

بررسی آزمایشگاهی تقویت برشی تیرهای بتن آرمه به روش کاشت میلگرد پیش‌تنیده در ارتفاع مقطع

رضا مرشد* (دانشیار)

احسان توسلی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

مهرداد بزرگر (دانشجوی کارشناسی ارشد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه یزد

مهندسی عمران شریف، زمستان ۱۳۹۷ (دردی ۲ - ۳۴، شماره ۲/۴، ص. ۱۱۰-۱۰۳، یادداشت نمی)

در نوشتار حاضر، استفاده از روش پیشنهادی کاشت میلگرد پیش‌تنیده در ارتفاع مقطع جهت تقویت تیرهای با کمبود آرما تور برشی به صورت آزمایشگاهی بررسی شده است. به منظور بررسی اثرپذیری روش تقویت پیشنهادی، ۱۰ نمونه تیر بتن آرمه به ابعاد $1700 \times 200 \times 200$ میلی‌متر با ضعف مقاومت برشی در یک طرف ساخته و با شرایط تقویت مختلف به صورت دهانه‌ی ساده با بار دوقطه‌یی در وسط دهانه آزمایش شدند. در کلیه تیرها قبل از تقویت با پیش بارگذاری، ترک برشی ایجاد شد. نیمی از نمونه‌ها پس از باربرداری و بقیه تحت بار ثابت تقویت شدند. براساس نتایج به دست آمده، روش کاشت میلگرد پیش‌تنیده به طور مؤثری می‌تواند جهت تقویت برشی تیرها، حتی در مواردی که تیر ترک خوردگی برشی قابل توجه داشته باشد با باربرداری و یا بدون باربرداری از تیر به کار رود.

واژگان کلیدی: تقویت برشی، تیر بتن آرمه، کاشت در ارتفاع مقطع، میلگرد پیش‌تنیده.

morshed@yazd.ac.ir
ehsan.tavasoli68@yahoo.com
mehrmod.barzegar@gmail.com

۱. مقدمه

است و جلوگیری از ایجاد این مد خرابی در بهسازی لرزه‌ی سازه الزامی است. در سال‌های اخیر، براساس مطالعات صورت گرفته در زمینه تقویت برشی تیرهای بتن آرمه، روش‌های مختلفی در زمینه مذکور پیشنهاد شده است. استفاده از الیاف مسلح پلیمری، استفاده از خاموت‌های پیش‌تنیده و روش کاشت در ارتفاع مقطع از جمله روش‌های ذکر شده هستند. روش کاشت در ارتفاع مقطع، یکی از جدیدترین روش‌های تقویت برشی تیرهای بتن آرمه است که در نوشتاری در سال ۲۰۰۸ پیشنهاد و استفاده شده است.^[۱] در روش کاشت در ارتفاع مقطع می‌توان از مصالح گوناگون از جمله: میلگردهای فولادی، میلگردهای الیاف مسلح پلیمری، تسمه‌ها و یا حتی از ورق‌های الیاف مسلح پلیمری استفاده کرد. ایده‌ی استفاده از روش کاشت در ارتفاع مقطع از روش نصب در نزدیکی سطح به این صورت است که شیارهایی در ارتفاع طرفین تیر زده می‌شود و مصالح تقویتی درون آن قرار می‌گیرد.^[۲-۴] در روش نصب در نزدیکی سطح نیز می‌توان از انواع مصالح الیاف مسلح پلیمری و همچنین از صفحات فلزی استفاده کرد.^[۵] به دو دلیل روش نصب در نزدیکی سطح پیشرفت کرد و به روش کاشت در ارتفاع مقطع تبدیل شد؛ دلیل اول، مشکل بودن دسترسی به طرفین تیرهای مدفون در سقف بود و دلیل دوم، مشکل جداسازی مصالح تقویتی به خاطر عدم محصوریت یک طرف آن‌ها بود، زیرا در روش نصب در نزدیکی سطح، مصالح تقویتی کاملاً محصور نشده‌اند و از یک طرف آزاد هستند.^[۶]

امروزه می‌توان از بتن مسلح به عنوان یکی از مهم‌ترین مواد ساختمانی موجود با کاربردی فراگیر در بسیاری از سازه‌های کوچک و بزرگ نام برد. این تمایل روزافزون به ساخت و ساز با بتن مسلح را می‌توان ناشی از دسترسی آسان به شن و ماسه و سیمان، بی‌نیازی به نیروی کار بسیار ماهر در ساخت و ساز بتن آرمه و برتری اقتصادی بتن آرمه در مقایسه با سایر مصالح ساختمانی دانست. به علاوه، شمار دیگری از مزایای بتن از جمله: مقاومت فشاری نسبتاً بالا، مقاومت بسیار خوب در برابر آتش‌سوزی، صلبیت بالا، هزینه‌ی نگهداری پایین و غیره، موجب موفقیت قابل توجه آن نسبت به سایر مصالح ساختمانی شده است. با وجود این، در سراسر دنیا سازه‌های بتنی زیادی وجود دارند که از لحاظ مهندسی غیرایمن و غیرقابل استفاده تلقی می‌شوند و نیاز به تقویت دارند. بسیاری از اعضاء بتن مسلح به دلیل نقایص طراحی و یا اجرایی، مقاومت کافی ندارند. در سال‌های اخیر، به منظور برطرف کردن نقیصه‌ی ذکر شده به استفاده از روش‌های مختلف مقاوم‌سازی توجه فراوان شده است.

یکی از اعضاء مهم سازه‌ی که در ساختمان‌های بتنی در معرض خرابی است، تیرهای بتنی هستند. مد خرابی تیرهای بتنی معمولاً به صورت خمشی و یا برشی مشاهده می‌شود. مد شکست برشی خطرناک‌تر و با جذب انرژی کمتری همراه

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۵/۸/۲۴، اصلاحیه ۱۳۹۶/۱/۱۴، پذیرش ۱۳۹۶/۲/۲۴

DOI:10.24200/J30.2019.1448

نتایج یک برنامه‌ی آزمایشی در سال ۲۰۰۸،^[۱۱] جهت بررسی تأثیر روش تقویت با استفاده از الیاف مسلح پلیمری کربن دار و ایجاد سوراخ در هسته‌ی تیرهای بتن آرمه، حاکی از تقویت بسیار مؤثر روش کاشت الیاف مسلح کربن دار در هسته‌ی تیر بتن آرمه بود. همچنین در سال ۲۰۱۲،^[۸] یک برنامه‌ی آزمایشگاهی براساس نمونه‌های تحت برش مستقیم تدارک دیده شد و در آن اثر پارامترهایی مانند: مقاومت بتن، قطر سوراخ، قطر میلگرد، سطح میلگرد و طول میلگرد بررسی شد و نتایج نشان داد که مسئله‌ی جداسدگی را می‌توان با ارائه‌ی طول کافی میلگرد و مقاومت بالای بتن برطرف کرد. برخی پژوهشگران،^[۹، ۱۰] نیز مطالعاتی را بر روی تأثیر روش کاشت در ارتفاع انجام دادند و در ادامه، روش مذکور را با روش‌های معمول نصب در نزدیکی سطح و نصب خارجی ارزیابی و مقایسه کردند و برای یک نمونه‌ی خاص، میزان افزایش ظرفیت برشی برای نمونه‌ی تقویت‌شده به روش کاشت در ارتفاع مقطع به صورت قابل ملاحظه‌ی بسیار بالاتر از نمونه‌های تقویت‌شده به دو روش دیگر بود.

