

بررسی تأثیر رطوبت و پیش‌بارگذاری در زمان نصب مصالح FRP در رفتار خمشی تیرهای تقویت‌شده

سید صالح موسوی‌نژاد (کارشناس ارشد)

محمدرضا اصفهانی* (استاد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد

مهندسی عمران شریف، (پاییز ۱۳۹۷)
دوری ۲ - ۳۴، شماره‌ی ۳/۲، ص. ۸۱-۷۳

پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهند که در بیشتر مطالعات، اعمال بار و فقط رطوبت، پس از تقویت با مصالح FRP انجام شده است؛ در صورتی که یکی از موارد مصرف ورق‌های FRP، تعمیر سازه‌های بارگذاری شده است. از طرفی در این قبیل موارد، احتمال وجود رطوبت سطحی هنگام تقویت وجود دارد. لذا، هدف از انجام پژوهش حاضر، بررسی رفتار خمشی تیرهای تقویت‌شده با استفاده از ورق FRP نزدیک به شرایط واقعی است. به این منظور ۲۰ عدد نمونه‌ی بتنی با ابعاد $1150 \times 200 \times 150$ میلی‌متر در دو گروه ۱۰ عددی با ۲ نوع آرایش متفاوت میلگرد کششی پیش از تقویت، تحت بارگذاری و شرایط رطوبتی قرار گرفتند و پس از انجام عملیات تقویتی در طی آزمایش‌های خمشی گسیخته شدند. براساس نتایج به دست آمده، مقاومت نهایی در تیرهای بدون ترک اولیه و بدون رطوبت سطحی، ۲۰٪ افزایش یافته و مقاومت خمشی در تیر با ترک اولیه، ۱۳٪ و در تیر با رطوبت سطحی، ۹٪ افزایش داشته است. در تیرهای با ترک اولیه و رطوبت سطحی به طور هم‌زمان نیز ۱۳٪ افزایش مقاومت نهایی به دست آمد. همچنین نتایج حاکی از آن است که استفاده از آرماتور کششی با قطر زیاد و تعداد کم در مقایسه با آرماتور با قطر کم و تعداد زیاد، باعث کاهش بهره‌وری تقویت و ایجاد شکست ترد می‌شود.

واژگان کلیدی: پیش‌بارگذاری، رطوبت سطحی، سازه‌های بتنی، مقاومت پیوستگی، مواد پلیمری الیافی، FRP.

۱. مقدمه

ورق CFRP می‌شود و با افزایش مقدار رطوبت و مدت زمان، کاهش کیفیت مذکور بیشتر می‌شود. در این حالت نوع شکست غالب، گسیختگی چسب در سطح مشترک بتن و چسب است. برای نمونه‌هایی که چسباندن ورق CFRP با کیفیت بالا انجام شود، قرارگیری در شرایط محیطی اشباع حتی برای مدت زمان کوتاه، از ۳ تا ۸ هفته، سبب افت پیوستگی بین بتن و ورق FRP می‌شود.^[۱] بر پایه‌ی نتایج مطالعات پیشین، پژوهشگران پیشینه‌ی مجاز رطوبت سطحی، رطوبت نسبی محیط و دما را برای رسیدن به عملکرد مناسب پیوستگی به ترتیب ۸۵٪، ۸۲٪ و $32^{\circ}C$ پیشنهاد کرده‌اند.^[۲]

در بررسی میزان تأثیرپذیری الیاف CFRP و GFRP در صورت وجود رطوبت پیش از نصب ورق در تیرهای کوتاه بتنی (۲۰۱۳)، آزمایش‌هایی انجام شد و نمونه‌های تقویت‌شده در محیط مرطوب با رطوبت نسبی ۹۰٪ و رطوبت سطحی ۹۰٪، به ترتیب کاهش مقاومتی حدود ۷٪ و ۱۰٪ نسبت به نمونه‌های با رطوبت نسبی و رطوبت سطحی ۳۵٪ داشتند. این در حالی است که در مقاومت نهایی نمونه‌های تقویت‌شده در شرایط محیطی با رطوبت نسبی ۶۵٪ و رطوبت سطحی ۷۰٪،

با توجه به کاربرد گسترده‌ی پلیمرهای مسلح الیافی در مقاوم‌سازی اعضاء بتنی، نیاز به شناخت صحیح رفتار مصالح مذکور در اتصال با بتن، امری بدیهی است. یکی از پارامترهای بسیار تأثیرگذار در رفتار اعضاء بتنی تقویت‌شده و یا مقاوم‌سازی‌شده با ورق FRP، شرایط محیطی گوناگون است. در این میان، رطوبت یکی از مهم‌ترین و تأثیرگذارترین عوامل در بین شرایط محیطی مختلف و پیش‌بارگذاری یکی از ناشناخته‌ترین عوامل در بین شرایط غیرمحیطی است.

ساختار بتن به نحوی است که رطوبت را تا مدت زمانی در سطح خود نگه می‌دارد و برای کاهش رطوبت سطحی به زمان نیاز دارد. در خیلی از مواقع، عملیات تقویت با ورق FRP در شرایط مرطوب انجام می‌شود و فرصتی برای کاهش رطوبت سطحی وجود ندارد. نتایج برخی مطالعات (۲۰۰۶)، نشان داده است که وجود رطوبت در زمان تقویت، به طور چشم‌گیری سبب کاهش کیفیت پیوستگی بین بتن

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴/۶/۱۳۹۵، اصلاحیه ۱۱/۱۰/۱۳۹۵، پذیرش ۲/۱۱/۱۳۹۵.

DOI:10.24200/J30.2018.1398

تغییر چشم‌گیری مشاهده نشده است. همچنین شرایط مذکور، تأثیر منفی بیشتری در نمونه‌های تقویت‌شده با ورق CFRP نسبت به نمونه‌های تقویت‌شده با ورق CFRP داشته است.^[۳]

همان‌طور که در ابتدای بخش حاضر بیان شد، پیش‌بارگذاری (ایجاد ترک اولیه)، یکی از عوامل مهم غیرمحیطی به شمار می‌رود. در بخشی از پژوهش حاضر، سعی در شناخت رفتار تیرهایی شده است که پیش از تقویت، ترک داشته‌اند. در یک عضو تحت کشش بتن مسلح، سختی عضو با افزایش ترک خوردگی کاهش می‌یابد.^[۴-۶] بنابراین پیش‌بینی می‌شود رفتار تیر پس از تقویت در تیرهای با پیش‌بارگذاری و بدون پیش‌بارگذاری متفاوت باشد. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که تقویت با CFRP در تیرهای بدون پیش‌بارگذاری، موجب ۸۳٪ افزایش مقاومت نسبت به نمونه‌ی کنترلی می‌شود؛ در صورتی که این مقدار برای تیرهای با ۴۰٪ پیش‌بارگذاری، برابر ۸۰٪ و برای تیرهای با ۹۰٪ پیش‌بارگذاری، برابر ۶۶٪ است.^[۷]

همچنین نتایج مطالعاتی در سال ۲۰۱۵،^[۸] نشان می‌دهد که وجود ۵۰٪ پیش‌بارگذاری در تیرهای تقویت‌شده با CFRP، باعث ۴۲٪ کاهش ظرفیت خمشی نهایی آن‌ها می‌شود. مطالعات دیگری (۲۰۰۷) نیز نشان داده است که ترک‌های ناشی از پیش‌بارگذاری در زمان تقویت باعث می‌شود که سختی مماسی نسبت به تیرهای بدون پیش‌بارگذاری بیشتر شود.^[۹]

