

مطالعه ظرفیت خمشی تیرهای بتن سبک تقویت شده با ورق CFRP در شرایط آماده سازی سطحی مختلف

رحمت مدن دوست^۱، کامران رحیمی^۲

^۱دانشیار گروه عمران، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان

Rmadandoust@yahoo.com

^۲دانشجوی کارشناسی ارشد عمران - سازه، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان

Rahimikamran@yahoo.com

Rahimikamran@yahoo.com

چکیده

در صنعت سازه کاهش بار مرده ساختمان منجر به تضعیف اثر نیروی زلزله می گردد. در این شرایط استفاده از بتن سبک اهمیت خاصی یافته و این نوع بتن را با بتن های نرمال قابل رقابت می کند. چنانچه سازه های بتن آرمه به دلایل گوناگونی آسیب بینند، روش مناسب و مدرن به منظور تقویت و بهسازی، استفاده از ورق های FRP می باشد. از این ورق ها در اجزای سازه ای به ویژه تیر، برای عملیات مقاوم سازی مانند نصب در سطح کششی استفاده می گردد. مزایای ورق FRP؛ بالا بودن مقاومت ورق نسبت به وزن خود، دوام بالا و سهولت اجرای کار می باشد که مسئله بالا بودن هزینه الیاف کربن را پوشش می دهد. در سال های اخیر برای افزایش ظرفیت باربری و جلوگیری از پدیده جداشدگی ورق، تحقیقاتی صورت گرفته و روش های آماده سازی سطحی مختلفی معرفی شده که اخیراً توسط محققین، روش شیارزنی به عنوان جایگزین روش های مرسوم، ارائه شده است. در این مطالعه آزمایشگاهی، ۸ تیر بتن مسلح با دو نوع بتن سبک سازه ای و نرمال، در ابعاد یکسان ۱۰۰×۱۶۰×۱۲۰۰ میلی متر به دو روش آماده سازی نصب خارجی (EBR) و شیارزنی (GM) با ورق های CFRP تقویت شده و تحت بارگذاری ۴ نقطه ای قرار گرفته اند. برای جلوگیری از شکست ترد در بتن سبک، از روش ابداعی تقویت ناحیه فشاری با رزین اپوکسی استفاده شده است. نتایج به دست آمده نشان می دهد که افزایش ظرفیت باربری تیرهای بتن سبک و نرمال، در تیر تقویت شده به صورت GM نسبت به تیر شاهد، به ترتیب ۲۵ و ۲۷ درصد، افزایش کرنش گسیختگی ورق در روش شیارزنی نسبت به روش نصب خارجی، در تیر بتن سبک ۴۵ و تیر بتن نرمال ۱۰ درصد بوده و با تقویت ناحیه فشاری تیرهای بتن سبک، مود گسیختگی از شکست ترد به نرم تبدیل می شود.

واژه های کلیدی: تیر بتن سبک، روش شیارزنی، جداشدگی ورق CFRP، روش نصب خارجی، ظرفیت باربری نهایی

