل اصلی خود پس از تغییر شکل می‌باشند و این توانایی به علت خاصیت برگشت‌پذیری انتقال فاز^۳ بین فازهای مختلف ماده است. این انتقال فاز را می‌توان با حذف تنش (خاصیت فوق الاستیک^۴) و یا اعمال گرما (خاصیت حافظه‌شکلی^۵) ایجاد کرد. این آلیاژها دارای ویژگی‌هایی نظیر بازیابی کرنش‌های بزرگ با حداقل تغییر شکل پسماند، مقاومت در برابر خوردگی بالا، ظرفیت جذب انرژی بالا و توانایی مطلوب در برابر خستگی هستند [۱۷]. بیشتر پژوهش‌های انجام گرفته در زمینه کاربردهای SMA در مهندسی عمران، بر روی آلیاژ نیکل-تیتانیوم (Ni-Ti) که با نام تجاری NiTiNol شناخته می‌شود صورت گرفته که در دسترس‌ترین آلیاژ موجود در بازار است.

عبدالریدی و همکاران^۶ [۲۱] آزمایشی انجام دادند که در آن تیرهای بتنی در ناحیه بحرانی خمشی با میلگردهای SMA مسلح شدند و تحت بارگذاری استاتیکی، چرخه‌ای و چرخه‌ای رفت و برگشتی قرار گرفتند. در بارگذاری استاتیکی، افزایشی در مقاومت نهایی و شکل‌پذیری تیرهای مسلح شده با میلگردهای SMA نسبت به تیرهای معمولی مشاهده شد. همچنین تحت بارگذاری چرخه‌ای، شکل‌پذیری و انرژی جذب شده همانند تیرهای بتن مسلح معمولی بود.

لی و همکاران^۷ [۲۲] به صورت ترکیبی از سیم‌های SMA و فولاد متعارف برای تقویت کششی تیر بتنی استفاده کردند. آن‌ها یک پیش‌تیندگی

- 1 Al-Obaidi
- 2 Shape Memory Alloys (SMA)
- 3 Phase Transformation
- 4 Superelastic Effect
- 5 Shape Memory Effect
- 6 Abdulridha et al.
- 7 Li et al.

$$A_{s \min} = \max \left\{ \frac{0.25 \sqrt{f'_c}}{f_y} \times b \times d, \frac{1.4}{f_y} \times b \times d \right\} \quad (5)$$

به منظور دستیابی به اهداف مورد نظر در طرح، تعداد ۱۱ تیر بتن مسلح در ابعاد مقطع 150×200 میلی‌متر و طول ۱۱۵۰ میلی‌متر، به صورت دو سر ساده و تحت بار خمشی سه نقطه‌ای مورد آزمایش قرار گرفت. لازم به ذکر است بر اساس سوابق علمی موجود در مسئله‌ی تقویت تیرهای بتن مسلح با مصالح FRP، بیشتر تحقیقات انجام شده بر روی نمونه‌های با مقیاس کوچک انجام شده است. در یک آمار ارائه شده، از بین ۶۴ نمونه‌ی جمع‌آوری شده از ده مطالعه‌ی مختلف، بیش از نصف نمونه‌ها، طولی کمتر از ۲ متر داشتند و متوسط طول تیرهای مشاهده شده، حدود $2/19$ متر ذکر شده است [۹]. در این تحقیق به دلیل خیلی گران بودن میلگردهای SMA، نمونه‌های با مقیاس کوچک مورد استفاده قرار گرفتند. در همه نمونه‌های آزمایشی، از دو عدد میلگرد $\phi 12$ به عنوان میلگرد کششی، دو عدد میلگرد $\phi 10$ به عنوان میلگرد فشاری و از تنگ بسته $\phi 8$ به عنوان میلگرد برشی استفاده گردید. برای تقویت نمونه‌ها با استفاده از روش NSM، از میلگردهای SMA و GFRP به قطر ۸ میلی‌متر استفاده شد. میلگردهای SMA استفاده شده در این پژوهش از نوع NiTiNol با خاصیت فوق الاستیک و با ترکیب شیمیایی ۵۶ درصد نیکل و ۴۴ درصد تیتانیوم بودند. پر کردن شیارهای حاوی میلگردهای تقویتی با استفاده از چسب و با نام تجاری QUANTOM EPR 3301 انجام گرفت. مشخصات مکانیکی میلگردهای مصرفی شامل تنش تسلیم، تنش نهایی، کرنش تسلیم، کرنش گسیختگی و مدول الاستیسیته در جدول ۱ آورده شده است.

بر روی میلگرد SMA، آزمایش بارگذاری-باربرداری در آزمایشگاه انجام گرفت تا میزان بازگشت‌پذیری این میلگردها به حالت اولیه پس از باربرداری (خاصیت فوق الاستیک) مشخص شود که نتیجه این آزمایش در شکل ۱ گزارش شده است. همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، میلگرد SMA قادر است بیش از ۸۰٪ از تغییر شکل اعمال شده را طی یک دوره بارگذاری-باربرداری بازگردانی‌پذیری کند. همچنین در شکل ۱ نمودار تنش-کرنش میلگردهای مصرف شده در نمونه‌های بتنی تحت آزمایش کشش ارائه شده است.

۲-۲- نمونه‌های آزمایشگاهی

به منظور دستیابی به اهداف پژوهش، ۱۱ تیر بتن مسلح با طول ۱۱۵۰ میلی‌متر و ابعاد مقطع 150×200 میلی‌متر مربع ساخته شدند و به صورت خمشی سه نقطه‌ای در وسط دهانه تحت بارگذاری قرار گرفتند. فاصله بین تکیه‌گاه‌ها ۹۰۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد. در شکل ۲، ابعاد تیرها، جزئیات بارگذاری و نیز آرایش میلگردگذاری تیر نشان داده شده است.

۲- طراحی و ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی

۲-۱- مشخصات مصالح

بتن با مقاومت معمولی ۴۰ مگاپاسکال در ساخت نمونه‌ها به کار گرفته شد. برای رسیدن به مقاومت فشاری مذکور، مقدار ریزدانه‌ی مصرفی ۹۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب، درشت دانه‌ی مصرفی ۸۲۱ کیلوگرم بر متر مکعب، سیمان ۳۷۸ کیلوگرم بر متر مکعب، آب ۱۵۵ کیلوگرم بر متر مکعب و فوق روان کننده ۲ کیلوگرم بر متر مکعب انتخاب گردید. برای تعیین مقاومت فشاری هر یک از نمونه‌های تیری، ۶ نمونه‌ی استوانه‌ای استاندارد به ابعاد 150×300 میلی‌متر مربع ساخته و در شرایط مشابه نمونه‌های تیری عمل‌آوری شدند. ۲ نمونه‌ی استوانه‌ای در سن ۲۸ روز آزمایش گردیدند و سایر نمونه‌ها به عنوان نمونه شاهد در زمان بارگذاری نهایی نمونه‌های تیری شکسته شدند.

در این تحقیق به منظور بررسی رفتار تیرهای بتن مسلح تقویت شده با روش NSM-SMA/FRP از نسبت میلگرد طولی $\rho_b = 0.3$ استفاده شده است، که ρ_b درصد فولاد کششی مقطع در حالت متوازن می‌باشد. مقدار ρ_b بر اساس ACI 318-14 [۲۷] از رابطه‌ی (۱) به شرح زیر حاصل می‌شود.

$$\rho_b = 0.85 \beta_1 \times \frac{f'_c}{f_y} \times \frac{600}{600 + f_y} \quad (1)$$

که در آن پارامتر β_1 برای f'_c بین ۱۷ و ۲۸ مگاپاسکال برابر 0.185 در نظر گرفته می‌شود. برای f'_c بالاتر از ۲۸ مگاپاسکال، برای هر ۷ مگاپاسکال افزایش، ضریب β_1 باید به صورت خطی و با آهنگ 0.05 کاهش داده شود، اما این ضریب نباید کمتر از 0.65 در نظر گرفته شود. برای مقادیر $f'_c = 40$ مگاپاسکال و $f_y = 450$ مگاپاسکال و $\beta_1 = 0.17786$ ، مقدار $\rho_b = 0.13326$ به دست می‌آید. همچنین مطابق آیین‌نامه‌ی ACI 318-14، برای میلگردهای کششی در یک لایه، مقدار $\rho_{max} = 0.1252$ از رابطه‌ی (۲) محاسبه می‌شود.