همچنین ۴ پروژه‌ی پژوهشی جهت بررسی روش کاشت در ارتفاع مقطع از لحاظ عملی و اجرایی بودن بررسی شدند و میزان تمایل میلگردهای تقویتی و نیز میزان تعامل بین میلگردهای تقویتی و خاموت‌های موجود درون مقطع ارزیابی شدند. پس از انجام آزمایش‌ها، نتایجی به دست آمد که طبق آن‌ها مشخص شد میلگردهای تقویتی شیب‌دار عملکرد بهتری نسبت به میلگردهای تقویتی عمودی دارند و هر چه تعداد میلگردهای تقویتی افزایش یابد، مقطع شکل‌پذیرتر می‌شود.^[۱۱-۱۴] در برخی مطالعات پیشین در زمینه‌ی تقویت برشی تیرهای بتن آرمه به روش کاشت در ارتفاع مقطع از میلگردهای فولادی و الیاف مسلح پلیمری جهت تقویت تیر استفاده شده است. در آزمایش‌های مذکور به منظور تقویت تیر، سوراخی در ارتفاع تیر از بالا به پایین تا نزدیکی کاور تحتانی تیر حفر و میلگرد تقویتی توسط چسب اپوکسی در آنجا کاشته شده است. دلیل اینکه سوراخ را تا انتها ادامه نمی‌دادند، جلوگیری از ریختن چسب اپوکسی گزارش کردند. اشکالی که وجود دارد، این است که امکان گسیختگی^۱ یا همان گسیختگی جداسدگی در تقویت مذکور وجود دارد. این نوع گسیختگی به این شکل است که مصالح تقویتی قبل از رسیدن به ظرفیت نهایی خود از مقطع بتنی جدا می‌شوند و دلیل آن پیوند سست و نامناسب میان مصالح تقویتی و مقطع بتنی است. در روش پیشنهادی پژوهش حاضر، سوراخی کاملاً در ارتفاع مقطع حفر شد و بولت تقویتی توسط چسب اپوکسی درون مقطع قرار گرفت. این تذکر لازم است که وجود و اثر در انتهای بولت، مانع از ریختن چسب اپوکسی می‌شود. علاوه بر این، وجود بولت به جای میلگرد، امکان پیش‌تنیده کردن را نیز فراهم می‌کند که خود نیز تا حدی رفتار تیر تقویت‌شده را بهبود می‌بخشد. مهار کردن بولت تقویتی توسط مهره‌ها و واشرهای ابتدایی و انتهایی، مانع از گسیختگی جداسدگی می‌شود و بولت تا بیشینه‌ی ظرفیت خود در تقویت تیر مشارکت می‌کند.

۲. مطالعه‌ی آزمایشگاهی

به منظور بررسی تأثیر پارامترهای پیشنهادی، پیش‌تیدگی و تقویت تحت بار ثابت، روی نتایج تقویت برشی به روش کاشت در ارتفاع مقطع، آزمایش‌هایی روی نمونه‌های تیر بتن مسلح با ضعف برشی برنامه‌ریزی شد که در آزمایشگاه بتن و سازی دانشگاه یزد انجام شدند و رفتار تیرهای تقویت‌شده از نظر افزایش ظرفیت باربری، شکل‌پذیری و جذب انرژی بررسی شدند.

۱.۲. نمونه‌های آزمایشگاهی

نمونه‌های آزمایشگاهی استفاده‌شده در پژوهش حاضر در مجموع ۱۰ تیر بتن مسلح با ابعاد $1750 \times 250 \times 250$ میلی‌متر بودند، که با دهانه‌ی ساده‌ی ۱۷۵ متر تحت بارگذاری دوقطبه‌ی در وسط دهانه (به فواصل ۳۰۰ میلی‌متر) قرار گرفته بودند. دهانه‌ی برش در هر طرف تیرها ۶۰۰ میلی‌متر و ضعف برشی فقط در یک سمت تیر ایجاد شده بود. برای ایجاد ضعف برشی قابل توجه، که شکست برشی را حاکم کند، در یک دسته‌ی ۵ تایی از تیرها در یک سمت تیر در دهانه‌ی برش خاموت‌گذاری صورت نگرفته (گروه ۵S) و در دسته‌ی ۵ تایی دوم، فقط یک خاموت در وسط دهانه‌ی برش قرار داده شده است (گروه ۱S). آرمانورگذاری طولی به صورت ۲ آرمانورکشی به قطر ۲۲ میلی‌متر در پایین تیر و ۲ آرمانور فشاری به قطر ۱۰ میلی‌متر در بالای تیر طرح شد و خاموت‌هایی با قطر ۸ میلی‌متر در فواصلی برابر نصف عمق مؤثر در خارج از نواحی با ضعف برشی قرار داده شدند.