۱. مقدمه

سبک سازی ساختمان از اولویت های مهم طراحان و محققین می باشد. در این شرایط نام بتن سبک بیش از پیش به چشم می خورد. این بتن، با کاهش بار مرده ساختمان، هنگام زلزله از نیروی وارد بر سازه کاسته و در صورت تخریب آن، وزن مصالح آوار شده کم خواهد بود [۱ و ۲]. بتن سبک نسبت به بتن نرمال ضعف هایی چون پایین بودن وزن مخصوص و مقاومت فشاری دارد اما خصوصیات مانده آنچه در بالا ذکر شد این نوع بتن را با بتن نرمال قابل رقابت کرده است. سازه های بتن مسلح موجود بر اساس آیین نامه های قدیمی طراحی شده و الزامات آیین نامه های جدید زلزله را ارضا نمی کنند. از این رو ضرورت تقویت و بهسازی سازه ها با روش های مقاوم سازی قابل اعتماد، آسان، سریع و اقتصادی [۳] مانند استفاده از ورق های FRP، احساس می شود. به همین منظور، عطاری و همکاران تیرهای بتن مسلح را با ورق های CFRP (دارای الیاف کربن) و GFRP (دارای الیاف شیشه) تقویت کرده و پس از آزمایش ۴ نقطه ای روی آن ها، نتیجه گرفتند ظرفیت خمشی در حالت استفاده هم زمان الیاف کربن و شیشه، ۱۱۴ درصد نسبت به تیر کنترل بالا رفت [۴]. اغلب برای مقاوم سازی تیرهای بتن آرمه، از ورق های CFRP به علت داشتن ظرفیت تنش بالاتر نسبت به انواع الیاف دیگر، رفتار ارتجاعی تا حد گسیختگی، مدول الاستیسیته بالا تا حدود ۷۰۰ گیگاپاسکال، کرنش نهایی ۳ - ۲،۵ درصد (تقریباً ۱۰ برابر فولاد معمولی) استفاده می گردد [۵]. آیین نامه های مختلف مانند ACI-440 و FIB ضوابط طراحی و اجرایی را برای بهتر شدن اتصال ورق به سطح بتن ارائه داده اند. [۶ و ۷]. از روش های متداول در اتصال ورق به تیرهای بتنی، نصب خارجی یا EBR^۱ می باشد. بروس و همکاران، ورق و لمینت های CFRP را به صورت EBR به کمک رزین اپوکسی در شکاف های سطح کششی بتن قرار دادند و نتیجه گرفتند که لمینت های نصب شده در حالات یک و دو لایه دچار پدیده جدایش شدند [۸]. علاوه بر این مستوفی نژاد و طباطبایی کاشانی، پس از تقویت تیرهای بتنی به روش EBR، به این نتیجه رسیدند که گرچه ظرفیت باربری تیرها نسبت به تیر شاهد، تا ۱۳ درصد بالا رفته اما ورق از سطح بتن جدا شده است [۹]. این مسئله، موجب شد تا مستوفی نژاد و محمودآبادی راهکاری جدید ارائه داده و روش شیارزنی روی سطح کششی بتن^۲ (GM) را معرفی کنند [۱۰]. بهبود پیوند و چسبانندگی رزین در کنار افزایش ظرفیت باربری ورق در اثر آماده سازی اولیه و افزایش اصطکاک ورق با سطح بتن نتیجه ای بود که مدندوست و همکارش در یک تحقیق تجربی گرفته [۱۱] و دقیقاً در روش شیارزنی این مهم به وقوع می پیوندد. مستوفی نژاد و مقدس، برای ارزیابی چسبندگی ورق CFRP به سطح بتن، از روش های آماده سازی سطحی نصب خارجی و شیارزنی استفاده کرده و نتیجه گرفتند که پس از تسلیم میلگردها، در روش EBR، جدایش ورق و در روش GM، پارگی ورق رخ داد. با افزایش درصد فولاد میلگرد های خمشی، ظرفیت باربری تیرها در روش شیارزنی نسبت به نصب خارجی در کمترین حالت ۷ و در بیشترین حالت ۲۲ درصد افزایش پیدا کرد. سطح زیر نمودار بار - خیز وسط دهانه تیرهای تقویت شده به روش شیارزنی بیش از تیرهای تقویت شده به روش نصب خارجی شد که نشان از شکل پذیری بیشتر روش GM نسبت به EBR بود. ظرفیت باربری نهایی تیرهای تقویت شده نسبت به تیر شاهد، در روش EBR، ۲۷ درصد و در روش GM، ۳۹ درصد افزایش پیدا کرد [۱۲]. هدف اصلی در این مطالعه آزمایشگاهی جلوگیری از شکست ناشی از جدایش بوده و برای کسب حداکثر میزان ظرفیت باربری ورق، از روش آماده سازی سطحی شیارزنی استفاده شده است. نکته قابل تامل در این مطالعه، تقویت تیرهای بتن مسلح سبک با ورق CFRP می باشد که تاکنون مطالعه خاص و قابل توجهی روی آن نشده است.