$$\rho_{max} = 0.364 \times \beta_1 \times \frac{f'_c}{f_y} \quad (2)$$

با توجه به روابط فوق نسبت میلگرد طولی برابر است با:

$$\rho = 0.3 \rho_b = 0.4 \rho_{max} = 0.0168 \quad (3)$$

و بنابراین:

$$A_s = \rho b d = 0.0101 \times 150 \times 160 = 242 \text{ mm}^2 \quad (4)$$

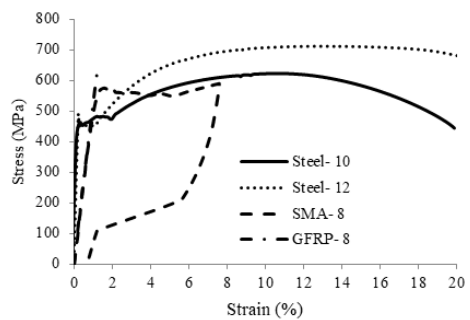
در روابط فوق، b عرض مقطع تیر و d عمق مؤثر میلگردهای کششی می‌باشد. در این پژوهش از آرایش میلگرد $(A_s = 226 \text{ mm}^2)$ استفاده شد. در این حالت مقدار نسبت میلگرد طولی $\rho = 0.1097$ می‌باشد. همچنین مقدار $A_{s \min}$ از رابطه‌ی (۵) به دست می‌آید.

جدول ۱. مشخصات میلگردهای مصرفی

Table 1. Reinforcements properties

نوع میلگرد	قطر (mm)	تنش تسلیم (MPa)	تنش نهایی (MPa)	ازدیاد طول در تنش تسلیم (%)	ازدیاد طول در تنش شکست (%)	مدول الاستیسیته (MPa)
مشخصات میلگردهای آجدار فولادی تحت آزمایش کشش	۱۰	۴۶۲	۶۲۲	۰/۲۴	۱۹/۹	۱۹۰۰۰۰
مشخصات میلگردهای FRP تحت آزمایش کشش	۱۲	۴۵۳	۷۱۱	۰/۲۲	۲۵/۴	۲۰۹۰۰۰
مشخصات میلگردهای SMA تحت آزمایش کشش	۸	-----	۶۱۵	-----	۱/۱۷	۵۰۷۲۰
مشخصات میلگردهای SMA تحت آزمایش بارگذاری- باربرداری	۸	۵۴۸	۶۵۰	۱/۰۵	۱۱/۵	۵۲۱۹۰

شیار به طول ۱۰۲۰ میلی‌متر، عرض ۱۵ میلی‌متر و عمق ۱۵ میلی‌متر بر روی وجه کششی آن‌ها ایجاد گردید. اندازه شیار طوری انتخاب شد که فضای کافی برای نفوذ چسب به اطراف مقاوم کننده وجود داشته باشد. سپس با استفاده از جت هوا و جت آب درون شیار از هر گونه گرد و غبار پاک گردید. پس از آن شیارها تا نیمه از چسب اپوکسی پر گردیدند و مصالح مقاوم کننده (میلگردهای FRP و SMA) مطابق شکل ۳ درون شیار قرار گرفتند و به منظور اطمینان از نفوذ چسب به تمامی فضاهای اطراف آن، به آرامی فشار داده شدند. در انتها شیار با چسب اضافه پر شد و سطح تراز گردید (شکل ۴). جزئیات نمونه‌های آزمایشگاهی در جدول ۲ آورده شده است.



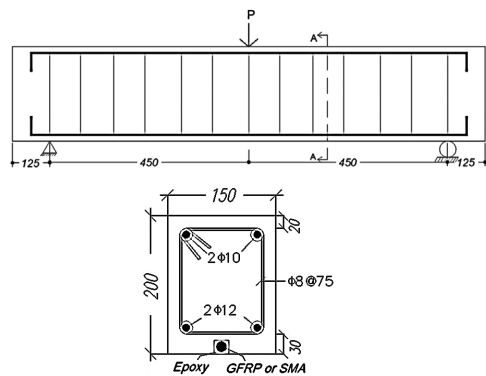
شکل ۱. نمودار تنش- کرنش میلگردهای مصرفی

Fig. 1. Stress-strain curve of reinforcements



شکل ۳. قرار گرفتن مصالح مقاوم کننده درون شیار

Fig. 3. Putting external reinforcement into the groove



شکل ۲. ابعاد هندسی تیرها، آرایش میلگردهای طولی و عرضی نمونه‌ها (ابعاد بر حسب میلی‌متر)

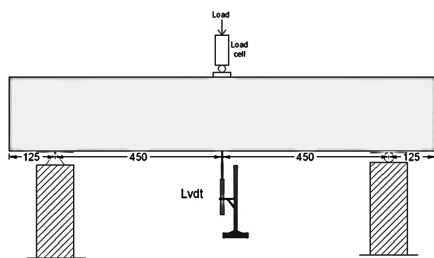
Fig. 2. Cross sectional dimensions of beam specimens, longitudinal and transverse reinforcement arrangement (all dimensions are in mm)



شکل ۴. پر کردن شیار با رزین

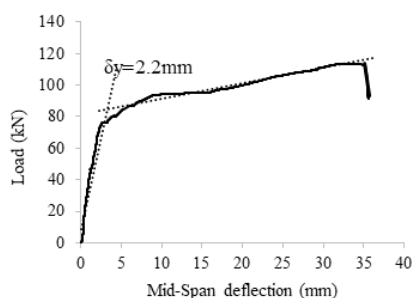
Fig. 4. Filling the groove with epoxy resin

از میان نمونه‌ها، ۸ نمونه به روش NSM تقویت شدند. برای تقویت خمشی با این روش، پس از عمل‌آوری نمونه‌ها، به وسیله تیغه الماسه یک



شکل ۵. پیکربندی آزمایش

Fig. 5. Loading set-up



شکل ۶. نمودار بار-تغییر مکان نمونه‌ی کنترل

Fig. 6. Load versus deflection curve of specimen BCM1

۴- نتایج آزمایش

۴-۱- پاسخ نمودار بار-تغییر مکان وسط دهانه

برای ارزیابی مقاومت تیرهای بتن مسلح که با روش‌های مختلف تقویت شده بودند، هر یک از این تیرها تحت بارگذاری استاتیکی قرار گرفتند و تغییرات بار-تغییر مکان آن‌ها تا لحظه گسیختگی ثبت گردید. شکل‌های ۷، ۸ و ۹ به ترتیب وضعیت تیرهای BCM1، BFM1 و BSM1 پس از رسیدن به حد نهایی مقاومت و پایان بارگذاری را نشان می‌دهند. اولین ترک برای تیر BCM1 در بار ۲۵ کیلونیوتن، تیر BFM1 در بار ۱۸ کیلونیوتن و تیر BSM1 در بار ۲۰ کیلونیوتن پدیدار گشت.



شکل ۷. وضعیت نمونه‌ی BCM1 پس از پایان بارگذاری

Fig. 7. Crack propagation in specimen BCM1

جدول ۲. جزئیات نمونه‌های آزمایشگاهی

Table 2. Details of beam specimens

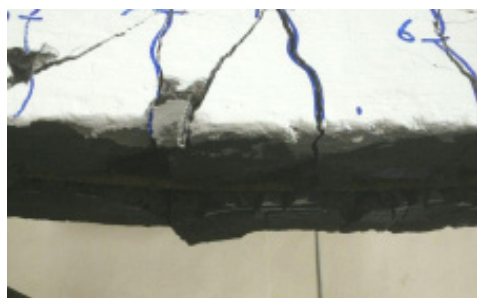
نام نمونه	نوع تقویت	نوع بارگذاری
BCM1	بدون تقویت	استاتیکی
BCC1		
BCC2	بدون تقویت	بارگذاری-باربرداری
BFM1	NSM FRP	استاتیکی
BFM2		
BFC1	NSM FRP	بارگذاری-باربرداری
BFC2		
BSM1	NSM SMA	استاتیکی
BSM2		
BSC1	NSM SMA	بارگذاری-باربرداری
BSC2		

نمونه‌ها به صورت کلی BXYZ نام‌گذاری شدند که X، Y و Z به ترتیب معرف نوع نمونه (تیر بتن مسلح)، نوع تقویت، نوع بارگذاری و شماره نمونه می‌باشند. در تمامی نمونه‌ها مقادیر ρ/ρ_b ، ρ ، ρ_{min} و ρ_{max} به ترتیب ۰/۲۹۰۳، ۰/۰۰۹۷، ۰/۰۰۳۵ و ۰/۰۲۵۰ می‌باشد.

