



رفتار تیرهای بتن آرمه تقویت شده با ورق‌های CFRP در مقاطع با فولاد کم و زیاد

جواد سبزی، محمدرضا اصفهانی*

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

تاریخچه داوری:

دریافت: ۳۰ فروردین ۱۳۹۶
بازنگری: ۲۱ خرداد ۱۳۹۶
پذیرش: ۱۸ مرداد ۱۳۹۶
ارائه آنلاین: ۲۸ مرداد ۱۳۹۶

کلمات کلیدی:

تیر بتن آرمه
تقویت خمشی
تسلیح خارجی
جداشدگی
CFRP

چکیده: تسلیح خارجی (EBR) روشی مرسوم برای تقویت خمشی تیرهای بتنی با ورق‌های FRP می‌باشد. در این تحقیق تقویت خمشی تیرهای بتن مسلح با استفاده از ورق‌های CFRP مورد بررسی قرار می‌گیرد. ۸ نمونه تیر آزمایشگاهی به ابعاد مقطع ۲۵۰×۳۰۰ میلی‌متر و طول ۲۲۰۰ میلی‌متر با درصدهای مختلف فولاد کششی (مقطع با فولاد کم و زیاد) به روش EBR تقویت شد و به صورت دو سر ساده و تحت خمش چهار نقطه‌ای مورد آزمایش قرار گرفت. ۴ نمونه از آن‌ها با مقاومت معمولی ۲۵ مگاپاسکال و ۴ نمونه‌ی دیگر با مقاومت بالای حدود ۵۵ مگاپاسکال ساخته شدند. برای تقویت تیرها، از دو لایه ورق CFRP به عرض ۱۶۰ میلی‌متر و طول ۱۷۰۰ میلی‌متر استفاده شد و عوامل متعددی نظیر نحوه آرایش میلگردهای کششی، میزان فولاد کششی تیر و مقاومت بتن مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس پژوهش انجام شده، در صورت یکسان بودن مساحت کل آرماتورهای کششی، ریزتر شدن آرایش آرماتورها همراه با افزایش تعداد آن، در مقاطع با درصد فولاد کششی کم، باعث افزایش ظرفیت باربری و تغییر مکان وسط دهانه در لحظه‌ی جداشدگی ورق FRP و برای مقاطع با درصد فولاد کششی زیاد، باعث کاهش آن می‌گردد. همچنین در مقاطع با فولاد کم، استفاده از میلگردهای کم قطر در ناحیه‌ی کششی تیر باعث توزیع یکنواخت‌تر ترک در طول تیر می‌شود.

۱- مقدمه

تاکنون تعداد زیادی از حالات گسیختگی برای تیرهای بتن آرمه‌ی تقویت شده با ورق ساده‌ی FRP در مطالعات آزمایشگاهی مشاهده شده است. این حالات گسیختگی بسیار متنوع بوده و برخی از محققین، این حالات را بیش از ۳۰ مورد عنوان کرده‌اند [۴]. بر پایه مطالعات انجام گرفته توسط محققان مختلف، انواع شکست خمشی نمونه‌های تقویت شده عبارتند از: (۱) تسلیم فولادهای طولی به همراه گسیختگی پلیمرهای الیافی؛ (۲) خرد شدن بتن در فشار قبل از گسیختگی پلیمرهای الیافی؛ (۳) جداشدن انتهای پلیمرهای الیافی از سطح بتن به همراه پوشش بتن روی میلگردهای طولی؛ (۴) جداشدن انتهای پلیمرهای الیافی از سطح بتن به همراه قسمتی از پوشش بتن؛ (۵) (این حالت شکست به ندرت گزارش شده است)؛ (۵) جداشدن پلیمرهای الیافی از سطح بتن به همراه قسمتی از پوشش بتن به علت ترک خمشی؛ (۶) جداشدن پلیمرهای الیافی از سطح بتن به همراه قسمتی از پوشش بتن به علت ترک خمشی-برشی. بر طبق آزمایش‌های انجام شده توسط محققان مختلف، حالت‌های سوم تا ششم بیش‌تر در تیرهایی اتفاق می‌افتد که از مهارهای عرضی استفاده نشده است.

دلایل زیادی برای مقاوم‌سازی یک سازه یا بخشی از آن وجود دارد، ولی با آنچه از مراجعه به آیین‌نامه‌های مرتبط در این زمینه به دست می‌آید، می‌توان به مواردی از قبیل تحمل بارهای بیش‌تر، جبران مقاومت از دست رفته‌ی ناشی از تخریب، اصلاح طراحی و نقص ساختمان‌ها و افزایش شکل‌پذیری به منظور بهبود رفتار لرزه‌ای آن‌ها اشاره کرد [۱].

استفاده از پلیمرهای الیافی در مهندسی عمران در ابتدا به دلیل قیمت بالای مواد اولیه و هزینه‌ی ساخت، به کندی صورت گرفت؛ اما مزایای این مواد نسبت به مصالح مرسوم قابل استفاده در صنعت ساختمان از قبیل: فولاد، بتن و چوب، با وجود هزینه‌های بالای مواد اولیه و ساخت، سبب افزایش استفاده آن‌ها گردیده است. با گذشت زمان، پیشرفت در صنعت ساخت مواد کامپوزیتی، سبب کاهش هزینه‌های ساخت شده است. امروزه علاوه بر تعمیر و تقویت سازه‌های بتن مسلح، در تعمیر و تقویت سازه‌های بنایی نیز از پلیمرهای الیافی استفاده می‌شود [۲].

چاجس و همکاران [۳]، تأثیر پارامترهایی مانند آماده‌سازی سطح بتن، نوع چسب و مقاومت بتن را بر روی مقاومت چسبندگی بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که آماده‌سازی سطح بتن باعث افزایش مقاومت چسبندگی از ۳ تا ۱۰ درصد می‌شود.

- 2 FRP Rupture
- 3 Crushing of Compressive Concrete
- 4 Concrete Cover Separation
- 5 Plate End Interfacial Debonding
- 6 Intermediate Flexural Crack Induced Interfacial Debonding
- 7 Intermediate Flexural-Shear Crack Induced Interfacial Debonding

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

اوبایدت^۵ [۹]، ۱۲ نمونه تیر بتن آرمه به عرض مقطع ۱۵۰ میلی‌متر، ارتفاع ۳۰۰ میلی‌متر و طول ۱۹۶۰ میلی‌متر را مورد آزمایش قرار داد. این ۱۲ نمونه شامل ۴ نمونه کنترلی و ۸ نمونه تقویت شده با ورق CFRP بودند. نتایج این تحقیقات نشان داد سختی تیرهای تقویت شده نسبت به تیرهای کنترلی بیش تر است. هم‌چنین استفاده از ورق‌های CFRP باعث افزایش ظرفیت باربری تیرها شده است. مشاهده شده بود که عرض ترک در نمونه‌های تقویت شده نسبت به نمونه‌های تقویت نشده کم تر بود و تیرهای تقویت شده در انتهای بارگذاری، دارای ترک‌های خمشی بسیار ولی با عرض کم بودند؛ در صورتی که تیرهای کنترلی دارای ترک‌های خمشی کم ولی با عرض زیاد بودند. هم‌چنین اوبایدت و همکاران [۱۰]، نتایج آزمایشگاهی موجود را با استفاده از نرم‌افزار Abaqus مدل‌سازی نموده و تطابق خوبی را بین نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی بدست آوردند.