۲. برنامه آزمایشگاهی

۲-۱ مشخصات تیرها، لوازم و تجهیزات آزمایش

در مطالعه پیش رو، تعداد ۸ تیر مسلح شامل ۴ تیر بتن نرمال و ۴ تیر بتن سبک ساخته و آماده تقویت شد (شکل ۱-۲). بدین منظور تیرهای ساخته شده پس از ۲۴ ساعت از قالب خارج و ۲۸ روز در آب نگهداری شدند. پس از گذشت زمان لازم برای خشک شدن سطح کششی تیرها، اقدامات مربوط به تقویت و آماده سازی سطحی آن ها صورت گرفت. دانه بندی مصالح طبق استاندارد ASTM C136 انجام شده است. جزئیات طرح مخلوط بتن های ساخته شده در جدول ۱ آمده است. بدین منظور از سیمان پرتلند تیپ ۲ کارخانه سیمان هگمتان به وزن مخصوص ۳,۱۵ گرم بر سانتی متر مکعب، از ماسه رودخانه‌ای و گردگوشه تحت عنوان ماسه ۰-۶ کارخانه لوله سازی شمال که وزن مخصوص آن در حالت اشباع با سطح خشک ۲۶۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب و جذب آب ۲,۴ درصد بوده و از لیکا به قطر ۳ تا ۱۲ میلی متر محصول کارخانه لیکا ساوه، برای ساخت بتن استفاده و جهت مسلح کردن تیرها، برای خمش از دو میلگرد فولادی به قطر ۱۰ میلی متر در ناحیه های کششی و فشاری و در برش از خاموت هایی به قطر و فاصله ۸ و ۵۰ میلی متر استفاده شد. برای جلوگیری از شکست ترد بتن سبک که در تحقیقات پیشین به آن اشاره شده است [۱۳]، شیاری به عمق و عرض ۸×۱۰ میلی متر در ناحیه فشاری آن زده شد و با رزین اپوکسی دو جزئی تقویت گردید. با هدف رسیدن به نتایج حاصل از خمش، طرح تیر طوری صورت گرفت که ظرفیت خمشی از ظرفیت برشی پایین تر باشد. تیرها تحت آزمایش بارگذاری ۴ نقطه ای استاتیکی خمشی قرار گرفتند. مراحل آزمایش در آزمایشگاه سازه دانشکده فنی دانشگاه گیلان انجام شد و از دستگاه تست خمش تا ظرفیت ۳۰۰ کیلونیوتن، کرنش سنج (LVDT) برای محاسبه خیز میانی تیرها در وسط تیر و دستگاه دیتا لاگر GL220-820APS برای ثبت داده ها استفاده شد. محاسبه تغییرات کرنش ورق متناسب با بار وارده توسط یک کرنش سنج الکتریکی در وسط تیر (ناحیه خمش خالص) صورت گرفت. برای تقویت تیرها از ورق کربنی SikaWrap.200C به مقاومت کششی ۳۹۰۰ مگاپاسکال و کرنش نهایی ۱,۵ درصد و رزین اپوکسی دو جزئی Sikadur.330 به مقاومت کششی ۳۰، مدول الاستیسیته خمشی ۳۸۰۰، مدول الاستیسیته کششی ۴۵۰۰ مگاپاسکال و کرنش نهایی ۰,۹ استفاده شد.



شکل ۱-۲: تیرهای بتن آرمه ساخته شده

جدول ۱: طرح مخلوط بتن های ساخته شده

مقاومت مشخصه MPa	لیکا (kg/m ³) (۶-۱۲,۵) - (۳-۶) mm	ماسه kg/m ³	شن kg/m ³	آب kg/m ³	سیمان kg/m ³	بتن
۲۲	0	990	990	150	300	نرمال
۲۳	420-200	550	0	140	360	سبک

