

تعمیر تیرهای بتن آرمه تخریب شده به وسیله ورقه‌های CFRP

حسین دورمحمدی¹، پیام حسینی²، عباس بوشهریان²، محمد اسدی²

۱- دانشجوی دکتری سازه و زلزله دانشگاه صنعتی شریف

۲- دانشجوی مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شریف

p.hosseini@civil.sharif.edu

خلاصه

با توجه به ضعف و خسارت پذیری تیرهای اصلی سازه‌ها در برش و خمش به دلیل افزایش بار، لذا می‌توان گفت که مقاوم سازی و در نهایت تعمیر این تیرها مقوله بسیار با اهمیتی در طراحی سازه می‌باشد. همچنین در سالیان اخیر زلزله و آسیب پذیری سازه‌های موجود در مقابل زلزله و بحث رفتار لرزه ای سازه‌ها از مباحث مورد علاقه مهندسين سازه می‌باشد. با توجه به موقعیت جغرافیایی ایران و پتانسیل لرزه‌ای بالای منطقه می‌توان گفت که مبحث فوق مبحثی جدی در مهندسی عمران در سال‌های اخیر می‌تواند باشد. از طرفی وصله زدن خارجی تیرها با کامپوزیت‌های مسلح شده با الیاف پلیمری (FRP) گامی جدید در عرصه تعمیر تیرهای آسیب دیده می‌باشد. کامپوزیت مسلح شده به الیاف کربنی (CFRP) نیز یکی از انواع مقاوم و مطلوب ورقه‌های FRP می‌باشد که امروزه کاربرد وسیعی در بخش‌های مقاوم سازی و تعمیراتی سازه پیدا کرده است. در این مقاله به بررسی نتایج حاصله از آزمایش‌های انجام شده بر روی تیرهای بتن آرمه تخریب شده در جهت تعمیر تیرهای آسیب دیده به وسیله کامپوزیت مسلح شده به الیاف پلیمری کربنی (CFRP) از طریق وصله زدن خارجی می‌پردازیم.

کلمات کلیدی: الیاف کربنی، تعمیر تیرهای بتن آرمه، رفتار خمشی، تیرهای آسیب دیده.

مقدمه

بسیاری از سازه‌های بتن آرمه تخریب می‌شوند. بیشتر آن‌ها تحت اثر عوامل مخرب گوناگونی آسیب می‌بینند: ترک‌ها، خرده شدن بتن، تغییر مکان‌های بزرگ و سایر موارد. بسیاری از فاکتورها منشأ این تخریب‌ها هستند، مانند افزایش عمر سازه، خوردگی فولاد، زمین لرزه، اثرات محیطی و ضربه‌های ناگهانی به سازه. امروزه، نسبت به یافتن روش‌های مناسب تعمیر که در وقت و هزینه صرفه‌جویی می‌کنند نیاز مبرمی احساس می‌شود.

کامپوزیت مسلح شده با الیاف پلیمری (FRP) به عنوان تکنولوژی نوین تقویت کننده‌ی سازه‌ای در پاسخ به نیاز روزافزون تعمیر و تقویت سازه‌های بتن آرمه‌ای پدیدار شده است، که مقاومت بالا، وزن سبک، مقابله در برابر خوردگی، دوام بالا و سهولت نصب از دلایل این امر می‌باشند. الیاف FRP نشان داده‌اند که قابلیت استحکام بخشی به اعضای سازه‌ای و تعمیر انواع سازه‌های بتن آرمه‌ای آسیب‌دیده مانند ستون‌ها، تیرها، دال‌ها، تونل‌ها و سیلوها را دارند. الیاف FRP می‌توانند برای افزایش ظرفیت خمشی و برشی، محصوریت و شکل‌پذیری اعضای فشاری سازه استفاده شوند. الیاف FRP بوسیله‌ی فیبرهای پر مقاومت جاسازی شده در رزین‌های پلیمری مشخص می‌شوند. رایج‌ترین نوع الیاف FRP در صنعت با استفاده از کربن، آرامید یا الیاف شیشه‌ای ساخته می‌شوند. تعمیر تیرها بوسیله‌ی اتصال خارجی کامپوزیت‌های FRP توسط چسباندن ورق‌های FRP در قسمت کششی مقطع تیر انجام می‌شود.

در میان انواع الیاف FRP، استفاده از کامپوزیت مسلح شده به الیاف پلیمری کربنی (CFRP) برای تقویت و تعمیر تیرهای بتنی بیشترین توجه را در میان محافل تحقیقاتی به خود اختصاص داده است. مطالعات نشان داده‌اند که سیستم‌های تقویتی کامپوزیتی به رقیب بسیار جدی برای روش‌های سنتی تقویت بوسیله‌ی فولاد تبدیل شده‌اند. اصولاً تیرهای ارتقاء یافته با استفاده از CFRP با هدف افزایش مقاومت مورد بررسی قرار گرفته‌اند. تحقیقات تأثیر مثبت استفاده از ورق‌های کامپوزیتی در تقویت تیرهای بتن آرمه‌ای را به عنوان آرماتورهای خارجی اثبات کرده‌اند. علاوه بر این، ورق‌های CFRP می‌توانند در تقویت دال‌های یک‌طرفه و دوطرفه به صورت خارجی استفاده شوند. روش دیگری نیز با استفاده از پرتوهای فرابنفش ارائه شده است [1]. این روش سرعت بسیار بالایی دارد اما نیازمند وسایل مخصوص از جمله چشمه‌ی پرتو دهنده‌ی فرابنفش می‌باشد. بیشترین کارهای انجام شده در تعمیر تیرهای بتن آرمه که با الیاف FRP مرتبط هستند روی سازه‌هایی است که بر اثر خوردگی تخریب شده‌اند [2-5].