۳- دستگاه و روند آزمایش استاتیکی و بارگذاری-باربرداری

برای تعیین ظرفیت باربری نمونه‌ها از دستگاه چک فشاری ۲۰۰ تنی استفاده شد. هم‌زمان با اعمال و قرائت بار وارده، مقدار تغییر مکان در وسط دهانه توسط دو LVDT مکانیکی اندازه‌گیری گردید. پیکربندی آزمایش و محل قرارگیری LVDTها در شکل ۵ نمایش داده شده است. ویژگی‌های باربری شامل ظرفیت باربری در لحظه ترک‌خوردگی، حداکثر ظرفیت باربری نهایی و تغییر مکان‌های وسط دهانه متناظر با این نیروها اندازه‌گیری و توسط کامپیوتر ثبت شد. در نمونه‌هایی که بارگذاری-باربرداری روی آن‌ها اعمال گردید، چرخه‌های بارگذاری بر اساس کنترل تغییر مکان تنظیم شده‌اند. مقدار هر گام در بارگذاری-باربرداری برابر با δ_y بود، به صورتی که بارگذاری به صورت δ_y ، $2\delta_y$ ، $3\delta_y$ ، $4\delta_y$ ، $5\delta_y$ و $6\delta_y$ ادامه یافت. مقدار از نمودار نیرو-تغییر مکان نمونه‌ی کنترل که به صورت استاتیکی بارگذاری شده بود، مطابق شکل ۶ به دست آمد.

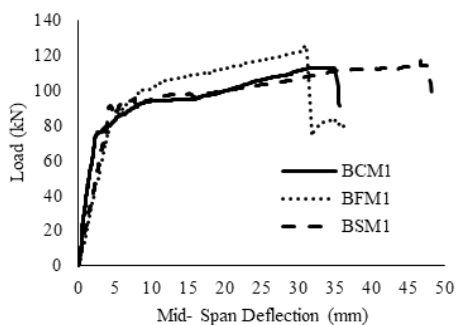
1 Linear Variable Displacement Transducer



شکل ۱۰. وضعیت وجه کششی نمونه‌ی BFM1 پس از شکست
Fig. 10. Tensile face of specimen BFM1 after failure



شکل ۱۱. وضعیت وجه کششی نمونه‌ی BSM1 پس از شکست
Fig. 11. Tensile face of specimen BSM1 after failure



شکل ۱۲. نمودار بار-تغییر مکان وسط دهانه نمونه‌های BCM1، BSM1 و BFM1

Fig. 12. Load versus deflection curves of specimens BCM1, BFM1 and BSM1

وضعیت نمونه‌های BFM2 و BSM2 پس از پایان بارگذاری استاتیکی، در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ آورده شده است. با شروع بارگذاری، اولین ترک در نمونه‌ی BFM2 در ناحیه میانی و در بار ۱۸ کیلونیوتن ظاهر شد. با ادامه روند بارگذاری، ترک‌ها از قسمت میانی به سمت تکیه‌گاه‌ها شروع به پدیدار شدن کردند و همانند تیر BFM1، رسیدن به ظرفیت باربری نهایی همراه با



شکل ۸. وضعیت نمونه‌ی BFM1 پس از پایان بارگذاری
Fig. 8. Crack propagation in specimen BFM1



شکل ۹. وضعیت نمونه‌ی BSM1 پس از پایان بارگذاری
Fig. 9. Crack propagation in specimen BSM1

نمونه‌ی کنترل (BCM1) در بار ۱۱۳ کیلونیوتن، به دلیل خرد شدن بتن در ناحیه بحرانی فشاری به حد نهایی مقاومت خود رسید و پس از آن بار به میزان قابل توجهی کاهش پیدا کرد. در این میزان بار، تغییر مکان وسط دهانه برابر با ۳۵ میلی‌متر بود. گسیختگی تیر BFM1 با جدا شدن نسبی میلگرد GFRP، به دلیل شکست در چسب همراه بود. وضعیت وجه کششی نمونه‌ی BFM1 پس از شکست نمونه، در شکل ۱۰ نمایش داده شده است. همان‌گونه که در شکل پیداست، میلگرد FRP آسیبی ندیده است و رسیدن تیر به بیشینه ظرفیت باربری خود با شکست چسب همراه بوده است. این نمونه مقاومت نهایی ۱۲۶ کیلونیوتن را در تغییر مکان وسط دهانه ۳۱ میلی‌متر تجربه کرد. ظرفیت باربری نمونه‌ی BSM1 برابر با ۱۱۷ کیلونیوتن بود که در تغییر مکان وسط دهانه ۴۷ میلی‌متر رخ داد. شکست تیر BSM1 همراه با از بین رفتن پیوستگی میان میلگرد کامپوزیتی SMA با سطح کششی بتن بود. وضعیت وجه کششی نمونه‌ی BSM1 پس از رسیدن به بیشینه ظرفیت باربری، در شکل ۱۱ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، ترک‌های بزرگ در چسب باعث از بین رفتن پیوستگی میان میلگرد SMA و تیر شده و به شکست نمونه منجر شده است. نمودار بار-تغییر مکان نمونه‌های BCM1، BFM1 و BSM1 در شکل ۱۲ به نمایش درآمده‌اند.

همان‌گونه که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود، تیر تقویت شده با میلگرد SMA (BSM1)، سختی الاستیک مشابهی با نمونه‌ی BFM1 تا بار حدود ۸۵ کیلونیوتن داشت. اما در بارهای بیشتر، به علت تسلیم شدن میلگرد SMA (انتقال فاز)، یک رفتار نرم در نمودار نمونه‌ی BSM1 مشاهده گردید. سختی این نمونه پس از نقطه‌ی تسلیم، تقریباً مشابه نمونه‌ی کنترل بود، با این تفاوت که تیر BSM1 تا قبل از رسیدن به ظرفیت نهایی باربری، تغییر مکانی حدود ۵۰ میلی‌متر را تجربه نمود.

همان‌طور که در شکل ۱۵ مشاهده می‌شود، سختی الاستیک نمونه‌ی BSM2 تا بار ۷۸ kN مشابه با سختی نمونه‌ی BFM2 بود. اما در سطح بارگذاری بالاتر، به دلیل تسلیم شدن میله SMA، نمونه BSM2 رفتاری نرم همراه با شکل‌پذیری بالا داشت. رفتار این نمونه پس از نقطه تسلیم نیز تقریباً مشابه رفتار نمونه‌ی کنترل بود، اما قبل از رسیدن به ظرفیت باربری نهایی، تغییر شکل بیشتری را تجربه نمود. نتایج به دست آمده از نمودارهای بار-تغییر مکان وسط دهانه نمونه‌های آزمایش شده تحت بارگذاری استاتیکی نشان داد که در زمان رسیدن به ظرفیت باربری نهایی، نمونه‌های تقویت شده با میلگردهای SMA، به طور میانگین ۳۹٪ نسبت به نمونه‌ی بدون تقویت و ۶۲٪ نسبت به نمونه‌های تقویت شده با مصالح FRP تغییر شکل بیشتری را تجربه نمودند. این رفتار نرم را می‌توان به ماهیت شکل‌پذیر میلگردهای فوق الاستیک SMA نسبت داد.

