



تقویت خمشی تیرهای بتن مسلح با ورقهای پلیمری مسلح شده با الیاف

علیرضا تجری، دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی

محمد رضا اصفهانی، دانشیار، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی

تلفن: ۰۵۱۱-۸۱۵۱۰۰، نمابر: ۰۵۱۱-۸۶۲۹۵۴۱، پست الکترونیکی: esfahani@ferdowsi.um.ac.ir

چکیده

در این مقاله تقویت خمشی تیرهای بتن مسلح با استفاده از ورقهای پلیمری مسلح شده با الیاف (FRP) مورد بررسی قرار می‌گیرد. دوازده عدد نمونه تیر آزمایشگاهی به عرض مقطع ۱۵۰ میلیمتر، ارتفاع ۲۰۰ میلیمتر و طول ۲۰۰۰ میلیمتر با درصدهای مختلف فولاد کششی (مقطع با فولاد کم، متوسط و زیاد) ساخته شد. نه نمونه با ورقهای پلیمری الیافی کربنی تقویت شدند و سه نمونه دیگر به عنوان نمونه کنترلی تقویت نشده مورد آزمایش قرار گرفتند. پهنا و تعداد لایه‌های ورقهای پلیمری الیافی در نمونه‌های مختلف متفاوت در نظر گرفته شده بود. آزمایشها به صورت خمش چهار نقطه‌ای انجام شد. نمونه‌های تقویت شده نسبت به نمونه‌های کنترلی دارای مقاومت و سختی خمشی بیشتر و شکل پذیری تغییر مکانی کمتری بودند. همچنین، نتایج تحقیق نشان می‌دهد که روابط طراحی دو آیین نامه ACI440.2R-02 آمریکا و ISIS کانادا اثر تقویت کنندگی ورق های (FRP) در مقاومت تیرهای خمشی با فولاد کم را دست بالا برآورد می‌کند.

کلیدواژه‌ها: ورقهای پلیمری الیافی، بتن مسلح، تقویت خمشی

تقویت خمشی تیرهای بتن مسلح با ورقهای پلیمری مسلح شده با الیاف

علیرضا تجری، دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی

محمدرضا اصفهانی، دانشیار، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی

تلفن: ۰۵۱۱-۸۸۱۵۱۰۰ شماره: ۰۵۱۱-۸۶۲۹۵۴۱ پست الکترونیکی: esfahani@ferdowsi.um.ac.ir

چکیده

در این مقاله تقویت خمشی تیرهای بتن مسلح با استفاده از ورقهای پلیمری مسلح شده با الیاف (FRP) مورد بررسی قرار می‌گیرد. دوازده عدد نمونه تیر آزمایشگاهی به عرض مقطع ۱۵۰ میلیمتر، ارتفاع ۲۰۰ میلیمتر و طول ۲۰۰۰ میلیمتر با درصدهای مختلف فولاد کششی (مقطع با فولاد کم، متوسط و زیاد) ساخته شد. نه نمونه با ورقهای پلیمری الیافی کربنی تقویت شدند و سه نمونه دیگر به عنوان نمونه کنترلی تقویت نشده مورد آزمایش قرار گرفتند. پهنا و تعداد لایه‌های ورقهای پلیمری الیافی در نمونه‌های مختلف متفاوت در نظر گرفته شده بود. آزمایشها به صورت خمش چهار نقطه‌ای انجام شد. نمونه‌های تقویت شده نسبت به نمونه‌های کنترلی دارای مقاومت و سختی خمشی بیشتر و شکل پذیری تغییر مکانی کمتری بودند. همچنین، نتایج تحقیق نشان می‌دهد که روابط طراحی دو آیین نامه ACI440.2R-02 آمریکا و ISIS کانادا اثر تقویت کنندگی ورق های (FRP) در مقاومت تیرهای خمشی با فولاد کم را دست بالا برآورد می‌کند.