۲-۲ تقویت تیرها

در شکل ۲-۲ نوع تقویت تیرها نمایش داده شده است. تیرهای CB و LWCB به عنوان تیر شاهد ساخته شدند. سطح کششی تیرهای CB-EBR و LWCB-EBR توسط یک لایه ورق CFRP تقویت شد. بدین منظور پس از ساخت تیرها، سطح کششی بتن، با فرچه سنگ تروست طوری ساییده گردید تا لایه ضعیف بتن برداشته شده و سنگدانه های آن نمایان گشت. سپس آلودگی و گرد و خاک سطح شست و سو داده شد و منافذ سطحی با رزین پر شد. پس از خشک شدن سطح، ورق CFRP به طول و عرض ۶۰ × ۹۰۰ میلی متر با رزین اپوکسی دو جزئی روی آن چسبانده شد. از آن جایی که در تیرهای بتن سبک و بتن نرمال تقویت شده به روش نصب خارجی، پدیده جداشدگی ورق از سطح بتن رخ داد، از روش شیارزنی برای تقویت استفاده شده و تیرهای CB-GM و LWCB-GM ساخته و تقویت شدند. بدین منظور در روش GM، ابتدا سطح کششی بتن با فرچه سنگ تروست ساییده شد تا لایه ضعیف بتن برداشته شود و سپس سه شیار طولی به طول و عرض ۸ × ۹۰۰ و به عمق ۱۰ میلی متر در سطح کششی زده شد و پس از شست و سوی این ناحیه، ورق به طول و عرض ۶۰ × ۹۰۰ میلی متر روی سطح کششی با رزین چسبانده شد. ناحیه فشاری تیرهای بتن سبک هم با رزین اپوکسی تقویت شدند (در تیر LWCB تقویت فشاری انجام نشد). بدین منظور یک شیار به عمق و عرض ۸ × ۱۰ میلی متر در سطح فشاری تیر زده شد و پس از شست و سوی این ناحیه، رزین اپوکسی درون شیار ریخته شد.



الف) به ترتیب از راست: تقویت ناحیه فشاری با رزین، شیارزنی ناحیه کششی تیرهای بتن سبک و نرمال



ب) تقویت ناحیه کششی تیرهای بتن مسلح سبک و نرمال با ورق CFRP
شکل ۲-۲: تقویت تیرهای بتن مسلح سبک و نرمال با ورق CFRP

۳. ارائه نتایج و تحلیل

۳-۱: مشاهدات آزمایشگاهی

در شکل ۳-۱ مود گسیختگی تیرها نمایش داده شده است. مود شکست در تیر CB، ظهور ترک های خمشی در ناحیه کششی و انهدام بتن فشاری بود. در تیر CB-EBR، ورق به همراه ضخامت کمی از پوشش بتن، دچار پدیده جداسازی شد و ناحیه فشاری سالم ماند. طبق تحقیقات پیشین [۱۴]، معمولا جداسازی از میانه تیر آغاز و به انتهای ورق سرایت می کند. در این مطالعه، برای دو انتهای تیر، ضخامت پیوند در ناحیه تماس ورق و سطح بتن با رزین اپوکسی بیش تر شد و مشاهده گردید که جداسازی ورق از میانه آغاز شد، اما به علت چسبندگی بالای ورق به سطح بتن در دو انتهای تیر، ورق از وسط پاره شد. پس مود شکست از نوع جداسازی گزارش شد. در تیر CB-GM، پیش از آن که ناحیه فشاری دچار انهدام شود، ورق در موقعیت زیر بار متمرکز، پاره شده و به همراهش پوشش بتن طوری که میلگردهای کششی قابل مشاهده باشند، جدا شد. این مود شکست، مزیت روش شیاری را نسبت به روش نصب خارجی نشان می دهد. نتایج در تیر LWCB، مشابه با تیر CB بود. نتایج در تیر LWCB-EBR مشابه با تیر CB-EBR بود با یک تفاوت که بر خلاف تیر بتن نرمال، در تیر بتن سبک، ورق به تنهایی جدا شده و همراه آن ضخامتی از پوشش بتن بلند نشد. در تیر LWCB-GM هم نتایج مشابه تیر CB-GM مشاهده شد. نکته قابل تامل، تاثیر رزین در جلوگیری از انهدام ناحیه فشاری تیرهای بتن سبک بود که مود شکست را از ترد به نرم تبدیل کرد. به نظر می رسد تقویت ناحیه فشاری، افزایش ضخامت پیوند ورق و سطح بتن در نواحی انتهایی ورق و استفاده از لیکای مناسب سازه ای، عملکرد بتن سبک را به بتن نرمال نزدیک کرده است. مود شکست در این مطالعه با مطالعه مستوفی نژاد و خزاعی [۱۵] مقایسه و دیده شد که مود شکست تیرهای بتن نرمال در هر دو مطالعه مشابه می باشد.