در برخی مطالعات پیشین،^[۱۰] هم نشان داده شده است که تأثیر پیش‌بارگذاری در کاهش ظرفیت تیرهای تقویتی از نظر تئوری حدود ۲٪ و در نتایج آزمایشگاهی حدود ۶٪ است. بنابراین پیشنهاد شده است که برای افزایش ضریب اطمینان در طراحی تیرهای تقویتی، ضریب کاهش برابر با ۰/۹ در نظر گرفته شود. همچنین در بررسی تیرهای بتن مسلح با پیش‌بارگذاری (۱۹۹۷)، نتیجه گرفته شده است که افزایش مقاومت به دلیل تقویت با CFRP، ۸٪ کمتر از حالت بدون پیش‌بارگذاری است.^[۱۱]

برخی نتایج مطالعات آزمایشگاهی اخیر (۲۰۱۵) نیز نشان داده است که پیش‌بارگذاری تا ۸۰٪ تنش تسلیم تیرهای بدون تقویت، تأثیری در ظرفیت خمشی نهایی تیر تقویت‌شده ندارد؛ ولی در حالتی که پیش‌بارگذاری بیشتر از ۹۰٪ تنش تسلیم تیر بدون تقویت باشد، نیاز به بررسی‌های بیشتر است.^[۱۲] همچنین در آزمایش‌های انجام‌شده به منظور بررسی تأثیر شرایط متفاوت در نوع شکست تیرهای تقویت‌شده بر روی نمونه‌های ترک‌خورده نشان داده شده است که به طور کلی رفتار بار در برابر خیز برای نمونه‌های با ترک که در شرایط رطوبتی قرار دارند و آن‌هایی که در اتاق خشک نگهداری شدند، مشابه است، ولی سختی نمونه‌هایی که در معرض رطوبت قرار می‌گیرند، اندکی کاهش می‌یابد؛ و نیز نمونه‌هایی که در معرض رطوبت به مدت ۸ هفته قرار داشتند، جداشدگی ورق یا از محل ترک ایجادشده‌ی قبلی و یا محل ترک‌های ایجادشده‌ی خمشی آغاز شد.^[۱۳] در پژوهشی در سال ۲۰۰۶، نیز از دال‌های ترک‌خورده و نمونه‌هایی که پیش از تقویت در شرایط نامطلوب محیطی قرار گرفته بودند، استفاده شد. به طوری که دال‌ها در چند محیط متفاوت، شامل شرایط طبیعی آزمایشگاه، محیط‌های نمکی، محیط‌های کشور عمان و دریای سیاه در حدود ۴ ماه در اثر بارگذاری قرار گرفتند. سپس نمونه‌ها با استفاده از CFRP تقویت شدند و دوباره برای حدود ۱ سال در شرایط مذکور قرار گرفتند تا در پایان در معرض آزمایش بارگذاری سه‌نقطه‌ی قرار گیرند. ظرفیت نهایی دال‌ها حدود ۷۰٪ میزان پیش‌بینی‌شده (نظری) بود. شکست‌ها عموماً ترد و شکننده بودند و فقط از ۳۰٪ کرنش نهایی صفحات CFRP استفاده شده بود.^[۱۴]

همچنین برخی پژوهشگران برای بررسی پایایی پیوستگی بین بتن و ورق FRP در نمونه‌های با پیش‌بارگذاری، آزمایش‌هایی انجام داده‌اند. برای نمونه، در آزمایش‌هایی

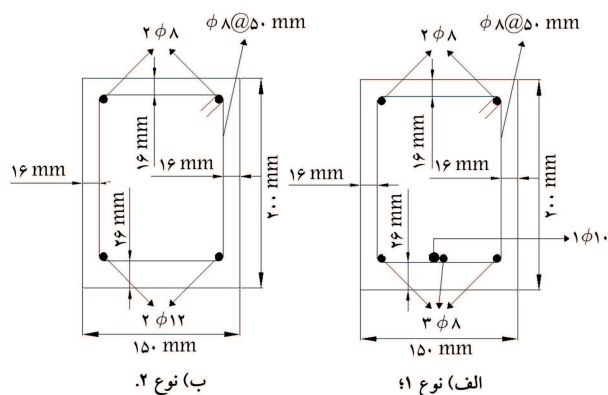
در سال ۲۰۰۱، ترک‌هایی توسط بارگذاری تک‌نقطه‌ی پس از عمل‌آوری ۲۸ روزه و قبل از تقویت و قرارگیری نمونه‌ها در معرض شرایط محیطی در تیرها ایجاد شد و نتایج حاصل نشان داد که پیش‌بارگذاری، آثار مخربی در پیوستگی بین بتن و ورق FRP دارد و به دنبال آسیب‌دیدگی پیوستگی، کاهش سختی خمشی به وجود خواهد آمد. همچنین آسیب‌دیدگی پیوستگی سبب می‌شود که در نمونه‌های قرارگرفته در شرایط محیطی مذکور، جداشدن ورق FRP از بتن مشاهده شود.^[۱۵] در آزمایشی دیگری (۲۰۱۶)، نیز تعداد ۶ تیر بتنی که پیش‌بارگذاری به میزان ۷۵٪ ظرفیت نهایی تیر بدون تقویت داشتند، با کمک ورق‌های دست‌ساز (HFRP) متشکل از ۲ لایه CFRP و ۲ لایه GFRP) تقویت شدند و در تیرهای مذکور ظرفیت نهایی به علت تقویت با ورق HFRP، ۶۶٪ الی ۷۵٪ افزایش یافت.^[۱۶]

با توجه به مقدمه‌ی ذکرشده و همچنین نبود پژوهش‌های کافی در زمینه‌ی موردبحث، نیاز به مطالعات گسترده‌تر جهت روشن شدن اثرهای رطوبت سطحی و پیش‌بارگذاری بر روی رفتار تیرهای تقویت‌شده با CFRP احساس می‌شود. بنابراین هدف از پژوهش حاضر، بررسی تأثیر رطوبت سطحی به‌عنوان یک عامل محیطی و پیش‌بارگذاری به‌عنوان یک عامل غیرمحیطی در زمان نصب مصالح CFRP در مقاومت نهایی، سختی و همچنین نوع شکست نهایی تیرهای خمشی بوده است. لذا ۲۰ عدد تیر خمشی قبل از انجام عملیات تقویتی، تحت شرایط مختلف رطوبت سطحی و یا پیش‌بارگذاری و یا هر دو حالت به‌صورت توأم قرار گرفتند و در نهایت، پس از انجام عملیات تقویتی با استفاده از ورق CFRP تحت آزمایش خمشی تا بار نهایی قرار گرفتند. در پژوهش حاضر، به انتخاب ۲ نوع آرایش میلگرد کششی متفاوت و در نظر گرفتن میزان ترک خمشی به جای مقدار بار به‌عنوان معیار پیش‌بارگذاری توجه شده است.