کلیدواژه‌ها: ورقهای پلیمری الیافی، بتن مسلح، تقویت خمشی

۱- مقدمه

یکی از روشهای جدید ترمیم و تقویت سازه‌ها، استفاده از مواد کامپوزیتی به صورت پلیمرهای مسلح شده با الیاف که در یک رزین پلیمری قرار داده شده‌اند، می‌باشد. رزین به منظور نگهداری و حفاظت از الیاف و انتقال تنش برشی مورد استفاده قرار می‌گیرد. برخی از مزایای این مواد نسبت به سایر مصالح مورد استفاده در تعمیر و تقویت سازه‌های بتن مسلح که سبب گردیده است این مصالح از توجه خاصی برخوردار باشند، عبارتند از: نسبت بالای مقاومت و سختی به وزن، مقاومت در برابر خوردگی، نارسا بودن، مقاومت در برابر حملات شیمیایی، راحتی نصب و هزینه پایین مراقبت و نگهداری.

۲- انواع شکست خمشی

برپایه 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 یافی؛ ۳) جداشدن انتهای پلیمرهای یافی از سطح بتن به همراه پوشش بتن روی میلگردهای طولی؛ ۴) جداشدن انتهای پلیمرهای یافی از سطح بتن به همراه قسمتی از پوشش بتن؛ ۵) جداشدن پلیمرهای یافی از سطح بتن به همراه قسمتی از پوشش بتن به علت ترک خمشی؛ ۶) جداشدن پلیمرهای یافی از سطح بتن به همراه قسمتی از پوشش بتن به علت ترک خمشی-برشی.

جداشدن انتهای پلیمرهای یافی از سطح بتن (حالت‌های ۳ و ۴) به علت ایجاد تمرکز تنش‌های برشی و قائم در انتهای ورق‌های پلیمری یافی می‌باشد. مقدار تنش برشی ماکزیمم در انتهای صفحه پلیمری یافی با افزایش ضخامت ورق‌های پلیمری یافی و مدول الاستیسیته چسب، افزایش و با افزایش ضخامت لایه چسب کاهش می‌یابد. همچنین، مقدار تنش کششی قائم ماکزیمم، با افزایش ضخامت لایه چسب کاهش می‌یابد. این حالت شکست به صورت آزمایشگاهی، تحلیلی و مدل‌های اجزای محدود در مراجع [۵-۱] بررسی شده است. حالت دیگر از شکست‌های خمشی نام‌برده شده، جداشدن پلیمرهای یافی از سطح بتن به همراه قسمتی از پوشش بتن به علت ترک خمشی-برشی یا ترک خمشی می‌باشد. این نوع شکست بستگی به رفتار تنش پیوستگی-لغزش بین ورق‌های پلیمری یافی و بتن دارد و در اعضای لاغر و اعضای که با لایه نازکی از ورق‌های پلیمری یافی تقویت شده‌اند، محتمل‌تر است. همچنین، خوردگی فولادهای طولی و کاهش ناگهانی در سطح مقطع فولادهای طولی در محل لنگرهای خمشی و نیروهای برشی بزرگ، احتمال این نوع شکست را افزایش می‌دهد [۶ و ۷].

۳- کار آزمایشگاهی

۳-۱- مصالح

طراحی اولیه نمونه‌ها براساس مقاومت فشاری استوانه‌ای بتن ۲۵ مگاپاسکال انجام گرفت. طرح اختلاط بتن مورد استفاده در جدول ۱ آورده شده است. همچنین در هنگام ساخت نمونه‌ها، آرماتورهای مورد استفاده تحت آزمایش کشش قرار گرفتند که مقاومت تسلیم آنها بین ۳۶۵ تا ۴۰۶ مگاپاسکال قرار داشت.

جدول ۱: طرح اختلاط بتن

آب	سیمان	ماسه	شن ^x
۱۶۴ (kg/m ³)	۳۵۰ (kg/m ³)	۱۱۰۰ (kg/m ³)	۷۸۰ (kg/m ³)