اصفهان‌ی و همکاران^{۱۱} [۱۱]، ۱۲ نمونه تیر بتن آرمه به ابعاد ۱۵۰×۲۰۰×۲۰۰۰ میلی‌متر، جهت بررسی تقویت خمشی با درصدهای مختلف فولاد کششی (مقطع با فولاد کم، متوسط و زیاد) مورد بررسی قرار دادند. نسبت فولاد کششی موجود به فولاد کششی حالت بالانس نمونه‌ها به ترتیب ۰/۲۷۵، ۰/۴۹۶ و ۰/۶۶۸ بود. ۹ نمونه با ورق‌های FRP تقویت شده و ۳ نمونه‌ی دیگر به عنوان نمونه‌ی کنترلی معرفی شده بودند. این تحقیقات نشان داد مقاومت خمشی و سختی نمونه‌های تقویت شده نسبت به نمونه‌ی تقویت نشده افزایش یافته است. هم‌چنین مشاهده شد پیش‌بینی‌های ACI [۱۲] و ISIS کانادا [۱۳] در مورد تأثیر ورق‌های FRP در افزایش مقاومت خمشی تیرها با نتایج آزمایشگاهی متفاوت بود. مقاومت خمشی حاصل از روابط تحلیلی برای مقاطع با درصد فولاد کششی کم، بیش تر از مقاومت خمشی آزمایشگاهی به دست آمد؛ اما مقاومت خمشی به دست آمده برای مقاطع با درصد فولاد کششی متوسط و زیاد به مقاومت خمشی آزمایشگاهی نزدیک تر بود.

سرونی و همکاران^{۱۴} [۱۴]، تأثیر تقویت تیر با مواد FRP (تسلیح خارجی EBR^۸ و نصب میلگرد نزدیک سطح NSM^۹) را مورد بررسی قرار دادند. در تیرهای تقویت شده با مواد FRP، برای درصد فولاد تقویت کم تر (۱٪) افزایش باربری بین ۲۶ تا ۵۰ درصد و برای درصد فولاد تقویت بیش تر (۵٪) افزایش باربری بین ۱۷ تا ۳۳ درصد بدست آمد. هم‌چنین، این تحقیقات نشان داد که شکل‌پذیری به سبب شکست ترد ناشی از انتهای ورق تقویتی FRP کاهش می‌یابد. در این پژوهش، سیستم NSM استفاده شده در تیرهای بتن آرمه در مقایسه با سیستم EBR (در شرایط مقادیر تقویت مساوی) عملکرد بهتری در بار شکست و شکل‌پذیری داشته است. جامات و همکاران^{۱۵} [۱۵]، روش CBENSMS^{۱۱} را ارائه دادند که ترکیبی از دو روش

رس و همکاران^۱ [۵] ۲۴ تیر بتن آرمه‌ی تقویت شده با ورقه‌های CFRP و درصدهای مختلف فولاد کششی را مورد بررسی قرار دادند. در این آزمایش‌ها میزان فولاد کششی استفاده شده در تیر در ۶ حالت، بین ρ_{min} و ρ_{max} ، انتخاب گردید. نتایج آزمایش‌های انجام شده، دو حالت گسیختگی را نشان داد. برای مقادیر زیاد آرماتور کششی استفاده شده، حالت گسیختگی با خرد شدن بتن ناحیه‌ی فشاری و ایجاد ترک‌های افقی در منطقه کششی تیر و در مجاورت فولادهای کششی توصیف شده است. در مقابل، در تیرهای تقویت شده با آرماتور کششی حداقل تا متوسط (که نسبت سطح مقطع تسلیح خارجی به تسلیح داخلی زیاد است)، اثرات تقویت بسیار واضح و گسیختگی با جداسازی ورق FRP از سطح بتن در ناحیه‌ی انتهایی ورق گزارش شده است.

شین و لی^۲ [۶]، اثرات بارهای موجود را بر رفتار خمشی تیرهای بتن آرمه‌ی تقویت شده با صفحات CFRP بررسی کردند. در این تحقیق تعداد ۸ تیر بتن آرمه با دو نسبت مختلف تسلیح و با سطوح بارهای موجود و مختلف در لحظه‌ی تقویت مورد آزمایش قرار گرفت. این آزمایشات به منظور بررسی وضعیت ترک‌خوردگی و حالت گسیختگی تیر انجام شد. نتایج این آزمایش‌ها نشان می‌دهد که عمدتاً ترک‌ها قبل از زمان تقویت، در تیرهای تقویت شده قادر به رشد بوده و معمولاً ترک‌های جدیدتر به صورت کامل در ارتفاع مقطع تیر، توسعه پیدا نمی‌کنند. هم‌چنین در این آزمایش‌ها، تأثیر سطوح بارهای موجود در لحظه‌ی تقویت بر میزان تغییر شکل تیر در زمان تسلیم و در لحظه‌ی نهایی بسیار بیش تر از مقاومت نهایی تیر عنوان شده است.

اوه و سیم^۳ [۷]، با استفاده از مطالعه‌ی آزمایشگاهی بر روی ۱۱ تیر بتن آرمه‌ی تقویت شده با ورقه‌های کامپوزیتی الیاف شیشه (GFRP)، اثرات طول، ضخامت و عرض ورق تقویتی را بر جداسازی بین سطحی بررسی کردند. نتایج حاصله نشان داد که با افزایش طول ورق تقویتی، نوع گسیختگی می‌تواند تغییر کند. به عبارت دیگر، در حالت استفاده از ورق تقویتی GFRP به طول $0/6 L$ (دهانه مؤثر تیر)، بدون توجه به نوع مهار استفاده شده، گسیختگی تیر با حالت جداسازی پوشش بتن از روی آرماتورهای کششی انجام می‌شود. در این تحقیق، برای کنترل جداسازی پوشش بتن، استفاده از طول ورق تقویتی حداقل به میزان ۸۰٪ طول دهانه‌ی تیر پیشنهاد شده است که در این صورت گسیختگی تیر از نوع جدا شدن بین سطحی خواهد بود.

داتین و استرانس^۴ [۸]، بر روی ۷ تیر بتنی تقویت شده با ورق‌های CFRP که پس از ترک‌خوردگی تیر تحت بار سرویس، تقویت شده بودند، نشان داده شد که با افزایش مقدار تسلیح فولادی، مقاومت اضافی فراهم شده به وسیله‌ی ورقه‌های FRP کاهش می‌یابد. هم‌چنین در مقایسه با تیرهای مسلح بتن آرمه با میزان فولاد زیاد، تیرهای تقویت شده با فولاد و ورقه‌ی کربن برخلاف مود گسیختگی ترد، ظرفیت تغییرشکل کافی از خود نشان می‌دهند.

5 Obaidat

6 Esfahani et al.

7 Ceroni et al.

8 Externally Bonded Reinforcement

9 Near Surface Mounted

10 Jumaat et al.

11 Combined Externally Bonded And Near-Surface Mounted

1 Ross et al.

2 Shin and Lee

3 Sim and Oh

4 Starnes and Duthinh

۲- طراحی و ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی

۲-۱- مشخصات مصالح

دو نوع بتن با مقاومت معمولی (۲۵ مگاپاسکال) و مقاومت بالا (حدود ۵۵ مگاپاسکال) در ساخت نمونه‌ها به کار گرفته شد. برای ساخت بتن با مقاومت ۲۵ مگاپاسکال از سیمان تیپ ۲ با نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۵ استفاده شد و بیشینه‌ی اندازه‌ی سنگ دانه‌ها در این بتن ۱۴ میلی‌متر بود. برای ساخت بتن با مقاومت ۵۵ مگاپاسکال از سیمان تیپ ۲، میکروسیلیس و فوق روان کننده استفاده شد و نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۳ بود. بیشینه‌ی اندازه‌ی دانه‌های مصالح سنگی در این نوع بتن به ۱۰ میلی‌متر محدود شد. خلاصه‌ی نتایج طرح اختلاط بتن‌های مورد نظر در جدول ۱ آورده شده است. برای تعیین مقاومت فشاری مشخصه هر یک از نمونه‌های تیری، ۹ نمونه استوانه‌ای استاندارد به ابعاد ۱۵۰×۳۰۰ میلی‌متر ساخته و در شرایط مشابه نمونه‌های تیری عمل‌آوری گردیدند. سه نمونه استوانه‌ای در سن ۲۸ روز آزمایش شد و سایر نمونه‌ها به عنوان نمونه شاهد در زمان بارگذاری نهایی نمونه‌های تیری شکسته شدند. از ورقه‌های CFRP با ابعاد ۱۶۰×۱۷۰ میلی‌متر به منظور تقویت وجه کششی نمونه‌ها استفاده شد. مشخصات CFRP و چسب مصرفی در جدول ۲ ارائه شده است.