در این مقاله، تأثیر ورق‌های CFRP بر رفتار خمشی، ظرفیت باربری و صلبیت تیرهای بتن آرمه‌ی آسیب دیده و سپس تعمیر بوسیله‌ی این ورق‌ها مورد بررسی قرار گرفته است [6]. ورق‌های کربنی در قسمت کششی مقطع تیرهای آسیب دیده قرار می‌گیرند. متغیری که بیشترین مطالعه روی آن انجام شده درجه‌ی تخریب است (نسبت بین بار وارد شده برای ایجاد اولین ترک به ظرفیت باربری تیر کنترل)، که مقادیر ۰٪، ۸۰٪، ۹۰٪ و ۱۰۰٪ را به خود گرفته است. علاوه بر این عرض ورق‌ها نیز

تغییر یافته تا تأثیر هندسه‌ی ورق‌ها بر ویژگی‌های مکانیکی تیرهای تعمیر شده مورد بررسی قرار گیرد (50mm و 100mm). نهایتاً، دو نوع بتن برای ساخت تیر استفاده شد: بتن معمولی (C38: دارای مقاومت فشاری میانگین 38MPa) که معمولاً در سازه‌های بتن‌آرمه استفاده می‌شود و یک بتن کم مقاومت (C21) دارای مقاومت فشاری میانگین 21MPa که مشابه بتن ضعیف می‌باشد.

مطالعات آزمایشگاهی

برنامه آزمایشگاهی

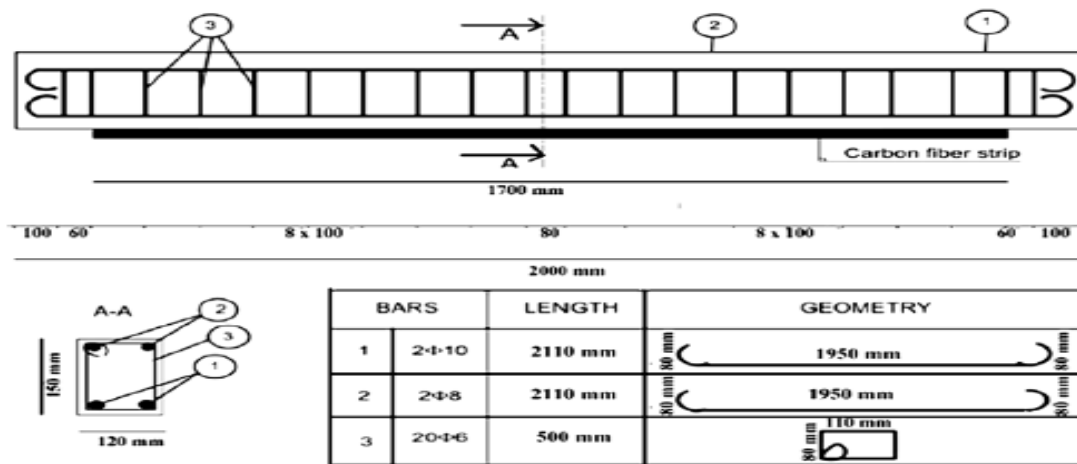
هشت نوع تیر بتن‌آرمه عمل‌آوری شد. یک تیر از هر نوع بتن، بدون ورق‌های کربنی، به عنوان تیر کنترل در نظر گرفته شد (تیر CB1 (بتن C21) و تیر CB2 (بتن C38)). ظرفیت بار قابل حمل توسط تیر کنترل با F نمایش داده می‌شود. برای یافتن درجه‌ی تخریب (D)، بار ثابت (F.D) به تیر وارد می‌شود. به یک تیر با استفاده از رزین‌های اپوکسی در قسمت کششی مقطع ورق‌های کربنی چسبانده شد (تیر RB1). ضریب تخریب این تیر برابر است با $D=0\%$ ، چون در این تیر ترک ایجاد نشده است (تیر مستحکم شده). سایر تیرها تحت ضریب تخریب ثابت تخریب شدند و سپس بوسیله‌ی چسباندن ورق‌های کربنی توسط رزین‌های اپوکسی در قسمت کششی مقطع تعمیر گشتند. سه گروه تیر در این مطالعه آزمایش شدند، دو تیر کنترل، تیر RB1 (تخریب نشده اما مستقیماً مستحکم شده)، و چهار تیر تخریب شدند و سپس با استفاده از مقادیر مختلف ورق‌های کربنی بوسیله‌ی تغییر در ضریب تخریب، تغییر در عرض ورق‌ها، و کلاس‌های مختلف مقاومت بتن، تعمیر گشتند. طول هر ورق که برای تعمیر تیرهای تخریب شده استفاده شد 1700mm است. در پایان، همه‌ی تیرها تحت خمش چهار نقطه‌ای قرار گرفتند. جزئیات برنامه‌ی آزمایشگاهی در جدول ۱ توصیف شده است.