^x اندازه حداکثر دانه‌ها ۱۴ میلی‌متر می‌باشد

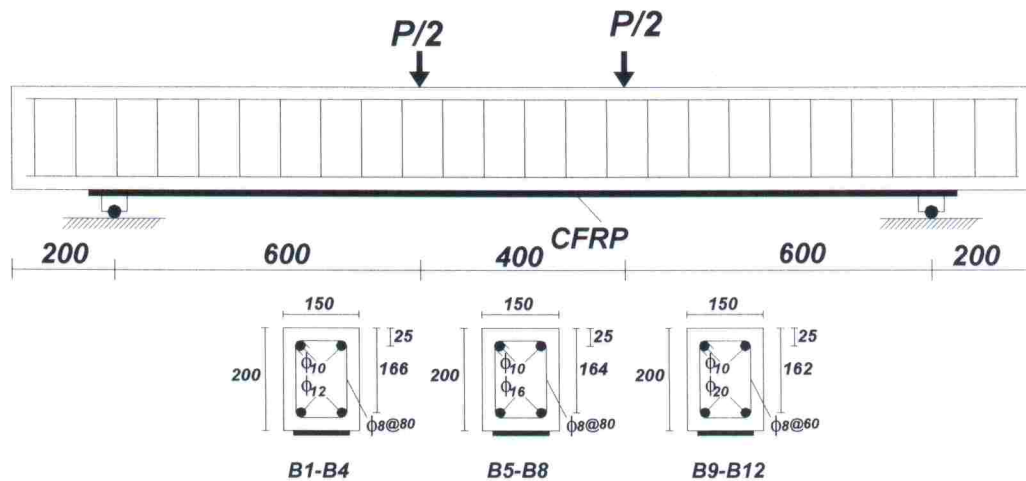
جدول ۲: مشخصات مکانیکی الیف کربنی C-Sheet240

ضخامت هر لایه (mm)	کرنش نهایی (%)	مقاومت کششی (MPa)	مدول الاستیسیته (GPa)
۰/۱۷۶	۱/۵۵	۳۸۰۰	۲۴۰

برای تقویت نمونه‌ها از ورقهای پلیمری الیافی یک جهتی کربنی استفاده شد که مشخصات مکانیکی آنها در جدول ۲ آورده شده است. قبل از اعمال ورقهای پلیمری الیافی، به منظور برداشتن روغن و شیره بتن از سطح نمونه‌ها، سطح نمونه‌ها با استفاده از دستگاه فرز سائیده شد. چسب مورد استفاده از دو قسمت رزین و سخت کننده به نسبت وزنی ۲ به ۱ ساخته شد. چسب با استفاده از قلم مو بر روی سطوح اعمال گردید و سپس ورقهای پلیمری الیافی به صورت خشک بر روی نمونه‌ها قرار داده شدند و برای خارج نمودن هوای محبوس از لوله غلطکی استفاده شد و سپس یک لایه چسب بر روی پلیمرهای الیافی اعمال گردید. در صورت اعمال چند لایه، فرآیند فوق تکرار شد. حداقل زمان لازم برای عمل آوری چسب قبل از بارگذاری یک هفته در نظر گرفته شد.

۳-۲- نمونه‌های آزمایشگاهی

دوازده نمونه به عرض مقطع ۱۵۰، ارتفاع ۲۰۰ و طول ۲۰۰۰ میلیمتر، جهت بررسی تقویت خمشی با درصد‌های مختلف فولاد کششی (مقطع با فولاد کم، متوسط و زیاد) ساخته شد. در تمامی نمونه‌ها از دو میلگرد به قطر ۱۰ میلیمتر جهت تسلیح فشاری، میلگردهای به قطر ۱۲، ۱۶ و ۲۰ میلیمتر جهت تسلیح کششی و میلگرد ساده به قطر ۸ میلیمتر جهت تسلیح عرضی استفاده شد. ابعاد هندسی و آرایش میلگردهای طولی و عرضی هر یک از نمونه‌ها در شکل ۱ آورده شده است. همچنین، جزئیات نمونه‌های آزمایشگاهی در جدول ۳ ارائه شده است.



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

نمونه با ورقهای پلیمری الیافی کربنی، با عرض و تعداد لایه‌های مختلف تقویت شدند و سه نمونه دیگر به عنوان نمونه کنترلی تقویت نشده مورد آزمایش قرار گرفتند. نمونه‌ها به صورت کلی Ba-bD-cLd نامگذاری شده‌اند که a، b، c و d به ترتیب شماره نمونه، قطر آرماتورهای کششی، تعداد لایه‌ها و عرض ورقهای پلیمری الیافی می‌باشد. نمونه‌های B۲، B۳ و B۴ به منظور بررسی تمرکز تنشهای برشی و قائم در

انتهای ورقهای پلیمری الیافی به ترتیب با یک لایه، دولایه و سه لایه تقویت شدند. در این نمونه‌ها فاصله‌های ورقهای پلیمری الیافی از تکیه‌گاه ۱۰۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد. با توجه به تحقیقات انجام شده توسط محققان مختلف، استفاده از تسمه‌های پلیمری الیافی و بستهای فولادی که به دور مقطع تیر در انتهای