۴-۲- روابط پیشنهاد شده توسط ACI440.2R-17 برای محاسبه‌ی ظرفیت باربری:

آیین‌نامه ACI440.2R-17 [۲۸] روابط مورد استفاده برای تسلیح خارجی تیرهای بتن مسلح با میلگردهای FRP را در مکانیزم‌های گسیختگی با در نظر گرفتن فرضیه‌های مناسب تعیین می‌کند. روند محاسبه‌ی مقاومت خمشی نهایی باید سازگاری کرنش‌ها و تعادل نیروها را با در نظر گرفتن مود گسیختگی غالب تأمین کند. ظرفیت خمشی تیر تقویت شده می‌تواند بر اساس مود گسیختگی به شرح زیر تعیین شود:

در حالت اول نمونه‌ها بر اساس خرد شدن بتن در ناحیه فشاری بعد از تسلیم میلگردهای کششی گسیخته می‌شوند. در این حالت اگرچه ماکزیمم کرنش فشاری در بتن $\epsilon_{cu} = 0.003$ است، هنوز تنش در مصالح FRP به تنش گسیختگی نمی‌رسد. در این حالت عمق تار خنثی با استفاده از تعادل نیروهای داخلی از رابطه‌ی (۶) محاسبه می‌شود و مقاومت خمشی اسمی با استفاده از رابطه‌ی (۷) به دست می‌آید:

$$c = \frac{A_s f_y + A_f f_f}{0.85 f'_c \beta_1 b} \quad (6)$$

$$M_n = A_s f_y \left(d - \frac{\beta_1 c}{2} \right) + \psi_f A_f f_f \left(d_f - \frac{\beta_1 c}{2} \right) \quad (7)$$

در حالت دوم اگر مود گسیختگی، گسیختگی مصالح FRP بعد از تسلیم میلگردهای کششی باشد، کرنش نهایی فشاری در بتن به مقدار نهایی خود ϵ_{cu} نرسیده است. در این حالت با استفاده از بلوک معادل تنش و نوشتن تعادل نیروها در مقطع، عمق تار خنثی با سعی و خطا از رابطه‌ی (۸) محاسبه می‌شود و در نهایت مقاومت خمشی اسمی تیر از رابطه‌ی (۹) به دست می‌آید:

$$c = \frac{A_s f_s + A_f f_{fe}}{a_1 f'_c a_1 b} \quad (8)$$

جدا شدن نسبی میلگرد کامپوزیتی FRP از وجه کششی تیر بود. بیشینه بار قرائت شده برای این نمونه ۱۲۲ کیلو نیوتن و تغییر مکان وسط دهانه در این بار ۲۹ میلی‌متر بود. در تیر BSM2، اولین ترک در بار ۲۲ کیلو نیوتن نمایان شد که شکست این نمونه به علت خرد شدن بتن ناحیه بحرانی و نیز از بین رفتن پیوستگی میان میلگرد SMA با وجه کششی تیر رخ داد. بیشینه بار قرائت شده برای این نمونه ۱۱۳ کیلو نیوتن و تغییر مکان وسط دهانه در این بار ۵۰ میلی‌متر بود. در شکل ۱۵ نمودار بار-تغییر مکان وسط دهانه برای تیرهای BSM2، BCM1 و BFM2 نشان داده شده است.



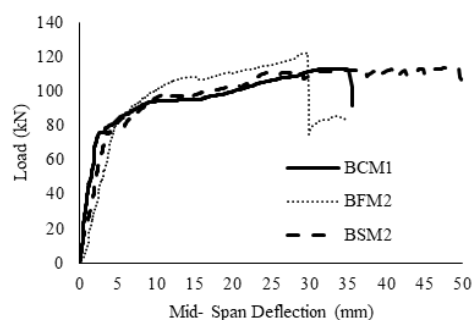
شکل ۱۳. وضعیت نمونه‌ی BFM2 پس از پایان بارگذاری

Fig. 13. Crack propagation in specimen BFM2



شکل ۱۴. وضعیت نمونه‌ی BSM2 پس از پایان بارگذاری

Fig. 14. Crack propagation in specimen BSM2



شکل ۱۵. نمودار بار-تغییر مکان وسط دهانه نمونه‌های BCM1، BSM2 و BFM2

Fig. 15. Load versus deflection curves of specimens BCM1, BFM2 and BSM2

نشانه‌ای برای مقایسه میزان جذب انرژی و شکل پذیری نمونه‌ها استفاده شود [۳۰]. خلاصه نتایج به دست آمده از نمودار بار-تغییر مکان نمونه‌های آزمایش شده تحت بار استاتیکی که شامل ظرفیت باربری نهایی، بیشینه تغییر مکان وسط دهانه، سطح زیر منحنی بار-تغییر مکان تا لحظه ظرفیت باربری نهایی و ظرفیت باربری بر اساس روابط آیین‌نامه‌ی ACI 440.2R-17 در جدول ۳ ارائه شده است.

همان‌گونه که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، تقویت تیر با روش NSM-SMA تأثیر چندانی در افزایش ظرفیت باربری تیر نداشت (تیرهای BSM1 و BSM2 به طور میانگین حدود ۲٪ افزایش ظرفیت باربری نسبت به تیر BCM1 نشان دادند)، اما جذب انرژی در تیرهای تقویت شده با این روش افزایش قابل توجهی داشت. تیرهای تقویت شده با مصالح SMA تا نقطه گسیختگی، به طور میانگین ۵۷٪ نسبت به تیر بدون تقویت خارجی و ۵۹٪ نسبت به تیرهای تقویت شده با روش NSM-FRP انرژی بیشتری جذب کردند. با توجه به شکل‌های ۱۲ و ۱۵ و نیز جدول ۳، می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از روش NSM-SMA برای تقویت خمشی تیرهای بتن مسلح موجب می‌شود که این تیرها طی بارگذاری استاتیکی، شکستی نرم همراه با جذب انرژی بالا داشته باشند. همچنین تقویت تیرها با مصالح FRP موجب افزایش ۱۰ درصدی در ظرفیت باربری نهایی و کاهش ۱۴ درصدی در بیشینه تغییر مکان گردید. این نتایج با نتایج به دست آمده از پژوهش سولیمان و همکاران [۳۱] مطابقت داشت. سولیمان و همکاران [۳۱] گزارش کردند که در تیرهای بتن مسلح با نسبت میلگرد کششی بیش از ۰/۸ درصد ($\rho_{steel} = \frac{A_s}{bd} \geq 0.8\%$)، افزایش مقاومت و کاهش تغییر مکان نمونه‌های تقویت شده با روش NSM-FRP مقدار قابل توجهی نیست. مقادیر نسبت‌های بار نهایی آزمایشگاهی به بار به دست آمده از روابط ACI440 در نمونه‌های آزمایشگاهی این پژوهش که شامل تیرهای با ابعاد کوچک می‌باشد، نسبتاً زیاد است. این وضعیت در پژوهش‌های گذشته [۲۹] نیز مشاهده شده است.

$$M_n = A_s f_s \left(d - \frac{\beta_1 c}{2}\right) + \psi_f A_f f_{fe} \left(d_f - \frac{\beta_1 c}{2}\right) \quad (9)$$

در روابط ۶ تا ۹، b عرض مقطع تیر، d_f عمق مؤثر میلگردهای کششی، عمق مؤثر میلگردهای FRP، f_{fe} تنش در مصالح FRP، f_s تنش در فولادهای کششی، f_{fe} تنش مؤثر در مصالح FRP، A_s سطح مقطع میلگردهای کششی و A_f سطح مقطع میلگردهای FRP است. همچنین ψ_f فاکتور کاهش خمش ایجاد شده توسط مصالح FRP است و برابر ۰/۸۵ در نظر گرفته می‌شود. نکته مهم در مود گسیختگی حالت دوم این است که چون بتن در فشار به کرنش نهایی خود نرسیده است، استفاده از بلوک مستطیلی تنش ویتنی صحیح نمی‌باشد. رابطه‌ی غیرخطی تنش-کرنش بتن تبدیل به یک بلوک تنش مستطیلی معادل با استفاده از دو پارامتر وابسته β_1 و α_1 می‌شود. جایی که ارتفاع و عمق معادل بلوک مستطیلی تنش برای این مدل به ترتیب $\beta_1 c$ و $\alpha_1 f'_c$ است. پارامترهای بلوک معادل تنش در معادلات (۱۰) و (۱۱) آورده شده است:

$$\beta_1 = \frac{4\epsilon'_c - \epsilon_c}{6\epsilon'_c - 2\epsilon_c} \quad (10)$$

$$\alpha_1 = \frac{3\epsilon'_c \epsilon_c - \epsilon_c^2}{3\beta_1 \epsilon_c'^2} \quad (11)$$

