

مقاوم سازی تیرهای بتن آرمه با CFRP پیش تنیده به روش نصب در نزدیک سطح

عباس میرزامحمدی^۱، علیرضا محمدجعفری صادقی^{۲*}، حسن افشین^۳

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز

^۲ استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز

^۳ استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز

(دریافت: ۹۸/۱۲/۴، پذیرش: ۹۹/۱۱/۵، نشر آنلاین: ۹۹/۱۱/۵)

چکیده

مقاوم سازی سازه های بتن آرمه از قبیل پل ها، تیرهای بتن آرمه و ... در سازه های آسیب دیده و یا دارای ضعف طراحی یا اجرا مطرح می باشد. یکی از روش های مقاوم سازی سازه های بتن آرمه استفاده از FRP (Fiber Reinforced Polymer) به صورت نصب در نزدیک سطح (NSM) (Near Surface Mounted) می باشد. از سوی دیگر با توجه به ظرفیت کششی بالای الیاف کربن و برای استفاده بهتر از این ظرفیت، استفاده از FRP پیش تنیده در مقاوم سازی سازه های بتن آرمه به صورت وسیعی مورد تحقیق قرار گرفته است. در تحقیق حاضر مقاوم سازی تیرهای بتن آرمه با CFRP (Carbon-Fiber Reinforced Polymer) پیش تنیده و با استفاده از روش NSM مورد بررسی آزمایشگاهی قرار گرفته است. به این منظور سه عدد تیر بتن مسلح دو سر ساده ساخته شدند. از این تعداد، یک تیر تقویت نشده (کنترل)، یک تیر به صورت NSM با FRP معمولی، یک تیر به صورت NSM با FRP پیش تنیده ساخته شد. همچنین تیر کنترل آسیب دیده، مقاوم سازی شده و همه نمونه ها تحت آزمایش خمش سه نقطه ای قرار گرفتند. نتایج آزمایش ها حاکی از آن است که اعمال پیش تنیدگی در نمونه های تقویت شده باعث تعویق لحظه ترک خوردگی بتن و در نتیجه افزایش محسوس مقدار بار متناظر با لحظه ایجاد اولین ترک در تیرهای بتنی می گردد. همچنین تیرهای پیش تنیده، بار ترک خوردگی و بار تسلیم بیشتری را در مقایسه با نمونه تقویت شده غیر پیش تنیده تحمل کردند. تیرهای تقویت شده پیش تنیده در مقایسه با نمونه غیر پیش تنیده دارای ظرفیت باربری نهایی بیشتری بوده و شکست آن ها متناظر با خیزهای کوچک تری است.

کلیدواژه ها: تیر بتن مسلح، مقاوم سازی، مصالح CFRP، روش NSM، پیش تنیدگی.

۱- مقدمه

۱-۱- کلیات

اعضای سازه های بتن آرمه به دلایل مختلفی از جمله کیفیت نامرغوب مصالح و عمل آوری نامناسب، اشتباهات محاسباتی، تغییر کاربری سازه، رعایت نکردن مقررات اجرایی، پیشرفت آیین نامه ها و غیره به مقاوم سازی نیاز دارند که این امر لزوم پژوهش در مورد روش های مقاوم سازی مناسب و اقتصادی را توجیه می کند.

مصالح پلیمری مسلح شده با الیاف (FRP) برای مقاوم سازی سازه های بتنی از سال ۱۹۸۰ مورد استفاده قرار گرفته اند. از مزایای این سیستم در مقایسه با مصالح سنتی می توان به وزن

کم، راحتی در نصب، دوام و مقاومت کششی بالا، خنثی بودن الکترومغناطیسی و دست رسی نامحدود در اندازه، شکل و ابعاد اشاره نمود (ACI، ۲۰۱۷). سیستم های FRP از اجزای مشخصی ساخته می شوند. این اجزا عبارتند از الیاف مسلح کننده و چسب های پلیمری. وظیفه اصلی الیاف فراهم نمودن سختی و مقاومت در عضو تقویت شده می باشد و وظیفه چسب ها فراهم نمودن شرایط انتقال تنش و تغییر شکل بین الیاف، افزایش مقاومت در برابر شرایط محیطی و ایجاد سطح محافظ در مقابل سایش و خراشیدگی است. متداول ترین روش استفاده از سیستم های FRP، روش تسلیح با اتصال خارجی (EBR)^۱ است. در این روش بعد از آماده سازی سطحی، ورقه FRP به وسیله چسب

1. Epoxy Resin

* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۴۱-۳۳۴۵۹۳۹۰

از این روش، اولین بار در دهه ۱۹۵۰ در شمال سوئد برای مقاوم سازی دال یک پل در قسمت لنگر منفی استفاده شده است. به این منظور آرماتورهای فولادی در شیارهایی که در سطح بتن ایجاد شده‌اند کار گذاشته شده و با ملات سیمان چسبانده شدند (Asplund, ۱۹۴۹).

در روش NSM پس از ایجاد شیار در سطح بتن و کارگذاری میلگردهای FRP در آن، دور میلگردها به منظور ایجاد پیوستگی لازم بین بتن و میله‌ها با چسب اپوکسی پر می‌شود. از مزایای FRP در مقایسه با فولاد در روش NSM می‌توان به مقاومت بهتر در برابر خوردگی، راحتی و سرعت اجرای بالاتر به خاطر سبک وزن بودن و بهینه بودن عملیات اجرای شیار اشاره کرد (De Lorenzis و Teng, ۲۰۰۷). روش NSM در مقایسه با روش EBR دارای مزایای متعددی می‌باشد که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به انتقال نیروی بهتر اشاره نمود. نکته قابل توجه این است که ایجاد شیار برای سازه‌هایی مانند پل‌ها که ضخامت پوشش بتنی بیشتری دارند، مناسب‌تر است (Carolin و همکاران, ۲۰۰۱).

۱-۲- مقاوم سازی با استفاده از مصالح FRP پیش تنیده

مزیت اصلی پیش‌تنیده کردن ورقه یا صفحات FRP قبل از چسباندن بر روی بتن در مقایسه با FRP غیر پیش‌تنیده این است که FRP پیش‌تنیده پس از چسباندن شدن بر روی المان بدون وارد شدن بار اضافی در باربری المان سهیم می‌باشد در حالی که در FRP غیر پیش‌تنیده مقداری از بار به المان وارد شده بعد به FRP منتقل می‌شود که این باعث می‌شود که از ظرفیت FRP به طور کامل استفاده نشود. با پیش‌تنیده نمودن مصالح FRP، تنش در فولاد و بتن کاهش یافته و باعث استفاده حداکثری از ظرفیت مصالح FRP می‌شود. به علاوه پیش‌تنیده کردن FRP باعث کاهش عرض ترک‌ها و تغییر شکل در طول المان می‌شود. بار ترک‌خوردگی در تیر مقاوم شده با FRP غیر پیش‌تنیده تقریباً برابر با تیر مقاوم نشده است؛ در حالی که بار ترک‌خوردگی در تیر مقاوم شده با مصالح FRP پیش‌تنیده به دو برابر تیر مقاوم نشده می‌رسد (El-Hacha و همکاران, ۲۰۰۳). در نهایت، می‌توان گفت مصالح FRP پیش‌تنیده به وسیله جلوگیری از وقوع حالت‌های شکست پیش از موعد (Premature Failure Modes)، مقاومت نهایی المان مقاوم شونده را افزایش دهند.