جدول ۳: جزئیات نمونه‌های آزمایشگاهی

نمونه‌ها	مقاومت فشاری استوانه‌ای بتن (MPa)	سطح مقطع آرماتورهای طولی (mm ²)		d mm	d' mm	عرض هر لایه از پلیمرهای الیافی (mm)	تعداد لایه‌های پلیمرهای الیافی	فاصله‌های پلیمرهای الیافی از تکیه‌گاه (mm)
		کششی	فشاری					
B۱-۱۲D-۰L	۲۵/۲	۲۲۶	۱۵۷	۱۶۶	۲۵	۰	۰	۰
B۲-۱۲D-۱L۱۵	۲۵/۲	۲۲۶	۱۵۷	۱۶۶	۲۵	۱۵۰	۱	۱۰۰
B۳-۱۲D-۲L۱۵	۲۵/۲	۲۲۶	۱۵۷	۱۶۶	۲۵	۱۵۰	۲	۱۰۰
B۴-۱۲D-۳L۱۵	۲۵/۲	۲۲۶	۱۵۷	۱۶۶	۲۵	۱۵۰	۳	۱۰۰
B۵-۱۶D-۰L	۲۳/۸	۴۰۲	۱۵۷	۱۶۴	۲۵	۰	۰	۰
B۶-۱۶D-۱L۱۰	۲۳/۸	۴۰۲	۱۵۷	۱۶۴	۲۵	۱۰۰	۱	۰
B۷-۱۶D-۱L۱۵	۲۳/۸	۴۰۲	۱۵۷	۱۶۴	۲۵	۱۵۰	۱	۰
B۸-۱۶D-۲L۱۵	۲۳/۸	۴۰۲	۱۵۷	۱۶۴	۲۵	۱۵۰	۲	۰
B۹-۲۰D-۰L	۲۴/۱	۶۲۸	۱۵۷	۱۶۲	۲۵	۰	۰	۰
B۱۰-۲۰D-۱L۱۰	۲۴/۱	۶۲۸	۱۵۷	۱۶۲	۲۵	۱۰۰	۱	۰
B۱۱-۲۰D-۱L۱۵	۲۴/۱	۶۲۸	۱۵۷	۱۶۲	۲۵	۱۵۰	۱	۰
B۱۲-۲۰D-۲L۱۵	۲۴/۱	۶۲۸	۱۵۷	۱۶۲	۲۵	۱۵۰	۲	۰

ورقهای پلیمری الیافی چسبانده می‌شوند، سبب جلوگیری از جدا شدن انتهای ورقهای پلیمری الیافی از سطح تیر خواهد شد. در صورت پیش‌تنیده نمودن این وسایل مهار، تنشهای قائم فشاری به وجود می‌آید که تمرکز تنش کششی قائم به وجود آمده را خنثی می‌نماید [۸ و ۹]. در این تحقیق به منظور جلوگیری از جدا شدن انتهای ورقهای پلیمری الیافی از سطح تیر در نمونه‌های تقویت شده B۶، B۷، B۸، B۱۰، B۱۱ و B۱۲، ورقهای پلیمری الیافی از روی تکیه‌گاه عبور داده شدند تا زمینه برای بررسی حالت‌های دیگر شکست (حالت‌های ۱، ۵ و ۶) فراهم آید. در صورتی که اتصال ورقهای پلیمری الیافی با سطح بتن از مقاومت پیوستگی کافی برخوردار باشد، ورقهای پلیمری الیافی گسیخته خواهند شد؛ در غیر این صورت حالت‌های ۵ و ۶ شکست اتفاق خواهد افتاد.