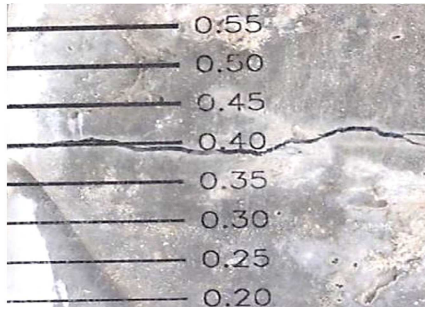
۲. کار آزمایشگاهی

۱.۲. مصالح و نمونه‌های آزمایشگاهی

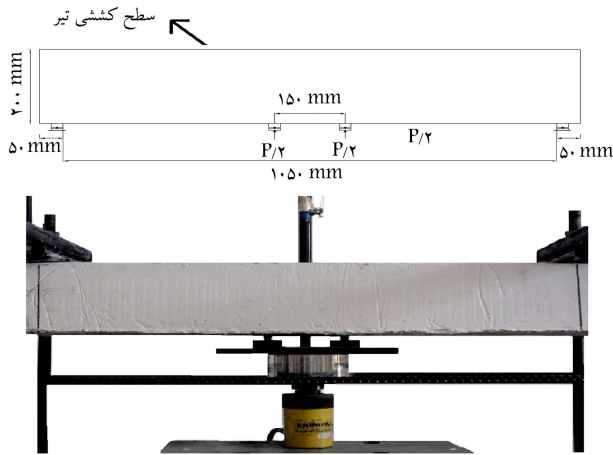
در پژوهش حاضر، ۲۰ عدد نمونه‌ی آزمایشگاهی، ساخته و آزمایش شدند. نمونه‌ها از نوع تیرهای بتنی مسلح به عرض ۱۵۰، ارتفاع ۲۰۰ و طول ۱۱۵۰ میلی‌متر بودند که از بتن با مقاومت ۴۰ MPa ساخته شدند. در نمونه‌ها، دو نوع متفاوت آرایش آرماتورهای کششی در نظر گرفته شد. مطابق شکل ۱ الف، در نوع اول از آرماتورهای کششی ریزتر ولی با تعداد بیشتر استفاده شد، که شامل ۳ عدد میلگرد آجدار به قطر ۸ میلی‌متر و ۱ عدد میلگرد به قطر ۱۰ میلی‌متر بود. در نوع دوم



شکل ۱. آرایش‌های آرماتور طولی



شکل ۲. چگونگی اندازه‌گیری ترک خمشی.



شکل ۳. دستگاه پیش‌بارگذاری از پایین در آزمایش‌ها.

به صورت شماتیک نشان داده شده است. در واقع تیر از سطح زیرین تحت بارگذاری ۴ نقطه‌یی قرار گرفت تا سطح کششی، سطح فوقانی تیر باشد. تغییرات مذکور در بارگذاری باعث شد عملیات تقویت با دقت و کیفیت بیشتری انجام شود، زیرا تسلط مناسب‌تری روی تیر در هنگام تقویت وجود داشت. در پایان پس از گذشت زمان موردنیاز برای عمل‌آوری چسب (۷ شبانه‌روز)، نمونه‌ها تحت بارگذاری در دستگاه آزمایش تا مرحله‌ی گسیختگی تحت بارگذاری ۴ نقطه‌یی قرار گرفتند.

۴.۲. رطوبت سطحی و پیش‌بارگذاری

آخرین حالتی که در پژوهش حاضر بررسی شد، شامل نمونه‌هایی می‌شود که در زمان تقویت با وجود ترک‌های خمشی، میانگین رطوبت سطحی تیر ۹۰٪ بود. پس از انجام فرایند پیش‌بارگذاری و مشاهده‌ی ترک‌های خمشی با عرض ۰/۴ mm رطوبت سطحی به طور پیوسته کنترل شد. هنگامی که رطوبت سطحی به ۹۰٪ رسید، عملیات تقویت در زیر بار آغاز و پس از ۷ شبانه‌روز که چسب به گیرش نهایی خود رسید، نمونه‌ها تحت بارگذاری ۴ نقطه‌یی گسیخته شدند.

۵.۲. مشخصات و محل نصب ورق CFRP

ورق تقویتی مورد استفاده با نام تجاری Sika wrap-۲۰۰C، مقاومت کششی MPa ۳۹۰۰، ضریب کشسانی ۲۳۰ GPa و ضخامت ۱۱ mm داشت. همچنین عرض و طول ورق به ترتیب برابر با ۱۰۰۰ و ۱۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. طول ورق بر این اساس انتخاب شد که روی تکیه‌گاه قرار نگیرد و از لغزش ورق CFRP روی نمونه جلوگیری شود. مشخصات نمونه‌ها و نقاط اعمال بار پیش از تقویت و پس از آن به صورت شماتیک در شکل‌های ۴ و ۵ نشان داده شده است.

(شکل ۱ ب)، برخلاف نوع اول از آرماتورهای درشت‌تر، ولی با تعداد کمتر استفاده شد، که فقط شامل ۲ عدد میلگرد آجدار به قطر ۱۲ میلی‌متر بود. لازم به ذکر است تنش تسلیم برای آرماتورهای به قطرهای ۸، ۱۰ و ۱۲ میلی‌متر به ترتیب برابر با ۴۴۱/۴، ۵۷۹/۸ و ۴۳۴/۹ مگاپاسکال و همچنین هر ۲ نوع آرایش مذکور با درصد آرماتور کششی یکسان برابر با ۷۵٪ (۵۰٪ آرماتور متوازن) بودند تا امکان مقایسه و بررسی تأثیر تعداد و قطر آرماتور در رفتار خمشی تیرهای تقویت‌شده با نسبت آرماتور یکسان فراهم شود. تعداد ۱۲ عدد از نمونه‌ها، ابتدا در معرض شرایط مختلفی شامل حالت‌های مختلف رطوبت سطحی، پیش‌بارگذاری و ترکیب آن‌ها قرار داده شدند و سپس تمام آن‌ها با یک لایه ورق از نوع CFRP (Sika Wrap-۲۰۰C) و چسب Sikadur-۳۰۰ تقویت شدند. ۴ نمونه به‌عنوان نمونه‌ی مبنا، در شرایط محیطی آزمایشگاه تقویت شدند و ۴ نمونه نیز به‌عنوان نمونه‌ی کنترلی بدون تقویت باقی ماندند. نمونه‌ها پس از گذشت مدت زمان لازم برای نگهداری و عمل‌آوری بتن و چسب، تحت خمش بارگذاری و آزمایش شدند. قابل ذکر است برای مشخصات یکسان، دو نمونه ساخته شد.

نمونه‌ها به صورت کلی $\alpha - \beta - \gamma$ نام‌گذاری شدند که در آن α بیان‌گر شماره‌ی نمونه است، β بیان‌گر شرایط آزمایشگاهی است که شامل: حرف C (Control) برای نمونه‌های بدون تقویت (نمونه‌های کنترلی)، حرف B (Base) برای نمونه‌های تقویت‌شده در محیط آزمایشگاهی (نمونه‌های مبنا)، حرف P (Preloaded) برای نمونه‌های با پیش‌بارگذاری، حرف M (Moisture) برای نمونه‌های تقویت‌شده با رطوبت سطحی ۹۰٪ و حرف PM (Preloaded and Moisture) برای نمونه‌هایی که تحت پیش‌بارگذاری و رطوبت سطحی به صورت توأم قرار دارند، است. همچنین γ مشخص‌کننده‌ی نوع آرماتورهای کششی است که ۱ نشان‌دهنده‌ی آرماتورهای کششی با قطر کم ولی تعداد بیشتر (۳ عدد میلگرد آجدار به قطر ۸ و یک عدد میلگرد آجدار به قطر ۱۰) و ۲ نشان‌دهنده‌ی آرماتورهای کششی با قطر زیاد ولی تعداد کم (دو عدد میلگرد آجدار به قطر ۱۲) است. جدول ۱، مشخصات نمونه‌ها را نشان می‌دهد.