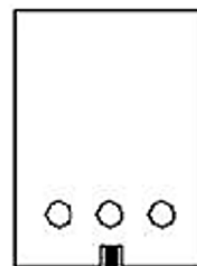
به طور کلی، مزایای استفاده از مصالح FRP پیش‌تنیده را به شرح زیر می‌توان بیان نمود:

۱- افزایش سختی

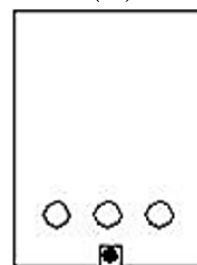
۲- کاهش عرض و توزیع ترک

اپوکسی^۲ به وجه کششی تیر یا المان‌هایی که لازم است مقاوم شوند، چسبانده می‌شود. تحقیقات در این زمینه نشان می‌دهند که استفاده از کل مقاومت کششی مصالح FRP به علت جداشدگی پیش از موعد، امکان‌پذیر نمی‌باشد (ACI, ۲۰۱۷). سیستم‌های مهارکننده متفاوتی برای استفاده بهتر از ظرفیت FRP در روش EBR ارائه شده است (Khalifa و همکاران, ۱۹۹۹).

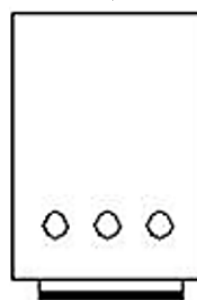
ممکن است در روش EBR عملکرد مسلح‌کنندگی کامپوزیت‌ها تحت تأثیر شرایط محیطی مخرب مانند اثرات منفی سیکل‌های یخ زدن و ذوب شدن قرار گیرند (Fortes و Barros, ۲۰۰۵). برای غلبه بر معایب روش EBR تحقیقات متعددی انجام شده است. نتایج تحقیقات حاکی از آن است که روش نصب در نزدیک سطح (NSM) یکی از روش‌های قابل قبول می‌باشد. در روش NSM میله یا تسمه‌های FRP در شیارهایی که در سطح بتن ایجاد شده کار گذاشته می‌شوند (شکل (۱)).



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۱- مقایسه شماتیک روش NSM و EBR (حاجی هاشمی و همکاران, ۲۰۱۵): الف) تسمه FRP به صورت NSM، ب) میله FRP به صورت NSM، ج) ورقه FRP به صورت EBR

می‌باشد. هدف این تحقیق مقایسه حالت‌های شکست تیر است. بنابراین در تیر نوع دو که آرماتور کششی استفاده شده $(1\emptyset12 + 2\emptyset14)$ ، عرض صفحه CFRP ۲۰ میلی‌متر و تا سطح ۴۴ درصد ظرفیت اسمی مصالح CFRP پیش‌تنیده شده، شکست به‌صورت گسیختگی صفحه CFRP همراه با خرد شدن بتن اتفاق افتاده است. در تیر نوع سه و نوع پنج آرماتور کششی استفاده شده به‌ترتیب $(3\emptyset12)$ و $(1\emptyset16 + 2\emptyset14)$ ، عرض صفحه FRP، ۲۰ میلی‌متر، مقدار پیش‌تنیدگی در تیر نوع سه و پنج به‌ترتیب تا سطح $50/6$ و $43/5$ درصد ظرفیت اسمی CFRP می‌باشد. در هر دو تیر، پس از جداسازی و گسیختگی صفحه‌ها به‌طور کامل، خرد شدن بتن اتفاق افتاده است. تیر نوع یک و چهار آرماتور کششی استفاده شده و عرض صفحه به‌ترتیب $(1\emptyset12 + 2\emptyset14)$ و $(1\emptyset16 + 2\emptyset14)$ ۵۰ و ۲۰ میلی‌متر و مقدار پیش‌تنیدگی در تیر نوع یک و چهار به‌ترتیب تا سطح ۴۲ و $50/6$ درصد ظرفیت اسمی CFRP می‌باشد. حالت شکست در هر دو تیر نوع یک و چهار به این صورت است که بار اعمالی به بار نهایی رسیده است و صفحات CFRP به‌طور ناگهانی از تیر بتنی جدا شده‌اند. آرماتور فشاری استفاده شده در همه تیرها $2\emptyset6$ و ضخامت صفحه CFRP، $1/4$ میلی‌متر می‌باشد.

Yang و همکاران (۲۰۰۹) اقدام به ساخت ۱۳ تیر بتن مسلح با متغیرهای شامل پیوستگی FRP، سیستم مهار، مقدار پیش‌تنیدگی و طول دهانه نموده‌اند. یک تیر کنترل، دو تیر بدون پیش‌تنیدگی همراه با یک ورق (عرض ۵ سانتی‌متر) و دو ورق (عرض ۱۰ سانتی‌متر) در جهت عرضی بدون مهار انتها، چهار تیر با مقدار متفاوت پیش‌تنیدگی بدون چسبندگی و با مهار انتها، چهار تیر پیش‌تنیده چسبیده شده با مهار انتها و دو تیر پیش‌تنیده با طول دهانه ۴۵۰ و ۶۰۰ سانتی‌متر جهت بررسی عملکرد خمشی اعضای بتن مسلح ساخته‌اند. هدف اصلی، مقایسه حالت‌های شکست تیر با و بدون پیش‌تنیدگی است. نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش نشان می‌دهد که حالت شکست در تیر کنترل، شکست خمشی و در تیر با صفحه CFRP پیش‌تنیده، گسیختگی FRP می‌باشد. برای اعضای بتنی مسلح تقویت‌شده با CFRP پیش‌تنیده چسبیده از خارج، جداسازی ورقه‌های کامپوزیت در دو مرحله اتفاق افتاده است. در مورد تیرهای با صفحات CFRP چسبیده، بعد از جداسازی صفحات CFRP، به علت اثر سیستم مهاربندی، رفتار آن‌ها به رفتار تیرهای با صفحات CFRP نچسبیده تغییر می‌کند. در تیر با طول دهانه ۴۵۰ و ۶۰۰ سانتی‌متر گسیختگی FRP اتفاق افتاده است.

Deng و همکاران (۲۰۱۱) اقدام به ساخت ۴ تیر بتن مسلح به‌صورت یک تیر کنترل، یک تیر تقویت‌شده بدون پیش‌تنیدگی و دو تیر تقویت‌شده با CFRP پیش‌تنیده تا سطح ۲۰ و ۴۰ درصد ظرفیت اسمی مصالح CFRP پیش‌تنیده، جهت بررسی عملکرد

۳- بهبود خدمت‌پذیری و دوام

۴- بهبود مقاومت برشی و خمشی عضو (به‌دلیل ترک نخوردن مقطع)

۵- اجتناب از موده‌های شکست ناشی از پوسته‌پوسته شدن در ناحیه ترک‌ها و انتهای لایه FRP

۶- افزایش ظرفیت مقطع (تار خنثی نسبت به حالت غیر پیش‌تنیده پایین‌تر قرار می‌گیرد)

۷- افزایش بار تسلیم مقطع (Taljesten و Nordin، ۲۰۰۶).

به‌طور خلاصه به مزایای FRP پیش‌تنیده اشاره شد، همچنین مصالح FRP پیش‌تنیده دارای معایبی نیز می‌باشد. که می‌توان به رفتار الاستیک خطی مصالح FRP اشاره نمود و با توجه به این‌که مقداری از ظرفیت کرنشی FRP در طول پیش‌تنیدگی استفاده شده، پس دارای تغییر شکل‌های کوچک‌تری نسبت به سازه مقاوم‌شده با مصالح غیر پیش‌تنیده خواهد بود (El-Hacha و همکاران، ۲۰۰۳).