۴- روش آزمایش

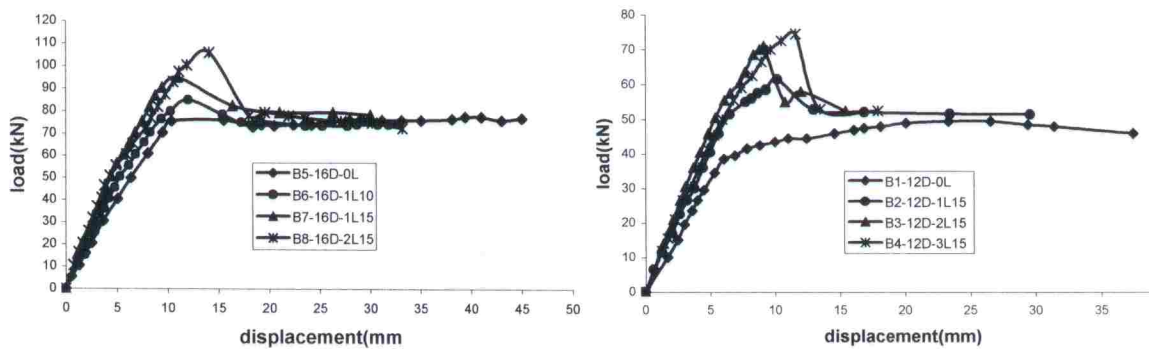
نمونه‌ها پس از گذشت زمان عمل‌آوری به صورت خمش چهار نقطه‌ای بارگذاری شدند. بارگذاری به صورت بار استاتیکی و یکنواخت انجام گرفت. تغییر مکان وسط نمونه‌ها با استفاده از یک

تغییر شکل سنج الکتریکی (LVDT) اندازه گیری شد. اطلاعات مربوط به بارها و تغییر مکانها توسط یک دستگاه ثبت اطلاعات (Data Logger) ثبت شدند. محل بارهای اعمالی در شکل ۱ مشخص شده است.

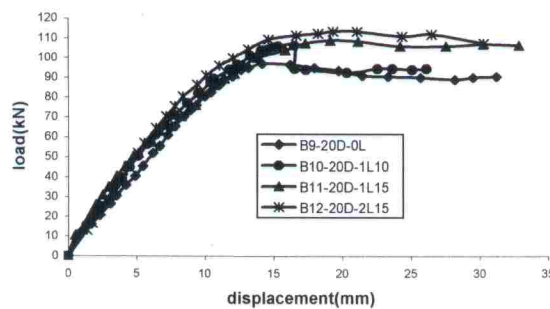
۵- نتایج آزمایشها

۵-۱- نمودارهای بار- تغییر مکان

نمودارهای تغییر مکان نمونه‌ها بر حسب بارهای اعمال شده در شکل‌های ۲، ۳ و ۴ ارائه شده است. همچنین، بارها و تغییر مکانهای متناظر با تسلیم فولاد طولی و ظرفیت نهایی هر یک از نمونه‌ها در جدول ۴ آورده شده است. بارها و تغییر مکانهای متناظر با تسلیم فولاد طولی از تغییر در شیب نمودارهای بار-تغییر مکان تخمین زده شده است. شکل‌های ۲ الی ۴ نشان می‌دهند که 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 تقویت شده سختی بیشتری از خود نشان می‌دهند. با توجه به جدول ۴، بار متناظر با حد تسلیم فولادهای طولی برای نمونه‌های تقویت شده B۲ تا B۴ بین ۳۳ تا ۴۴ درصد، برای نمونه‌های تقویت شده B۶ تا B۸ بین ۸ تا ۱۸ درصد و برای نمونه‌های تقویت شده B۱۰ تا B۱۲ بین ۱/۶ تا ۱۵ درصد افزایش یافت. بعد از تسلیم فولادهای طولی، نمونه‌های تقویت شده مقاومت و سختی بیشتری نسبت به نمونه‌های کنترلی از خود نشان دادند. با توجه به شکل ۵، در نمونه‌های B۳ و B۴ به دلیل ایجاد تمرکز تنش برشی و قائم در انتهای پلیمرهای الیافی، ابتدا ترک موربی در پوشش بتن اتفاق افتاد که با افزایش بار، ترک ایجاد شده در امتداد آرماتورهای کششی گسترش پیدا نمود و سبب ایجاد شکست ناگهانی در این دو نمونه گردید.