۲.۲. رطوبت سطحی

تعدادی از نمونه‌ها در شرایطی تقویت شدند که رطوبت سطحی آن‌ها به میزان ۹۰٪ بود. تقویت نمونه‌های مذکور به این صورت انجام شد که ابتدا نمونه‌های بتنی به مدت یک هفته در آب قرار داده شدند تا کاملاً اشباع شوند. پس از خارج کردن نمونه‌ها از آب، مقدار رطوبت سطحی توسط رطوبت‌سنج به طور پیوسته کنترل می‌شد و زمانی که رطوبت سطحی به میزان ۹۰٪ رسید، کار تقویت انجام شد. اندازه‌گیری رطوبت سطحی توسط دستگاه رطوبت‌سنج سطحی^۱ مدل MS-۷۰۰۳ انجام شد. در پایان، پس از چسباندن ورق FRP به سطح کششی تیر و گذشت مدت زمان لازم برای عمل‌آوری چسب (۷ شبانه‌روز)، نمونه‌ها برای آزمایش آماده شدند.

۳.۲. پیش‌بارگذاری

ابتدا تیرهای بدون تقویت تحت بارگذاری ۴ نقطه‌یی با استفاده از جک دستی با ظرفیت ۱۰۰ kN قرار گرفتند و البته بارگذاری تا مرحله‌یی ادامه داشت که عرض اولین ترک خمشی به ۰/۴ mm برسد (شکل ۲). مقدار مذکور برابر با بیشینه‌ی عرض ترک مجاز تیرهای خمشی برای شرایط معمولی طبق آیین‌نامه‌ی ACI-۳۱۸، است.^[۱۷] به منظور انجام تقویت تیرها در زمان پیش‌بارگذاری، بارگذاری میانه‌ی تیر از پایین به بالا انجام شد. جزئیات بارگذاری انجام‌شده و نقاط اعمال بار در شکل ۳

جدول ۱. مشخصات نمونه‌های آزمایشگاهی.

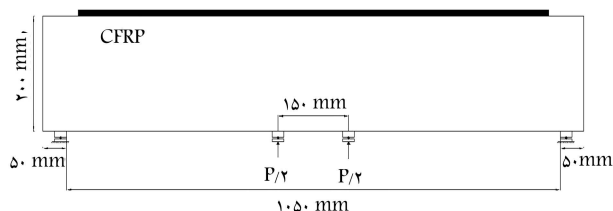
ردیف	نام اختصاری نمونه	تقویت	پیش‌بارگذاری	رطوبت سطحی (%)
۱	۱-C-۱	ندارد	ندارد	۳۵
	۲-C-۱			
۲	۳-C-۲	ندارد	ندارد	۳۵
	۴-C-۲			
۳	۵-B-۱	دارد	ندارد	۳۵
	۶-B-۱			
۴	۷-B-۲	دارد	ندارد	۳۵
	۸-B-۲			
۵	۹-P-۱	دارد	دارد	۳۵
	۱۰-P-۲			
۶	۱۱-P-۲	دارد	دارد	۳۵
	۱۱-P-۲			
۷	۱۳-M-۱	دارد	دارد	۹۰
	۱۴-M-۱			
۸	۱۵-M-۲	دارد	ندارد	۹۰
	۱۶-M-۲			
۹	۱۷-PM-۱	دارد	دارد	۹۰
	۱۸-PM-۱			
۱۰	۱۹-PM-۲	دارد	دارد	۹۰
	۲۰-PM-۲			

۶.۲. شرایط محیطی آزمایشگاه

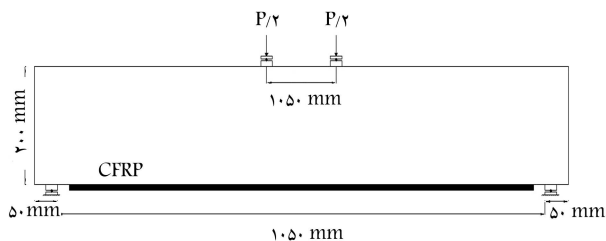
علاوه بر رطوبت سطحی، رطوبت و دمای محیط آزمایشگاه در زمان تقویت، برای تمامی نمونه‌ها اندازه گرفته شد. بنابراین، این امکان فراهم شد که برای هر حالت مورد بررسی، شرایط محیطی کاملاً در دسترس باشد تا در صورت لزوم، آثار آن‌ها نیز در نتایج قابل ارزیابی باشد. میانگین دمای محیط $31^{\circ}C$ و میانگین رطوبت محیط برابر با ۳۵٪ بود. همچنین برای اندازه‌گیری رطوبت سطحی، از سطح هر نمونه قرانته‌های متعددی (۵ قرانته) صورت گرفت. میانگین رطوبت سطحی در نمونه‌های بدون رطوبت سطحی ۳۳٪ و در نمونه‌های با رطوبت سطحی ۹۰٪ مشاهده شد.

۳. روش انجام آزمایش گسیختگی

پس از گذشت مدت زمان لازم برای عمل‌آوری چسب، نمونه‌های تقویت شده توسط آزمایش خمش ۴ نقطه‌یی با استفاده از یک جک هیدرولیکی با ظرفیت 2000 kN (مطابق شکل ۶)، آزمایش شدند. آزمایش خمش ۴ نقطه‌یی به این دلیل انتخاب شد که اولاً یک روش معمول بارگذاری است و ثانیاً ناحیه‌یی با لنگر ثابت ایجاد می‌کند. در شکل ۶، نمونه‌ی آماده‌ی انجام آزمایش مشاهده می‌شود. همچنین بارگذاری به صورت



شکل ۴. ابعاد هندسی تیرهای بتنی، طول تقویت آن‌ها و نقاط اعمال بار در مرحله‌ی پیش‌بارگذاری.



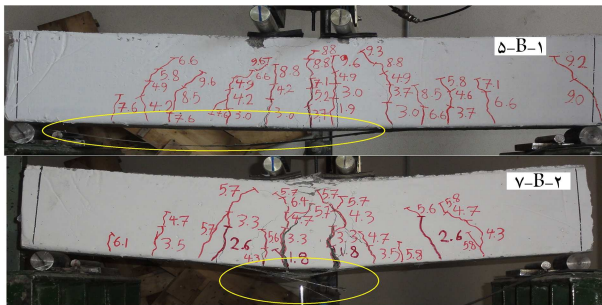
شکل ۵. ابعاد هندسی تیرهای بتنی، طول تقویت آن‌ها و نقاط اعمال بار در مرحله‌ی نهایی بارگذاری.

جدول ۲. خلاصه‌ی نتایج آزمایش برای نمونه‌های کنترلی.

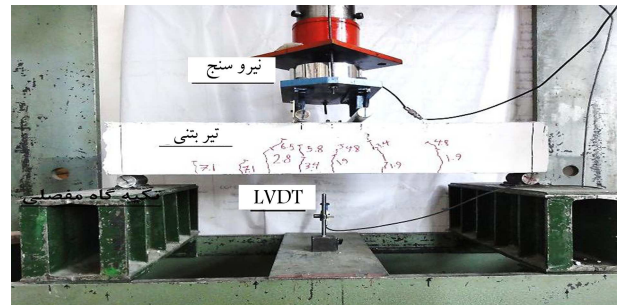
نوع آرایش آرماتور طولی	میانگین تغییر مکان متناظر با بار نهایی (mm)	میانگین بار نهایی (kN)
قطر کم و تعداد زیاد (نوع ۱)	۹٫۴	۸۴٫۷
قطر زیاد و تعداد کم (نوع ۲)	۱۱٫۰	۷۱٫۷

جدول ۳. خلاصه‌ی نتایج آزمایش برای نمونه‌های مینا.