پارامترهای متغیر در پژوهش حاضر، شامل پیش‌تیدگی یا عدم پیش‌تیدگی بولت‌های تقویتی و نحوه‌ی بارگذاری نمونه‌ها در حین تقویت (تقویت پس از باربرداری و تقویت تحت بار ثابت) است. به منظور شبیه‌سازی حالتی که سازه بدون عملیات باربرداری نیاز به تقویت دارد (همانند عرشه‌ی بل‌های مرتفع) سیستمی طراحی شد که تیر در حین اعمال بار و بدون باربرداری تقویت شود. سیستم طراحی‌شده به این صورت است که به جهت راحتی کار، تیر به صورت وارونه روی تکیه‌گاه‌ها قرار می‌گیرد و بارگذاری بر روی تیر توسط یک جک هیدرولیکی از پایین به سمت بالا صورت می‌گیرد. پس از اعمال بار تا مقدار مشخص از پیش تعیین‌شده، جک‌های مکانیکی ثابت‌شونده‌ی در زیر صفحات بارگذاری قرار می‌گیرند تا از کاهش تدریجی بار در طی عملیات زمانبر تقویت در جک هیدرولیکی جلوگیری شود. پس از ثابت کردن بار بر روی تیر، عملیات تقویت صورت می‌گیرد و نیز پس از سپری شدن زمان لازم جهت عمل‌آوری چسب اپوکسی مورد استفاده در تقویت، بارگذاری نهایی توسط جک هیدرولیکی انجام می‌شود که در این مرحله بارگذاری تا لحظه‌ی گسیختگی مقطع ادامه می‌یابد. در پژوهش حاضر، این نوع بارگذاری، بارگذاری ثابت نامیده شد. جزئیات شماتیک تقویت و آزمایش تیرها تحت بار ثابت را می‌توان در شکل ۱ مشاهده کرد. به جهت مقایسه‌ی نحوه‌ی بارگذاری‌های مختلف، یک سری از تیرها تحت بارگذاری ثابت آزمایش و تعدادی از تیرها پس از اعمال بارگذاری اولیه و مشاهده‌ی ترک در سطح آنان، باربرداری شدند و پس از انجام عملیات تقویت، بارگذاری مجدد آنان تا لحظه‌ی گسیختگی صورت گرفت.

۲.۲. بولت‌های تقویتی

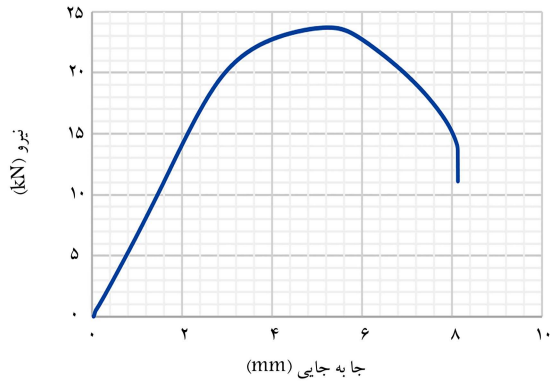
از بولت‌های فولادی تمام رزوه به قطرهای واقعی ۵/۴ و ۹/۲ میلی‌متر جهت تقویت برشی نمونه‌ها استفاده شد. به منظور نام‌گذاری ساده‌تر، از این به بعد بولت‌های تقویتی با شماره‌های ۶ و ۱۰ نام برده می‌شوند. مشخصات مکانیکی بولت‌های مذکور که براساس آزمون کشش به دست آمده است، در جدول ۱ ارائه شده است. ضمناً در شکل‌های ۲ و ۳، نمودار نیرو - جابه‌جایی بولت‌های شماره‌ی ۶ و ۱۰ براساس جابه‌جایی در طول ۵ برابر قطر مشاهده می‌شود.

۳.۲. نام‌گذاری نمونه‌ها

نمونه‌ی تیرهای موردآزمایش به صورتی ساخته شدند که در یک طرف در طول دهانه‌ی برش (۶۰۰ میلی‌متر)، به علت نبود یا کمبود خاموت، ضعف برشی وجود داشت.

جدول ۱. مشخصات مکانیکی بولت‌ها براساس نتایج آزمون کشش.

حالت	مقاومت تسلیم (MPa)	مقاومت نهایی (MPa)	درصد کشیدگی (%)
بولت شماره ۶	۲۲۰	۳۲۹	۱۰
بولت شماره ۱۰	۲۵۹	۳۸۹	۱۸



شکل ۳. نمودار نیرو - جابه‌جایی آزمون کشش بولت شماره ۱۰.

عدد بعد از آن درصد پیش‌تنیدگی بولت است. درصد پیش‌تنیدگی نسبت به مقاومت تسلیم بولت‌ها سنجیده شده است.

بخش چهارم: نوع بارگذاری در بخش مذکور ارائه شده است، که در آن E نشان‌دهنده تقویت پس از ایجاد ترک و باربرداری و C نشان‌دهنده تقویت تحت بار ثابت است.

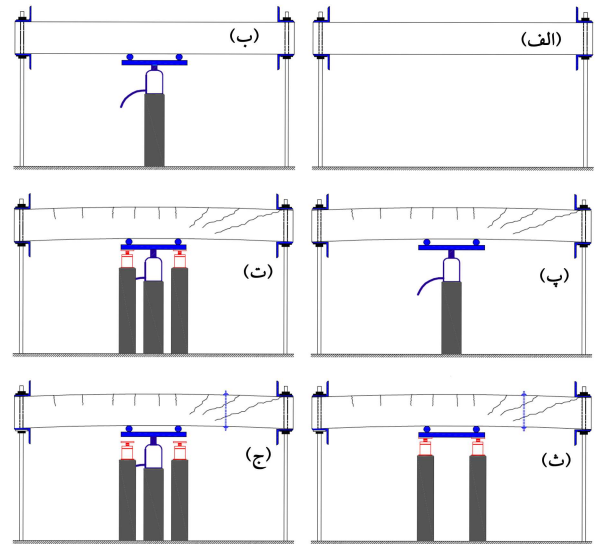
۴.۲. برنامه‌ی آزمایش‌ها

از هر گروه از تیرها، یک نمونه به‌عنوان تیر شاهد انتخاب شد و بدون هیچ‌گونه تقویتی تا لحظه‌ی گسیختگی تحت بارگذاری قرار گرفت. از ۴ تیر باقی‌مانده از هر گروه، دو نمونه بدون هیچ‌گونه پیش‌تنیدگی و دو نمونه با پیش‌تنیدگی بولت‌های تقویتی شدند. از دو نمونه‌ی که بدون پیش‌تنیدگی تقویت شدند، یک تیر تحت بار ثابت و دیگری بدون بار ثابت، تحت بارگذاری قرار گرفتند. دو نمونه‌ی دیگر نیز که تحت پیش‌تنیدگی تقویت شده بودند، به همین صورت تحت بارگذاری قرار گرفتند.

۱.۴.۲. تقویت نمونه‌ها

تقویت به روش کاشت در ارتفاع مقطع به این صورت است که ابتدا محل موردنظر جهت تقویت برشی مشخص می‌شود، پس از آن محل مشخص شده توسط دستگاه دریل و به اندازه‌ی قطر مشخص حفاری می‌شود. محل حفاری شده توسط برس سیمی و بعد از آن توسط فشار هوا، عاری از هرگونه گردوغبار و مواد لغزنده می‌شود. دلیل این تمیزکاری آن است که یک اتصال مناسب بین بولت و بستر بتنی توسط چسب اپوکسی فراهم شود. پس از تمیزکاری سوراخ حفاری شده، بولت تقویتی که از قبل توسط استون کاملاً تمیز شده است، درون سوراخ قرار می‌گیرد و مهره در دوسر بولت بسته می‌شود. در صورت نیاز به پیش‌تنیده کردن بولت تقویتی، این کار توسط آچار ترک‌انجام می‌شود.