شکل ۲: روابط بار- تغییر مکان نمونه‌های B۱، B۲، B۳، B۴ و B۵، B۶، B۷ و B۸



شکل ۴: روابط بار- تغییر مکان نمونه‌های B۹، B۱۰، B۱۱ و B۱۲

در نمونه B11 به دلیل ایجاد ترکهای برشی - خمشی در ناحیه برش ثابت، ورق پلیمری الیافی از سطح تیر جدا گردید. شکست پیوستگی بوجود آمده از نزدیکی محل اعمال بارها آغاز گردید و به سمت دوتکیه گاه گسترش پیدانمود. با توجه به شکل ۶، در نمونه ۱۲ B نیز ورق پلیمری الیافی از سطح تیر جدا گردید؛ اما شکست پیوستگی بوجود آمده از نزدیکی تکیه گاهها آغاز گردید و به سمت ناحیه با لنگر ثابت گسترش پیدانمود و با رسیدن به این ناحیه متوقف گردید و بدون اینکه باربری تیر افزایش یابد بتن ناحیه فشاری خرد شد. در جدول ۴ حالت‌های مختلف شکست نمونه‌ها ارائه شده است.

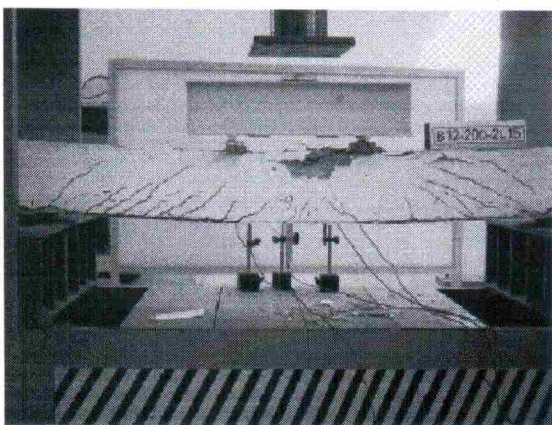
جدول ۴: نتایج آزمایشها و مقایسه آنها با روابط آیین نامه ها

نمونه‌ها	بار تسلیم تخمینی (kN)	بار نهایی (P_{test}) (kN)	خیز متناظریا تسلیم فولاد طولی (mm)	خیز نهایی (mm)	شاخص شکل پذیری	حالت شکست	$\frac{P_{test}}{P_{ACI}}$	$\frac{P_{test}}{P_{ISIS}}$
B1-12D-0L	۳۸/۴	۴۹/۴	۶/۰۳۴	۲۳/۳	۳/۸	-	-	-
B2-12D-1L10	۵۱/۴	۶۱/۴	۶/۴۹۸	۱۰/۲	۱/۵	۱	۰/۸۶	۰/۹۲
B3-12D-2L10	۵۵/۴	۷۰/۹	۶/۰۸۴	۹/۱	۱/۵	۳	۰/۸۲	۰/۸۸
B4-12D-3L10	۵۵/۴	۷۴/۴	۶/۷۹۸	۱۱/۵	۱/۷	۳	۰/۷۷	۰/۸۵
B5-16D-0L	۶۰/۹	۷۵/۹	۸/۰۷۲	۱۵/۵	۱/۹	-	-	-
B6-16D-1L10	۶۵/۹	۸۴/۹	۷/۷۱۲	۱۲/۰	۱/۵	۱	۱/۰۶	۱/۱۸
B7-16D-1L10	۷۰/۴	۹۴/۹	۶/۸۲۸	۱۱/۰۱	۱/۶	۱	۱/۱۰	۱/۲۵
B8-16D-2L10	۷۱/۹	۱۰۵/۹	۷/۷۸۲	۱۱/۹	۱/۵	۱	۱/۱۱	۱/۲۵
B9-20D-0L	۹۴/۹	۹۶/۴	۱۳/۲	۱۶/۲	۱/۲	-	-	-
B10-20D-1L10	۹۶/۴	۱۰۶/۳	۱۲/۴	۱۶/۵	۱/۳	۱	۱/۱۴	۱/۲۲
B11-20D-1L10	۹۹/۹	۱۰۸/۹	۱۳/۸	۱۹/۱	۱/۳	۶	۱/۱۶	۱/۲۲
B12-20D-2L10	۱۰۹/۴	۱۱۳/۴	۱۴/۶	۱۹/۳	۱/۳	۶	۱/۱۹	۱/۲۲

حالت ۱: تسلیم فولادهای طولی و گسیختگی پلیمرهای الیافی به همراه خرد شدن بتن ناحیه فشاری؛ حالت ۳: جدا شدن انتهای پلیمرهای الیافی از سطح بتن به همراه پوشش بتن روی میلگردهای طولی؛ حالت ۶: جدا شدن پلیمرهای الیافی از سطح بتن به همراه قسمتی از پوشش بتن به علت ترک خمشی-برشی.