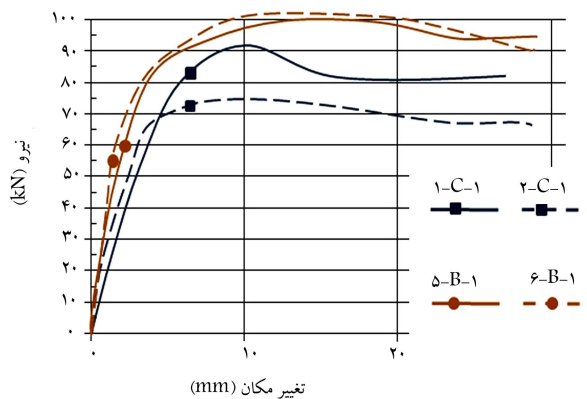
نوع آرایش آرماتور طولی	میانگین تغییر مکان متناظر با بار نهایی (mm)	میانگین بار نهایی (kN)
قطر کم و تعداد زیاد (نوع ۱)	۱۵٫۴	۱۰۱٫۸
قطر زیاد و تعداد کم (نوع ۲)	۱۹٫۱	۸۴٫۳



شکل ۷. شکست غالب در نمونه‌های مینا.



شکل ۶. دستگاه آزمایش و نمونه‌ی آماده‌ی آزمایش خمش ۴ نقطه‌یی.



شکل ۸. مقایسه‌ی رفتار نمونه‌های مینا و کنترلی با آرایش آرماتور نوع ۱.

به نمونه‌های کنترلی است. در صورتی که در نمونه‌های مینا با آرایش آرماتور نوع ۱، سختی خمشی نسبت به نمونه‌های کنترلی افزایش چشم‌گیری پیدا نکرده است. در تیرهای با آرایش آرماتور نوع ۱ که با آرماتور ریزتر و تعداد بیشتر هستند، ترک‌خوردگی در طول تیر بیشتر و عرض ترک کمتر است. بنابراین اثر ترک‌خوردگی در جداسدگی ورق از بتن قابل ملاحظه نخواهد بود. در نتیجه در حالت مذکور، تقویت تیرها اثر چندانی در سختی تیر نداشته است. در صورتی که در تیرهای با آرایش آرماتور نوع ۲، به علت عرض زیادتر ترک‌ها در طول تیر و تأثیر آن در جداسدگی ورق از بتن، سختی تیرهای فوق تغییر زیادتری داشته است. ضمناً با توجه به تفاوت در آج آرماتورهای نوع ۱ و ۲ و اثر آج‌ها در لغزش آرماتور در بتن بدیهی است که سختی تیرهای مذکور نمی‌توانند مشابه باشند.

نمونه‌های با پیش‌بارگذاری: در بخش کنونی، نمونه‌ها پیش از تقویت تحت بارگذاری قرار گرفتند و با وجود ترک‌های خمشی تقویت شدند. در جدول ۴، خلاصه‌ی

استاتیکی و یکپارخت انجام شده است. برای ثبت تغییر مکان وسط نمونه‌ها از یک عدد LVDT^۲ با نام تجاری Pulsotronic با خطای کمتر از ۰٫۵٪ استفاده شد. ثبت بار اعمالی توسط بارسنج با ظرفیت ۵۰۰ kN انجام شد.

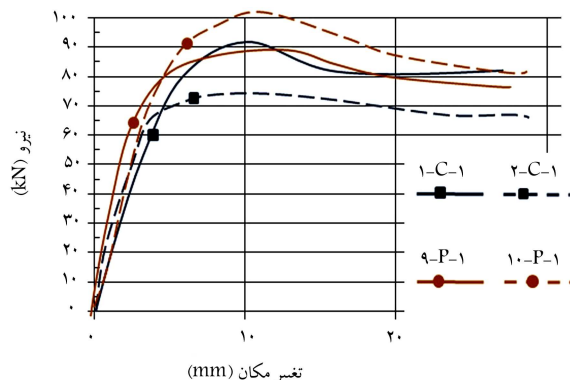
۴. تحلیل نتایج

در بخش حاضر، تحلیل نتایج به صورت دقیق و به تفکیک شرایط تیر در زمان تقویت ارائه شده است.

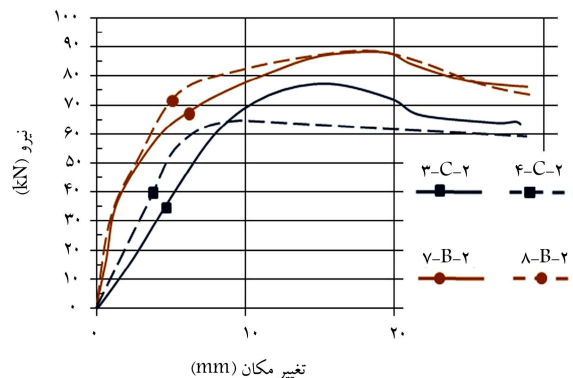
- نمونه‌های کنترلی: نمونه‌های کنترلی شامل تیرهای بدون تقویت هستند. همان‌طور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود، در صورت استفاده از آرایش آرماتور نوع ۱ در مقایسه با نوع ۲، ظرفیت بار نهایی به مقدار ۱۸٪ افزایش و مقدار تغییر مکان متناظر با بار نهایی، ۱۷٪ کاهش می‌یابد و شکست به صورت نرم‌تر اتفاق می‌افتد.
 - نمونه‌های مینا: نمونه‌های مینا در شرایط محیطی آزمایشگاه تقویت شدند. نتایج حاصل از آزمایش بر روی نمونه‌های مذکور در جدول ۳ ارائه شده است. مقایسه‌ی جدول‌های ۲ و ۳ نشان می‌دهد که تقویت خمشی با استفاده از ورق CFRP برای تیرهای مینا با آرایش آرماتور نوع‌های ۱ و ۲ به ترتیب موجب ۲۰٪ و ۱۸٪ افزایش مقاومت نهایی نسبت به نمونه‌های کنترلی شده است. همچنین تغییر مکان متناظر با بار نهایی در نمونه‌های مذکور با آرایش آرماتور نوع‌های ۱ و ۲ به ترتیب ۶۴٪ و ۷۴٪ نسبت به نمونه‌های کنترلی افزایش یافته است. همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، نوع غالب شکست، پاره و جدا شدن ورق است.
- شکل‌های ۸ و ۹، رفتار نمونه‌های مینا و کنترلی را نشان می‌دهند. از مقایسه‌ی شکل‌های مذکور مشاهده می‌شود که از دیگر آثار تقویت خمشی با ورق CFRP در تیرهای مینا با آرایش آرماتور نوع ۲، افزایش سختی خمشی تیرهای مینا نسبت

جدول ۴. خلاصه‌ی نتایج آزمایش برای نمونه‌های با پیش‌بارگذاری.

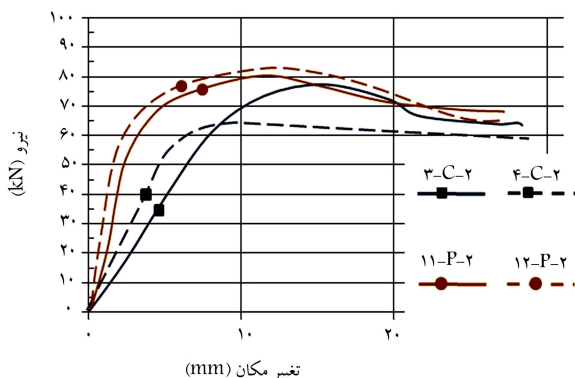
نوع آرایش آرماتور طولی	میانگین تغییر مکان متناظر با بار نهایی (mm)	میانگین بار نهایی (kN)
قطر کم و تعداد زیاد (نوع ۱)	۱۷	۹۵٫۹
قطر زیاد و تعداد کم (نوع ۲)	۱۶٫۷	۸۰٫۱



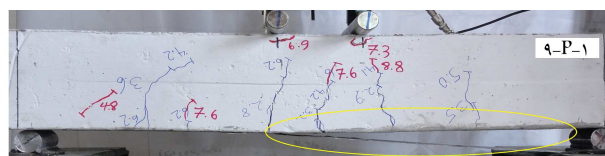
شکل ۱۱. مقایسه‌ی رفتار نمونه‌های با پیش‌بارگذاری و کنترلی با آرایش آرماتور نوع ۱.