نمونه‌های گروه S^۰ توسط یک بولت شماره ۱۰ درست در وسط ناحیه‌ی بدون خاموت و نمونه‌های گروه S^۱ نیز توسط دو بولت شماره ۶ در وسط نواحی بدون خاموت تقویت شدند. جزئیات تقویت نمونه‌های دو گروه را می‌توان در شکل‌های ۴ و ۵



الف) استقرار نمونه در محل بارگذاری؛

ب) قرار دادن صفحه‌ی بارگذاری و جک هیدرولیکی؛

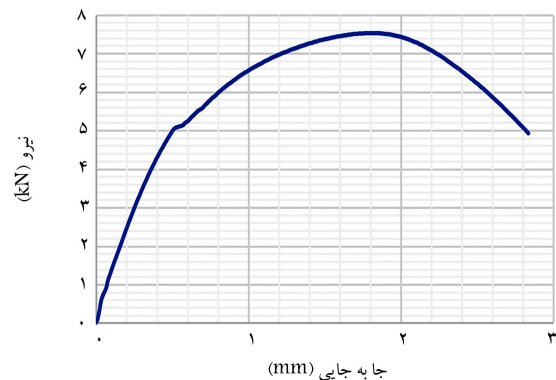
پ) اعمال نیرو و مشاهده‌ی ترک‌های برشی و تعدادی ترک خمشی؛

ت) استقرار جک‌های مکانیکی ثابت شونده و فیکس کردن آنها؛

ث) باربرداری توسط جک هیدرولیکی و پس از آن تقویت نمونه؛

ج) ادامه بارگذاری پس از تقویت نمونه‌ها تا رسیدن به ظرفیت نهایی.

شکل ۱. سازوکار سیستم بارگذاری ثابت.



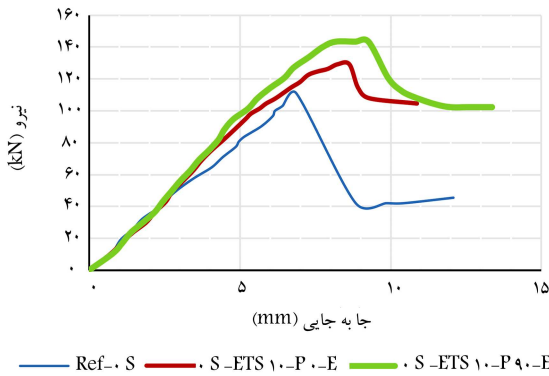
شکل ۲. نمودار نیرو - جابه‌جایی آزمون کشش بولت شماره ۶.

نام‌گذاری نمونه‌ها شامل ۴ بخش است که عبارت‌اند از:

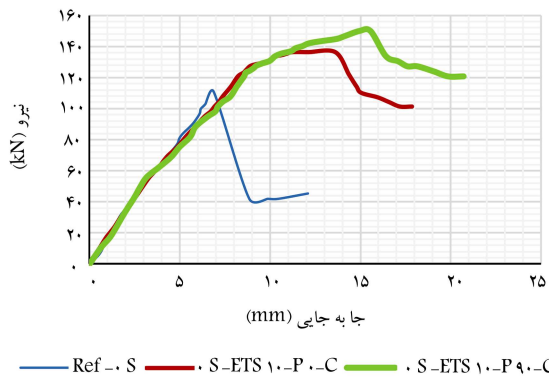
بخش اول (S^۰ یا S^۱) که S به‌این معناست که در طول ۶۰۰ میلی‌متر از طول تیر، هیچ‌گونه خاموتی وجود ندارد و S^۱ به‌این معناست که در طول ۶۰۰ میلی‌متر دقیقاً یک خاموت در وسط آن وجود دارد.

بخش دوم: که در آن ETS^۲ به‌معنی کاشت در ارتفاع مقطع است و عدد بعد از آن، قطر بولت تقویتی مورد استفاده است.

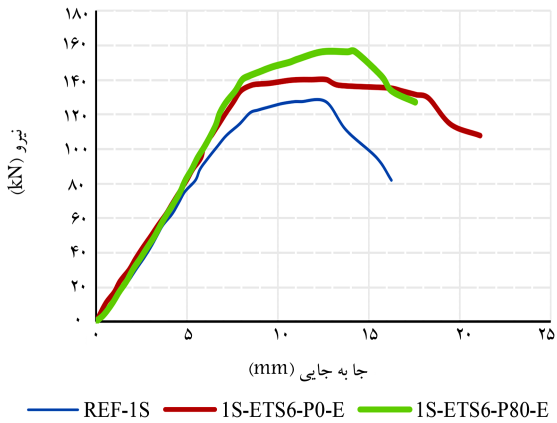
بخش سوم: که در آن P اول کلمه‌ی Prestress به‌معنی پیش‌تنیدگی است و



شکل ۶. مقایسه‌ی نمودار بار-جاب‌جایی نمونه‌های S-ETS10-P0-E و S-ETS10-P90-E با نمونه‌ی REF-S.

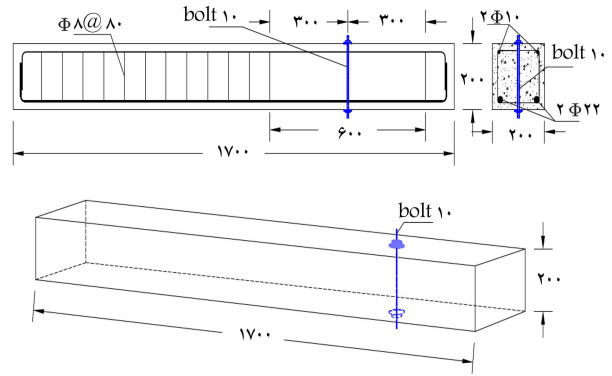


شکل ۷. مقایسه‌ی نمودار بار-جاب‌جایی نمونه‌های S-ETS10-P0-C و S-ETS10-P90-C با نمونه‌ی REF-S.

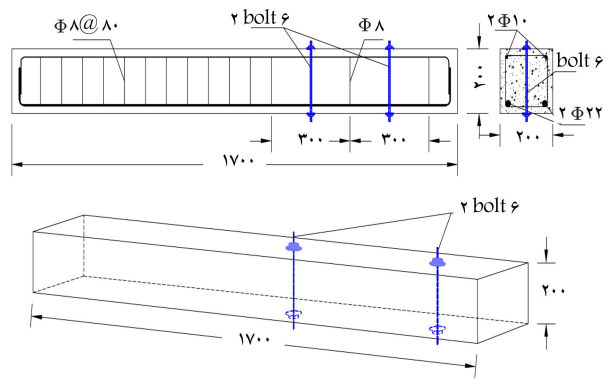


شکل ۸. مقایسه‌ی نمودار بار-جاب‌جایی نمونه‌های 1S-ETS6-P0-E و 1S-ETS6-P80-E با نمونه‌ی REF-1S.