جدول ۱- پارامترهای متغیر برای تیرهایی که در آزمایش مورد استفاده قرار گرفتند

Beam reference	Concrete strength f_{cs} (MPa)	Designation	Damage degree (%)	Width of laminate (mm)
CB1	21	Control beam	-	-
CB2	38	Control beam	-	-
RB1	21	Reinforced	0	100
RB2	21	Repaired	80	100
RB3	21	Repaired	90	100
RB4	21	Repaired	100	100
RB5	21	Repaired	90	50
RB6	38	Repaired	90	100

طراحی تست تیرها

تمامی تیرها از لحاظ ابعاد مقطع، آرماتورهای طولی داخلی و چیدمان خاموتها مشابه بودند. هندسه‌ی تیر و ابعاد آن در شکل ۱ نمایش داده شده‌اند. تیرها 120mm عرض، 150mm ارتفاع و 2000mm طول داشتند. دهانه‌ی تیرها توسط وسیله‌ی بارگذاری محدود شده بود (1800mm). تیرها توسط میله‌های فولادی به قطر 10mm در قسمت کششی و به قطر 8mm در قسمت فشاری آرماتورگذاری شدند. خاموت‌های به قطر 6mm در فواصل 100mm قرار داده شدند. طراحی برشی تمامی تیرها بیش از مقدار مورد نیاز بود تا دچار شکست‌های برشی متعارف نشوند.



شکل ۱- جزئیات تیرهای مورد استفاده در آزمایشات

خصوصیات مصالح

از بتن و فولاد نرمه در آماده سازی نمونه‌های تیرها استفاده شد و نیز ورق‌های یکسویه و چسب اپوکسی برای مقاومت بخشی استفاده شد. جزئیات مصالح به اختصار در زیر بحث شده است.

بتن

دو نوع بتن استفاده شد: C21 دارای مقاومت فشاری میانگین 21MPa و C38 دارای مقاومت فشاری میانگین 38MPa. این مقادیر نتایج بدست آمده از آزمایش‌های مقاومت فشاری نمونه‌ی ۲۸ روزه می‌باشد. سیمان پرتلند معمولی و شن و ماسه‌ی در دسترس برای ساخت بتن مورد استفاده قرار گرفتند و نیز بزرگترین اندازه‌ی سنگدانه‌ی درشت 16mm و ضریب نرمی ماسه ۳,۵۶ بود. جزئیات ویژگی‌های مختلف بتن در جدول ۲ آمده است. ضریب الاستیسیته و مقاومت کششی طبق رابطه ۱ مطابق آیین‌نامه‌ی فرانسوی [7] بدست آمده است.

$$f_c = 0.6 + 0.006f_c \quad E = 11000\sqrt{f_c} \quad (1)$$

جدول ۲- ویژگی‌های مکانیکی مصالح مورد استفاده در تست‌ها

Materials		Elastic modulus (GPa)	Compressive strength (MPa)	Tensile strength (MPa)
Concrete	C21	30	21	1.86
	C38	36	38	2.88
Steel bars	High yield steel	200	400	400
	Mild steel	200	235	235
Carbon fibers laminates		165		2800
Epoxy resin		12.8		4

فولاد

برای تمام تیرهای بتنی، آرماتورهای طولی با شاخصه‌ی مقاومتی 400MPa و مدول الاستیسیته‌ی 200GPa استفاده شد. دو آرماتور پر مقاومت فولادی به قطر 10mm در قسمت کششی مقطع و دو آرماتور پر مقاومت به قطر 8mm در قسمت فشاری قرار داده شد. میله‌های از جنس فولاد نرمه به قطر 6mm با شاخصه مقاومتی 235MPa و مدول الاستیسیته‌ی 200GPa به عنوان خاموت برشی مورد استفاده قرار گرفتند (جدول ۲). نحوه‌ی آرماتور گذاری در شکل ۱ آمده است.

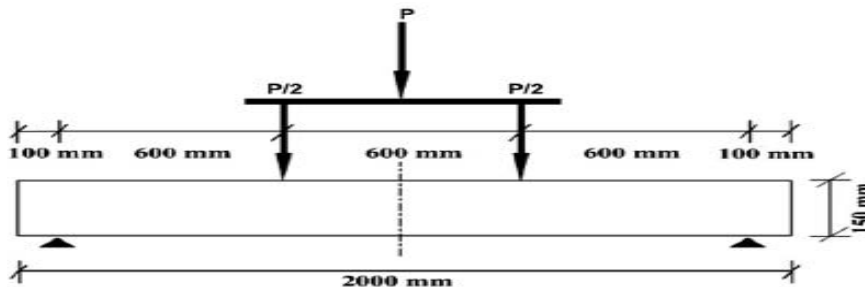
ورق‌های کربنی و چسب‌های اپوکسی

بعد از ۲۸ روز هیدراسیون بتن، شش تیر با ضرایب تخریب مختلف تخریب شدند. سپس، این تیرها با استفاده از ورق‌های کربنی یکسویه تعمیر گشتند (شکل ۱). پنج تیر با ورق‌های به عرض 100mm و یک تیر با ورق 50mm تعمیر شدند.