که در آن $\epsilon'_c = 1.7f'_c / E_c$ و $\epsilon_c = \text{ماکزیمم کرنش فشاری بتن است } (f'_c)$
 $(\sqrt{4700} = E_c)$

شکل‌پذیری یک سیستم سازه‌ای، اجزا و مواد تشکیل دهنده آن همواره اهمیت ویژه‌ای در طراحی سازه‌ها دارد. شکل‌پذیری یک عضو به عنوان توانایی آن برای تحمل تغییر شکل غیر الاستیک قبل از گسیختگی، بدون از دست دادن قابل توجه مقاومت می‌باشد. سطح زیر منحنی بار-تغییر مکان تا نقطه حداکثر ظرفیت باربری نمونه‌ها ممکن است به عنوان معیار اولیه و

جدول ۳. خلاصه نتایج تست شده تحت بارگذاری استاتیکی

Table 3. Summary of experimental results under static loading

نام نمونه	تغییر مکان بیشینه در وسط تیر (mm)	ظرفیت باربری نهایی آزمایشگاهی (kN)	بار به دست آمده بر اساس آیین‌نامه ACI440 (kN)	نسبت بار نهایی آزمایشگاهی به بار به دست آمده از روابط ACI440	سطح زیر منحنی بار-تغییر مکان (mm.kN)
BCM1	۳۵	۱۱۳	۶۸	۱/۶۶	۳۰۳۵
BFM1	۳۱	۱۲۶	۷۷	۱/۶۴	۳۱۰۸
BFM2	۲۹	۱۲۲	۷۷	۱/۵۸	۲۸۵۸
BSM1	۴۷	۱۱۷	۹۸	۱/۱۹	۴۵۹۹
BSM2	۵۰	۱۱۳	۹۸	۱/۱۵	۴۹۳۲

۴-۳- قابلیت بستن ترک

به منظور ارزیابی توانایی تیرهای تقویت شده در بستن ترک‌های ایجاد شده تحت چرخه‌های متوالی بارگذاری-باربرداری، ۶ نمونه تحت بارگذاری-باربرداری قرار گرفتند و بیشینه عرض ترک پس از پایان هر بارگذاری و باربرداری توسط یک شابلون با دقت اندازه-گیری ۰/۰۵ میلی‌متر ثبت شد. با شروع بارگذاری، ترک‌های ابتدایی در قسمت خمشی تیر شروع به پدیدار شدن کردند و با ادامه روند بارگذاری-باربرداری، ترک‌های مایل نیز در قسمت‌های دیگر نمونه‌ها ظاهر شدند. در تمامی نمونه‌ها، ترک‌های با بیشترین عرض، در ناحیه بحرانی خمشی تیرها به وجود آمدند.

وضعیت انتشار ترک در نمونه‌های BCC1، BFC1 و BSC1 پس از پایان بارگذاری-باربرداری، به ترتیب در شکل‌های ۱۶، ۱۷ و ۱۸ به نمایش درآمده است. همچنین مقادیر قرائت شده بیشینه عرض ترک پس از پایان هر دوره بارگذاری-باربرداری برای این نمونه‌ها، در جدول ۴ آورده شده است.



شکل ۱۷. وضعیت انتشار ترک در نمونه‌ی BFC1 پس از پایان بارگذاری-باربرداری

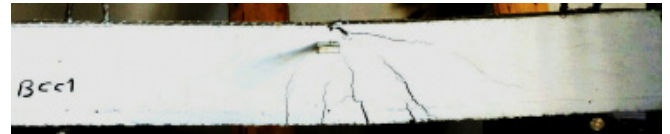
Fig. 17. Crack propagation in specimen BFC1



شکل ۱۸. وضعیت انتشار ترک در نمونه‌ی BSC1 پس از پایان بارگذاری-باربرداری

Fig. 18. Crack propagation in specimen BSC1

از باربرداری دارد. به عنوان مثال در چرخه‌ی دوم نمونه‌ی BSC1، ۷۵٪ از عرض ترک ایجاد شده بر روی تیر بسته شد که این مقدار برای تیرهای BCC1 و BFC1 در چرخه‌ی دوم به ترتیب برابر با ۱۸٪ و ۴۰٪ بود. با ادامه روند بارگذاری-باربرداری، از قابلیت نمونه‌ی BSC1 در بستن عرض ترک‌های ایجاد شده کاسته شد. مثلاً در چرخه‌ی شماره ۵ و ۶ نمونه‌ی تقویت شده با روش NSM-SMA، به ترتیب ۳۹٪ و ۲۶٪ از بیشینه عرض ترک بسته شد. لازم به ذکر است که تفاوت در مقدار تغییر مکان تسلیم در نمونه‌های مختلف اثر قابل ملاحظه‌ای در پوش منحنی‌های بارگذاری و باربرداری ندارد.



شکل ۱۶. وضعیت انتشار ترک در نمونه‌ی BCC1 پس از پایان بارگذاری-باربرداری

Fig. 16. Crack propagation in specimen BCC1

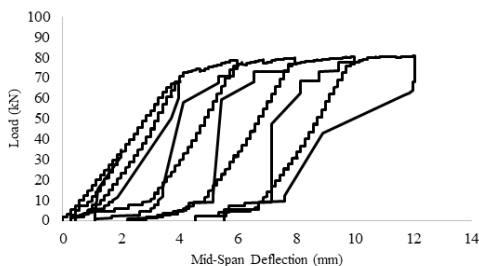
همان‌گونه که در جدول ۴ قابل مشاهده است، در یک چرخه یکسان، تیر تقویت شده با میلگرد SMA، قابلیت بالاتری در بستن عرض ترک‌ها پس

جدول ۴. بیشینه عرض ترک نمونه‌های BCC1، BFC1 و BSC1 پس از مرحله بارگذاری-باربرداری

Table 4. Maximum crack width in specimens BCC1, BFC1 and BSC1 after each loading-unloading

چرخه	BCC1		BFC1		BSC1	
	W_{cr}^* (mm)	R_{cr}^* (mm)	W_{cr} (mm)	R_{cr} (mm)	W_{cr} (mm)	R_{cr} (mm)
$1\delta_y$	۰/۱	۰/۰۵	۰/۱۵	۰/۱	۰/۱	۰
$2\delta_y$	۰/۸۵	۰/۷	۱/۴	۱	۰/۶	۰/۱۵
$3\delta_y$	۱/۵	۱/۳	۱/۵	۱/۳	۱/۳	۰/۴
$4\delta_y$	۲	۱/۶	۱/۶	۱/۳	۲/۵	۱/۶
$5\delta_y$	۲/۵	۲	۲/۵	۱/۵	۲/۸	۱/۷
$6\delta_y$	۳	۲/۶	۲/۵	۲/۲	۳/۱	۲/۳

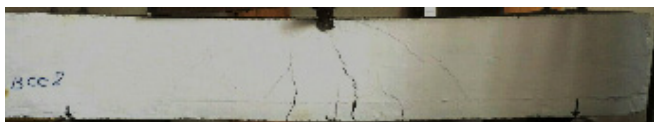
* W_{cr} و R_{cr} به ترتیب بیشینه عرض ترک و عرض ترک باقی‌مانده می‌باشند.