EBR و NSM می‌باشد. آن‌ها با آزمایش بر روی ۶ تیر تقویت شده به این نتیجه رسیدند که این روش برای تیرهای با عرض کم و مواردی که یک روش به تنهایی قادر به تأمین ظرفیت خمشی مورد نیاز نمی‌باشد، مناسب است. همچنین کوتینیا و کولستیاکوف [۱۶] با بهره‌گیری از مزایای این دو روش و آزمایش بر روی ۹ تیر ساخته شده در مقیاس واقعی روش جدیدی پیشنهاد کردند که باعث افزایش سختی و ظرفیت باربری تیر شده و خیز وسط دهانه را به مقدار قابل توجهی کاهش می‌دهد.

المسلم و همکاران^۲ [۱۷] با آزمایش بر روی ۱۱ تیر خمشی به ابعاد ۱۵۰×۲۰۰×۲۲۵۰ میلی‌متر و آنالیز تیرها با روش اجزا محدود به این نتیجه رسیدند که با افزایش درصد آرماتورهای کششی در تیرهای تقویت نشده شکل‌پذیری خیز کاهش یافته و تأثیر تقویت با ورق‌های FRP بر افزایش ظرفیت خمشی کاهش می‌یابد.

جدول ۱: وزن مصالح مصرفی در یک متر مکعب مخلوط بتنی (وزن به کیلوگرم)

Table 1. The weight of the materials used in 1 m³ of concrete mixture (kg)

نوع مصالح مصرفی	بادامی	نخودی	ماسه	سیمان	آب	فوق روان کننده	میکرو سیلیس
بتن با مقاومت معمولی	۴۵۰	۳۲۰	۱۱۰۰	۳۵۰	۱۷۵	---	---
بتن با مقاومت بالا	---	۷۷۲	۸۹۴	۵۲۰	۱۵۶	۳	۲۰/۸

جدول ۲: مشخصات CFRP و چسب مصرفی

Table 2. The properties of consumed CFRP and Adhesive

مشخصات ورق تقویتی الیاف تک جهته	نوع ورق	ضخامت هر لایه (mm)	مقاومت کششی (MPa)	مدول کشسانی (GPa)	کرنش پارگی (%)
	QUANTOM Wrap 300C	۰/۱۶۷	۴۹۵۰	۲۴۰	۱/۵
مشخصات چسب	نوع چسب	ضخامت هر لایه (mm)	مقاومت کششی (MPa)	مدول کششی (MPa)	مدول خمشی (MPa)
	QUANTOM EPR 3301	۰/۴	۴۵	۳۵۰۰	۳۰۰۰

1 Cholostiakow and Kotynia

2 Almusallam et al.

FRP به سطح آماده شده‌ی بتن از روش نصب به شیوه‌ی تر^۱ استفاده شده است. به این منظور ابتدا یک لایه‌ی نازک و یکنواخت از چسب به سطح بتن مالیده شده و سپس ورقه‌های FRP به ابعاد $167 \times 160 \times 1700$ میلی‌متر بر روی سطح مورد نظر و محل مربوطه قرار می‌گیرند؛ در ادامه ورقه‌های FRP توسط چسب کافی کاملاً اشباع می‌گردد و چسب اضافی به وسیله‌ی کاردک برداشته می‌شود. پس از گذشت ۷ روز از چسباندن ورقه‌های FRP، نمونه‌ها آماده بارگذاری می‌باشند. جزئیات نمونه‌های آزمایشگاهی در جدول ۳ ارائه شده است.

نمونه‌ها به صورت کلی E-Fc-aDb نام‌گذاری شده‌اند. که a، b و c به ترتیب تعداد آرماتورهای کششی، قطر آرماتورهای کششی بر حسب میلی‌متر و مقاومت فشاری بتن بر حسب MPa و E نیز بیانگر استفاده از روش EBR برای چسباندن ورقه‌های FRP می‌باشد.

۲-۳- دستگاه و روند آزمایش استاتیکی

نمونه‌ها پس از عمل‌آوری به صورت خمش چهار نقطه‌ای با استفاده از یک جک هیدرولیکی مورد آزمایش قرار گرفتند. آزمایش خمش چهار نقطه‌ای یکی از بهترین و متداول‌ترین آزمایش‌های تیری می‌باشد. در این آزمایش، ناحیه بین دو بار نقطه‌ای دارای لنگر ثابت و برش صفر است؛ بنابراین در این ناحیه، امکان بررسی رفتار تیر تحت خمش خالص وجود دارد. در ناحیه بین هر کدام از بارهای نقطه‌ای و نزدیک‌ترین تکیه‌گاه به آن بار نیز می‌توان اثر توأم خمش و برش را بررسی کرد. بارگذاری به صورت بار استاتیکی و یکنواخت انجام گرفت. تغییر مکان وسط تیر توسط تغییر مکان سنج خطی (LVDT)^۲ و نیرو توسط نیروسنج^۳ به دستگاه ثبت داده‌ها^۴ منتقل شدند و خیز تجربی تیرهای مسلح شده با FRP در وسط دهانه برداشت شد.

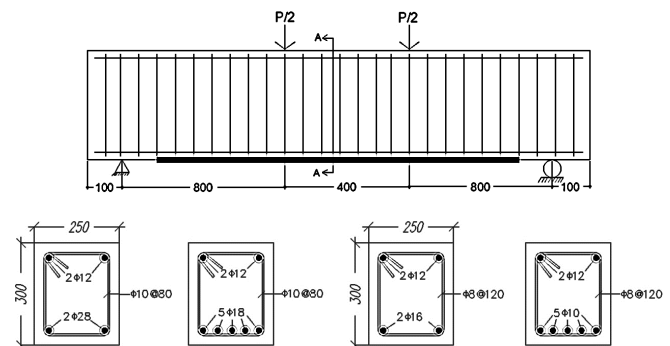
با استفاده از نمودار بار-تغییر مکان به دست آمده از آزمایش، خیز نمونه‌ها در سطوح مختلف بارگذاری و ظرفیت باربری تیرهای تقویت شده با FRP محاسبه گردید. همچنین در مراحل مختلف بارگذاری، مشاهدات ثبت و چگونگی گسترش ترک‌ها ترسیم شد تا چگونگی شکست تیر مشخص گردد.

۳- نتایج آزمایشگاهی

۳-۱- نمونه‌های با درصد آرماتور کششی کم و بتن با مقاومت معمولی

بتن تعداد زیادی ترک‌های ریز به خصوص در حد فاصل سنگدانه‌های درشت و ملات حتی قبل از هرگونه بارگذاری اعمال شده تشکیل می‌دهد [۱۹]. بنابراین انتشار این ترک‌های ریز در حین بارگذاری به رفتار غیرخطی بتن در تنش‌های پایین کمک می‌کند و باعث گسترش حجم بتن در نزدیکی شکست می‌شود. این ترک‌های ریز ممکن است به دلیل جدایی، آب رفتگی

در این پژوهش ۸ تیر بتن‌آرمه تقویت شده با ورق‌های CFRP به طول ۲۲۰۰ میلی‌متر (فاصله بین دو تکیه‌گاه ۲۰۰۰ میلی‌متر) طراحی و ساخته شده است. عرض و ارتفاع مقطع تیرها به ترتیب ۲۵۰ و ۳۰۰ میلی‌متر است. لازم به ذکر است بر اساس سوابق علمی موجود در مسئله‌ی تقویت تیرهای بتن‌آرمه با صفحات 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 ۲/۱۹ متر ذکر شده است [۱۸]. در این تحقیق به منظور مشابهت بیش‌تر با نمونه‌های واقعی، ابعاد با طول متوسط مورد استفاده قرار گرفتند. همچنین با توجه به نحوه‌ی آرایش آرماتورها در مقطع، ابعاد عرضی مقطع تیر به گونه‌ای اختیار شد که تعداد ۵ آرماتور طولی با قطر متوسط ۱۸ میلی‌متر در یک ردیف در مقطع جا داده شود. ۸ نمونه‌ی آزمایشی، مطابق با اهداف مورد نظر در این تحقیق، به روش آماده‌سازی سطحی بتن (EBR) تقویت و مورد آزمایش قرار گرفتند، که ۴ نمونه از آن‌ها با مقاومت پایین ۲۵ مگاپاسکال و ۴ نمونه‌ی دیگر با مقاومت بالای حدود ۵۵ مگاپاسکال انتخاب شدند. ابعاد هندسی و آرایش میلگردهای طولی و عرضی هر یک از نمونه‌ها در شکل ۱ آورده شده است.