ورق‌های کربنی بوسیله‌ی رزین‌های اپوکسی چسبانده شدند. ضخامت ورق‌ها 1.2mm می‌باشد. ویژگی‌های مکانیکی ورق‌های کربنی و رزین‌های اپوکسی در جدول ۲ آمده است.

تنظیمات آزمایش

تمامی تیرها در تست خمشی چهار نقطه‌ای با آهنگ ثابت افزایشی 1mm/min در دستگاه یونیورسال با حداکثر ظرفیت باربری 500KN آزمایش شدند. نمودار بار-تغییر مکان توسط دستگاه بدست آمد. تکیه‌گاه‌های تیر را یک مفصل و یک غلطک تشکیل می‌دادند. دهانه‌ی بزرگتر بارگذاری 1800mm و دهانه‌ی کوچکتر 600mm بود. دستگاه‌های آزمایش و محل قرارگیری تجهیزات در شکل ۲ نمایش داده شده است. تیرهای تخریب شده نیز توسط این دستگاه دچار ترک اولیه شدند. بار لازمه برای رسیدن به ضریب تخریب ثابت به تیرها وارد شد. سپس تیرها بوسیله‌ی چسباندن ورق‌های کربنی توسط رزین‌های اپوکسی در قسمت کششی مقطع تعمیر گشتند و تحت بارگذاری قرار گرفتند تا دچار تخریب شوند.



شکل ۲- دستگاه‌های آزمایش و محل قرارگیری بارها

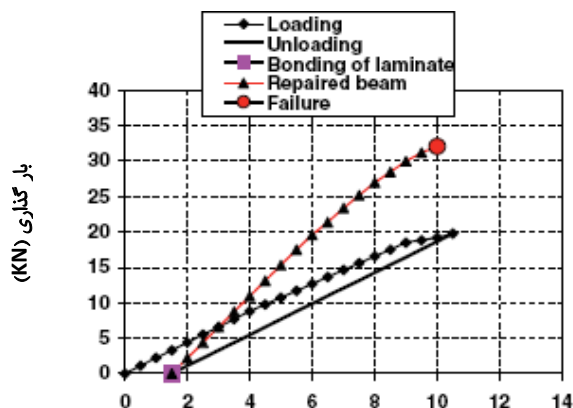
تکنیک تعمیر

مراحل بارگذاری-باربرداری در شکل ۳ نشان داده شده است. بعد از بارگذاری و رسیدن به ضریب تخریب مورد نظر، تیرها باربرداری می‌شوند. نتایج حاصل از بررسی تخریب به صورت زیر می‌باشد:

- ۱- در ۰٪ ضریب تخریب، تیر بدون ترک توسط ورق‌ها تقویت شده است.
- ۲- در ۸۰٪ ضریب تخریب، تیر همچنان بدون ترک در محدوده‌ی الاستیک قرار دارد.
- ۳- در ۹۰٪ ضریب تخریب، دو ترک در هر طرف تیر ایجاد شد و تیر انحنایی برابر 1.8mm داشت. تیر به محدوده‌ی پلاستیک رسید.
- ۴- در ۱۰۰٪ ضریب تخریب، ترک‌های بیشتری ایجاد شد و به انحنای 10.5mm رسید.

بعد از مرحله چهارم، تمامی ترک‌ها و انحنای بدون تغییر باقی ماند و ورق‌های کربنی به تیرها چسبانده شدند. روند چسباندن ورق‌ها به این صورت است: تمامی ذرات ضعیف و جدا شده از سطح قسمت کششی تیر توسط قلم درز خارج شدند. سپس قبل از استفاده از فشار هوا سطوح بوسیله‌ی برس سیمی ساییده شدند تا هیچ گونه گرد و غباری باقی نماند. مشخص است که هیچ رطوبتی بر روی سطح باقی نمی‌ماند. چسب بر سطح آماده شده‌ی بتن و سطح ورق مالیده شد. پس از آن، یک سر

ورق‌های کربنی چسبانده شده و سایر قسمت‌ها با فشار متصل شدند تا تمامی چسب‌های اضافی خارج شوند. آخرین قدم، بارگذاری تیر تعمیر شده تا شکست آن بود (شکل ۳).