در شکل ۷، نمودار بار-تغییرمکان دو نمونه‌ی S-ETS10-P90-C و S-ETS10-P0-C با نمونه‌ی شاهد گروه S مقایسه شده است. پیش‌تنیدگی در بولت‌های تقویتی در حالت بار ثابت، علاوه بر اینکه ظرفیت نهایی تیر را در حدود ۱۰٪ افزایش می‌دهد، شکل‌پذیری را نیز افزایش داده است. همچنین، میزان جذب انرژی در نمونه با پیش‌تنیدگی، در حدود ۲۳٪ بالاتر از نمونه بدون پیش‌تنیدگی بوده است. در شکل ۸، می‌توان مقایسه‌ی نمودار بار-تغییرمکان دو نمونه‌ی S-ETS6-P0-E و S-ETS6-P80-E را با نمونه‌ی شاهد گروه S مشاهده کرد. پیش‌تنیدگی



شکل ۴. نمونه‌های تقویت‌شده با یک بولت شماره‌ی ۱۰ (تمام ابعاد بر حسب میلی‌متر).



شکل ۵. نمونه‌های تقویت‌شده با دو بولت شماره‌ی ۶ (تمام ابعاد بر حسب میلی‌متر).

مشاهده کرد، و همچنین خلاصه‌ی تقویت کلیه‌ی نمونه‌ها در جدول ۲ ارائه شده است.

۳. ارائه و بررسی نتایج

در بخش حاضر، رابطه‌ی بار-تغییرمکان وسط دهانه‌ی نمونه‌های تیر تحت آزمون خمشی ۴ نقطه‌ای تا لحظه‌ی شکست ارائه، مقایسه، و بررسی شده‌اند. ظرفیت باربری بیشینه، جاب‌جایی بیشینه در وسط دهانه، نحوه‌ی شکست و جذب انرژی از پارامترهای مورد مقایسه بوده است.

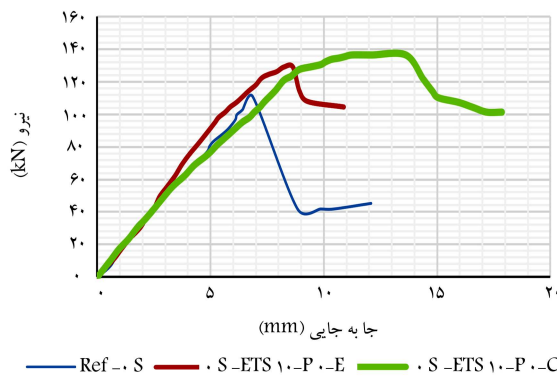
این تذکر لازم است که به منظور محاسبه‌ی میزان جذب انرژی هر یک از نمونه‌ها، مساحت زیر منحنی بار-جاب‌جایی نمونه تا لحظه‌ی بیشینه‌ی ظرفیت آن محاسبه شده و بخش نزولی بعد از بیشینه‌ی ظرفیت در محاسبه‌ی میزان جذب انرژی در نظر گرفته نشده است.

۱.۳. اثر پیش‌تنیدگی بولت‌های تقویتی

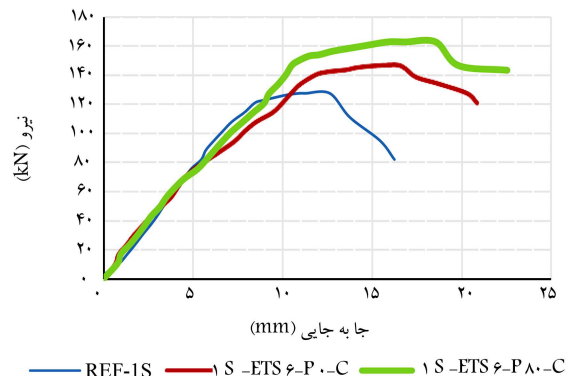
به منظور بررسی اثر پیش‌تنیدگی، نمونه‌هایی که از لحاظ نوع بارگذاری یکسان هستند و فقط پیش‌تنیده بودن و یا نبودن در آن‌ها متغیر است، با یکدیگر مقایسه شده‌اند. در شکل ۶، نمودار بار-تغییرمکان دو نمونه‌ی S-ETS10-P90-E و S-ETS10-P0-E مقایسه شده است. اعمال پیش‌تنیدگی، ظرفیت نهایی تیر را در حدود ۱۱٪ افزایش داده است. علاوه بر این، میزان جذب انرژی در نمونه با پیش‌تنیدگی در حدود ۲۲٪ بالاتر از نمونه بدون پیش‌تنیدگی است.

جدول ۲. خلاصه‌ی تقویت نمونه‌ها.

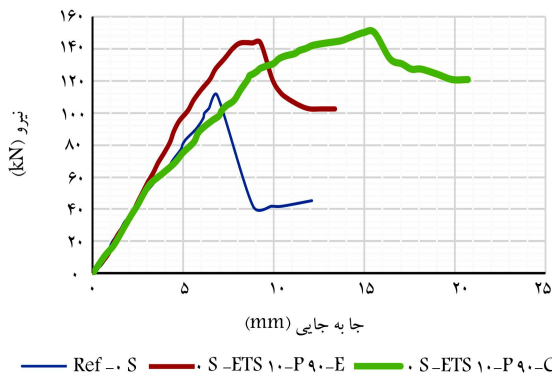
گروه	نمونه	شماره‌ی بولت تقویتی	نحوه‌ی تقویت
S	REF-°S	-	-
	°S-ETS۱۰-P°-E	۱۰	با ۱۰۰ کیلو نیوتن بارگذاری اولیه + بدون پیش‌تنیدگی بولت‌ها
	°S-ETS۱۰-P°-E	۱۰	با ۱۰۰ کیلو نیوتن بارگذاری اولیه + با ۹٪ پیش‌تنیدگی بولت‌ها
	°S-ETS۱۰-P°-C	۱۰	با ۱۰۰ کیلو نیوتن بارگذاری بار ثابت + بدون پیش‌تنیدگی بولت‌ها
S	°S-ETS۱۰-P°-C	۱۰	با ۱۰۰ کیلو نیوتن بار ثابت + با ۹٪ پیش‌تنیدگی بولت‌ها
	REF-°S	-	-
	°S-ETS۱۲-P°-E	۶	با ۱۲۰ کیلو نیوتن بارگذاری اولیه + بدون پیش‌تنیدگی بولت‌ها
	°S-ETS۱۲-P°-E	۶	با ۱۲۰ کیلو نیوتن بارگذاری اولیه + با ۸٪ پیش‌تنیدگی بولت‌ها
S	°S-ETS۱۲-P°-C	۶	با ۱۲۰ کیلو نیوتن بار ثابت + بدون پیش‌تنیدگی بولت‌ها
	°S-ETS۱۲-P°-C	۶	با ۱۲۰ کیلو نیوتن بار ثابت + با ۸٪ پیش‌تنیدگی بولت‌ها



شکل ۸. مقایسه‌ی نمودار بار - جابه‌جایی نمونه‌های °S-ETS۱۰-P°-E و °S-ETS۱۰-P°-C با نمونه‌ی REF-°S.