شکل ۱: ابعاد هندسی تیرها، آرایش میلگردهای طولی و عرضی نمونه‌ها و بارهای اعمالی (ابعاد بر حسب میلی‌متر)

Fig. 1. Cross sectional dimensions of beam specimens, longitudinal and transverse reinforcement arrangement and loading arrangement (all dimensions are in mm)

۲-۲- روش انجام آزمایش

پس از عمل‌آوری نمونه‌ها انجام فرآیند آماده‌سازی وجه کششی تیر به منظور نصب ورق FRP انجام شد. با استفاده از سنگ فرز و نیز سنگ مخصوص سایش بتن لایه‌ای از وجه مورد نظر برداشته می‌شود، به گونه‌ای که دیگر اثری از شیره‌ی بتن وجود نداشته باشد و سنگ دانه‌های آن نمایان شده باشد. معمولاً این مقدار حدود ۲ تا ۳ میلی‌متر می‌باشد. پس از حذف شیره‌ی بتن، سطح نمونه‌های آماده شده توسط دستگاه جت هوا و جت آب از هر گونه آلودگی و گرد و غبار کاملاً پاک شدند. به منظور اتصال ورقه‌های

1 Wet-Lay-Up

2 Linear Variable Displacement Transducer

3 Load Cell

4 Logger-Data

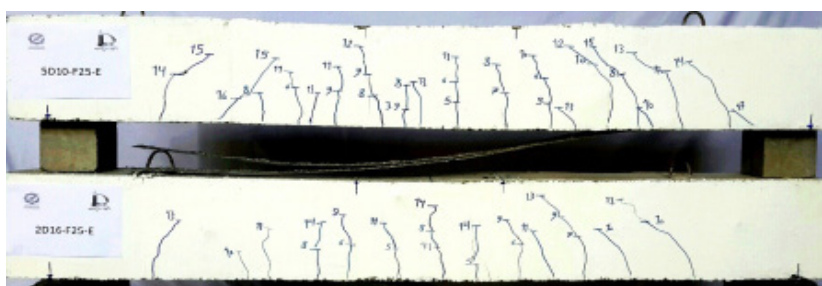
در نمونه‌های 2D16-F25-E و 5D10-F25-E نشان داد که با توزیع آرماتورهای کششی در عرض مقطع (کاهش قطر آرماتورهای کششی)، تعداد ترک در در یک فاصله‌ی ثابت افزایش می‌یابد. به عنوان یک قاعده کلی در مقادیر خیز یکسان، تعداد ترک‌های ایجاد شده در طول تیر، به صورت معکوس با عرض بازشدگی ترک در تناسب است. به عبارت دیگر برای یک خیز ثابت وسط دهانه، افزایش تعداد ترک در طول تیر منجر به کاهش عرض بازشدگی ترک‌ها می‌شود. بررسی رفتار ترک‌خوردگی نمونه‌های 2D16-F25-E و 5D10-F25-E در سطوح مختلف بارگذاری نشان می‌دهد که در یک بار ثابت، با زیاد شدن تعداد آرماتورها، فواصل بین ترک‌ها کاهش می‌یابد. هم‌چنین عرض بازشدگی، تابع قطر میلگردهای کششی است و هر چه میلگردهای با قطر بزرگ‌تر استفاده شود، عرض ترک بزرگ‌تری ایجاد خواهد شد. هر چه عرض ترک‌ها کم‌تر باشد ظرفیت باربری تیر به همان نسبت بیش‌تر خواهد بود. در شکل ۲ الگوی ترک‌خوردگی این نمونه‌ها نشان داده شده است.

(انقباض) و یا انبساط حرارتی در ملات که در حین بارگذاری به دلیل تفاوت سختی بین سنگ دانه‌ها و ملات پیشرفت کرده است، ایجاد شود. مقاومت بتن در تنش‌های کششی به مراتب بسیار کم‌تر از تنش‌های فشاری است و ناحیه‌ی کششی تیر پس از رسیدن بتن به مقاومت کششی، مستعد ترک‌خوردگی می‌شود. در تیرهای بتن آرمه، وجود این تنش‌ها در صورت افزایش بار، اجتناب ناپذیر بوده و تقریباً در ابتدای بارگذاری، ترک یا ترک‌هایی در محل‌های بحرانی که عموماً محل لنگر خمشی حداکثر است، ایجاد می‌شود. با افزایش بارگذاری، سایر نواحی تیر نیز به محض رسیدن به مقاومت کششی بتن، این ترک‌ها را تجربه می‌کنند. در نمونه‌های 2D16-F25-E و 5D10-F25-E، تحت آزمایش خمش چهار نقطه‌ای، اولین ترک خمشی به ترتیب در بارهای ۳۹ و ۴۱ کیلو نیوتن ایجاد گردید. به منظور بررسی تأثیر قطر و فواصل بین میلگردهای کششی، در ظرفیت باربری و الگوی انتشار ترک تیرهای تقویت شده، ترک ایجاد شده در هر مرحله از بارگذاری به همراه میزان بار مربوطه، برای هر یک از نمونه‌ها، به صورت هم‌زمان، در طول آزمایش ثبت گردید. شمارش ترک‌های ایجاد شده

جدول ۳: جزئیات نمونه‌های تقویت شده به روش آماده‌سازی سطحی

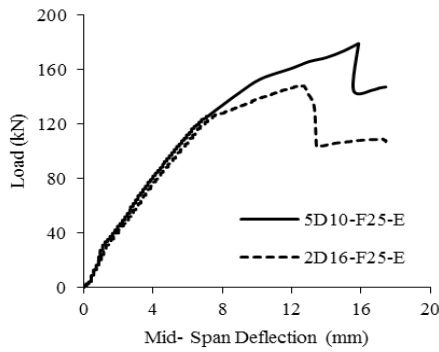
Table 3. Details of the EBR strengthened specimens

نمونه‌ها	مقاومت بتن (MPa)	آرایش آرماتورهای کششی	تنش حد تسلیم آرماتور (MPa)	سطح مقطع آرماتورهای کششی (mm ²)	قطر خاموت (mm)	پوشش جانبی آرماتور	پوشش تحتانی آرماتور	ρ	ρ_{min}	ρ_{max}	ρ/ρ_{max}
2D16-F25-E	۲۵	۲Ø۱۶	۴۵۳	۴۰۲	۸	۳۰	۲۰	۰/۰۰۶۱	۰/۰۰۳۱	۰/۰۱۷۱	۰/۳۶
5D10-F25-E	۲۵	۵Ø۱۰	۴۶۲	۳۹۳	۸	۳۰	۲۰	۰/۰۰۵۹	۰/۰۰۳۰	۰/۰۱۶۷	۰/۳۵
2D28-F25-E	۲۵	۲Ø۲۸	۳۷۹	۱۲۳۲	۱۰	۲۵	۳۰	۰/۰۲۰۰	۰/۰۰۳۷	۰/۰۲۰۴	۰/۹۸
5D18-F25-E	۲۵	۵Ø۱۸	۳۶۷	۱۲۷۲	۱۰	۲۵	۳۰	۰/۰۲۰۳	۰/۰۰۳۸	۰/۰۲۱۱	۰/۹۶
2D16-F55-E	۵۵	۲Ø۱۶	۴۵۳	۴۰۲	۸	۳۰	۲۰	۰/۰۰۶۱	۰/۰۰۴۱	۰/۰۲۹۷	۰/۲۱
5D10-F57-E	۵۷	۵Ø۱۰	۴۶۲	۳۹۳	۸	۳۰	۲۰	۰/۰۰۵۹	۰/۰۰۴۱	۰/۰۲۹۵	۰/۲۰
2D28-F54-E	۵۴	۲Ø۲۸	۳۷۹	۱۲۳۲	۱۰	۲۵	۳۰	۰/۰۲۰۰	۰/۰۰۴۹	۰/۰۳۵۲	۰/۵۷
5D18-F53-E	۵۳	۵Ø۱۸	۳۶۷	۱۲۷۲	۱۰	۲۵	۳۰	۰/۰۲۰۳	۰/۰۰۵۰	۰/۰۳۶۱	۰/۵۶