از تحقیقات انجام‌شده در زمینه مقاوم‌سازی با مصالح FRP پیش‌تنیده می‌توان به تحقیقات Deng و همکاران، ۲۰۲۰؛ Kara و همکاران، ۲۰۱۶؛ حاجی‌هاشمی و همکاران، ۱۳۹۳؛ Xue و همکاران، ۲۰۱۰؛ Yang و همکاران، ۲۰۰۹؛ Deng و همکاران، ۲۰۱۱؛ Soudki و Badawi (۲۰۰۹) اشاره نمود.

حاجی‌هاشمی و همکاران (۱۳۹۳) اقدام به ساخت پنج عدد تیر بتنی با مشخصات یکسان از جمله یک نمونه کنترل، یک نمونه تقویت‌شده با تسمه CFRP به‌روش NSM بدون پیش‌تنیدگی و سه نمونه تقویت‌شده با تسمه CFRP به‌روش NSM با کرنش پیش‌تنیدگی ۵، ۲۰ و ۳۰ درصد کرنش نهایی کردند. تقویت نمونه‌ها با استفاده از تسمه پیش‌ساخته از جنس الیاف کربن به ابعاد 25×2 میلی‌متر، چسب مورد استفاده، چسب اپوکسی دوجزئی و بارگذاری نمونه‌ها به‌صورت خمش سه‌نقطه‌ای انجام شد. نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش نشان می‌دهند که بار ترک‌خوردگی در تیرهایی که تا سطح ۵، ۲۰ و ۳۰ درصد ظرفیت اسمی مصالح CFRP پیش‌تنیده شده‌اند. به‌ترتیب تا $117/5$ ، $127/5$ و $144/5$ درصد بار ترک‌خوردگی در نمونه مبنا افزایش یافتند. در کنار بار ترک‌خوردگی بالاتر، ترک‌های ایجادشده در نمونه تقویت‌شده پیش‌تنیده، دارای عرض و توزیع محدودتر بوده‌اند. همچنین ظرفیت باربری نهایی در تیرهایی که تا سطح ۵، ۲۰، ۳۰ درصد ظرفیت اسمی مصالح CFRP پیش‌تنیده شده‌اند، به ترتیب $1/5$ ، $14/7$ و $15/0$ درصد نسبت به نمونه مبنا افزایش یافتند.

Xue و همکاران (۲۰۱۰) پنج عدد تیر بتن مسلح را توسط CFRP پیش‌تنیده مقاوم‌سازی کرده‌اند. متغیرهای مورد بررسی شامل مقدار پیش‌تنیدگی، عرض صفحه و نسبت آرماتور کششی هستند. آزمایش بارگذاری نمونه‌ها به‌صورت خمش چهار نقطه‌ای

خمشی کرده‌اند. عرض صفحه CFRP استفاده شده ۵۰ میلی‌متر و ضخامت ۱/۲ میلی‌متر است. نتایج آزمایش نشان می‌دهد بار نهایی تیر تقویت‌شده بدون پیش‌تنیدگی در مقایسه با تیر کنترل افزایش یافته است. استفاده از صفحه CFRP پیش‌تنیده تا سطح ۲۰ و ۴۰ درصد، منجر به افزایش بار ترک‌خوردگی و بهبود سرویس‌دهی می‌شود. بار ترک‌خوردگی، بار تسلیم، بار نهایی و سختی در تیر تقویت‌شده با صفحه CFRP پیش‌تنیده افزایش یافته است. شاخص شکل‌پذیری در تیر مقاوم شده با FRP نسبت به تیر کنترل کاهش پیدا کرده است. در تیر تقویت‌شده با FRP پیش‌تنیده با افزایش مقدار پیش‌تنیدگی شکل‌پذیری کاهش یافته است.

Soudki و Badawi (۲۰۰۹) اثر مقاوم‌سازی تیر بتن مسلح توسط میله‌های CFRP پیش‌تنیده به‌روش NSM را مورد بررسی قرار داده‌اند. تعداد چهار تیر بتن مسلح به‌صورت یک تیر کنترل، یک تیر مقاوم‌شده با میله FRP بدون پیش‌تنیدگی و دو تیر مقاوم‌شده با میله FRP پیش‌تنیده تحت ۴۰ و ۶۰ درصد مقاومت نهایی میله FRP ساخته شده‌اند. قطر میله CFRP ۹/۵ میلی‌متر، تیرها تحت آزمایش خمش چهار نقطه‌ای قرار گرفتند. طبق نتایج تحقیق، بار نهایی در تیر غیر پیش‌تنیده ۵۰ درصد نسبت به تیر کنترل افزایش یافته است. همچنین بار نهایی در تیر با ۴۰ درصد پیش‌تنیدگی ۷۹ درصد نسبت به تیر کنترل و ۲۰ درصد نسبت به تیر غیر پیش‌تنیده افزایش یافته است. برای تیر مقاوم شده با ۶۰ درصد پیش‌تنیدگی، بار نهایی ۲/۶ درصد کم‌تر از تیر مقاوم شده با ۴۰ درصد پیش‌تنیدگی می‌باشد و بار ترک‌خوردگی در دو حالت مقاوم‌سازی شده به‌طور قابل‌توجهی افزایش یافته است. دو نوع حالت شکست مشاهده شده است. شکست در تیر کنترل و تیر مقاوم شده با میله CFRP به‌صورت خرد شدن بتن فشاری همراه با جاری شدن میلگرد کششی و در تیر مقاوم شده با میله CFRP پیش‌تنیده، گسیختگی میله CFRP بعد از جاری شدن میلگرد کششی بوده است.

Kara و همکاران، (۲۰۱۶) روش عددی برای تخمین بار ترک‌خوردگی، بار تسلیم و انحنای تیرهای بتن مسلح تقویت‌شده با میله و نوارهای FRP پیش‌تنیده به‌روش NSM را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج به‌دست‌آمده از روش عددی را با نتایج ۲۰ تیر بتن مسلح در مطالعات پیشین به‌روش تجربی مقایسه کردند. طبق نتایج، با افزایش مقدار پیش‌تنیدگی، بار ترک‌خوردگی و بار تسلیم افزایش ولی انعطاف‌پذیری نسبت به نمونه تقویت‌شده با FRP NSM غیر پیش‌تنیده کاهش یافتند. حالت‌های شکست در تمام تیرها تسلیم فولاد سپس پارگی FRP بود، به‌جز در یک مورد که تسلیم فولاد سپس خرد شدن بتن اتفاق افتاد. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که روش عددی و تجربی توافق خوبی داشتند.

Deng و همکاران، (۲۰۲۰) اقدام به ساخت ۳ عدد تیر بتنی مستطیلی شکل در مقیاس کوچک و ۳ عدد تیر بتنی T شکل در مقیاس بزرگ، که از هرکدام یک تیر تقویت‌شده با CFRP غیر پیش‌تنیده و ۲ تیر تقویت‌شده با CFRP پیش‌تنیده تا سطح ۲۰ و ۴۰ درصد ظرفیت اسمی CFRP جهت بررسی عملکرد خمشی کرده‌اند. ابعاد CFRP در تمام نمونه‌ها ۵۰×۳ میلی‌متر و بارگذاری نمونه‌ها به‌صورت خمشی ۴ نقطه‌ای می‌باشد. طبق نتایج تحقیق، لنگر نهایی در تیر مستطیل و T شکل که تا سطح ۲۰ درصد ظرفیت اسمی CFRP پیش‌تنیده شده‌اند به‌ترتیب تا ۱۷/۶۵ و ۵/۱۴ درصد و تا سطح ۴۰ درصد پیش‌تنیدگی به‌ترتیب تا ۲۹/۱۶ و ۱۳/۹۸ درصد نسبت به تیر تقویت‌شده با CFRP غیرپیش‌تنیده افزایش یافته است. لنگر ترک‌خوردگی و لنگر تسلیم در تیر مستطیل و T شکل تا سطح ۴۰ درصد پیش‌تنیدگی به‌ترتیب ۱۰۰ و ۵۰ درصد نسبت به تیر تقویت‌شده با CFRP غیر پیش‌تنیده افزایش یافتند.