شکل ۲۱. نمودار بارگذاری-باربرداری نمونه‌ی BSC2

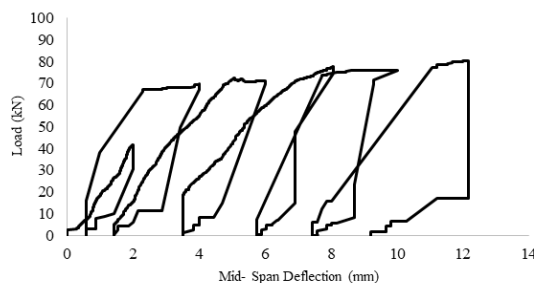
Fig. 21. Loading-unloading curve of specimen BSC2

در تیرها با توجه به اعمال بار زنده، تنها این بار است که به صورت بارگذاری و باربرداری می‌باشد. این نوع بارگذاری باعث تغییرات رشد ترک، لغزش میلگرد تقویتی و در نتیجه رفتار غیرخطی می‌شود که لازم است کنترل گردد. بنابراین با رسم پوش منحنی بار-تغییر مکان در این نوع بارگذاری و مقایسه آن با بارگذاری یکنوا می‌توان اثرات آن را بررسی و مقایسه کرد. نمودار بارگذاری-باربرداری نمونه‌های BCC2، BFC2 و BSC2 به ترتیب در شکل‌های ۱۹، ۲۰ و ۲۱ ارائه شده است. همچنین وضعیت انتشار ترک در نمونه‌های BCC2، BFC2 و BSC2 پس از پایان بارگذاری-باربرداری، به ترتیب در شکل‌های ۲۲، ۲۳ و ۲۴ نشان داده شده است. همچنین مقادیر ثبت شده بیشینه عرض ترک پس از پایان هر دوره بارگذاری-باربرداری برای این نمونه‌ها، در جدول ۵ ارائه گردیده است.



شکل ۲۲. وضعیت انتشار ترک در نمونه‌ی BCC2 پس از پایان بارگذاری-باربرداری

Fig. 22. Crack propagation in specimen BCC2



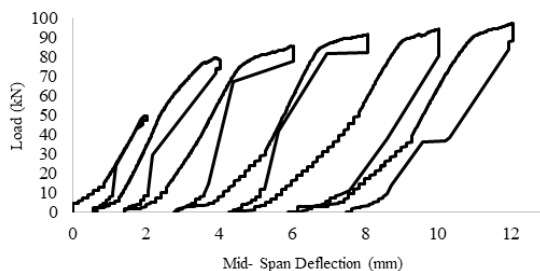
شکل ۱۹. نمودار بارگذاری-باربرداری نمونه‌ی BCC2

Fig. 19. Loading-unloading curve of specimen BCC2



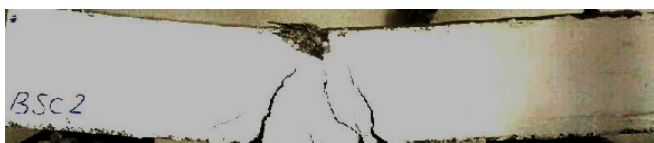
شکل ۲۳. وضعیت انتشار ترک در نمونه‌ی BFC2 پس از پایان بارگذاری-باربرداری

Fig. 23. Crack propagation in specimen BFC2



شکل ۲۰. نمودار بارگذاری-باربرداری نمونه‌ی BFC2

Fig. 20. Loading-unloading curve of specimen BFC2

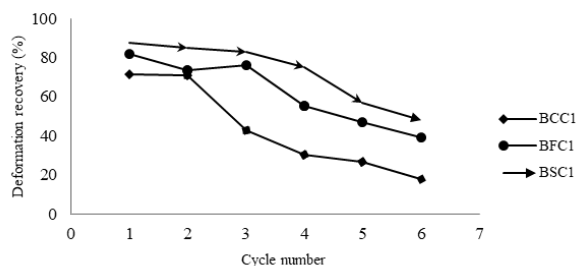


شکل ۲۴. وضعیت انتشار ترک در نمونه‌ی BSC2 پس از پایان بارگذاری-باربرداری

Fig. 24. Crack propagation in specimen BSC2

پس از باربرداری در چرخه‌ی شماره ۳ برای نمونه‌های BSC2، BFC2 و BCC2 به ترتیب برابر با ۰.۶۷٪، ۰.۳۱٪ و ۰.۱۳٪ از عرض بیشینه ترک ایجاد شده طی بارگذاری بود. در چرخه‌های بالاتر بارگذاری-باربرداری، توانایی نمونه‌ی BSC2 همانند نمونه‌ی BSC1 در بستن عرض ترک‌ها کاهش یافت. به عنوان مثال، در چرخه‌ی شماره ۶ تنها ۰.۲۴٪ از عرض ترک بیشینه

با توجه به جدول ۵، نمونه‌ی BSC2 نیز توانایی بیشتری در بستن عرض ترک‌های ناشی از بارگذاری-باربرداری، نسبت به سایر نمونه‌ها از خود نشان داد. مثلاً در چرخه‌ی شماره ۲، ۰.۷۸٪ از بیشینه عرض ترک در تیر BSC2 بسته شد، در حالی که این مقدار برای نمونه‌ی BCC2 برابر با ۰.۲۱٪ و برای نمونه‌ی BFC2 برابر با ۰.۳۸٪ بود. میزان بسته شدن ترک



شکل ۲۵. نمودار مقایسه‌ای قابلیت بازیابی تغییر شکل تیرهای BCC1، BFC1 و BSC1

Fig. 25. Comparative graph for deformation recovery ability of specimens BCC1, BFC1 and BSC1

همان‌گونه که در شکل ۲۵ مشاهده می‌شود نمونه‌ی تقویت شده با روش NSM-SMA توانایی بالاتری در بازیابی تغییر شکل‌های ایجاد شده طی چرخه‌های بارگذاری-باربرداری از خود نشان می‌دهد. به عنوان مثال در چرخه‌ی شماره ۲ نمونه‌ی BSC1، ۸۶٪ از تغییر مکان وسط دهانه بازیابی گردید. این مقدار برای نمونه‌ی BFC1 برابر با ۷۴٪ و برای نمونه‌ی BCC1 برابر با ۷۱٪ بود. همچنین در چرخه‌ی چهارم، میزان تغییر شکل برای تیرهای BCC1، BFC1 و BSC1 به ترتیب برابر با ۵۵، ۷۵ و ۳۰ درصد به دست آمد.

نمودار مقایسه‌ای قابلیت بازیابی تغییر مکان وسط دهانه در هر چرخه برای نمونه‌های BCC2، BFC2 و BSC2 در شکل ۲۶ نشان داده شده است.

بسته شد. این‌گونه به نظر می‌آید که افزایش بارهای وارده، موجب ایجاد ترک‌های بزرگ در ماده مورد استفاده برای چسباندن میلگرد به وجه کششی بتن گردید و پیوستگی میان تیر و میلگرد کامپوزیتی SMA کاهش قابل توجهی یافت.

از نتایج به دست آمده در بخش ۳-۴ می‌توان نتیجه گرفت که تقویت خمشی تیرهای بتن مسلح با روش NSM-SMA موجب کاهش خسارت بارهای با ماهیت بارگذاری-باربرداری گردید و تقویت خمشی تیرهای بتن مسلح با روش مذکور که در معرض بارگذاری-باربرداری قرار گرفتند، نتایج مطلوبی را در پی داشت. نتایج آزمایشگاهی این پژوهش نشان می‌دهد که احتمالاً لغزش‌هایی بین میلگرد SMA و چسب اتفاق افتاده که باعث اثر کاهش مثبت SMA در رفتار تیر شده است. برای ایجاد پیوستگی بهتر میان میلگرد SMA و سطح عضو، باید تمهیدات بهتری در نظر گرفته شود. بنابراین می‌توان در پژوهش‌های آینده با آچار کردن سطح میلگرد SMA احتمال لغزش بین میلگرد SMA و چسب را کاهش داد.

۴-۴- بازیابی تغییر شکل^۱

جهت سنجش توانایی روش‌های مختلف تقویت تیرهای بتن مسلح برای بازیابی تغییر شکل پسماند، نمونه‌های تقویت شده تحت ۶ چرخه‌ی بارگذاری و باربرداری قرار گرفتند. پروتکل بارگذاری-باربرداری مطابق با بخش ۳ بود. نمودار مقایسه‌ای قابلیت بازیابی تغییر مکان وسط دهانه در هر چرخه برای نمونه‌های BCC1، BFC1 و BSC2 در شکل ۲۵ نشان داده شده است.