شکل ۹. مقایسه‌ی نمودار بار - جابه‌جایی نمونه‌های °S-ETS۶-P°-C و °S-ETS۶-P°-C با نمونه‌ی REF-°S.



شکل ۱۰. مقایسه‌ی نمودار بار - جابه‌جایی نمونه‌های °S-ETS۱۰-P°-E و °S-ETS۱۰-P°-C با نمونه‌ی REF-°S.

ظرفیت نهایی تیر را در حدود ۱۱٪ افزایش داده است. البته میزان جذب انرژی در نمونه با پیش‌تنیدگی اندکی کمتر از نمونه بدون پیش‌تنیدگی است. شکل ۹، مقایسه‌ی نمودار بار - تغییرمکان دو نمونه‌ی °S-ETS۶-P°-C و °S-ETS۶-P°-C را با نمونه‌ی شاهد گروه S نشان می‌دهد. پیش‌تنیدگی در بولت‌های تقویتی در حالت بار ثابت، علاوه بر اینکه ظرفیت نهایی تیر را در حدود ۱۱٪ افزایش داده است، شکل‌پذیری را نیز افزایش می‌دهد. همچنین، میزان جذب انرژی در نمونه با پیش‌تنیدگی، در حدود ۲۰٪ بالاتر از نمونه بدون پیش‌تنیدگی است. بررسی مجموعه‌ی شکل‌های ۵ الی ۸ بیانگر تأثیر مثبت پیش‌تنیده کردن بولت‌های تقویت برشی در افزایش ظرفیت باربری (حدود ۱۱٪) و در بیشتر موارد جذب انرژی (تا حدود ۲۳٪) است. شکل‌پذیری و جابه‌جایی بیشینه نیز در بیشتر موارد بهبود یافته است.

۲.۳. اثر بار ثابت در تیرهای تقویتی

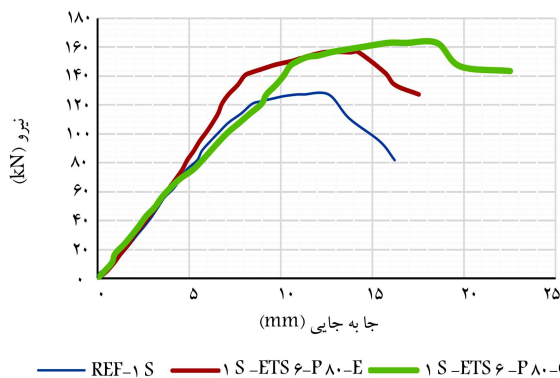
در اینجا به منظور بررسی تأثیر نحوه‌ی بارگذاری در تقویت نمونه، نمونه‌هایی که از لحاظ پیش‌تنیده بودن و یا نبودن بولت‌های تقویتی مشابه هستند و فقط از لحاظ نوع بارگذاری در هنگام تقویت، یعنی تحت بار ثابت بودن و یا باربرداری شدن تفاوت دارند، با هم مقایسه شده‌اند. در شکل ۱۰، نمودارهای بار - تغییرمکان ۳ نمونه‌ی REF-°S، °S-ETS۱۰-P°-E و °S-ETS۱۰-P°-C با هم مقایسه شده‌اند. افزایش ظرفیت باربری ۱۶/۵٪، نمونه‌ی °S-ETS۱۰-P°-E و ۲۳٪

نمونه‌ی °S-ETS۱۰-P°-C نسبت به نمونه‌ی REF-°S مشاهده شده است. ظرفیت نهایی نمونه‌ی تحت بار ثابت در حدود ۶٪ بیشتر از نمونه‌ی باربرداری شده است. علاوه بر این، میزان جذب انرژی در نمونه‌ی تحت بار ثابت در حدود ۶٪ بالاتر از نمونه‌ی باربرداری شده است و افزایش شکل‌پذیری نمونه‌های تقویت‌شده تحت بار ثابت کاملاً مشهود است.

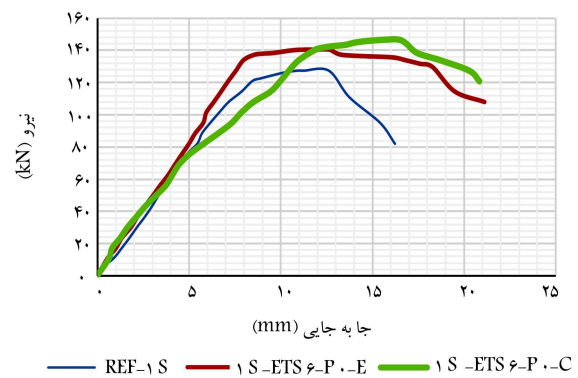
در شکل ۱۱، نمودار بار - تغییرمکان ۳ نمونه‌ی REF-°S، °S-ETS۱۰-P°-E و

جدول ۳. خلاصه‌ی نتایج به‌دست آمده برای نمونه‌های مورد آزمایش.