یکی از بزرگ‌ترین مشکلات در مقاوم‌سازی سازه‌های بتنی با مصالح FRP پیش‌تنیده، مهار ناحیه انتهایی می‌باشد. برای جلوگیری از جدا شدن ورقه‌های FRP می‌توان به اعمال تدریجی نیروی پیش‌تنیدگی (Meier و Stocklin، ۲۰۰۴) و کاهش لایه‌های FRP در نواحی انتهایی (Weight و همکاران، ۲۰۰۱) اشاره نمود.

در تحقیق حاضر مقاوم‌سازی تیرهای بتن‌آرمه با CFRP پیش‌تنیده و با استفاده از روش NSM مورد بررسی آزمایشگاهی قرار گرفته و با روش مقاوم‌سازی بدون پیش‌تنیدگی CFRP مقایسه شده است. به این منظور سه عدد تیر بتن مسلح ساخته شدند که یک تیر تقویت نشده (کنترل)، یک تیر به‌صورت NSM با FRP معمولی، یک تیر به‌صورت NSM با FRP پیش‌تنیده و همچنین تیر کنترل آسیب‌دیده، مقاوم‌سازی شده و تحت آزمایش خمشی سه نقطه‌ای قرار گرفتند. نحوه انتشار ترک، منحنی‌های بار-تغییر مکان وسط دهانه، شکل‌پذیری، جذب انرژی و مودهای شکست نمونه‌ها ارزیابی و تحلیل شده است.

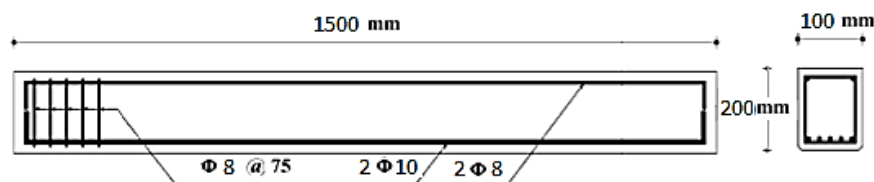
۲- مطالعات آزمایشگاهی

در این تحقیق سه نمونه تیر بتن مسلح به ابعاد ۱۰۰×۲۰۰×۱۵۰ میلی‌متر با استفاده از بتن معمولی با نسبت آب به سیمان ۰/۵۶ و با عیار سیمان ۳۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب ساخته شدند. میلگرد کششی دو عدد ۱۰ و میلگرد فشاری دو عدد میلگرد ۸ انتخاب گردید و میلگرد برشی ۸ در فواصل ۷۵ میلی‌متر می‌باشد. عمق شیار ایجادشده به‌منظور مقاوم‌سازی تیر به‌روش NSM در تمام وجوه مقطع برابر ۲۵ میلی‌متر و در نتیجه عمق مؤثر مقطع $d = ۱۷۵$ میلی‌متر می‌باشد. طرح نهایی برای ساخت نمونه‌ها در شکل (۲) نشان داده

در داخل شیارهایی که در بتن و صفحات فولادی نیم‌دایره ایجاد شده قرار می‌گیرد. پیش‌تنیدگی با استفاده از جک هیدرو-لیکی که در یک طرف تیر به صفحه فولادی نیم‌دایره متصل شده، به تسمه CFRP اعمال می‌شود و این نیرو تا زمان کسب مقاومت لازم چسب (حدود سه روز) ثابت نگه‌داشته شده است. نحوه مقاوم‌سازی تیر بتن مسلح توسط الیاف کربن پیش‌تنیده به روش NSM مطابق شکل (۳) می‌باشد. همچنین نمونه کنترل آسیب‌دیده با استفاده از ملات ماسه سیمان مرمت شده و با استفاده از الیاف کربن به روش تسلیح با اتصال خارجی (EBR) به‌سازی شده است. نحوه مرمت نمونه آسیب‌دیده مطابق شکل (۴) می‌باشد. در این پژوهش برای یافتن ظرفیت باربری تیرهای کنترلی و مقاوم‌سازی شده، از آزمایش خمش سه‌نقطه‌ای با دهانه خالص ۱۳۵ سانتی‌متر استفاده شده است. در این آزمایش از جک هیدرولیکی دستی ۱۰ تن و بازشدگی ۵ سانتی‌متر و LVDT با ظرفیت بازشدگی ۲۵ و ۱۰۰ میلی‌متر و حساسیت ۰/۰۱ میلی‌متر برای اندازه‌گیری تغییر مکان میانه دهانه استفاده شده است.

شده است. تعداد سه عدد تیر بتنی با مشخصات یکسان، به صورت یک تیر کنترل، یک تیر تقویت‌شده با CFRP بدون پیش‌تنیدگی و یک تیر تقویت‌شده با CFRP پیش‌تنیده جهت بررسی عملکرد خمشی ساخته شده‌اند. برای سهولت در شناسایی هر نمونه، نام‌گذاری نمونه‌ها به صورت NS-NP برای نمونه‌های مقاوم‌سازی نشده (Non-Strengthened) و غیر پیش‌تنیده (Non-Prestressed) و S-NP برای نمونه مقاوم‌سازی شده و غیر پیش‌تنیده و S-P برای نمونه مقاوم‌سازی شده و پیش‌تنیده استفاده شده است. در جدول (۱) مشخصات نمونه‌ها نشان داده شده است.

در این تحقیق برای تقویت نمونه‌ها از ورقه‌های الیاف کربن به صورت دو لایه به ابعاد (20×34) میلی‌متر (جدول (۲)) و چسب اپوکسی با مشخصات مطابق جدول (۳) استفاده شده است. بر اساس آزمایش صورت گرفته، مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن مصرفی برابر با ۳۰ MPa و تنش تسلیم میلگردهای کششی برابر با ۳۴۰ MPa می‌باشد. برای پیش‌تنیده کردن تسمه‌های CFRP، ابتدا نصف شیار با چسب اپوکسی پر شده و بلافاصله تسمه CFRP



شکل ۲- ابعاد و میلگردگذاری تیرهای بتن آرمه در تحقیق حاضر

جدول ۱- مشخصات نمونه‌ها

نام نمونه	مشخصات
NS-NP	نمونه کنترل (تقویت نشده)
S-NP	نمونه تقویت‌شده با تسمه CFRP به روش NSM بدون پیش‌تنیدگی
S-P40	نمونه تقویت‌شده با تسمه CFRP به روش NSM با کرنش پیش‌تنیدگی ۰/۰۰۶ (۴۰ درصد کرنش نهایی)

جدول ۲- مشخصات مکانیکی ورقه‌های الیاف کربن (Wrap-330CU)

کرنش نهایی (%)	مدول الاستیسیته (MPa)	مقاومت کششی (MPa)	ضخامت (mm)	چگالی (gr/cm^3)
۱/۵	۲۳۰۰۰	۳۴۰۰	۰/۱۶۷	۱/۸۰

جدول ۳- مشخصات مکانیکی چسب اپوکسی (Sikadur 330)

مدول کششی (MPa)	مدول خمشی (MPa)	مقاومت کششی (MPa)	افزایش طول (%)
۴۵۰۰	۳۸۰۰	۳۰	۰/۹