الف) تیرهای بتن نرمال (به ترتیب از راست): CB - CB-EBR - CB-GM



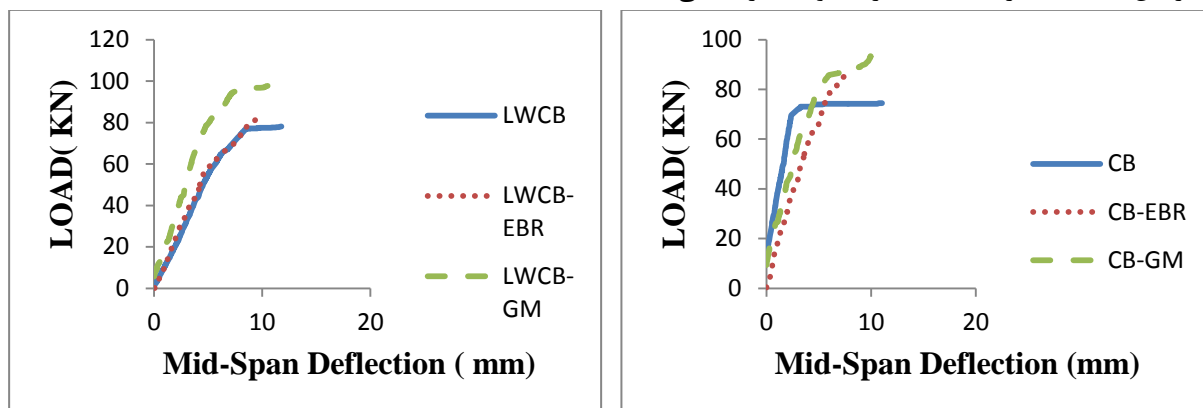
ب) تیرهای بتن سبک (به ترتیب از راست): LWC.B- LWC.EBR – LWC.GM

شکل ۱-۳: مود گسیختگی تیرهای بتن مسلح تقویت شده با ورق CFRP

۳-۲: نمودار بار – خیز وسط دهانه تیرهای بتن مسلح

نمودار بار – خیز وسط دهانه تیرهای بتن مسلح در شکل ۳-۲ و مشاهدات آزمایشگاهی به همراه خلاصه نتایج در جدول ۲ نمایش داده شده است. با توجه به این ها، همانطور که انتظار می رفت، در تیرهای شاهد خیز نهایی بیشتری رخ داده و استفاده از ورق CFRP، خیز نهایی تیرهای بتنی تقویت شده را کاهش داد. خیز نهایی تیر بتن سبک در روش شیارزنی ۱۰ و در روش نصب خارجی ۱۸ درصد و خیز نهایی تیر بتن نرمال در روش شیارزنی ۹ و در روش نصب خارجی ۳۱ درصد (نسبت به تیر شاهد) کاهش یافت. خیز نهایی تیرهای بتن سبک تقویت شده به روش GM، ۱۰،۵ میلی مترو تیر تقویت شده به روش EBR، ۹،۶ میلی متر فرائت شد که نشان دهنده افزایش ۹،۵ درصدی خیز نهایی در روش شیارزنی نسبت به نصب خارجی می باشد. خیز نهایی تیر بتن نرمال در روش GM، برابر ۱۰،۰۴ میلی متر و در روش EBR برابر ۷،۶ میلی متر خوانده شد که افزایش ۳۲ درصدی را گزارش می دهد. از نتایج فوق برمی آید که خیز نهایی تیرها در روش GM نسبت به روش EBR افزایش یافته است. این درصد افزایش در بتن نرمال حدود ۲۲ درصد بیش از بتن سبک بود. ظرفیت باربری نهایی تیرهای بتن سبک و بتن نرمال تقویت شده به روش GM نسبت به تیر شاهد به ترتیب ۲۵ و ۲۷ درصد و در روش EBR، به ترتیب ۶ و ۱۵ درصد افزایش داشته است. بنابراین ظرفیت خمشی تیرهای هر دو نوع بتن در روش GM نسبت به روش EBR افزایش بیشتری داشته و در بتن نرمال این درصد افزایش در هر دو روش تقویت بیش از بتن سبک بوده است. از مقایسه نتایج روش تقویت GM نسبت به روش تقویت EBR، در شکل پذیری تیرهای بتنی نتیجه شد که این مقدار در تیرهای بتن سبک و بتن نرمال به ترتیب ۴ و ۶۶ درصد افزایش داشته است. افزایش شکل پذیری در بتن نرمال بیش از بتن سبک بوده و مشخص است که در هر دو روش، استفاده از ورق، شکل پذیری تیرهای بتنی را کاهش داده است. بیشترین مقدار مربوط به شکل پذیری، برای نمونه های شاهد بوده که در آن ها از ورق استفاده نشده است. از مقایسه بتن های سبک و نرمال نتیجه شد که در حالت تقویت تیر به روش شیارزنی، خیز نهایی وسط دهانه و ظرفیت باربری نهایی تیر بتن سبک نسبت به تیر بتن نرمال به ترتیب ۴ و ۳ درصد افزایش داشته است. نزدیکی نتایج دو نوع بتن در این مطالعه، موید این نکته است که بتن سبک با بتن نرمال قابل رقابت بوده و علت این امر را می توان در مواردی چون استفاده از لیکای سازه ای با کیفیت و اجرای مناسب دانست. با توجه به مود گسیختگی در تیرهای بتن سبک می توان نتیجه گرفت که تقویت ناحیه فشاری با رزین اپوکسی در تیرهای LWC.B-GM و LWC.EBR موجب تغییر مود شکست تیر از انهدام ناحیه فشاری شد. نتایج مطالعه پیش رو با مطالعه مستوفی نژاد و خزاعی [۱۵]، مقایسه شد و مشاهده گردید که در بیشتر بودن ظرفیت باربری نهایی و شکل پذیری تیرهای تقویت شده به روش شیارزنی نسبت به روش نصب خارجی، هر دو مطالعه مشابه می باشند اما به علت تفاوت های طراحی و اجرایی مانند: ابعاد، طرح اختلاط، اجرا و مقاومت مشخصه بتن، دقت تجهیزات و لوازم آزمایش و ...، در مطالعه مستوفی نژاد و خزاعی درصد افزایش ها بالاتر می باشد. مثلاً ظرفیت باربری نهایی تیرهای بتن نرمال تقویت شده به