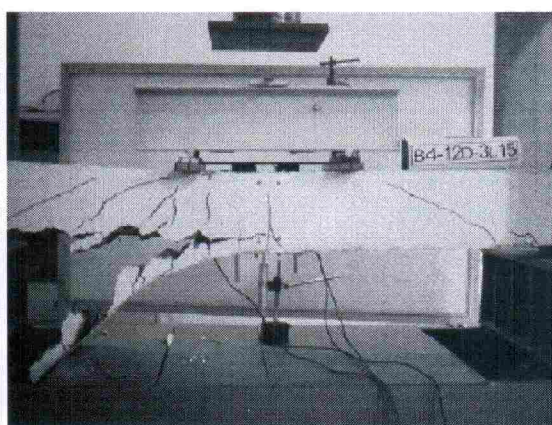
۵-۲- شکل پذیری تغییر مکان

با توجه به تعریف شکل پذیری تغییر مکانی، اگر شاخص شکل پذیری تغییر مکانی را نسبت تغییر مکان وسط تیر در هنگام ظرفیت نهایی به تغییر مکان وسط تیر در هنگام تسلیم فولاد طولی در نظر بگیریم، در بیشتر نمونه‌های تقویت شده این شاخص نسبت به نمونه‌های کنترلی کاهش یافته است. شاخص شکل پذیری نمونه‌ها در جدول ۴ آورده شده است.



شکل ۶: جدا شدن پلیمرهای الیافی از سطح بتن به همراه

قسمتی از پوشش بتن بعلت ترک خمشی-برشی، نمونه B12



شکل ۵: جدا شدن انتهای پلیمرهای الیافی از سطح بتن به

همراه پوشش بتن روی میلگردهای طولی، نمونه B4

۶- مقایسه با روابط آیین نامه‌ها

۶-۱- مقایسه با روابط پیشنهادی کمیته ISIS کانادا [۱۱]

کمیته ISIS کانادا کرنش نهایی بتن را 0.0035 و تغییرات کرنش در عمق تیر را خطی فرض می‌نماید. برای محاسبه ظرفیت نهایی از بلوک تنش مستطیلی مطابق با روابط موجود تیرهای خمشی تقویت نشده و فاکتورهای کاهش 0.6 ، 0.85 و 0.75 به ترتیب برای بتن، فولاد و ورقهای پلیمری الیافی استفاده می‌شود. نتایج نسبت بارهای نهایی آزمایشگاهی به بارهای به دست آمده مطابق با روابط پیشنهادی این کمیته در جدول ۴ ارائه شده است.

۶-۲- مقایسه با آیین نامه ACI440.2R-02 [۱۲]

این آیین نامه برای تعیین ظرفیت نهایی نمونه‌های تقویت شده از بلوک تنش مستطیلی مطابق با روابط موجود تیرهای خمشی تقویت نشده استفاده نموده و به منظور جلوگیری از شکستهای زودهنگام و ناگهانی (حالت‌های ۶-۳) مطابق با روابط ۱ و ۲ کرنش نهایی پلیمرهای الیافی را محدود می‌نماید.

$$\varepsilon_{fe} \leq k_m \varepsilon_{fu} \quad (1)$$

$$k_m = \begin{cases} \frac{1}{60\varepsilon_{fu}} \left(1 - \frac{nE_f t_f}{360000}\right) \leq 0.90 & , nE_f t_f \leq 180000 \\ \frac{1}{60\varepsilon_{fu}} \left(\frac{90000}{nE_f t_f}\right) \leq 0.90 & , nE_f t_f > 180000 \end{cases} \quad (2)$$

در روابط فوق ε_{fu} ، E_f ، t_f و ε_{fe} به ترتیب کرنش نهایی، مدول الاستیسیته، ضخامت، کرنش مؤثر و تعداد لایه‌های ورقهای پلیمری الیافی می‌باشد. همچنین هنگام محاسبه ظرفیت خمشی طراحی، به منظور انعطاف پذیری مناسب، کرنش فولاد در هنگام شکست نهایی باید بیشتر از 0.005 باشد؛ در غیر اینصورت از فاکتور کاهش ظرفیت خمشی اسمی استفاده می‌شود. نتایج نسبت بارهای نهایی آزمایشگاهی به بارهای نهایی به دست آمده مطابق با این آیین نامه در جدول ۴ آورده شده است.