جدول ۵. بیشینه عرض ترک نمونه‌های BCC2، BFC2 و BSC2 پس از مرحله بارگذاری و باربرداری

Table 5. Maximum crack width in specimens BCC2, BFC2 and BSC2 after each loading-unloading

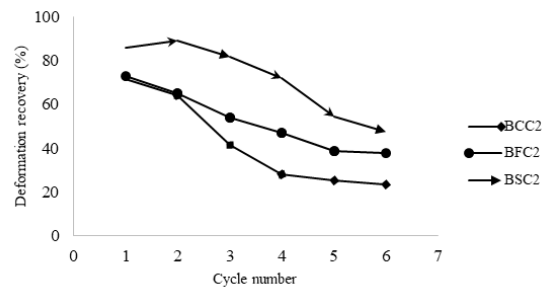
چرخه	BCC2		BFC2		BSC2	
	$W_{cr}^*(mm)$	$R_{cr}^*(mm)$	$W_{cr}(mm)$	$R_{cr}(mm)$	$W_{cr}(mm)$	$R_{cr}(mm)$
$1\delta_y$	۰/۱۵	۰/۱	۰/۱	۰/۰۵	۰/۰۵	۰
$2\delta_y$	۱/۴	۱/۱	۰/۴	۰/۲۵	۰/۴۵	۰/۱
$3\delta_y$	۱/۵	۱/۳	۰/۸	۰/۵۵	۱/۲	۰/۴
$4\delta_y$	۱/۶	۱/۳	۱/۴	۱/۱	۱/۶	۱
$5\delta_y$	۲/۵	۱/۷	۲	۱/۵	۲/۱	۱/۳
$6\delta_y$	۲/۵	۲/۲	۲/۲	۱/۷	۲/۵	۱/۹

1 Deformation recovery

۱. استفاده از روش NSM-SMA در تیرهایی که تحت بارگذاری استاتیکی قرار گرفتند، گرچه موجب افزایش قابل توجهی در بیشینه ظرفیت باربری نسبت به تیر بدون تقویت نشد، اما جذب انرژی در تیرهای تقویت شده با این روش تا نقطه گسیختگی نسبت به روش NSM-FRP و تیرهای کنترل، افزایش قابل توجهی را تجربه کرد. تیرهای تقویت شده به روش NSM-SMA به طور میانگین ۵۷٪ نسبت به نمونه‌های بدون تقویت و ۵۹٪ نسبت به نمونه‌های تقویت شده با روش NSM-FRP انرژی بیشتری جذب کردند. همچنین روش تقویت NSM-SMA موجب افزایش تغییر مکان وسط دهانه تیر تا نقطه گسیختگی گردید. خیز وسط دهانه در لحظه‌ی بیشینه ظرفیت باربری در تیرهای تقویت شده به روش NSM-SMA نسبت به نمونه‌های بدون تقویت ۳۸٪ و نسبت به نمونه‌های تقویت شده با روش NSM-FRP ۶۱٪ بیش‌تر بود. به عبارت دیگر روش تقویت NSM-SMA سبب شد تیرهای بتن مسلح، شکستی نرم همراه با جذب انرژی بالاتری داشته باشند.

۲. استفاده از میلگردهای NSM-FRP در تیرهای تحت بار استاتیکی نسبت به تیر بدون تقویت، موجب افزایش ۱۰٪ در ظرفیت باربری نهایی و کاهش ۱۴٪ در بیشینه تغییر مکان تیر شد. میزان جذب انرژی تیرهای تقویت شده با این روش تا نقطه گسیختگی، نسبت به تیرهای کنترل تفاوت چندانی نداشت. به طور کلی می‌توان گفت تیرهای تقویت شده با روش NSM-FRP تحت بار استاتیکی، اگرچه ظرفیت باربری نهایی بالاتری داشتند اما شکستی ترد و ناگهانی را تجربه نمودند.

۳. نمونه‌های تقویت شده با میلگرد SMA به طور میانگین، نسبت به نمونه‌های بدون تقویت ۳۵٪ و نسبت به نمونه‌های تقویت شده با میلگرد FRP، ۳۰٪ توانایی بالاتری در بستن ترک‌های ایجاد شده طی ۶ دوره‌ی بارگذاری و باربرداری، از خود نشان دادند. با افزایش روند بارگذاری-باربرداری، به دلیل کاهش میزان پیوستگی بین میلگرد SMA و وجه کششی تیر، از میزان این قابلیت کاسته شد. در نتیجه به منظور بهبود عملکرد رفتار تیرهای تقویت شده با روش NSM-SMA و کاهش عرض ترک تحت بارهای با ماهیت بارگذاری-باربرداری، باید تمهیداتی جهت ایجاد پیوستگی بیشتر بین میلگرد SMA و بتن اندیشیده شود. نتایج آزمایشگاهی این پژوهش نشان می‌دهد که احتمالاً لغزش‌هایی بین میلگرد SMA و چسب اتفاق افتاده که باعث کاهش اثر مثبت SMA در رفتار تیر شده است. در پژوهش‌های آینده بایستی با آچار کردن سطح میلگرد SMA احتمال لغزش بین میلگرد SMA و چسب را کاهش داد. بنابراین لازم است این مسئله در پژوهش‌های پیش‌رو مورد توجه قرار گیرد.



شکل ۲۶. نمودار مقایسه‌ای قابلیت بازیابی تغییر شکل تیرهای BCC2، BFC2 و BSC2

Fig. 26. Comparative graph for deformation recovery ability of specimens BCC2, BFC2 and BSC2

در شکل ۲۶ نیز مشاهده می‌شود که نمونه‌ی تقویت شده با روش NSM-SMA قابلیت بیشتری برای کاهش تغییر شکل پسماند، تحت بار دارد. در چرخه‌ی سوم نمونه‌ی BSM2، ۸۲٪ از تغییر مکان وسط دهانه خود را بازیابی کرده است. این مقدار برای تیر BFC2 برابر با ۵۴٪ و برای تیر BCC2 معادل ۴۲٪ بود. همچنین در چرخه‌ی شماره ۵، این مقادیر برای نمونه‌های BCC2، BSC2، BFC2 به ترتیب معادل ۵۵، ۳۸ و ۱۰ درصد بود.

با توجه به نتایج به‌دست آمده از بخش ۴-۴، تقویت خمشی تیرهای بتن مسلح با روش NSM-SMA موجب بازیابی بیشتر تغییر شکل ایجاد شده تحت دوره‌های متوالی بارگذاری-باربرداری گردید که این خاصیت را می‌توان به ماهیت فوق الاستیک میلگردهای SMA نسبت داد. همچنین می‌توان نتیجه گرفت استفاده از روش NSM-SMA در تیرهایی که تحت بارگذاری-باربرداری قرار گرفتند، موجب کاهش تغییر شکل پسماند و در نتیجه کاهش خسارت سازه‌ای گردید.

۵- نتیجه‌گیری

هدف اصلی پژوهش حاضر، بررسی تأثیر تقویت خمشی تیرهای بتن مسلح با میلگردهای کامپوزیتی SMA و به روش NSM در بهبود رفتار تیرهای بتن مسلح، تحت بارگذاری‌های استاتیکی و بارگذاری-باربرداری نسبت به سایر روش‌ها بود. به منظور دستیابی به اهداف پژوهش، ۱۱ نمونه تیر بتن مسلح ساخته شد که ۳ نمونه از آن‌ها بدون تقویت بودند (یک نمونه تحت بارگذاری استاتیکی و دو نمونه تحت بارگذاری-باربرداری)، ۴ نمونه با میلگردهای GFRP به روش NSM (دو نمونه تحت بارگذاری استاتیکی و دو نمونه تحت بارگذاری-باربرداری) و ۴ نمونه با میلگردهای فوق الاستیک SMA به روش NSM (دو نمونه تحت بارگذاری استاتیکی و دو نمونه تحت بارگذاری-باربرداری) تقویت شدند و ویژگی‌هایی مانند مقاومت، بیشینه تغییر مکان تا نقطه گسیختگی، جذب انرژی، قابلیت بستن عرض ترک و توانایی بازیابی تغییر شکل مورد ارزیابی قرار گرفتند. با توجه به بررسی‌های انجام شده، نتایج زیر حاصل شد.