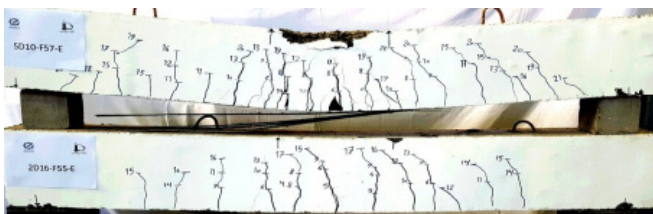
شکل ۲: وضعیت انتشار ترک در نمونه‌های 2D16-F25-E و 5D10-F25-E

Fig. 2. Crack propagation in specimens 2D16-F25-E and 5D10-F25-E



شکل ۳: منحنی بار-تغییر مکان وسط دهانه نمونه‌های 2D16-F25-E و 5D10-F25-E

Fig. 3. Load versus mid-span deflection curve of the specimens 2D16-F25-E and 5D10-F25-E



شکل ۴: ترک‌های ایجاد شده در دو نمونه‌ی آزمایشی 2D16-F55-E و 5D10-F57-E

Fig. 4. Crack propagation in specimens 2D16-F55-E and 5D10-F57-E

منحنی بار-تغییر مکان وسط دهانه برای دو نمونه 2D16-F55-E و 5D10-F57-E در شکل ۵ نشان داده شده است. نمودارها در ناحیه‌ی خطی تقریباً بر یکدیگر منطبق هستند. با افزایش بارگذاری، وضعیت ترک خوردگی به دلیل نحوه‌ی آرایش مختلف آرماتورگذاری، متفاوت شده است و از این رو بعد از ناحیه‌ی خطی منحنی‌های بار-تغییر مکان در نمونه‌های مختلف از هم فاصله می‌گیرند. نحوه‌ی تمایز این منحنی‌ها پس از ناحیه‌ی خطی، به گونه‌ای است که نمونه‌های با قطر کوچک‌تر، بارپذیری بیشتری را از خود نشان می‌دهند. به عبارت دیگر افزایش تعداد میلگردها در مقطع و توزیع آن‌ها در ناحیه‌ی بیشتری از عرض تیر سبب یکنواختی و همگنی بیشتر شده و در نتیجه به بهبود بارپذیری نمونه‌ها منجر شده است. در این حالت با کاهش قطر آرماتورهای کششی، ظرفیت باربری و خیز وسط دهانه نسبت به نمونه مشابه و استفاده از آرماتورهای درشت‌تر، به ترتیب، به میزان ۲۹/۳ و ۳/۳ درصد افزایش یافت. مود شکست هر دو نمونه به صورت جداشدگی ورقه‌ی FRP از سطح بتن بود.

شکل ۳ منحنی بار-تغییر مکان وسط دهانه را برای دو نمونه 2D16-F25-E و 5D10-F25-E که تقویت به روش EBR انجام شده است، نشان می‌دهد. در مراحل اولیه بارگذاری (قبل از ترک خوردگی خمشی بتن)، نمودارهای بار-تغییر مکان‌های نمونه‌ها تقریباً بر هم منطبق هستند. به تدریج با افزایش بار، نمونه‌های با میلگرد کششی ریزتر سختی بیشتری از خود نشان می‌دهند. برای یک نسبت ثابت سطح مقطع میلگردهای کششی، کاهش قطر میلگردها (یا افزایش تعداد آن‌ها)، منجر به افزایش ظرفیت باربری نمونه در یک تغییر مکان ثابت می‌شود. به عبارت دیگر، منحنی‌های بار-تغییر مکان برای نمونه‌های با میلگرد کششی با قطر کوچک‌تر، همواره در بالا دست منحنی‌های مربوط به نمونه‌های با قطر بزرگ‌تر قرار می‌گیرند. کوچک شدن قطر میلگردهای مصرفی، باعث توزیع تنش یکنواخت‌تری در بتن تحت کشش در مقطع تیر شده که افزایش ظرفیت باربری را به دنبال دارد. ظرفیت باربری و خیز وسط دهانه در لحظه جداشدگی ورق FRP برای نمونه‌ی 5D10-F25-E، به ترتیب ۱۷۹ کیلو نیوتن و ۱۵/۹ میلی‌متر قرائت گردید که نسبت به ظرفیت باربری و خیز نمونه‌ی 2D16-F25-E به ترتیب، به میزان ۲۰/۹ و ۲۵/۲ درصد افزایش نشان می‌دهد. مود گسیختگی هر دو نمونه به صورت جداشدگی ورقه‌ی FRP از سطح بتن بوده با این تفاوت که در نمونه‌ی 5D10-F25-E لایه‌ی نازکی از بتن به همراه ورق FRP از سطح تیر جدا شد.

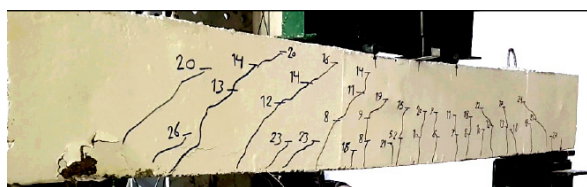
در لحظه‌ی ایجاد اولین ترک خمشی، سختی خمشی تیر کاهش می‌یابد. کاهش شیب ناحیه‌ی خطی منحنی بار-تغییر مکان در شکل ۳ در حدود بار ۴۰ کیلو نیوتن نیز به همین دلیل است. پس از اولین ترک خوردگی، رفتار بار-تغییر مکان به صورت خطی و با سختی کاهش یافته تا مرحله‌ی تسلیم آرماتورهای کششی ادامه پیدا می‌کند. پس از تسلیم آرماتورهای کششی، ورقه‌های FRP در باربری سیستم به صورت مؤثرتر وارد می‌شوند. با ادامه‌ی بارگذاری و عریض شدن ترک‌های ایجاد شده در سطح مشترک ورق تقویتی و سطح کششی بتن، پدیده‌ی جداشدگی زودرس ورق FRP از وجه کششی تیر به وقوع می‌پیوندد. پس از جداشدگی ورق تقویتی، منحنی بار-تغییر مکان دچار ناپیوستگی می‌شود.

۲-۳- نمونه‌های با درصد آرماتور کششی کم و بتن با مقاومت بالا
اولین ترک خمشی در نمونه‌های 2D16-F55-E و 5D10-F57-E به ترتیب در بارهای ۴۸ و ۵۲ کیلو نیوتن ایجاد شد. در شکل ۴ نحوه‌ی گسترش ترک‌ها در مراحل مختلف بارگذاری برای نمونه‌ها مشاهده می‌شود. توجه به فواصل بین ترک‌های ایجاد شده در طول تیر، نشان می‌دهد که افزایش تعداد آرماتور (کاهش قطر آرماتورهای کششی)، در عرض مقطع تیر، باعث کاهش عرض ترک در طول تیر می‌شود. به عبارت دیگر کنترل عرض بازشدگی ترک در نمونه‌های با تعداد بیش‌تر میلگرد، ولی با قطر میلگردهای کوچک‌تر، بهتر صورت می‌گیرد. بازشدگی عرض ترک از جمله علل اصلی جداشدگی ناگهانی ورق تقویتی است، لذا در نمونه‌ی 2D16-F55-E به دلیل بازشدگی بیش‌تر عرض ترک، گسیختگی نمونه سریع‌تر رخ می‌دهد.