شکل ۳- سیستم پیش‌تنیدگی



شکل ۴- مقاوم سازی نمونه کنترل آسیب دیده



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۵- توزیع ترک در لحظه نهایی در نمونه های مختلف: (الف) تیر کنترل، (ب) تیر مقاوم شده با FRP بدون پیش تنیدگی، (ج) تیر مقاوم شده با FRP پیش تنیده

۳- بررسی نتایج

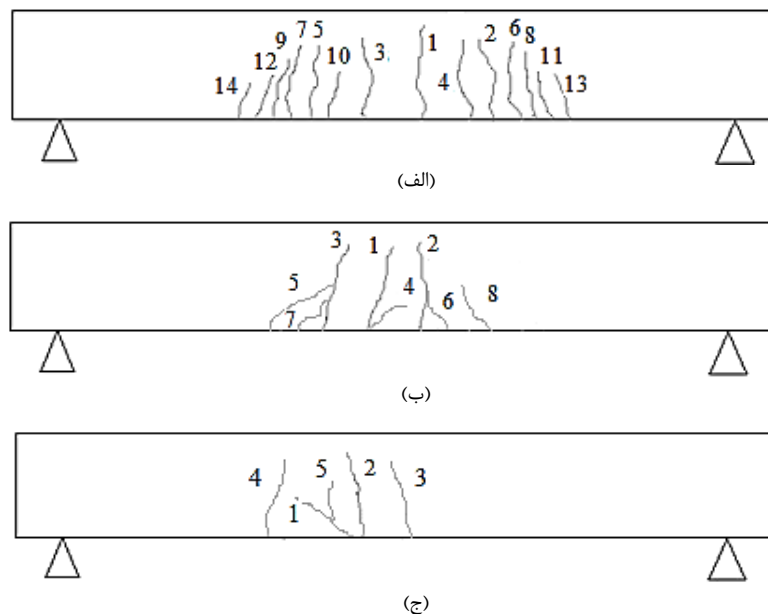
۳-۱- مشخصات ترکها

توزیع ترکها متناظر با لحظه شکست در نمونه های مختلف در شکل (۵) و همچنین چگونگی توزیع ترکها در شکل (۶) نشان داده شده است که ترکها به ترتیب از شماره های ۱، ۲، ۳ شروع شده و ادامه می یابد. در تیر کنترل

اولین ترک در بار 13 kN ایجاد می شود و بعد تعداد ترکها و عرض ترکها گسترش یافته تا بار به 30 kN می رسد در این مرحله، بدون افزایش بار، تغییر مکان افزایش یافته تا در نهایت تیر گسیخته می شود. در تیر مقاوم شده با FRP بدون پیش تنیدگی، ترکها در بار 11 kN شروع شده ولی تعداد و عرض ترک در این تیر نسبت به تیر کنترل کم تر گسترش یافته

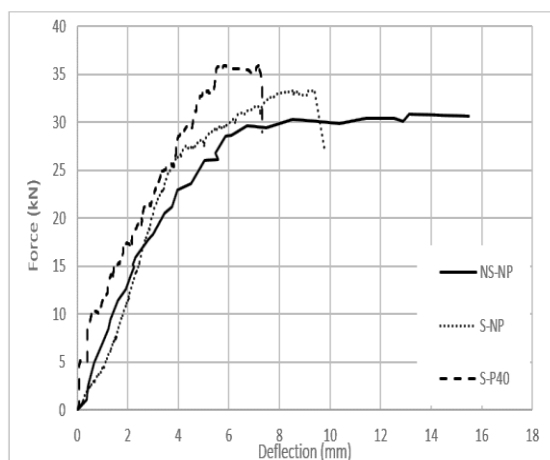
هاشمی و همکاران، ۱۳۹۳) ترک‌های ایجادشده در نمونه تقویت‌شده پیش‌تنیده، دارای عرض و توزیع محدودتر بوده‌اند. همچنین شکست آن‌ها متناظر با خیزهای کوچک‌تری بوده است.

و در بار ۳۳kN، FRP گسیخته می‌شود. اعمال نیروی پیش‌تنیدگی باعث محدودتر شدن تعداد ترک‌ها می‌گردد، ترک‌ها در بار ۱۷kN شروع شده و در بار ۳۶kN، FRP گسیخته می‌شود و تغییر مکان نسبت به تیر مقاوم شده با FRP بدون پیش‌تنیدگی کاهش پیدا کرده است؛ که مطابق با تحقیق (حاجی



شکل ۶- شکل شماتیک توزیع ترک در لحظه نهایی در نمونه‌های مختلف: الف) تیر کنترلی، ب) تیر مقاوم شده با FRP بدون پیش‌تنیدگی، ج) تیر مقاوم شده با FRP پیش‌تنیده

بار نهایی در تیر تقویت‌شده بدون پیش‌تنیدگی در مقایسه با تیر کنترل افزایش یافته است. در مقایسه تیر کنترل و تیر تقویت‌شده پیش‌تنیده، بار نهایی و سختی در تیر تقویت‌شده با صفحه CFRP پیش‌تنیده افزایش یافته است.



شکل ۷- منحنی بار- تغییر مکان وسط دهانه تحت آزمایش خمش سه‌نقطه‌ای در نمونه‌های مختلف

۳-۲- منحنی‌های بار تغییر مکان

اطلاعات ثبت‌شده به وسیله جابه‌جایی‌سنج و نیروسنج وسط دهانه در طول آزمایش در نمونه‌های مختلف در شکل (۷) نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود ظرفیت باربری نهایی در نمونه کنترل (تقویت‌نشده) برابر با ۳۰ کیلو نیوتن می‌باشد. در نمونه تقویت‌شده بدون پیش‌تنیدگی (S-NP) ظرفیت باربری نهایی ۳۳ کیلو نیوتن می‌باشد که ۱۰ درصد افزایش نسبت به تیر کنترل را نشان می‌دهد. با توجه به میزان بسیار پایین CFRP استفاده شده در مقطع $(\rho_f = 0.0038)$ این افزایش متناسب است. ظرفیت باربری نهایی در نمونه تقویت‌شده با CFRP پیش‌تنیده (S-P40)، ۲۰ درصد نسبت به نمونه کنترل و ۱۰ درصد نسبت به نمونه مقاوم‌شده با CFRP بدون پیش‌تنیدگی افزایش می‌یابد. بر این اساس پیش‌تنیده کردن مصالح FRP، ظرفیت باربری نمونه‌ها را به صورت قابل توجهی افزایش می‌دهد که به دلیل استفاده سطح بالاتری از ظرفیت کششی مصالح CFRP می‌باشد. در تحقیق (حاجی‌هاشمی و همکاران، ۱۳۹۳؛ Deng و همکاران، ۲۰۱۱؛ Soudki و Badawi، ۲۰۰۹؛ Deng و همکاران، ۲۰۲۰)

۳-۳- شکل پذیری

مقدار ضریب شکل پذیری تغییرمکان ($\eta\Delta$)، از تقسیم تغییرمکان نهایی هر نمونه (δu) به مقدار تغییرمکان متناظر با تسلیم آن (δy) برای نمونه‌های مختلف محاسبه می‌گردد (Oudah و El-Hacha، ۲۰۱۲). در جدول (۴) ضریب شکل پذیری تغییرمکان برای نمونه‌های مختلف محاسبه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود شکل پذیری در تیرهای مقاوم شده با FRP

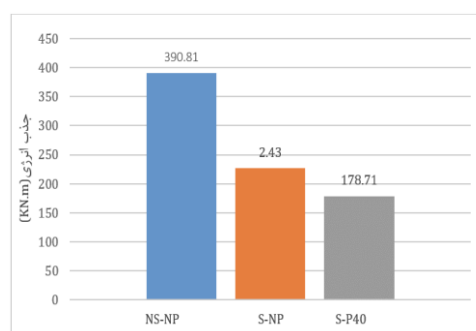
کاهش می‌یابد. این کاهش برای نمونه مقاوم شده با FRP بدون پیش‌تنیدگی و نمونه مقاوم شده با FRP پیش‌تنیده به ترتیب ۷/۵ و ۵۰ درصد نسبت به تیر کنترل است. در تحقیق (Deng و همکاران، ۲۰۱۱؛ Kara و همکاران، ۲۰۱۶) نیز، شاخص شکل-پذیری در تیر تقویت شده با CFRP نسبت به تیر کنترل کاهش و در تیر تقویت شده با CFRP پیش‌تنیده با افزایش مقدار پیش-تنیدگی شکل پذیری کاهش یافته است.