۷- نتیجه گیری

در این تحقیق اثر ورقهای پلیمری در تقویت خمشی تیرهای بتن مسلح مطالعه گردید. براساس اطلاعات به دست آمده از انجام آزمایشها، نتایج زیر به دست آمده است:

۱- نمونه‌های تقویت شده از مقاومت و سختی بیشتر و شاخص شکل پذیری کمتری نسبت به نمونه‌های کنترلی برخوردار بودند.

۲- تقویت نمونه‌ها سبب افزایش بار متناظر تسلیم فولادهای طولی گردید؛ اما میزان افزایش، با افزایش درصد فولادهای طولی کاهش یافت.

۳- با توجه به مقایسه نتایج به دست آمده با روابط آیین‌نامه‌های ACI440.2R-02 و ISIS کانادا مشاهده می‌شود که روابط طراحی هر دو آیین‌نامه اثر تقویت کنندگی ورق‌های FRP در مقاومت تیرهای خمشی با درصد فولاد کم را دست‌بالا برآورد می‌کند. همچنین، پیش‌بینی هر دو آیین‌نامه برای مقاومت نمونه‌هایی که شکست آنها به صورت جدا شدن انتهای پلیمرهای الیافی از سطح بتن به همراه پوشش روی میلگردهای طولی می‌باشد، دست‌بالا تراز حالت‌های دیگر شکست می‌باشد.

قدردانی: نمونه‌های آزمایشگاهی این پژوهش توسط شرکت بنیان بتن تهیه گردید. بدین وسیله از کمک‌های بیدریغ این شرکت قدردانی می‌شود.

۸- مراجع

- [1] Maalej, M., Bian, Y. "Interfacial Shear Stress Concentration in FRP-Strengthened Beams", Composite Structures, Vol.54, 2001, pp. 417-426.
- [2] Malek, A.M., Saadatmanesh, H., Ehsani, M.R. "Prediction of Failure Load of R/C Beams Strengthened With FRP Plate Due to Stress Concentration at the Plate End", ACI Structural Journal, Vol.95, No.1, 1998, pp. 142-152.
- [3] Ye, J.Q. "Interfacial Shear Transfer of RC Beams Strengthened by Bonded Composite Plates", Cement & Concrete Composite, Vol.23, 2001, pp. 411-417.
- [4] Ascione, L., Feo, L. "Modeling of Composite/Concrete Interface of RC Beams Strengthened with Composite Laminates", Composites Part B: Engineering, Vol.31, 2000, pp. 535-540.
- [5] Lau, K.T., Dutta, P.K., Zhou, L.M., Hui, D. "Mechanics of Bonds in an FRP Bonded Concrete Beam", Composites Part B: Engineering, Vol.32, 2001, pp. 491-502.
- [6] Teng, J.G., Smith, S.T., Yao, J., Chen, J.F. "Intermediate Crack-Induced Debonding in RC Beams and Slabs", Construction and Building Materials, Vol.17, 2003, pp. 447-462.
- [7] Sebastian, W.M. "Significance of Midspan Debonding Failure in FRP-Plated Concrete Beams", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.127, No.7, 2001, pp. 792-798.
- [8] Arduini, M., Nanni, A., Tommaso, A.D. "Brittle Failure in FRP Plate and Sheet Bonded Beams", ACI Structural Journal, Vol.94, No.4, 1997, pp. 363-370.
- [9] Brena, S., Bramblett, R.M., Wood, S.L., Kreger, M.E. "Increasing Flexural Capacity of Reinforced Concrete Beams Using Carbon Fiber-Reinforced Polymer Composites", ACI Structural Journal, Vol.100, No.1, 2003, pp 36-46.
- [10] Frostig, Y., Rabinovitch, o. "High-Order Approach for the Control of Edge Stresses in RC Beams Strengthened with FRP Strips" Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.127, No.7, 2001, pp. 799-809.
- [11] ISIS CANADA "Strengthening Reinforced Concrete Structures with Externally-Bonded Fiber Reinforced Polymers" Design Manual, No.4, 2001.
- [12] ACI Committee 440F "Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures", 2002.