شکل ۹. مقایسه‌ی رفتار نمونه‌های مینا و کنترلی با آرایش آرماتور نوع ۲.



شکل ۱۲. مقایسه‌ی رفتار نمونه‌های با پیش‌بارگذاری و کنترلی با آرایش آرماتور نوع ۲.



شکل ۱۰. شکست غالب در نمونه‌های با پیش‌بارگذاری.

نتایج حاصل از آزمایش بر روی نمونه‌های مذکور ارائه شده است. همان‌طور که از مقایسه‌ی جدول‌های ۳ و ۴ مشاهده می‌شود، وجود ترک اولیه در زمان تقویت، موجب کاهش بهره‌وری از ورق CFRP شده است. در حقیقت وجود ترک اولیه باعث شده است که افزایش مقاومت نهایی و تغییر مکان متناظر با بار نهایی در نمونه‌های با پیش‌بارگذاری با آرایش آرماتور نوع ۱ نسبت به نمونه‌های مینا به ترتیب از ۲۰٪ به ۱۳٪ و از ۶۴٪ به ۸۱٪ تغییر کند. همچنین افزایش مقاومت نهایی و تغییر مکان متناظر با بار نهایی در نمونه‌های با پیش‌بارگذاری با آرایش آرماتور نوع ۲ نسبت به نمونه‌های مینا به ترتیب از ۱۸٪ به ۱۲٪ و از ۷۴٪ به ۵۲٪ کاهش بیاید. همان‌طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، در بخش کنونی از نمونه‌ها، پارگی ورق مشاهده نشده و نوع غالب شکست، جدا شدن ورق از سطح تیر بوده است. برخلاف انتظار که باید به‌طور کلی پس از بارگذاری بر روی تیر بتنی (عملیات پیش‌بارگذاری)، سختی خمشی تیر کاهش یابد، مطابق شکل‌های ۱۱ و ۱۲ که رفتار نمونه‌های با پیش‌بارگذاری و کنترلی را نشان می‌دهند، پس از عملیات پیش‌بارگذاری، سختی خمشی تیر کاهش نیافت؛ بلکه مشاهده شد سختی خمشی تیرهای با پیش‌بارگذاری از سختی خمشی تیرهای کنترلی و مینا به مقدار اندک بیشتر است. دلیل این موضوع می‌تواند تقویت خمشی با استفاده از کامپوزیت‌های CFRP باشد، به عبارتی ورق CFRP کاهش سختی ناشی از پیش‌بارگذاری را جبران کرده است.

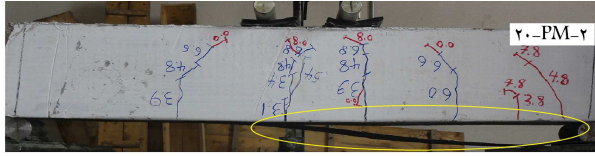
با پیش‌بارگذاری بیشتر بود. جدول ۵، خلاصه‌ی نتایج آزمایش برای نمونه‌های با رطوبت سطحی را نشان می‌دهد. مقایسه‌ی نتایج ارائه‌شده در جدول‌های ۳ و ۵ نشان می‌دهد که در نمونه‌های با آرایش آرماتور نوع ۱، افزایش مقاومت نهایی در نمونه‌های با رطوبت سطحی در مقایسه با نمونه‌های مینا از ۲۰٪ به ۹٪ و تغییر مکان متناظر با بار نهایی از ۶۴٪ به ۱۶٪ تغییر یافته است. همچنین در نمونه‌های با آرایش آرماتور نوع ۲، افزایش مقاومت نهایی در نمونه‌های با رطوبت سطحی در مقایسه با نمونه‌های مینا از ۱۸٪ به ۳٪ و تغییر مکان متناظر با بار نهایی از ۷۴٪ به ۵۴٪ تغییر یافته است. مطابق شکل ۱۳، نوع غالب شکست در بخش حاضر، جدا شدن ورق از سطح بتن بوده است.

از نتایج دیگری که در بخش حاضر می‌توان به آن اشاره کرد، مشابه بودن سختی خمشی تیرهای با رطوبت سطحی و تیرهای کنترلی است. شکل‌های ۱۴ و ۱۵، تغییرات سختی برای نمونه‌های با رطوبت سطحی و کنترلی را نشان می‌دهند. که به این دلیل است که ورق CFRP به سرعت از سطح جدا می‌شود و تأثیر ناچیزی در سختی خمشی دارد.

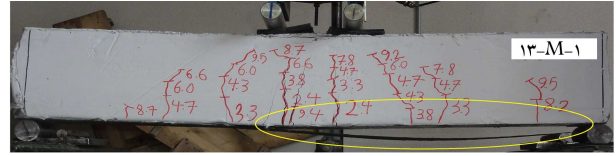
- نمونه‌های با رطوبت سطحی: نمونه‌های با رطوبت سطحی در زمان تقویت، ۹۰٪ رطوبت سطحی داشتند. همانند ترک اولیه، وجود رطوبت سطحی ۹۰٪ در زمان تقویت موجب کاهش تأثیر ورق CFRP در افزایش مقاومت شد، با این تفاوت که میزان کاهش بهره‌وری در نمونه‌های با رطوبت سطحی نسبت به نمونه‌های

جدول ۵. خلاصه‌ی نتایج آزمایش برای نمونه‌های با رطوبت سطحی.

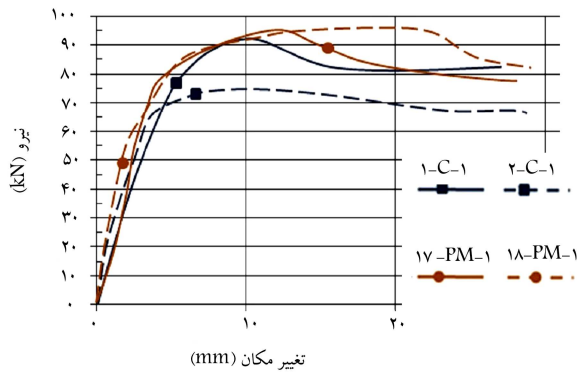
نوع آرایش آرماتور طولی	میانگین تغییر مکان متناظر با بار نهایی (mm)	میانگین بار نهایی (kN)
قطر کم و تعداد زیاد (نوع ۱)	۱۰٫۹	۹۲
قطر زیاد و تعداد کم (نوع ۲)	۱۶٫۹	۷۴



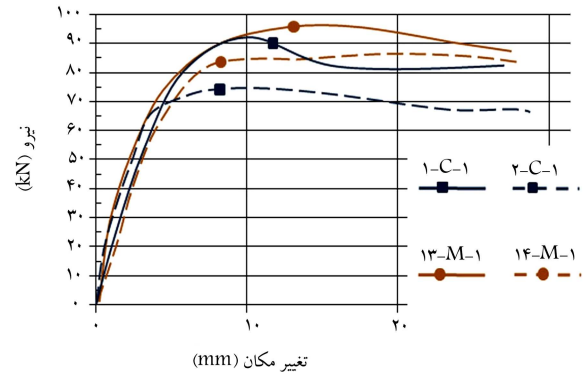
شکل ۱۶. شکست غالب در نمونه‌های با پیش‌بارگذاری و رطوبت سطحی.