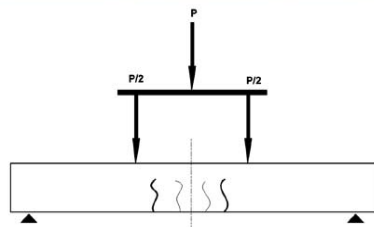


شکل ۳- جزئیات تست‌های انجام شده بر روی تیرهای تعمیر شده

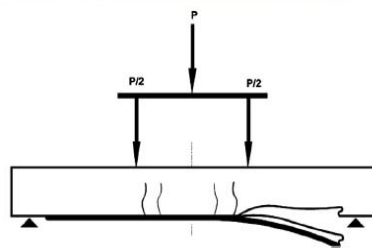
نتیجه‌گیری و بحث در مورد آن

مدهای شکست

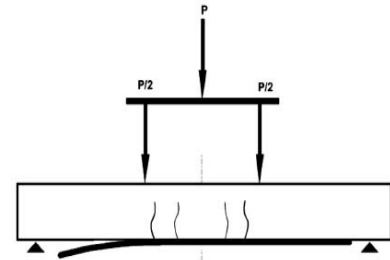
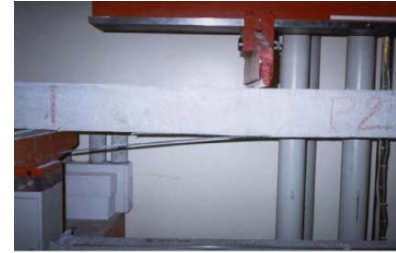
مد شکست در تیرهای کنترل بر اثر جاری شدن آرماتورها بوجود آمد و باعث تغییر مکان زیادی را در تیرها شد. این مدهای شکست از روی شکل ظاهری اولین دو ترک ایجاد شده تحت دو بار شناخته می‌شوند (شکل ۴)، که شکل ریز ترک‌های ایجاد شده بین دو ترک اصلی نیز در این تشخیص مؤثر است. برای تمامی تیرهای تعمیر شده، دو مد شکست در سازه‌های بتنی مشاهده شد: جدا شدن پوسته‌ی بتن (شکل ۵) و انفصال ورق و تیر (شکل ۶). برای تمامی تیرها، هیچ شکستی در ورق-های CFRP ایجاد نشد. جدا شدن پوسته‌ی بتن در تیرهای دارای عرض ورق 100mm و انفصال ورق و تیر در تمامی تیرهای با عرض ورق 50mm مشاهده شد. از این مشاهدات می‌توان نتیجه گرفت که عرض ورق‌ها عامل مؤثری بر مد شکست تیرهای تعمیر شده می‌باشد. در تیرهای با عرض بیشتر، با توجه به اتصال مستحکم در سطح تماس، جدا شدگی پوسته‌ی بتن رخ می‌دهد. در حالیکه در ورق‌های با عرض کمتر، سطح تماس چسبندگی لازم را ایجاد نمی‌کند. مشاهدات مشابهی توسط Gao و همکاران [8] انجام شده اما متغیر مورد مطالعه ضخامت صفحات می‌باشد. شکست در تیرهای کنترل بر اثر جاری شدن آرماتورها بوجود آمد. رفتار الاستوپلاستیک این تیرها با محدوده‌ی پلاستیکی زیاد نمایانگر خاصیت شکل پذیری بالا بود. اما، در تمامی تیرهای تعمیر شده شکست ترد و ناگهانی، بر اثر رفتار الاستیک کامل ورق‌های CFRP دیده شد. بنابراین، خاصیت شکل پذیری تیرهای تعمیر شده کمتر از تیرهای کنترل می‌باشد. این پدیده توسط Ramana و همکاران [9] نیز مورد بررسی قرار گرفت. آنها بیان کردند که، هر چه درجه‌ی استحکام تیرها افزایش می‌یابد، تغییر مکان تحت بار نهایی کاهش پیدا می‌کند، که نشانگر کاهش در خاصیت شکل پذیری تیرهای تقویت شده می‌باشد.



شکل ۴- تخریب تیر کنترلی



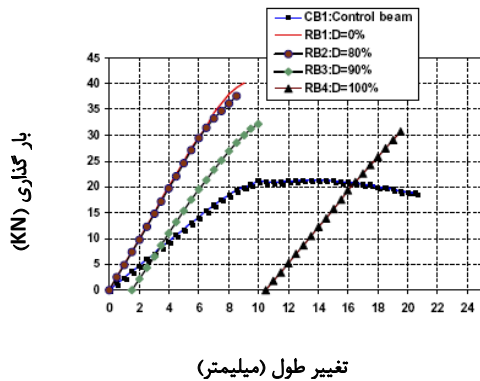
شکل ۵- تخریب تیر تعمیر شده



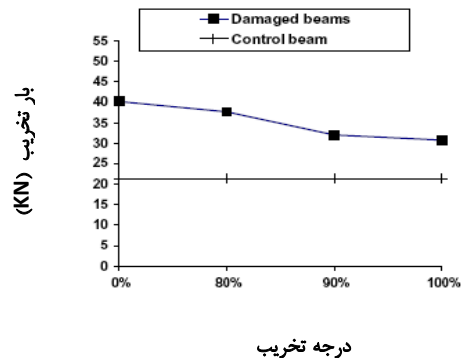
شکل ۶- تخریب تیرهای تعمیر شده با اتصال داخلی