روش GM نسبت به تیر شاهد در بیشترین و کمترین مقدار ۱۰۶ و ۵۸ درصد و در تیرهای تقویت شده به روش EBR، ۷۵ و ۳۰ درصد افزایش داشته که در مطالعه حاضر ۲۷ و ۱۵ درصد می باشد.



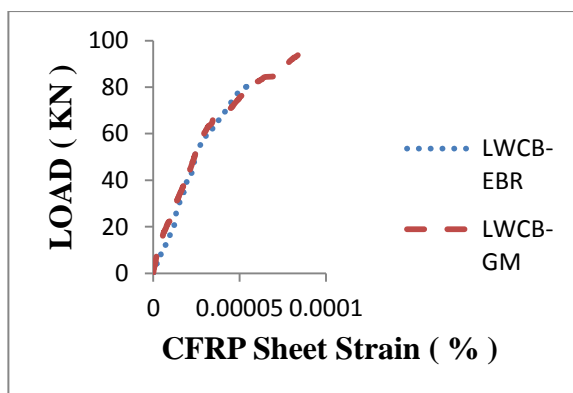
الف) تیرهای بتن نرمال ب) تیرهای بتن سبک
شکل ۳-۲: نمودار بار - خیز وسط دهانه تیرهای بتن مسلح نرمال و سبک

جدول ۲: مشاهدات آزمایشگاهی به همراه نتایج حاصل از نمودار بار - خیز وسط دهانه (خیز به میلی متر و ظرفیت باربری به کیلونیوتن)