جدول ۴- تغییرات ضریب شکل پذیری در نمونه‌ها (میلی متر)

نمونه	تغییر مکان تسلیم (δy)	تغییر مکان نهایی (δu)	ضریب شکل پذیری	درصد کاهش نسبت به نمونه مبنا
NS-NP	۵/۸	۱۵/۵	۲/۶۷	۰
S-NP	۳/۸	۹/۴	۲/۴۷	۷/۵
SP-40	۵/۵	۷/۳	۱/۳۳	۵۰

۴-۳- جذب انرژی

جذب انرژی نمونه‌ها به صورت سطح زیر نمودار بار-جابجایی وسط دهانه تحت آزمایش خمشی سه نقطه‌ای محاسبه شده است. مطابق شکل (۸) مشاهده می‌شود که جذب انرژی برای نمونه‌های مقاوم شده بدون پیش‌تنیدگی و مقاوم شده با اعمال پیش‌تنیدگی به ترتیب به میزان ۴۱ و ۵۴ درصد کمتر از جذب انرژی نمونه کنترل می‌باشد که نشانگر رفتار تردتر نمونه‌های مقاوم سازی شده است. همان‌طور که انتظار می‌رود با افزودن ورق CFRP، عمق تار خنثی افزایش یافته، کرنش دورترین تار کششی کاهش یافته و در نهایت، از شکل پذیری تیر کاسته شده است.



شکل ۸- مقایسه جذب انرژی تیرها

۵-۳- مقایسه نتایج تحلیل و آزمایش‌ها

مقادیر ظرفیت باربری به دست آمده از انجام آزمایش و ارزیابی تحلیلی در نمونه‌های مختلف بررسی شده است. همان‌گونه که در جدول (۵) نشان داده شده بار نهایی و لنگر خمشی مقاوم به دست آمده از ارزیابی تحلیلی کمتر از مقدار تجربی بوده است. در تحقیق (حاجی هاشمی و همکاران، ۱۳۹۳؛ Kara و همکاران، ۲۰۱۶)، در ارزیابی تحلیلی، نمونه‌ها سخت‌تر از رفتار واقعی خود در نظر گرفته شده‌اند و مقادیر تغییر شکل به دست آمده از ارزیابی تحلیلی، محافظه کارانه‌تر بوده است.

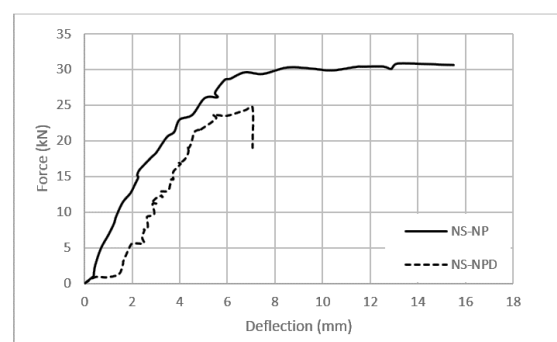
در یک آزمایش دیگر ظرفیت باربری نهایی تیر کنترل آسیب دیده بهسازی شده با FRP به روش EBR به دست آمده و با نمونه کنترل مورد مقایسه قرار گرفته است. بر اساس نمودار شکل (۹) مشاهده گردید که مقاومت نمونه آسیب دیده بهسازی شده هر چند که به حالت اول برگشته است ولی عملکرد قابل قبولی از خود نشان داده است. مقاومت خمشی و تغییرمکان نهایی نمونه به ترتیب ۱۸٪ و ۶۴٪ افت نشان می‌دهد.

جدول ۵- مقایسه نتایج باربری نمونه‌ها بر اساس مقادیر آزمایشگاهی و محاسبات تحلیلی

نمونه	بار نهایی - تجربی (kN)	لنگر نهایی - تجربی (kN.m)	بار نهایی - تحلیلی (kN)	لنگر نهایی - تحلیلی (kN.m)	درصد اختلاف
NS-NP	۳۰	۱۰/۱	۲۶	۸/۸	۱۳/۳
S-NP	۳۳	۱۱/۱	۳۱	۱۰/۵	۱۲
S-P40	۳۶	۱۲/۱۵	۳۵	۱۱/۸	۵/۵

۳-۶- حالت‌های شکست

حالت شکست در تیر کنترل، تسلیم میلگرد کششی و در تیر مقاوم شده به‌روش NSM با تسمه‌های CFRP پیش‌تنیده و بدون پیش‌تنیدگی با مهار انتها، گسیختگی تسمه‌های CFRP است. همچنین حالت شکست در تیر کنترل آسیب‌دیده به‌سازی شده جداولدگی تسمه CFRP در نواحی بدون مهار انتها و سپس گسیختگی تسمه CFRP می‌باشد. در تحقیقات (Xue و همکاران، ۲۰۱۰؛ Yang و همکاران، ۲۰۰۹؛ Soudki و Badawi، ۲۰۰۹) نیز حالت شکست در تیر کنترل، شکست خمشی و در تیر مقاوم شده با صفحه CFRP پیش‌تنیده، گسیختگی FRP گزارش شده است.



شکل ۹- منحنی بار تغییر مکان وسط دهانه تحت آزمایش خمشی سه نقطه‌ای در نمونه کنترل و نمونه کنترل آسیب‌دیده به‌سازی شده

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، برای بررسی تأثیر پیش‌تنیدگی کامپوزیت‌های CFRP در روش نصب نزدیک سطح (NSM) بر مقاومت‌سازی خمشی تیرهای بتنی، ۳ عدد تیر بتن‌آرمه به طول ۱/۵ متر، عرض ۱۰۰ و ارتفاع ۲۰۰ میلی‌متر آماده شد. یک تیر تقویت نشده (کنترل)، یک تیر تقویت شده به‌صورت NSM با FRP معمولی، یک تیر تقویت شده به‌صورت NSM با FRP پیش‌تنیده تا سطح ۴۰ درصد کرنش نهایی اسمی تسمه‌های CFRP ساخته شدند. همچنین تیر کنترل آسیب‌دیده، مقاوم‌سازی شده و مورد آزمایش قرار گرفتند. همچنین نمونه‌ها به‌صورت تحلیلی مورد ارزیابی قرار گرفتند و نتایج تحلیلی و تجربی در کنار هم مقایسه شدند. در ادامه، تعدادی از نتایج مهم ذکر شده‌اند.