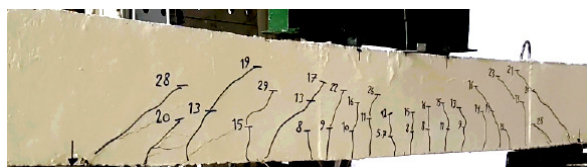
مقاومت‌های معمولی و بالا، هنگام استفاده از آرماتورهای درشت‌تر، بیش‌تر از مقاومت خمشی حاصل از نتایج آزمایشگاهی می‌باشد؛ اما هنگام استفاده از آرماتورهای ریزتر، مقاومت خمشی به دست آمده از روابط آیین نامه در بتن با مقاومت معمولی بیش‌تر و در بتن با مقاومت بالا کم‌تر از مقاومت خمشی حاصل از نتایج آزمایشگاهی می‌باشد. لازم به ذکر است که روابط ارائه شده در آیین نامه ACI440 بر مبنای پارگی ورق FRP می‌باشد در حالی که در نمونه‌های مورد آزمایش، نوع گسیختگی جداسازی ورق FRP از سطح بتن بوده و از کل ظرفیت ورق FRP استفاده نشده است.

۳-۳- نمونه‌های با درصد آرماتور کششی زیاد و بتن با مقاومت معمولی

اولین ترک‌خوردگی در نمونه‌های 2D28-F25-E و 5D18-F25-E به ترتیب در بارهای ۵۷ و ۵۲ کیلو نیوتن ایجاد شد. وضعیت ترک‌خوردگی این دو نمونه در شکل ۶-الف و ب مشاهده می‌شود.



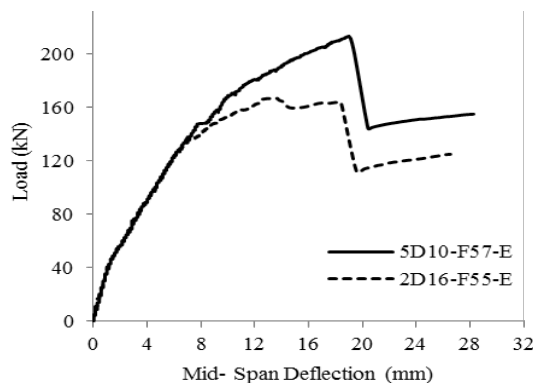
الف) نمونه‌ی 5D18-F25-E



ب) نمونه‌ی 2D28-F25-E

شکل ۶: وضعیت انتشار ترک در نمونه‌های 2D28-F25-E و 5D18-F25-E

Fig. 6. Crack propagation in specimens 2D28-F25-E and 5D18-F25-E



شکل ۵: منحنی بار-تغییر مکان نمونه‌های 2D16-F55-E و 5D10-F57-E

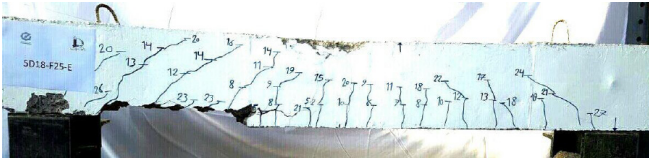
Fig. 5. Load versus mid-span deflection curve of the specimens 2D16-F55-E and 5D10-F57-E

نتایج مربوط به بار اولین ترک، ظرفیت باربری و خیز وسط دهانه در لحظه‌ی باربری حداکثر بر اساس نتایج آزمایشگاهی و ظرفیت باربری بر اساس روابط آیین نامه ACI440 [۱] نمونه‌های با درصد آرماتور کششی کم در جدول ۴ ارائه شده است. همان گونه که از نتایج ارائه شده در این جدول مشاهده می‌شود، استفاده از آرماتورهای درشت‌تر در بتن با مقاومت بالا، ظرفیت باربری را نسبت به نمونه‌ی مشابه در بتن با مقاومت معمولی به میزان ۱۰/۸ افزایش می‌دهد. همچنین در شرایط مشابه خیز در لحظه‌ی باربری حداکثر به به میزان ۴۴/۹ درصد افزایش یافت. مود گسیختگی هر دو نمونه به صورت جداسازی ورق FRP از وجه کششی تیر بود. همچنین، استفاده از آرماتورهای ریزتر در بتن با مقاومت بالا ظرفیت باربری و خیز تیر را نسبت به نمونه‌ی مشابه در بتن با مقاومت پایین، به ترتیب، به میزان ۱۸/۴ و ۱۹/۵ درصد افزایش داد. مود گسیختگی هر دو نمونه به صورت جداسازی ورقه‌ی FRP از سطح بتن بوده با این تفاوت که در نمونه‌ی 5D10-F25-E لایه‌ی نازکی از بتن به همراه ورق FRP از سطح تیر جدا شد. مقاومت خمشی به دست آمده از روابط آیین‌نامه ACI440 در بتن با

جدول ۴: خلاصه‌ی نتایج آزمایشگاهی نمونه‌های با حداقل درصد آرماتور کششی (مقطع با فولاد کم)

Table 4. Summary of experimental results in case of low reinforcement ratio

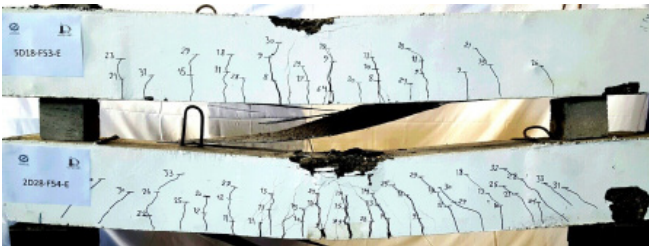
نمونه‌ها	ρ/ρ_{max}	بار اولین ترک (kN)	تغییر مکان بیشینه در وسط تیر (mm)	بار نهایی آزمایشگاهی (kN)	بار به دست آمده بر اساس آیین نامه ACI440 (kN)	نسبت بار نهایی آزمایشگاهی به بار به دست آمده از روابط ACI440
2D16-F25-E	۰/۳۶	۳۹	۱۲/۷	۱۴۸	۱۹۰	۰/۷۸
5D10-F25-E	۰/۳۵	۴۱	۱۵/۹	۱۷۹	۱۹۲	۰/۹۳
2D16-F55-E	۰/۲۱	۴۸	۱۸/۴	۱۶۴	۱۹۶	۰/۸۴
5D10-F57-E	۰/۲۰	۵۲	۱۹/۰	۲۱۲	۱۹۹	۱/۰۶



شکل ۸: جداسازی پوشش بتن در نمونه‌ی 5D18-F25-E

Fig. 8. Concrete cover separation in the specimen 5D18-F25-E

۳-۴- نمونه‌های با درصد آرماتور کششی زیاد و بتن با مقاومت بالا بار ترک‌خوردگی نمونه‌های 2D28-F54-E و 5D18-F53-E به ترتیب در باری حدوداً معادل ۷۹ و ۶۴ کیلو نیوتن مشاهده گردید. در شکل ۹ چگونگی توزیع ترک‌ها در مراحل مختلف بارگذاری نشان داده شده است. آزمایش‌های انجام شده نشان می‌دهند که بر خلاف نتایج مربوط به نمونه‌های قبل با درصد آرماتور کششی کم، با کاهش قطر میلگردهای کششی، فاصله‌ی متوسط بین ترک‌ها افزایش یافته و عرض بازشدگی ترک نیز بیش‌تر شده است.

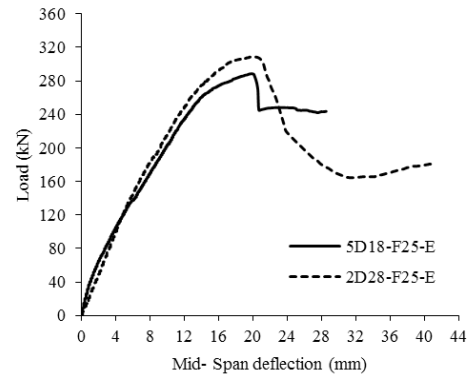


شکل ۹: نمای کلی از وضعیت انتشار ترک در نمونه‌های 2D28-F54-E و 5D18-F53-E

Fig. 9. General view of crack propagation in specimens 2D28-F54-E and 5D18-F53-E

نمودار تغییر مکان نمونه‌های 2D28-F54-E و 5D18-F53-E بر حسب بارهای اعمال شده، در شکل ۱۰ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که مشابه دو نمونه قبل (2D28-F25-E و 5D18-F25-E)، مقدار بار قابل تحمل نمونه‌های تقویت شده، با افزایش تعداد میلگردهای کششی (کاهش قطر میلگردهای مصرفی) کاهش می‌یابد. در یک نسبت ثابت آرماتور، کاهش قطر میلگردهای کششی و هم‌زمان افزایش تعداد آن‌ها ظرفیت باربری و خیز وسط دهانه را نسبت به نمونه‌ی مشابه به ترتیب به میزان ۱۴/۳ و ۹/۷ درصد کاهش داد. مود گسیختگی نمونه‌ی 2D28-F54-E به صورت جداسازی ورق FRP از سطح بتن و مود گسیختگی نمونه‌ی 5D18-F54-E جداسازی ورق FRP به همراه پوشش نازکی از بتن از وجه کششی تیر بود.