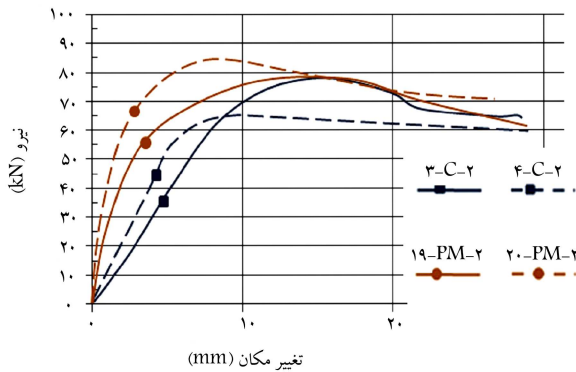
شکل ۱۳. شکست غالب در نمونه‌های با رطوبت سطحی.



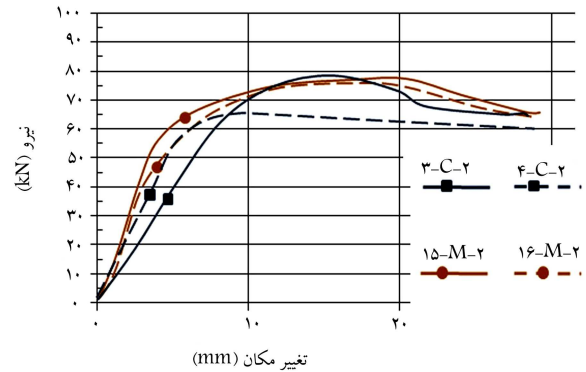
شکل ۱۷. مقایسه‌ی رفتار نمونه‌های با پیش‌بارگذاری و رطوبت سطحی و نمونه‌های کنترلی با آرایش آرماتور نوع ۱.



شکل ۱۴. مقایسه‌ی رفتار نمونه‌های با رطوبت سطحی و کنترلی با آرایش آرماتور نوع ۱.



شکل ۱۸. مقایسه‌ی رفتار نمونه‌های با پیش‌بارگذاری و رطوبت سطحی و نمونه‌های کنترلی با آرایش آرماتور نوع ۲.



شکل ۱۵. مقایسه‌ی رفتار نمونه‌های با رطوبت سطحی و کنترلی با آرایش آرماتور نوع ۲.

نسبت به نمونه‌های مینا به ترتیب از ۲۰٪ به ۱۳٪ و از ۶۴٪ به ۹۱٪ تغییر یافته است. همچنین افزایش مقاومت نهایی و تغییر مکان متناظر با بار نهایی در نمونه‌های با پیش‌بارگذاری و رطوبت سطحی با آرایش آرماتور نوع ۲ نسبت به نمونه‌های مینا به ترتیب از ۱۸٪ به ۱۳٪ و از ۷۴٪ به ۳۳٪ کاهش یافت. همان‌طور که در شکل ۱۶ مشاهده می‌شود، نوع غالب شکست در نمونه‌های مذکور، جدا شدن ورق از سطح عضو بوده است.

در شکل‌های ۱۷ و ۱۸، تغییرات بار در برابر تغییر مکان برای نمونه‌های با پیش‌بارگذاری و رطوبت سطحی و نیز نمونه‌های کنترلی مشاهده می‌شوند. از

نمونه‌های با پیش‌بارگذاری و رطوبت سطحی: در بخش حاضر، پس از اعمال بارگذاری نمونه‌ها و مشاهده‌ی ترک‌های خمشی با عرض 0.4 mm و همچنین وجود رطوبت سطحی ۹۰٪، عملیات تقویت انجام گرفت. نتایج حاصل از آزمایش بر روی نمونه‌های مذکور در جدول ۶ مشاهده می‌شود. مقایسه‌ی جدول‌های ۳، ۴ و ۶ برای هر ۲ نوع آرایش آرماتور نشان می‌دهد که ظرفیت نهایی در نمونه‌های با پیش‌بارگذاری و رطوبت سطحی با نمونه‌هایی که فقط پیش‌بارگذاری داشتند، مشابه است. به عبارت دیگر، افزایش مقاومت نهایی و تغییر مکان متناظر با بار نهایی در نمونه‌های با پیش‌بارگذاری و رطوبت سطحی با آرایش آرماتور نوع ۱

جدول ۶. خلاصه‌ی نتایج آزمایش برای نمونه‌های با رطوبت سطحی.

نوع آرایش آرما تور طولی	میانگین تغییر مکان متناظر با بار نهایی (mm)	میانگین بار نهایی (kN)
قطر کم و تعداد زیاد (نوع ۱)	۱۸/۰	۹۵/۸
قطر زیاد و تعداد کم (نوع ۲)	۱۴/۶	۸۰/۷

آرما تور طولی نوع ۱ نسبت به نمونه‌های با آرما تور طولی نوع ۲، کاهش بیشتری در مقاومت ایجاد کرده است. همچنین اثر هم‌زمان رطوبت سطحی و پیش‌بارگذاری در نمونه‌های با آرما تور طولی نوع ۱ نسبت به نمونه‌های با آرما تور طولی نوع ۲ مشهودتر بود.

۶. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، اثر پیش‌بارگذاری و رطوبت سطحی در زمان تقویت، در مقاومت نهایی نمونه‌های بتنی مسلح به دو نوع آرما تور طولی با نسبت آرما تور یکسان و تقویت‌شده با ورق‌هایی از نوع CFRP بررسی شده است. لذا تعداد ۲۰ عدد تیر بتنی به ابعاد $1150 \times 200 \times 150$ میلی‌متر ساخته شدند که پس از عمل‌آوری بتن، پیش‌بارگذاری یا رطوبت سطحی و یا هر دو حالت به صورت توأم به تیر اعمال و پس از آن عملیات تقویت انجام شد. در پایان پس از گذشت زمان مورد نیاز برای عمل‌آوری چسب، توسط جک هیدرولیکی تحت خمش ۴ نقطه‌یی قرار گرفتند. براساس اطلاعات به دست آمده از انجام آزمایش‌ها، این نتایج به دست آمده است:

۱. ظرفیت خمشی در تیرهای تقویت‌شده‌ی با آرما تور طولی با قطر کم و تعداد زیاد به طور میانگین ۱۸٪ از تیرهای با آرما تور طولی با قطر زیاد و تعداد کم (با نسبت آرما تور یکسان در مقطع)، بیشتر مشاهده شد. بنابراین استفاده از آرایش آرما تور با قطر کم و تعداد زیاد در تیرها مناسب به نظر می‌رسد.

۲. در نمونه‌های آزمایشگاهی پژوهش حاضر، تقویت تیرهای بتنی با استفاده از ورق CFRP به طور میانگین باعث افزایش مقاومت در حدود ۱۹٪ شده است. به طور کلی سختی خمشی تیر نیز افزایش یافته است.

۳. تاثیر تقویت در تغییر سختی خمشی در تیرهای تقویت‌شده با آرما تور کششی با قطر زیاد و تعداد کم (نوع ۲) نسبت به تیرهای تقویت‌شده با آرما تور کششی با قطر کم و تعداد زیاد (نوع ۱)، مشهودتر است.

۴. در نمونه‌های پژوهش حاضر مشاهده شد که اگر پیش از تقویت، پیش‌بارگذاری وجود داشته باشد، ۶٪ از مقاومت نهایی تیر تقویت‌شده به دلیل پیش‌بارگذاری کاهش می‌یابد.