گروه	نمونه	ظرفیت نهایی (kN)	افزایش ظرفیت (%)	جابه‌جایی (mm)	افزایش جابه‌جایی (%)	نحوه‌ی گسیختگی
S	REF- \circ S	۱۱۰٫۹۳	-	۵٫۲۲	-	شکست برشی
	\circ S-ETS۱۰-P \circ -E	۱۲۹٫۱۱	۱۶	۸٫۶۳	۶۵	شکست برشی
	\circ S-ETS۱۰-P \circ -E	۱۴۳٫۵۲	۲۹	۹٫۲۶	۷۷	شکست برشی
	\circ S-ETS۱۰-P \circ -C	۱۳۶٫۴۵	۲۳	۱۳٫۶۱	۱۶۰	شکست برشی
	\circ S-ETS۱۰-P \circ -C	۱۵۰٫۰۸۶	۳۵	۱۵٫۵۶	۱۹۸	شکست برشی
۱S	REF-۱S	۱۲۷٫۳۰۲	-	۱۲٫۶۲	-	شکست برشی
	۱S-ETS۶-P \circ -E	۱۴۰٫۲۷	۱۰	۱۳٫۵۶	۵٫۷	شکست برشی
	۱S-ETS۶-P \circ -E	۱۵۶٫۴۹	۲۳	۱۴٫۲۵	۱۳	شکست خمشی
	۱S-ETS۶-P \circ -C	۱۴۶٫۷۶۴۸	۱۵	۱۶٫۴۶	۳۰	شکست برشی
	۱S-ETS۶-P \circ -C	۱۶۲٫۹۸۳۸	۲۸	۱۸٫۵۴	۴۷	شکست خمشی



شکل ۱۳. مقایسه‌ی نمودار بار - جابه‌جایی نمونه‌های ۱S-ETS۶-P \circ -E و ۱S-ETS۶-P \circ -C با نمونه‌ی REF-۱S.



شکل ۱۲. مقایسه‌ی نمودار بار - جابه‌جایی نمونه‌های ۱S-ETS۶-P \circ -E و ۱S-ETS۶-P \circ -C با نمونه‌ی REF-۱S.

بررسی شکل‌های ۱۰ الی ۱۳ نشان می‌دهد که با حفظ بار ثابت و عدم باربرداری از نمونه‌ها در هنگام تقویت برشی، تأثیر تقویت هم از نظر افزایش مقاومت (۴ تا ۶ درصد) و هم از نظر افزایش جذب انرژی (تا ۶۰٪) بهتر بوده است. همچنین شکل‌پذیری مناسب‌تری حاصل شده و تغییرمکان متناظر با شکست نیز افزایش یافته است. تفاوت عملکرد تقویت تحت بار ثابت و پس از باربرداری را می‌توان در دیرتر وارد عمل شدن میلگرد و استفاده‌ی بیشتر از ظرفیت انتقال برشی بتن دانست. مقاومت برشی نهایی به‌طور معنی‌داری افزایش نیافته است، اما تفاوت شکل‌پذیری و جذب انرژی قابل توجه بوده است. درصد افزایش مقاومت و جابه‌جایی متناظر با ظرفیت نهایی و همچنین مود شکست نمونه‌های مورد آزمایش به‌صورت خلاصه در جدول ۳ ارائه شده است.

۴. نتیجه‌گیری

مطالعه‌ی آزمایشگاهی حاضر به منظور بررسی تأثیر پیش بارگذاری و وجود بار ثابت در نمونه‌های تیر بتن مسلح با ضعف مقاومت برشی، که به روش کاشت میلگرد در ارتفاع مقطع تقویت می‌شوند و همچنین بررسی تأثیر پیش‌تیدگی میلگرد در آزمایشگاه بتن و سازه‌ی دانشگاه یزد صورت گرفت. از آنجا که تقویت برشی سازه‌های موجود معمولاً پس از مشاهده‌ی ضعف برشی و ترک‌خوردگی صورت می‌گیرد، لذا در کلیه‌ی

EST و \circ S-ETS۱۰-P \circ -C با یکدیگر مقایسه شده است. مقاومت نهایی نمونه‌ی \circ S-ETS۱۰-P \circ -E در حدود ۲۹٪ و مقاومت نهایی نمونه‌ی \circ S-ETS۱۰-P \circ -C در حدود ۳۵٪ بالاتر از نمونه‌ی REF- \circ S بوده است. ظرفیت نهایی نمونه تحت بار ثابت در حدود ۵٪ بیشتر از نمونه‌ی باربرداری شده است. علاوه بر این، میزان جذب انرژی در نمونه‌ی تحت بار ثابت، در حدود ۶۰٪ بالاتر از نمونه‌ی باربرداری‌شده قبل از تقویت مشاهده شده و افزایش شکل‌پذیری نیز کاملاً مشهود است.

در شکل ۱۲، مقایسه‌ی نمودار بار - تغییرمکان ۳ نمونه‌ی REF-۱S، \circ S-ETS۶-P \circ -E و ۱S-ETS۶-P \circ -C مشاهده می‌شود. ظرفیت نهایی نمونه تحت بار ثابت در حدود ۴٪ بیشتر از نمونه‌ی باربرداری‌شده است. میزان جذب انرژی در نمونه تحت بار ثابت نیز اندکی بیشتر از نمونه‌ی باربرداری‌شده است. در شکل ۱۳، نمودار بار - تغییرمکان ۳ نمونه‌ی REF-۱S، ۱S-ETS۶-P \circ -E و ۱S-ETS۶-P \circ -C با یکدیگر مقایسه شده است.

مقاومت نهایی نمونه‌ی ۱S-ETS۶-P \circ -E در حدود ۲۳٪ و مقاومت نهایی نمونه‌ی ۱S-ETS۶-P \circ -C در حدود ۲۹٪ بالاتر از نمونه‌ی REF-۱S بوده است. ظرفیت نهایی نمونه تحت بار ثابت در حدود ۵٪ بیشتر از نمونه‌ی باربرداری‌شده است. علاوه بر این، میزان جذب انرژی در نمونه تحت بار ثابت در حدود ۳۰٪ بالاتر از نمونه‌ی بدون بار ثابت است.