مراجع

- [1] R.Y. Huang, I.S. Mao, H.K. Lee, Exploring the deterioration factors of RC bridge decks: a rough set approach, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 25(7) (2010) 517-529.
- [2] L.C. HOLLAWAY, Case studies, in: *Strengthening and Rehabilitation of Civil Infrastructures Using Fibre-Reinforced Polymer (FRP) Composites*, Elsevier, 2008, pp. 352-385.
- [3] J. Teng, J.-F. Chen, S.T. Smith, L. Lam, FRP: strengthened RC structures, *Frontiers in Physics*, (2002) 266.
- [4] R. Seracino, M. Raizal Saifulnaz, D. Oehlers, Generic debonding resistance of EB and NSM plate-to-concrete joints, *Journal of Composites for Construction*, 11(1) (2007) 62-70.
- [5] I. Liu, D. Oehlers, 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.
- [6] J. Bonacci, M. Maalej, Behavioral trends of RC beams strengthened with externally bonded FRP, *Journal of Composites for Construction*, 5(2) (2001) 102-113.
- [7] L. Bizindavyi, K. Neale, Transfer lengths and bond strengths for composites bonded to concrete, *Journal of composites for construction*, 3(4) (1999) 153-160.
- [8] J. Sabzi, M.R. Esfahani, Flexural behavior of RC beams strengthened by CFRP sheets in the beams with low and high reinforcement ratios, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 50 (5) (2018) 907-918.
- [9] J. Sabzi, M.R. Esfahani, Effects of tensile steel bars arrangement on concrete cover separation of RC beams strengthened by CFRP sheets, *Construction and Building Materials*, 162 (2018) 470-479.
- [10] F. Ceroni, M. Pecce, A. Bilotta, E. Nigro, Bond behavior of FRP NSM systems in concrete elements, *Composites Part B: Engineering*, 43(2) (2012) 99-109.
- [11] F. Oudah, R. El-Hacha, Fatigue behavior of RC beams strengthened with prestressed NSM CFRP rods, *Composite Structures*, 94(4) (2012) 1333-1342.
- [12] R. El-Hacha, S.H. Rizkalla, Near-surface-mounted fiber-reinforced polymer reinforcements for flexural strengthening of concrete structures, *Structural Journal*, 101(5) (2004) 717-726.
- [13] R. Kotynia, Bond between FRP and concrete in reinforced concrete beams strengthened with near surface mounted and externally bonded reinforcement, *Construction and Building Materials*, 32 (2012) 41-54.

۴. نمونه‌های تقویت شده با میلگرد SMA به طور میانگین، نسبت به نمونه‌های بدون تقویت ۲۸٪ و نسبت به نمونه‌های تقویت شده با میلگرد FRP ۱۴٪ توانایی بالاتری در بازیابی تغییر شکل ایجاد شده طی ۶ دوره‌ی بارگذاری و باربرداری، از خود نشان دادند. ویژگی کاهش تغییر شکل‌های پسماند، روش تقویت NSM-SMA را برای تیرهای بتن مسلحی که تحت بارهایی با ماهیت بارگذاری-باربرداری قرار می‌گیرند، روشی مطلوب جلوه می‌دهد، زیرا باعث کاهش خسارت وارد بر سازه می‌گردد.

فهرست علائم

علائم انگلیسی

- A_f سطح مقطع میلگردهای FRP
 A_s سطح مقطع میلگردهای کششی (mm^2)
 $A_{s\min}$ حداقل سطح مقطع میلگردهای کششی (mm^2)
 b عرض مقطع تیر (mm)
 c عمق تار خنثی (mm)
 d عمق مؤثر میلگردهای کششی (mm)
 d_f عمق مؤثر مصالح FRP (mm)
 E_c مدول الاستیسیته بتن (N/mm^2)
 f'_c مقاومت فشاری بتن (N/mm^2)
 f_f تنش در مصالح FRP (N/mm^2)
 f_{fe} تنش مؤثر در مصالح FRP (N/mm^2)
 f_s تنش در میلگردهای کششی (N/mm^2)
 f_y تنش تسلیم میلگردهای کششی (N/mm^2)
 M_n مقاومت خمشی اسمی تیر (N.mm)

علائم یونانی

- α_1 ضریب f'_c برای تعیین شدت توزیع تنش مستطیلی معادل برای بتن
 β_1 نسبت عمق بلوک تنش مستطیلی معادل به عمق محور خنثی
 ϵ_c ماکزیمم کرنش فشاری بتن (mm/mm)
 ϵ'_c کرنش فشاری بتن غیر محصور مربوط به f'_c (mm/mm), که می‌توان ۰/۰۰۲ در نظر گرفت.
 ρ نسبت فولاد کششی مقطع
 ρ_b نسبت فولاد کششی مقطع در حالت متوازن
 ρ_{\max} حداکثر نسبت فولاد کششی مقطع
 ρ_{\min} حداقل نسبت فولاد کششی مقطع
 ψ_f فاکتور کاهش خمش ایجاد شده توسط مصالح FRP

- [23] N. Wierschem, B. Andrawes, Superelastic SMA–FRP composite reinforcement for concrete structures, *Smart materials and structures*, 19(2) (2010) 025011.
- [24] C. Czaderski, B. Hahnebach, M. Motavalli, RC beam with variable stiffness and strength, *Construction and Building Materials*, 20(9) (2006) 824-833.
- [25] K. Moser, A. Bergamini, R. Christen, C. Czaderski, Feasibility of concrete prestressed by shape memory alloy short fibers, *Materials and Structures*, 38(5) (2005) 593-600.
- [26] O. Ozbulut, S. Hurlbaeus, Neuro-fuzzy modeling of temperature-and strain-rate-dependent behavior of NiTi shape memory alloys for seismic applications, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 21(8) (2010) 837-849.
- [27] ACI Committee 318, *Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary*, American Concrete Institute, Farmington Hills, 2014.
- [28] ACI 440.2R-17. "Guide for the Design and Construction of Externally Bonded Frp Systems for Strengthening Concrete Structures." Reported by ACI Committee 440.2017 (2017).
- [29] D. Mostofinejad, A. Moghaddas, Bond efficiency of EBR and EBROG methods in different flexural failure mechanisms of FRP strengthened RC beams, *Construction and Building Materials*, 54 (2014) 605-614.
- [30] S.M. Soliman, E. El-Salakawy, B. Benmokrane, Flexural behaviour of concrete beams strengthened with near surface mounted fibre reinforced polymer bars, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 37(10) (2010) 1371-1382.
- [14] L.D. Lorenzis, A. Nanni, Characterization of FRP rods as near-surface mounted reinforcement, *Journal of Composites for Construction*, 5(2) (2001) 114-121.
- [15] S.M. Soliman, E. El-Salakawy, B. Benmokrane, Bond performance of near-surface-mounted FRP bars, *Journal of Composites for Construction*, 15(1) (2010) 103-111.
- [16] I.A. Sharaky, L. Torres, M. Baena, I. Vilanova, Effect of different material and construction details on the bond behaviour of NSM FRP bars in concrete, *Construction and Building Materials*, 38 (2013) 890-902.
- [17] S.M. Daghash, O.E. Ozbulut, Bond–slip behavior of superelastic shape memory alloys for near-surface-mounted strengthening applications, *Smart Materials and Structures*, 26(3) (2017) 035020.
- [18] R. El-Hacha, M. Gaafar, Flexural strengthening of reinforced concrete beams using prestressed, near-surface mounted CFRP bars, *PCI journal*, 56(4) (2011).
- [19] C. Czaderski, M. Shahverdi, R. Brönnimann, C. Leinenbach, M. Motavalli, Feasibility of iron-based shape memory alloy strips for prestressed strengthening of concrete structures, *Construction and Building Materials*, 56 (2014) 94-105.
- [20] S. Al-Obaidi, Behavior of reinforced concrete beams retrofitted in flexure using CFRP-NSM technique, (2015).
- [21] A. Abdulridha, D. Palermo, S. Foo, F.J. Vecchio, Behavior and modeling of superelastic shape memory alloy reinforced concrete beams, *Engineering Structures*, 49 (2013) 893-904.
- [22] H. Li, Z.-q. Liu, J.-p. Ou, Experimental study of a simple reinforced concrete beam temporarily strengthened by SMA wires followed by permanent strengthening with CFRP plates, *Engineering Structures*, 30(3) (2008) 716-723.

Please cite this article using:

B. Farahi, M. R. Esfahani, J. Sabzi, Experimental Investigation on the Behavior of Reinforced Concrete Beams Retrofitted with NSM-SMA/FRP, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 51(4) (2019) 685-698.
DOI: 10.22060/ceej.2018.13927.5512

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