اثر ضریب تخریب تیرها

سؤال این است: « آیا امکان استفاده از ورق‌های CFRP برای هر تیر بتن‌آرمه‌ی تخریب شده وجود دارد؟ ». در این مطالعه، اثر ضریب تخریب بر ظرفیت باربری و صلبیت تیرهای تعمیر شده با استفاده از ورق‌های CFRP مورد مطالعه قرار گرفته است. یک تیر کنترلی CB1 و چهار تیر آسیب دیده آزمایش شده‌اند: RB1 (D=۰٪) (ضریب تخریب)، RB2 (D=۸۰٪)، RB3 (D=۹۰٪) و RB4 (D=۱۰۰٪) و سپس بوسیله‌ی ورق‌های به طول 1700mm و عرض 100mm تعمیر شدند. نمودار بار- تغییر شکل برای هر تیر با ضریب تخریب متفاوت در شکل ۷ نمایش داده شده است. خلاصه‌ی داده‌های بدست آمده برای بار شکست، تغییر مکان در شکست، سهم ظرفیت باربری، ضریب صلبیت، سهم صلبیت و مدهای شکست در جدول ۳ آمده است. سهم ظرفیت باربری، ظرفیت بار حمل شده‌ی تیر تعمیر شده به تیر کنترلی می‌باشد. ضریب صلبیت، حد الاستیک تیر به تغییر مکان متناظر آن می‌باشد. سهم صلبیت، نسبت بین ضریب صلبیت تیر تعمیر شده به ضریب صلبیت تیر کنترلی می‌باشد. با توجه به نتایج نشان داده شده در جدول ۳ و شکل ۷، تیرهای تعمیر شده دارای خواص مکانیکی بهتری، مانند ظرفیت صلبیت و باربری، نسبت به تیرهای کنترلی هستند (ضریب باربری از تیر CB1 به RB1 به اندازه‌ی ۸۷٪ و از تیر CB1 به RB4 حدود ۴۴٪ افزایش یافته است. ضریب صلبیت نیز از تیر CB1 به RB1 تقریباً دو برابر و از CB1 به RB4 به مقدار ۴۷٪ بیشتر شده است). می‌توان نتیجه گرفت که ورق‌های CFRP برای تیرهای تعمیر شده خواص مکانیکی بهتری را فراهم می‌کنند. نتایج این بررسی در شکل ۸ موجود است، که بار شکست را نسبت به ضریب تخریب نمایش داده است. تیر RB1 و RB2 ظرفیت باربری برابر (RB1 = 40.11 kN و RB2 = 37.66 kN) و صلبیت برابر دارند (RB1 = 4.845 kN/mm و RB2 = 4.878 kN/mm) زیرا RB1 (D=۰٪) تخریب نشده بود ولی مستقیماً مستحکم شده بود و RB2 (قبل از تعمیر) به حد الاستیک خود نرسیده بود، پس هر دو تیر خواص مکانیکی مشابهی را بروز دادند. در نهایت می‌توان گفت که رفتار مکانیکی تیرهای تعمیر شده از حالت الاستوپلاستیک به رفتار الاستیکی تغییر یافته است. در نتیجه استفاده از ورق‌های CFRP برای هر ضریب تخریبی در تیرهای بتن‌آرمه مؤثر است و کارایی بالای تیر تعمیر شده مستقیماً به ویژگی‌های مکانیکی قابل ملاحظه‌ی این ورق‌ها بستگی دارد. علاوه بر این، تیرهای با ضریب تخریب ۸۰٪ و ۰٪ مشابه هم عمل کردند و مقادیر بالاتری را در ظرفیت باربری و صلبیت نسبت به تیرهای بتن‌آرمه از خود نشان دادند.



شکل ۷- نمودار بار-تغییر شکل تیرها با درجه تخریب متفاوت



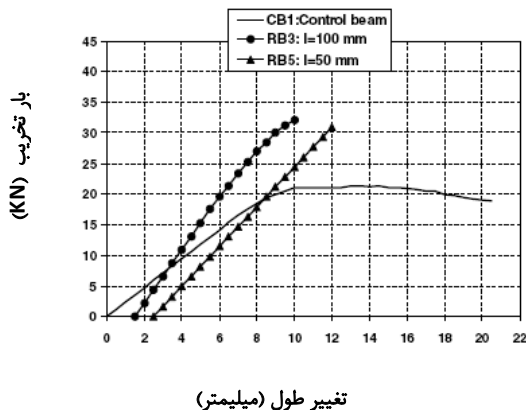
شکل ۸- نمودار بار گذاری تخریب بر حسب درجه تخریب