شکل ۷ منحنی بار-تغییر مکان وسط دهانه را برای دو نمونه 2D28-F25-E و 5D18-F25-E نشان می‌دهد. آزمایش‌های انجام شده نشان می‌دهند که بر خلاف نتایج مربوط به نمونه‌های قبل با درصد آرماتور کششی کم، کاهش قطر میلگردهای کششی باعث کاهش ظرفیت باربری و تغییر مکان وسط دهانه در لحظه‌ی جداسازی ورق تقویتی می‌شود. در این نمونه‌ها ظرفیت باربری و خیز وسط دهانه در یک نسبت ثابت آرماتور با کاهش قطر آرماتورهای کششی نه تنها افزایشی ندارد بلکه، به ترتیب، به میزان ۶/۵ و ۳/۰ درصد کاهش یافت. در خصوص این ناهماهنگی می‌توان چنین عنوان نمود که افزایش تعداد میلگرد از یک طرف باعث توزیع یکنواخت‌تر میلگرد در عرض مقطع تیر بتنی می‌شود. ولی از طرف دیگر افزایش تعداد میلگرد کششی و کاهش فاصله‌ی آزاد بین میلگردها باعث می‌شود که پوشش بتنی روی آرماتورهای کششی، تحت تأثیر مؤلفه قائم تنش در اتصال انتهای ورق و تیر باعث جدا شدن پوشش بتن گردد.



شکل ۷: منحنی بار-تغییر مکان وسط دهانه نمونه‌های 2D28-F25-E و 5D18-F25-E

Fig. 7. Load versus mid-span deflection curve of the specimens 2D28-F25-E and 5D18-F25-E

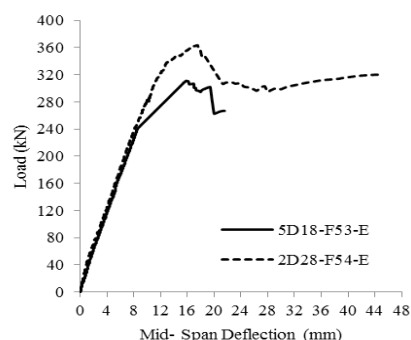
مود شکست نمونه‌ی 5D18-F25-E به صورت جداسازی کامل پوشش بتن (شکل ۸) و مود گسیختگی نمونه‌ی 2D28-F25-E به صورت جداسازی قسمتی از پوشش بتن همراه با ورق FRP از وجه کششی تیر بود. در نمونه‌ی 5D18-F25-E و بار ۱۳۰ کیلو نیوتن، در انتهای ورق پلیمری الیافی، ترک مورب با زاویه‌ی ۴۵ درجه ظاهر گردید. با رسیدن بار به ۲۰۰ کیلو نیوتن، ترک به وجود آمده در دو مسیر مورب و افقی گسترش یافت. ترک افقی در پوشش بتن و زیر آرماتورهای طولی به وجود آمد و با رسیدن به ناحیه‌ی بالنگر ثابت متوقف گردید. نهایتاً در بار ۲۸۹ کیلو نیوتن پوشش بتن از قسمت انتهایی ورقه‌ی FRP از وجه کششی تیر جدا شد.

برای مقاطع با درصد فولاد کششی زیاد در بتن با مقاومت‌های معمولی و بالا، هنگام استفاده از آرماتورهای درشت و ریز به مقاومت خمشی حاصل از نتایج آزمایشگاهی نزدیک است. مشابه با نمونه‌های دارای درصد آرماتور کششی کم، نوع گسیختگی نمونه‌ها جدایش ورق FRP از سطح بتن بوده و از کل ظرفیت ورق FRP استفاده نشده است؛ در حالی که روابط ارائه شده در آیین نامه بر مبنای پارگی ورق FRP می‌باشد.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش ۸ نمونه‌ی آزمایشگاهی با هدف بررسی رفتار تیرهای بتن آرمه‌ی تقویت شده با ورق‌های FRP در مقاطع با فولاد کم و زیاد ساخته و آزمایش شده‌اند و تأثیر پارامترهایی مانند میزان آرماتور کششی (مقطع با فولاد کم و زیاد) و مقاومت بتن مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت. بر اساس این مطالعه، نتایج زیر حاصل شد:

۱. در یک نسبت مساوی آرماتور، کاهش قطر میلگردهای کششی همراه با افزایش تعداد آن برای مقاطع با درصد فولاد کششی کم باعث افزایش ظرفیت باربری و تغییر مکان وسط دهانه در لحظه‌ی جدایش ورق تقویتی گردید.
۲. برای مقاطع با درصد فولاد کششی زیاد، استفاده از آرماتور ریزتر و تعداد بیشتر باعث کاهش ظرفیت باربری و تغییر مکان وسط دهانه می‌شود.
۳. در مقاطع با درصد فولاد کششی کم، چنانچه میلگردهای ناحیه‌ی کششی از قطر کوچک‌تری برخوردار باشند، توزیع آرماتورهای کششی در مقطع، در عرض بیش‌تری انجام شده و این رفتار همگن و یکنواخت‌تر باعث می‌شود ورق تقویتی متصل به تیر نیز در مقابل جدایش زودرس مقاومت بیش‌تری از خود نشان دهد. در مقاطع با درصد فولاد کششی زیاد، افزایش تعداد میلگرد از طرفی باعث توزیع یکنواخت‌تر میلگرد در عرض مقطع تیر بتنی می‌شود؛ اما از طرف دیگر افزایش تعداد میلگرد کششی و کاهش فاصله‌ی آزاد



شکل ۱۰: منحنی بار-تغییر مکان وسط دهانه نمونه‌های 2D28-F54-E و 5D18-F53-E

Fig. 10. Load versus mid-span deflection curve of the specimens 2D28-F54-E and 5D18-F53-E

در جدول ۵ نتایج مربوط به بار اولین ترک، ظرفیت باربری و خیز وسط دهانه در لحظه‌ی باربری حداکثر بر اساس نتایج آزمایشگاهی و ظرفیت باربری بر اساس روابط آیین نامه ACI440 [۱] برای نمونه‌های مورد نظر ارائه شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، استفاده از آرماتورهای درشت‌تر در بتن با مقاومت بالا ظرفیت باربری را نسبت به نمونه مشابه در بتن با مقاومت معمولی به میزان ۱۷/۵ درصد افزایش و خیز در لحظه‌ی باربری حداکثر ۱۲/۴ درصد کاهش می‌دهد. مکانیزم گسیختگی نمونه 2D28-F54-E جدایش ورق FRP و مود گسیختگی نمونه 2D28-F25-E جدایش ورق FRP همراه با قسمتی از پوشش بتن بود. همچنین، استفاده از آرماتورهای ریزتر در بتن با مقاومت بالا ظرفیت باربری را نسبت به نمونه مشابه در بتن با مقاومت معمولی به میزان ۷/۶ درصد افزایش و خیز در لحظه‌ی باربری حداکثر ۱۸/۵ درصد کاهش می‌دهد. مود شکست نمونه‌ی 5D18-F53-E به صورت جدایش ورق FRP به همراه پوشش نازکی از بتن از وجه کششی تیر و مود شکست نمونه 5D18-F25-E جدایش ورق FRP به همراه پوشش بتن می‌باشد. مقاومت خمشی بدست آمده بر اساس آیین‌نامه