۱- مقاومت نمونه مقاوم‌شده به‌روش NSM با تسمه CFRP غیر پیش‌تنیده به‌میزان ۱۰ درصد نسبت به نمونه کنترل (تقویت نشده) افزایش یافته و مقاومت نمونه مقاوم‌شده به‌روش NSM با تسمه CFRP پیش‌تنیده (تا سطح ۴۰ درصد ظرفیت اسمی تسمه‌های CFRP) ۲۰ درصد نسبت به نمونه

کنترل افزایش یافت.

۲- ضریب شکل‌پذیری تغییر مکان برای نمونه مقاوم‌شده با FRP بدون پیش‌تنیدگی و برای نمونه مقاوم‌شده با FRP پیش‌تنیده (تا سطح ۴۰ درصد ظرفیت اسمی تسمه‌های CFRP) نسبت به نمونه کنترل به‌ترتیب به‌میزان ۷/۵ و ۵۰ درصد کاهش یافت.

۳- قبل از انجام آزمایش‌ها یک ارزیابی تحلیلی از نمونه‌ها انجام شد تا بتوان نوع رفتار و مشخصات خمشی هریک از نمونه‌ها را پیش‌بینی کرد. مقایسه بین نتایج تجربی و تحلیلی نشان می‌دهد که بار نهایی و لنگر خمشی مقاوم به‌دست‌آمده از ارزیابی تحلیلی کم‌تر از مقدار تجربی بوده است.

۴- تعداد و نحوه توزیع ترک‌های خمشی حاکی از عملکرد بهتر تیر از نظر ترک‌خوردگی در اثر مقاوم‌سازی به‌روش NSM با استفاده از تسمه‌های CFRP پیش‌تنیده می‌باشد. توجه به مشخصات ترک‌ها نشان می‌دهد که تعداد و پراکندگی ترک‌ها برای نمونه تقویت نشده (کنترل) و نمونه تقویت شده غیر پیش‌تنیده متفاوت است. همچنین با اعمال پیش‌تنیدگی، توزیع ترک‌ها محدودتر و تعداد آن‌ها نیز نسبت به نمونه کنترل و تقویت شده غیر پیش‌تنیده کاهش یافته است. همچنین عرض ترک در تیر مقاوم‌شده با FRP پیش‌تنیده نسبت به تیر مقاوم‌شده با FRP بدون پیش‌تنیدگی و تیر کنترل کاهش یافته است. ترک‌های ایجاد شده در تیر مقاوم شده با CFRP پیش‌تنیده در ناحیه خمشی متمرکز شده است ولی در تیر کنترل، ترک‌ها گسترش یافته‌اند.

۵- جذب انرژی نمونه‌های مقاوم شده بدون پیش‌تنیدگی و مقاوم شده با اعمال پیش‌تنیدگی به‌ترتیب به‌میزان ۴۱ و ۵۴ درصد کم‌تر از جذب انرژی نمونه مبنا می‌باشد.

۶- حالت شکست در تیر کنترل تسلیم میلگرد کششی و در تیر مقاوم شده به‌روش NSM با استفاده از تسمه‌های CFRP پیش‌تنیده و بدون پیش‌تنیدگی با مهار انتها، گسیختگی تسمه‌های CFRP است. همچنین حالت شکست در تیر کنترل آسیب‌دیده به‌سازی شده جداولدگی تسمه CFRP در نواحی بدون مهار انتها و سپس گسیختگی تسمه CFRP می‌باشد.

۵- مراجع

حاجی‌هاشمی ع، مستوفی‌نژاد د، ازهری م، "بررسی تجربی و تحلیلی رفتار تیرهای بتن‌آرمه تقویت شده با تسمه‌های CFRP پیش‌تنیده به‌روش NSM"، فصلنامه مهندسی عمران فردوسی، ۱۳۹۳، ۲۶ (۱)، ۱-۲۴.

ACI, 440.2R-17: Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures, 2017.

prestressed carbon composites", Composite Structures, 2009, 88, 497-508.

Asplund S, "Strengthening bridge slabs with grouted reinforcement", Journal Proceedings, 1949. 397-406.

Badawi M, Soudki K, "Flexural strengthening of RC beams with prestressed NSM CFRP rods- Experimental and analytical investigation", Construction and Building Materials, 2009, 23, 3292-3300.

Barros JA, Fortes A, "Flexural strengthening of concrete beams with CFRP laminates bonded into slits", Cement and Concrete Composites, 2005, 27, 471-480.

Carolin A, Nordin H, Täljsten B, "Concrete beams strengthened with near surface mounted reinforcement of CFRP", International Conference on FRP Composites in Civil Engineering, 2001. Elsevier, 1059-1066.

De Lorenzis L, Teng J, "Near-surface mounted FRP reinforcement: An emerging technique for strengthening structures", Composites Part B: Engineering, 2007, 38, 119-143.

Deng J, Rashid K, Li X, Xie Y, Chen S, "Comparative study on prestress loss and flexural performance of rectangular and T beam strengthened by prestressing CFRP plate", Composite Structures, 2021, 262, 113340.

Deng LN, Chen H, Kang K, "Flexural Strengthening of Reinforced Concrete Beams with Prestressed CFRP Plates", Advanced Materials Research, 2011. Trans Tech Publ, 3077-3081.

El-Hacha R, Wight RG, Green MF, "Innovative system for prestressing fiber-reinforced polymer sheets", Structural Journal, 2003, 100, 305-313.

Kara IF, Ashour AF, Köroğlu MA, "Flexural performance of reinforced concrete beams strengthened with prestressed near-surface-mounted FRP reinforcements", Composites Part B: Engineering, 2016, 91, 371-383.

Khalifa A, Alkhrdaji T, Nanni A, Lansburg S, "Anchorage of surface mounted FRP reinforcement", Concrete International- Detroit, 1999, 21, 49-54.

Meier U, Stocklin I, "Computer controlled adhesion of prestressed CFRP strips", Proc. of Beijing Bonding Technology Symp, 2004, 041.

Nordin H, Täljsten B, "Concrete beams strengthened with prestressed near surface mounted CFRP", Journal of composites for construction, 2006, 10, 60-68.

Oudah F, El-Hacha R, "A new ductility model of reinforced concrete beams strengthened using fiber reinforced polymer reinforcement", Composites Part B: Engineering, 2012, 43, 3338-3347.

Wight R, Green M, Erki M, "Prestressed FRP sheets for poststrengthening reinforced concrete beams", Journal of composites for construction, 2001, 5, 214-220.

Xue W, Tan Y, Zeng L, "Flexural response predictions of reinforced concrete beams strengthened with prestressed CFRP plates", Composite Structures, 2010, 92, 612-622.

Yang DS, Park SK, Neale KW, "Flexural behaviour of reinforced concrete beams strengthened with

EXTENDED ABSTRACT

Strengthening of RC Beams with Prestressed NSM CFRP Laminates

Abbas Mirzamohammadi, Alireza Mohammadjafari Sadeghi*, Hasan Afshin

Faculty of Civil Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran

Received: 23 February 2020; Accepted: 24 January 2021

Keywords:

Reinforced concrete beam, Strengthening, Carbon-fiber-reinforced polymer (CFRP), Near-surface mounted (NSM) method, Prestressing

1. Introduction

In the present paper, results of experimental investigations on the flexural strengthening of reinforced concrete beams using prestressed carbon-fiber-reinforced polymer (CFRP) laminates with near-surface mounted (NSM) method are presented and compared with the results of non-prestressed and non-strengthened specimens. Flexural strength tests of concrete using simple beams with center-point loading are conducted and crack propagation, mid-span load-deflection curves, ductility coefficient, energy absorption capability, and failure modes are discussed.