جدول ۳- خلاصه‌ای از نتایج تست‌های خمشی انجام شده

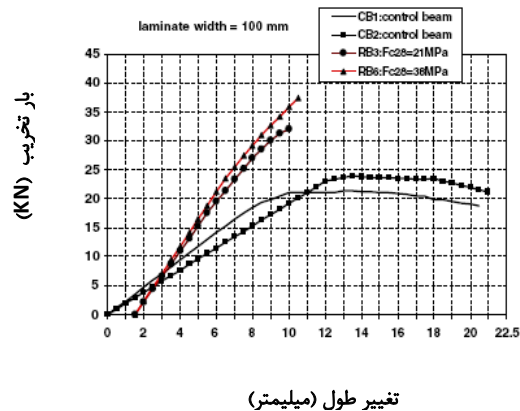
Beam reference	Failure load (kN)	Deflection at failure (mm)	Load capacity contribution (%)	Rigidity coefficient (kN/mm)	Rigidity contribution (%)	Failure modes
CB1	21.41	12.86	-	2.352	-	Steel yielding
CB2	23.92	13.50	-	1.818	-	Steel yielding
RB1	40.11	9.02	187	4.854	206	Peeling off
RB2	37.66	8.65	176	4.878	207	Peeling off
RB3	32.10	9.87	150	4.445	189	Peeling off
RB4	30.75	19.50	144	3.448	147	Peeling off
RB5	30.10	13.50	140	3.225	137	Interfacial debonding
RB6	37.37	10.50	156	4.716	289	Peeling off

تأثیر عرض ورق‌های الیاف کربنی

برای بررسی تأثیر عرض ورق‌های کربنی در ظرفیت باربری و صلبیت تیرهای تعمیر شده، دو تیر مشابه تخریب شدند و سپس با ورق‌های با عرض متفاوت تعمیر شدند: RB3 (L=100mm) که تقریباً ۸۳٪ عرض تیر می‌باشد) و RB5 (L=50mm) که حدوداً ۴۲٪ عرض تیر می‌باشد). در ابتدا، مشخص می‌شود که عرض ورق‌ها بر مدهای شکست تیرهای تعمیر شده تأثیر گذار می‌باشد. این مدهای شکست با افزایش عرض ورق‌ها از ۵۰ به ۱۰۰ میلیمتر، از حالت انفصال ورق و تیر به حالت جدا شدن پوسته‌ی بتن مبدل می‌شود. نتایج دو عرض متفاوت در شکل ۹ که منحنی بار- تغییر مکان را نمایش می‌دهد داده شده است. با توجه به نتایج موجود در جدول ۳ و شکل ۹، ظرفیت باربری‌ها عبارتند از: RB3=32.10 KN و RB5=30.10 KN و ضرایب صلبیت برابرند با: RB3=4.44 KN/mm و RB5=3.22 KN/mm. بنابراین رفتار مکانیکی تیرهای تعمیر شده با دو عرض متفاوت، در موارد ظرفیت باربری و صلبیت، بیشتر از تیرهای کنترل می‌شود (ظرفیت باربری = ۲۱،۴۱KN و ضریب صلبیت = ۲،۳۵ KN/mm). همچنین، می‌توان نتیجه گرفت که افزودن عرض ورق‌ها کمی ظرفیت باربری را افزایش می‌دهد (از ۱۴۰٪ برای RB5 به ۱۵۰٪ برای RB3)، ولی بر صلبیت به صورت قابل توجهی تأثیر می‌گذارد (از ۱۳۷٪ برای RB5 به ۱۸۹٪ برای RB3). بنابراین، برای افزایش ظرفیت بارگذاری، استفاده از ورق‌های مسلح کننده‌ی CFRP با عرض تقریبی نصف عرض تیر مناسب می‌باشد. حتی هنگامی که انفصال بین تیر و ورق رخ می‌دهد، می‌توان با افزایش مقدار ورق‌ها این کاستی را جبران نمود.



شکل ۹- نمودار بار-تغییر شکل برای ورقه‌های با عرض متفاوت



شکل ۱۰- نمودار بار-تغییر شکل برای کلاس‌های مختلف بتن

تأثیر مقاومت بتن

در این مطالعه، تأثیر مقاومت بتن بر ظرفیت باربری و صلبیت تیرهای بتن‌آرمه‌ی تعمیر شده بوسیله‌ی ورق‌های CFRP نیز بررسی شده است. چهار تیر مورد آزمایش قرار گرفتند: CB1 و RB3 با استفاده از بتن C21 (متناظر با بتن‌های ضعیف) و CB2 و RB6 بوسیله‌ی بتن C38 (بتن رایجی که معمولاً در سازه‌های بتن‌آرمه استفاده می‌شود) ساخته شدند. CB1 و CB2 به عنوان تیرهای کنترل در نظر گرفته شدند و RB3 و RB6 تخریب گشتند ($D=90\%$) و سپس بوسیله‌ی ورق‌های با طول 1700mm و عرض 100mm تعمیر شدند. شکل ۱۰ منحنی بار-تغییر مکان را برای این دو کلاس مقاومتی بتن نمایش می‌دهد.