جدول ۵: خلاصه‌ی نتایج آزمایشگاهی نمونه‌های با حداکثر درصد آرماتور کششی (مقطع با فولاد زیاد)

Table 5. Experimental results in case of high reinforcement ratio

نمونه‌ها	ρ/ρ_{max}	بار اولین ترک (kN)	تغییر مکان بیشینه در وسط تیر (mm)	بار نهایی آزمایشگاهی (kN)	بار به دست آمده بر اساس آیین نامه ACI440 (kN)	نسبت بار نهایی آزمایشگاهی به بار به دست آمده از روابط ACI440
2D16-F25-E	۰/۹۸	۵۷	۲۰/۱	۳۰۹	۳۰۲	۱/۰۲
5D10-F25-E	۰/۹۶	۵۲	۱۹/۵	۲۸۹	۳۰۹	۰/۹۴
2D16-F55-E	۰/۵۷	۷۹	۱۷/۶	۳۶۳	۳۳۴	۱/۰۹
5D10-F57-E	۰/۵۶	۶۴	۱۵/۹	۳۱۱	۳۴۰	۰/۹۱

- [2] L. Van Den Eende, L. Zhao, F. Seible, b. materials, Use of FRP composites in civil structural applications, 17(6-7) (2003) 389-403.
- [3] M.J. Chajes, W.W. Finch, T.A. Thomson, Bond and force transfer of composite-material plates bonded to concrete, 93(2) (1996) 209-217.
- [4] D.J. Oehlers, manufacturing, Development of design rules for retrofitting by adhesive bonding or bolting either FRP or steel plates to RC beams or slabs in bridges and buildings, 32(9) (2001) 1345-1355.
- [5] C.A. Ross, D.M. Jerome, J.W. Tedesco, M.L.J.S.J. Hughes, Strengthening of reinforced concrete beams with externally bonded composite laminates, 96(2) (1999) 212-220.
- [6] Y.S. Shin, C. Lee, Flexural behavior of reinforced concrete beams strengthened with carbon fiber-reinforced polymer laminates at different levels of sustaining load, 100(2) (2003) 231-239.
- [7] H.S. Oh, J. Sim, Interface debonding failure in beams strengthened with externally bonded GFRP, 11(1) (2004) 25-42.
- [8] D. Duthinh, M. Starnes, Strength and ductility of concrete beams reinforced with carbon fiber-reinforced polymer plates and steel, 8(1) (2004) 59-69.
- [9] Y.T. Obaidat, Retrofitting of reinforced concrete beams using composite laminates, Ph.D. Thesis, Jordan University of Science and Technology, (2007).
- [10] Y.T. Obaidat, S. Heyden, O. Dahlblom, The effect of CFRP and CFRP/concrete interface models when modelling retrofitted RC beams with FEM, 92(6) (2010) 1391-1398.
- [11] M.R. Esfahani, M.R. Kianoush, A.R. Tajari, Flexural behaviour of reinforced concrete beams strengthened by CFRP sheets, 29(10) (2007) 2428-2444.
- [12] ACI 440.2R-02, Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures, Reported by ACI Committee 440, (2002).
- [13] ISIS Canada, Strengthening Reinforced Concrete Structures with Externally-Bonded Fibre Reinforced Polymers, ISIS Canada, (2001).
- [14] F. Ceroni, M. Pecce, S. Matthys, L. Taerwe, Debonding strength and anchorage devices for reinforced concrete elements strengthened with FRP sheets, 39(3) (2008) 429-441.
- [15] M.Z. Jumaat, A.A. Shukri, M. Obaydullah, M.N. Huda, M.A. Hosen, N. Hoque, Strengthening of RC beams using externally bonded reinforcement combined with near-surface mounted technique, 8(7) (2016) 261.

بین میلگردها سبب می‌شود پوشش بتنی روی آرماتورهای کششی، تحت تأثیر مؤلفه قائم تنش در اتصال انتهای ورق و تیر قرار گرفته و باعث جدا شدن پوشش بتن گردد.

۴. علت اصلی جداسازی ورق تقویتی از نمونه‌های حاوی درصد‌های مختلف آرماتور کششی (مقطع با فولاد کم و زیاد)، بازشدگی عرض ترک می‌باشد؛ ولی شکل‌گیری ترک‌های منجر به گسیختگی در این نمونه‌ها بسته به میزان آرماتور کششی و ریز و درشت بودن این آرماتورها متفاوت است. در مقاطع حاوی درصد فولاد کششی کم، با افزایش تعداد میلگردهای کششی، فاصله‌ی متوسط بین ترک‌ها کم‌تر و عرض ترک‌ها کاهش می‌یابد به همین دلیل ظرفیت باربری و خیز وسط دهانه در لحظه‌ی جداسازی ورق تقویتی، بیش‌تر می‌باشد. اما در مقاطع با درصد آرماتور کششی زیاد، با کاهش قطر میلگردهای کششی تعداد ترک‌ها کاهش و عرض ترک‌ها افزایش می‌یابد؛ لذا به دلیل بازشدگی بیش‌تر عرض ترک خمشی در این نمونه‌ها، جداسازی ورق FRP زودتر رخ می‌دهد و به همین علت ظرفیت باربری و تغییرمکان وسط دهانه در لحظه‌ی جداسازی ورق FRP، کم‌تر می‌باشد.

۵. با افزایش مقاومت فشاری بتن، چسبندگی ورق FRP به بتن بهبود می‌یابد؛ این مسئله ضمن افزایش ظرفیت خمشی منجر به کاهش احتمال جداسازی ورق FRP به همراه پوشش بتنی در هنگام استفاده از آرماتورهای ریز در مقاطع با درصد آرماتور کششی زیاد می‌شود؛ اما افزایش مقاومت فشاری بتن در مقاطع با فولاد کم و استفاده از آرماتورهای ریز، احتمال جداسازی ورق FRP به همراه پوشش نازکی از بتن را کاهش می‌دهد.

۶. از مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی و نتایج به‌دست آمده از روابط آیین‌نامه ACI440 مشاهده می‌شود که مقاومت خمشی برای مقاطع با درصد فولاد کششی کم، هنگام استفاده از آرماتورهای درشت در بتن با مقاومت‌های معمولی و بالا، بیش‌تر از مقاومت خمشی آزمایشگاهی است؛ اما هنگام استفاده از آرماتورهای ریز‌تر، مقاومت خمشی حاصل از روابط آیین‌نامه برای بتن با مقاومت معمولی بیش‌تر و برای بتن با مقاومت بالا کم‌تر از مقاومت خمشی آزمایشگاهی می‌باشد. مقاومت خمشی بتن با مقاومت‌های معمولی و بالا برای مقاطع با درصد فولاد کششی زیاد، هنگام استفاده از آرماتورهای درشت و ریز به ترتیب بیش‌تر و کم‌تر از مقاومت خمشی حاصل از نتایج آزمایشگاهی می‌باشد.

مراجع

- [1] ACI 440.2R-08, Guide for the Design and Construction of Externally Bonded Frp Systems for Strengthening Concrete Structures, Reported by ACI Committee 440, (2008).

- [18] J.F. Bonacci, Strength, failure mode and deformability of concrete beams strengthened externally with advanced composites, in: Proceedings Of The 2nd International Conference On Advanced Composite Materials In Bridges And Structures, Acmb-I, Montreal (1996).
- [19] W.F. Chen, A.F. Saleeb, Constitutive equations for engineering materials, Vol. 1: Elasticity and modeling, in, Wiley, New York, (1982).
- [16] R. Kotynia, S. Cholostiakow, New proposal for flexural strengthening of reinforced concrete beams using CFRP T-shaped profiles, 7(11) (2015) 2461-2477.
- [17] T.H. Almusallam, H.M. Elsanadedy, Y.A. Al-Salloum, Effect of Longitudinal Steel Ratio on Behavior of RC Beams Strengthened with FRP Composites: Experimental and FE Study, 19(1) (2014) 04014028.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

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.

DOI: 10.22060/ceej.2017.12793.5270