2. Experimental study

Three beam specimens, according to Fig. 1 are prepared. One of them is not strengthened and is considered the control specimen. The second one is strengthened using two layers of non-prestressed CFRP laminates with dimensions of 20x0.17 mm. The last specimen is also strengthened with CFRP laminates with the same properties of the previous specimen but prestressed up to 40 percent of the ultimate strain of CFRP as Fig. 2. The center-point loading tests are conducted, and the flexural behavior of these specimens is assessed, and the effect of strengthening methods are discussed.

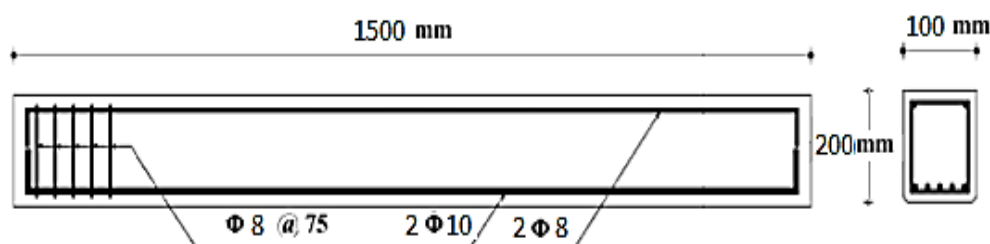


Fig. 1. Dimensions and reinforcement details of beam specimens

* Corresponding Author

E-mail addresses: abbas.civil1374@gmail.com (Abbas Mirzamohammadi) mohammadjafari@sut.ac.ir (Alireza Mohammadjafari Sadeghi), hafshin@sut.ac.ir (Hasan Afshin).



Fig. 2. Prestressing of NSM CFRP

3. Results and discussion

3.1. Crack propagation

The crack propagation under flexural loading until fracture of specimens is shown in Fig. 3 which indicates that prestressing of CFRP laminates restricts the cracks.

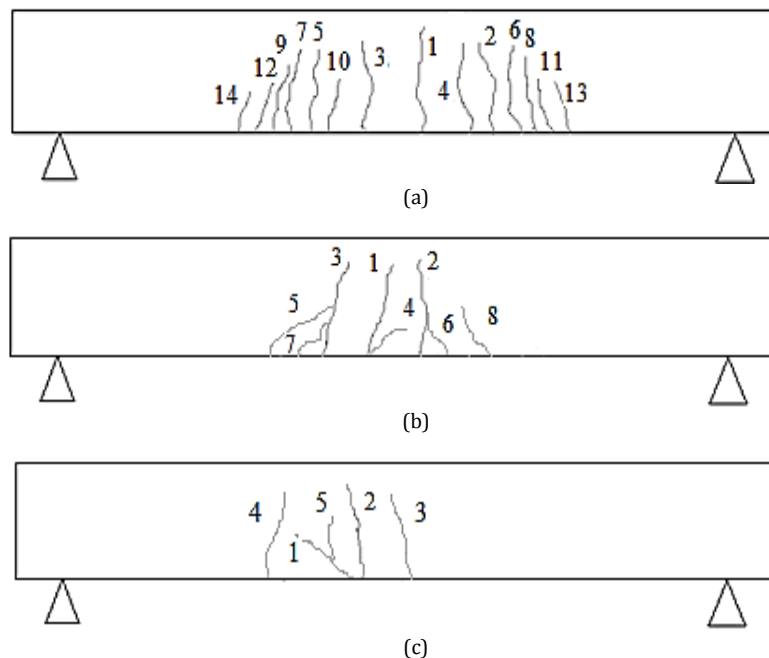


Fig. 3. Crack propagation: a) Control beam specimen, b) Beam specimen strengthened with non-prestressed CFRP laminates, c) Beam specimen strengthened with prestressed CFRP laminates

3.2. Load-deflection curves

Mid-span load-deflection curves under flexural loading of specimens are presented in Fig. 4. As can be seen, the ultimate load capacity of control (NS-NP) and non-prestressed strengthened (S-NP) and prestressed strengthened (S-P40) specimens are 30 kN, 33 kN and 36 kN respectively. Prestressing enhances the flexural strength by utilizing a higher level of tension capacity of FRP materials, while this leads to less ultimate deflection and more brittle behavior.

The displacement ductility coefficient of non-prestressed and prestressed strengthened specimens are decreased by 7.5% and 50% compared to the control specimen, respectively. Furthermore, the energy absorption capabilities of mentioned specimens are 41% and 54% less than the control specimen, respectively. The failure mode of the control specimen was yielding of steel reinforcement, and it was the fracture of CFRP straps in the strengthened specimens.

The observed results are in accordance with studies by (Badawi and Soudki, 2009) and (Xue et al., 2010) and (Yang et al., 2009) and (Deng et al., 2011).

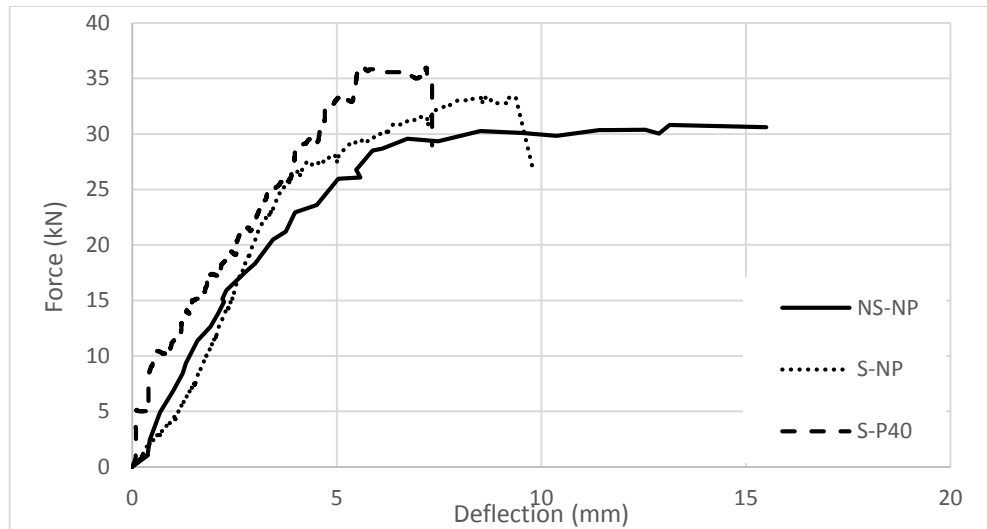


Fig. 4. Mid-span load- deflection curves for specimens under center-point flexural loads

4. Conclusions

The flexural strengthening of RC beams using prestressed CFRP laminates with the NSM method enhances the load-bearing capacity more than non- prestressed CFRP laminates while decreasing ductility because of the deeper neutral axis and less tensile strain in the extreme tension fibers. It is worth mentioning that this method leads to less number of cracks with limited widths.

5. References

- Badawi M, Soudki K, "Flexural strengthening of RC beams with prestressed NSM CFRP rods- Experimental and analytical investigation", *Construction and Building Materials*, 2009, 23, 3292-3300.
- Deng LN, Chen H, Kang K, "Flexural Strengthening of Reinforced Concrete Beams with Prestressed CFRP Plates", *Advanced Materials Research*, 2011. Trans Tech Publ, 3077-3081.
- Xue W, Tan Y, Zeng L, "Flexural response predictions of reinforced concrete beams strengthened with prestressed CFRP plates", *Composite Structures*, 2010, 92, 612-622.
- Yang DS, Park SK, Neale KW, "Flexural behaviour of reinforced concrete beams strengthened with prestressed carbon composites", *Composite Structures*, 2009, 88, 497-508.