از نتایج موجود در جدول ۳ و شکل ۶، نتیجه می‌شود که برای دو نوع مختلف بتن، رفتار مکانیکی در موارد ظرفیت و صلبیت، بیشتر از تیرهای کنترل است (برای C21، ظرفیت باربری از CB1 به RB3، ۵۰٪ افزایش یافت و ضریب صلبیت از CB1 به RB3 حدود ۸۹٪؛ برای C38، ظرفیت باربری از CB2 به RB6، ۵۶٪ افزایش یافت و ضریب صلبیت از CB2 به RB6 حدود ۱۸۹٪). خاطر نشان می‌شود که دو تیر اگرچه از دو نوع مختلف بتن می‌باشند، اما دارای صلبیت برابر هستند. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که صلبیت تیرهای تعمیر شده فقط تحت تأثیر ورق‌های CFRP می‌باشد. علاوه بر این، تفاوت ظرفیت بین دو تیر (RB3 و RB6) مربوط به افزایش مقاومت بتن است. در پایان، تأثیر ورق‌های CFRP بر روی خواص مکانیکی تیرهای تعمیر شده بتن‌آرمه بیشتر از تأثیر خواص بتن و فولاد بر این تیرها می‌باشد.

نتیجه گیری

در این مطالعه، رفتار مکانیکی تیرهای تعمیر شده بوسیله‌ی کامپوزیت‌ها تحت تست‌های آزمایشگاهی استاندارد مورد بررسی قرار گرفت. دو گروه تیر در این مطالعه آزمایش شدند؛ تیرهای کنترل (بدون ورق‌های CFRP) و تیرهای تعمیر شده با مقادیر مختلف CFRP با تغییر عرض این ورق‌ها، تغییر ضریب تخریب و کلاس مقاومتی بتن. با استفاده از داده‌های بدست آمده از کارهای آزمایشگاهی، می‌توان به نتایج متفاوتی رسید که در زیر آمده است:

- ۱- ویژگی‌های مکانیکی تیرهای بتن‌آرمه‌ای تعمیر شده با استفاده از ورق‌های CFRP بهبود قابل توجهی می‌یابد. بنابراین، حداقل این روش تأثیر بسزایی بر بازگرداندن کارایی‌های مکانیکی تیرهای ترک خورده یا آسیب دیده‌ی بتن‌آرمه‌ای دارد.
- ۲- عرض ورق‌ها بر مدهای شکست تیرهای تعمیر شده تأثیر گذار است. این مدهای شکست با تغییر عرض ورق از 50mm به 100mm از حالت انفصال ورق و تیر به حالت جدا شدن پوسته‌ی بتن مبدل می‌شود.
- ۳- رفتار مکانیکی تیرهای تعمیر شده از حالت الاستوپلاستیک به رفتار الاستیکی تبدیل می‌شود. قابلیت ارتجاعی تیرهای تعمیر شده کمتر از تیرهای کنترل می‌باشد.
- ۴- صلبیت تیرهای تعمیر شده فقط به مقدار ورق استفاده شده در تیرها بستگی دارد.
- ۵- به عنوان نتیجه‌ی کلی می‌توان گفت، برای هر درجه‌ی تخریبی، استفاده از ورق‌های CFRP منجر به بهبود ویژگی‌های مکانیکی تیرهای بتن‌آرمه تعمیر شده می‌شود. برای تمامی تیرهای تعمیر شده، هیچ خرابی یا شکستی در ورق‌ها مشاهده نشد.
- ۶- برای افزایش ظرفیت باربری، استفاده از ورقی با عرض تقریبی نصف عرض تیر مناسب می‌باشد.
- ۷- برای کلاسهای مختلف بتن، ورق‌های CFRP ظرفیت باربری را تقریباً ۵۰٪ افزایش دادند.

- [1] Li G, Ghebreyesus A. (2006) *Fast repair of damaged RC beams using UV curing FRP composites*. Compos Struct. 72(1).105–10.
- [2] Bonacci JF, Maalej M. (2000) *Externally bonded Fiber-Reinforced Polymer for rehabilitation of corrosion damaged concrete beams*. ACI Struc J. 97(5). 703–11.
- [3] Sherwood EG, Soudki K. (2000) *Rehabilitation of corrosion damaged concrete beams with CFRP laminates – a pilot study*. Comp Part B: Engng . 31(6–7). 453–9.
- [4] El Maaddawy T, Soudki K. (2005) *Carbon-Fiber-Reinforced Polymer repair to extend service life of corroded reinforced concrete beams*. ASCE J Compos for Constr . 9(2). 187–94.
- [5] Badawi M, Soudki K. (2005) *Control of corrosion-induced damage in reinforced concrete beams using carbon fiber-reinforced polymer laminates*. ASCE J Compos for Constr. 9(2). 195–201.
- [6] Benjeddou O, Ouezdou M.B, Bedday A. (2007) *Damaged RC beams repaired by bonding of CFRP laminates, Construction and Building Materials*. 21. 1301-1310.
- [7] BAEL. (1992) *Re`gles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en be´ton arme´ suivant la me´thode des e´tats limites*. French Concrete Code Eyrolles ed. (in French).
- [8] Gao B, Kim JK, Christopher KY. (2004) *Experimental study on RC beams with FRP strips bonded with rubber-modified resins*. Comp Sci Tech. 64(16). 2557–64.
- [9] Ramana VPV, Kanta T, Mortonb SE, Duttac PK, Mukherjee A, Desai YM. (2000) *Behavior of CFRPC strengthened reinforced concrete beams with varying degrees of strengthening*. Compos Part B: Eng 31(6–7). 461–70.