۵. وجود رطوبت سطحی برابر با ۹۰٪ در زمان تقویت، میزان تأثیر ورق CFRP در ظرفیت را کاهش می‌دهد. در نمونه‌های آزمایشگاهی پژوهش حاضر، مقاومت نهایی نمونه‌ی تقویت‌شده‌ی با رطوبت سطحی نسبت به نمونه‌های با رطوبت معمولی ۱۱٪ کاهش یافت. بنابراین اگر در هنگام تقویت، رطوبت سطحی بیشتر از ۹۰٪ بر روی تیر وجود داشته باشد، باید تمهیدات خاصی اندیشیده شود.

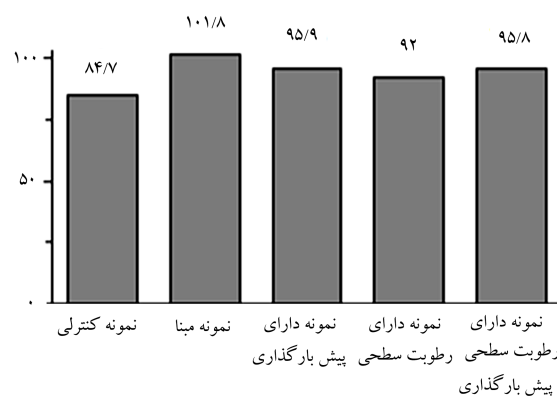
۶. شکل غالب شکست در نمونه‌های با رطوبت سطحی و ترک اولیه، جدا شدن ورق از سطح تیر است. لازم به ذکر است که در تیرهای با رطوبت سطحی نسبت به تیرهای با ترک اولیه، جدایش زودتر و در شدت بار کمتری اتفاق افتاده است.

مقایسه‌ی شکل‌های مذکور و شکل‌های ۱۱ و ۱۲ مشاهده می‌شود که رفتار و سختی خمشی نمونه‌های مذکور با نمونه‌های با فقط پیش‌بارگذاری تفاوت قابل ملاحظه‌یی ندارد.

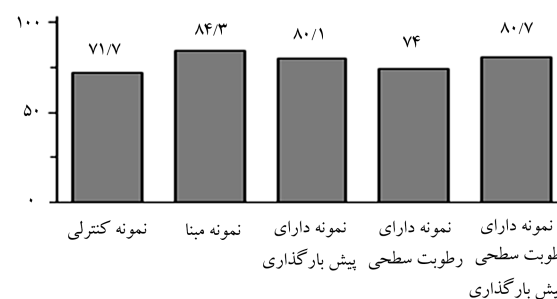
۵. جمع‌بندی نتایج آزمایشگاهی

در بخش حاضر به منظور مقایسه‌ی بهتر میزان اثرگذاری شرایط مختلف در مقاومت نهایی، خلاصه‌ی جدول‌های ۲ الی ۶ در شکل ۱۹ ارائه و جمع‌بندی شده است. همان‌طور که در شکل ۱۹ مشاهده می‌شود، روند تغییرات مقاومت در تمامی نمونه‌ها برای هر دو نوع آرایش آرما تور یکسان است. در صورتی که مقدار تغییرات مقاومت برای هر دو نوع آرایش آرما تور، متفاوت است. پیش‌بارگذاری در نمونه‌های با آرما تور طولی نوع ۲ نسبت به نمونه‌های با آرما تور طولی نوع ۱، کاهش بیشتری در مقاومت ایجاد کرد؛ در صورتی که وجود رطوبت سطحی در زمان تقویت برای نمونه‌های با

میزان بار نهایی در نمونه‌های دارای آرما تور طولی نوع ۱ (kN)



میزان بار نهایی در نمونه‌های دارای آرما تور طولی نوع ۲ (kN)



شکل ۱۹. مقایسه‌ی میانگین بار نهایی نمونه‌های با آرما تورهای طولی نوع ۱ و ۲.

پانوشتها

1. moisture meter
2. linear variable differential transformers (LVDT)

منابع (References)

1. Wan, B., Petrou, M.F. and Harries, K.A. "The effect of the presence of water on the durability of bond between CFRP and concrete", *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, **25**(8), pp. 875-890 (May, 2006).
2. Myers, J.J. and Ekenel, M. "Effect of environmental conditions on bond strength between CFRP laminate and concrete substrate", Proceeding of the 7th International Symposium on Fiber-Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures, ACI Special Publication, SP-230-89, pp. 1571-1592 (Jan., 2005).
3. Danaee, S. "Investigation of moisture effects on the bond between concrete and FRP", M.S. Thesis, The Department of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, 112 p. (2013).
4. Bischoff, P.H. "Reevaluation of deflection prediction for concrete beams reinforced with steel and fiber reinforced polymer bars", *Journal of Structural Engineering*, **131**(5), pp. 752-767 (May, 2005).
5. Bischoff, P.H. "Effects of shrinkage on tension stiffening and cracking in reinforced concrete", *Canadian Journal of Civil Engineering*, **28**(3), pp. 363-374 (2001).
6. Goto, Y. "Cracks formed in concrete around deformed tension bars", *ACI Journal*, **68**(4), pp. 244-251 (Jan., 1971).
7. Parikh, K. and Modhera, C.D. "Application of GFRP on preloaded retrofitted beam for enhancement in flexural strength", *International Journal of Civil and Structural Engineering*, **2**(4), pp. 1070-1080 (2012).
8. Morsy, A.M., El-Tony, E-T.M. and El-Neggar, M. "Flexural repair/strengthening of pre-damaged RC beams using embedded CFRP rods", *Alexandria Engineering Journal*, **54**(4), pp. 1175-1179 (Dec., 2015).
9. Ya-hong, D., Xing-guo, W., Xian-tao, Z. and Xiang-li, C. "Preloading effect on load-capacity of RC beams strengthened with FRP laminate", *Journal of Engineering Mechanics*, **24**(1), pp. 154-158 (Jun., 2007).
10. Hui, Z.A., Liang, J.W. and Bing, L.G. "Behavior of preloaded RC beams strengthened with CFRP laminates", *Journal of Zhejiang University-Science A*, **7**(3), pp. 436-444 (Mar., 2006).
11. Arduini, M. and Nanni, A. "Behavior of pre-cracked RC beams strengthened with carbon FRP sheets", *Journal of Composites for Construction*, **1**(2), pp. 63-70 (May, 1997).
12. Li, G., Zhang, A. and Guo, Y. "Effect of preload level on flexural load-carrying capacity of RC beams strengthened by externally bonded FRP sheets", *The Open Civil Engineering Journal*, **9**(1), pp. 426-434 (July, 2015).
13. Tuakta, C. "Effects of moisture on debonding in FRP-retrofitted concrete systems", Ph.D. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, 195 p. (Jun., 2011).
14. Alfar, A. "Durability of reinforced concrete members strengthened with CFRP plates and subjected to moisture and salts", Ph.D. Thesis, The Department of Architecture, Civil Engineering and Environmental Sciences of the Technology University Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, 124 p. (2006).
15. Myers, J.J., Murthy, S. and Micelli, F. "Effect of combined environmental cycles on the bond of FRP sheets to concrete", *Proceedings-Composites in Construction International Conference*, Porto, Portugal, pp. 339-344 (Oct., 2001).
16. Umar, H. and Manikandan. T. "Flexural retrofitting of RC beam using hybrid laminates", *International Journal of Science and Research*, **5**(4), pp. 2329-2333 (Apr., 2016).
17. ACI Committee 318., *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-14) and Commentary*, Farmington Hills, MI, 524 p. (2014).