۴. هر چند فواصل بولت‌های کاشته شده در مقایسه با ضوابط آیین‌نامه‌ی در رابطه با بیشینه‌ی فواصل آرماتور برشی بیشتر بوده است، ولی تأثیر آن‌ها به‌ویژه در حالت پیش‌تنیده بسیار قابل ملاحظه بوده است. با اعمال نیروی پیش‌تنیدگی قائم در ارتفاع مقطع بتنی، زاویه‌ی ترک‌های برشی کاهش یافتند و آرماتورهای برشی تا فواصل بیشتری تأثیرگذار بودند. این کاهش زاویه‌ی ترک برشی به افزایش مقاومت برشی تقویت در حالت پیش‌تنیده نسبت به همان تقویت در حالت بولت غیرپیش‌تنیده منجر شده است.
۵. در دو نمونه از تیرهای مورد آزمایش، ضعف برشی کاملاً برطرف شد و مد شکست به حالت خمشی تغییر کرد. در هر دو نمونه‌ی مذکور از کاشت بولت پیش‌تنیده و با فاصله‌ی 15° میلی‌متر از آرماتورهای برشی موجود (بسیار بیشتر از بیشینه‌ی فاصله‌ی مجاز آرماتورهای برشی یعنی $d/2$) استفاده به عمل آمده بود.
۶. تأثیر بولت تقویتی پیش‌تنیده به‌طور قابل ملاحظه‌ی بیشتر از خاموت از قبل تعبیه شده در مقطع تیر بوده است. ظرفیت باربری تیرهای گروه S که با یک میلگرد پیش‌تنیده‌ی نمره ۱۰ در وسط دهانه‌ی برش تقویت شده بودند، بسیار بهتر از نمونه‌ی شاهد گروه S بود که یک خاموت دو شاخه‌ی نمره ۸ (با سطح مقطع بزرگ‌تر از یک میلگرد نمره ۱۰) در وسط دهانه برش داشت.
۷. براساس نتایج پژوهش حاضر، استفاده از کاشت میلگرد پیش‌تنیده در ارتفاع مقطع تیرهای با ضعف و ترک برشی، بدون باربرداری تیر در هنگام تقویت، روشی کاملاً اجرایی و مؤثر برای تقویت برشی این‌گونه تیرها خواهد بود.
- نمونه‌ها، تقویت پس از پیش‌بارگذاری و ایجاد عمده‌ی ترک‌های برشی هشداردهنده در تیر انجام شد. در نیمی از نمونه‌های تقویت‌شده، تقویت برشی پس از باربرداری و بسته‌شدن نسبی ترک‌ها و در بقیه، تقویت تحت بار ثابت و بدون باربرداری انجام شد. کاشت میلگرد (از نوع بولت تمام رزوه) نیز به دو صورت معمولی و پیش‌تنیده (با سفت کردن بولت توسط تورک متر) صورت گرفت.
- نتایج به‌دست آمده از انجام آزمایش خمش ۴ نقطه‌ی بر روی ۱۰ نمونه تیر در پژوهش حاضر را می‌توان به این شرح خلاصه کرد:
۱. در روش کاشت در ارتفاع مقطع به‌خاطر محصوریت کاملی که در اطراف بولت تقویتی به‌وجود می‌آید، از جداسدگی زودهنگام بولت از مقطع بتنی جلوگیری و از بیشینه‌ی ظرفیت بولت استفاده می‌شود و بولت تا لحظه‌ی گسیختگی کامل پیش می‌رود.
۲. برخلاف تصور اولیه، حفظ بار ثابت در هنگام تقویت نه فقط منجر به کاهش تأثیر تقویت برشی نشد، بلکه ظرفیت نهایی نمونه‌های تقویت‌شده تحت بار اندکی (از ۴ تا ۱۱ درصد) بیشتر از نمونه‌های مشابه باربرداری شده مشاهده شد. علاوه بر این، جذب انرژی، شکل‌پذیری، و جابه‌جایی بیشینه‌ی نمونه‌های تقویت‌شده تحت بار نسبت به نمونه‌های باربرداری شده در هنگام تقویت بهتر بود.
۳. اعمال پیش‌تنیدگی روی بولت تقویتی در تمامی موارد باعث بهبود ظرفیت باربری نهایی (حدود 1° ٪) و در بیشتر موارد باعث بهبود جذب انرژی (حدود 2° ٪) و شکل‌پذیری شد.

پانویس‌ها

1. debonding
2. embedded through-section

منابع (References)

1. Barros, J.A.O., Dalfr, G.M., Trombini, E. and Aprile, A. "Exploring the possibilities of a new technique for the shear strengthening of RC elements", In *Proceedings of International Conference of Challenges Civil Construction (CCC2008)*, Univ. Porto, Porto, Portugal (16-18 Apr., 2008).
2. Barros, J.A.O. and Dias, S.J.E. "Near surface mounted CFRP laminates for shear strengthening of concrete beam", *Cement and Concrete Composites*, **28**(3), pp. 276-292 (2006).
3. Dias, S.J.E. and Barros, J.A.O. "NSM CFRP laminates for the shear strengthening of T section RC beams", 2nd International fib Congress, Naples, Italy, Paper ID 10-58 in CD (2006).
4. Dias, S.J.E., Bianco, V., Barros, J.A.O. and Monti, G. "Low strength concrete T cross section RC beams strengthened in shear by NSM technique", Workshop-Materiali ed Approcci Innovativi Per Ilprogetto in Zona Sismica E La Mitigazione Della Vulnerabilità Delle Strutture, University of Salerno, Italy (12-13 Feb., 2006).
5. Oehlers, D.J., Haskett, M., Wu, C. and Seracino, R. "Embedding NSM FRP plates for improved IC debonding resistance", *J. Compos. Constr.*, **12**(6), pp. 635-642 (2008).
6. Bianco, V., Barros, J.A.O. and Monti, G. "Bond model of NSM CFRP in the context of the shear strengthening of RC beams", *ASCE J. Struct. Eng.*, **135**(6), pp. 619-631 (2009).
7. Mohamed Ali, M.S., Oehlers, D.J., Griffith, M.C. and et al. "Interfacial stress transfer of near surface-mounted FRP-to-concrete joints", *Eng. Struct.*, **30**(7), pp. 1861-1868 (2008).
8. Godat, A., ASCE, M., L'Hady, A. and et al. "Bond behavior of the ETS FRP bar shear-strengthening method", *J. Compos. Constr.*, **16**, pp. 529-539 (2012).
9. Chaallal, O., Mofidi, A., Benmokrane, B. and et al. "Embedded through-section FRP rod method for shear strengthening of RC beams: Performance and comparison with existing techniques", *J. Compos. Constr.*, **15**(3), pp. 374-383 (2011).
10. Chaallal, O., Mofidi, A., Benmokrane, B. and et al. "Experimental tests and design model for RC beams strengthened in shear using the embedded through-section FRP method", *J. Compos. Constr.*, **16**(5), pp. 540-550 (2012).

11. Breveglieri, M., Aprile, A. and Barros, J.A.O. "Shear strengthening of reinforced concrete beams strengthened using embedded through section steel bars", *Engineering Structures*, **81**, pp. 76-87 (2014).
12. Breveglieri, M., Aprile, A. and Barros, J.A.O. "Embedded through-section shear strengthening technique using steel and CFRP bars in RC beams of different percentage of existing stirrups", *Composite Structures*, **126**, pp. 101-113 (2015).
13. Breveglieri, M., Aprile, A. and Barros, J.A.O. "RC beams strengthened in shear using the Embedded Through-Section technique: Experimental results and analytical formulation", *Composites: Part B*, **89**, pp. 266-281 (2016).
14. Barros, J.A.O. and Dalfré, G.M. "Assessment of the effectiveness of the embedded through-section technique for the shear strengthening of reinforced concrete beams", *Strain*, **49**(1), pp. 75-93 (2012).