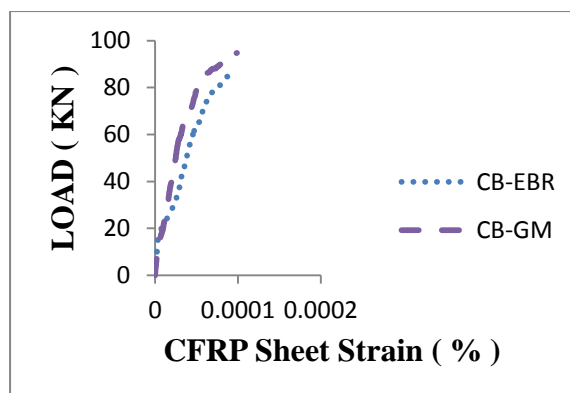
$\frac{\Delta u}{\Delta y}$	$\frac{P_u}{P_{u \text{ کنترل}}}$	$\frac{\Delta y}{\Delta y \text{ کنترل}}$	حد گسیختگی		حد جاری شدن		مود شکست	تیرها
			P_u	Δu	P_y	Δy		
۳,۶۶	۱	۱	۷۴,۴	۱۱,۰۳	۷۲,۱۹	۳,۰۱۵	شکست خمشی	CB
۱,۵۳	۱,۱۵	۱,۶۴	۸۵,۹	۷,۶	۶۴,۷	۴,۹۵	جداشدگی ورق	CB-EBR
۲,۵۴	۱,۲۷	۱,۳۱	۹۴,۷	۱۰,۰۴	۶۷,۲	۳,۹۵	پارگی ورق	CB-GM
۲,۸۸	۱	۱	۷۸,۱	۱۱,۷	۴۴,۰۲	۴,۰۹	شکست خمشی	LWCB
۲,۴۵	۱,۰۶	۰,۹۶	۸۲,۷	۹,۶	۴۳,۴	۳,۹۱	جداشدگی ورق	LWCB-EBR
۲,۵۶	۱,۲۵	۱,۰۰۲	۹۷,۶	۱۰,۵	۶۷,۵	۴,۱	پارگی ورق	LWCB-GM

۳-۳: نمودار بار - کرنش ورق کربنی

شکل ۳-۳ روند تغییرات کرنش ورق را نسبت به بار وارده نشان می دهد. در هر دو نوع بتن، کرنش ورق با افزایش بار بالا رفت. افزایش کرنش نهایی ورق در لحظه گسیختگی تیر، در روش شیارزنی نسبت به روش نصب خارجی در بتن سبک ۴۵ و در بتن نرمال ۱۰ درصد بود. از بند ۳-۱ می دانیم در روش تقویت شیارزنی، محل پارگی ورق زیر بار متمرکز است و از آن جایی که محل نصب کرنش سنج الکتریکی در این مطالعه در ناحیه خمش خالص یا بین دو بار متمرکز (وسط تیر) می باشد، بنابراین کرنش نهایی ورق طبق اطلاعات کارخانه سازنده (۱,۵ درصد) ثبت نشده و مقدار کرنش نهایی گزارش شده در نمودار شکل ۳-۳ مربوط به ورق پاره نشده در وسط تیر است. می توان از کرنش سنج الکتریکی در موقعیت زیر بارهای متمرکز استفاده کرد و کرنش گسیختگی ورق را ثبت کرد. میزان کرنش ورق در هر دو شرایط آماده سازی سطحی در بتن نرمال بیش از بتن سبک بوده است. در تیرهای تقویت شده به روش EBR به علت پدیده جداشدگی ورق از سطح کششی بتن، از تمام ظرفیت ورق استفاده نشد و به علت افزایش ضخامت پیوند ورق و سطح بتن، ورق پس از جداشدگی از سطح در وسط پاره شد. اعداد ثبت شده نشان از پارگی ورق پس از جداشدگی می دهند که آن هم به علت شکل پذیری پایین ورق است. نزدیکی و تشابه تغییرات کرنش ورق، در دو روش آماده سازی سطحی، برای تیرهای بتن سبک نسبت به تیرهای بتن نرمال، به وضوح قابل مشاهده است.



ب) تیرهای بتن سبک



الف) تیرهای بتن نرمال

شکل ۳-۳: نمودار بار - کرنش ورق CFRP در تیرهای بتن مسلح نرمال و سبک

۴- نتیجه گیری

با توجه به مشاهدات آزمایشگاهی، نمودار بار - خیز وسط دهانه، نمودار بار - کرنش ورق CFRP و جداول و شکل های ارائه شده، نتایج زیر قابل استخراج است.

- * در اثر تقویت ناحیه فشاری تیرهای بتن سبک با رزین اپوکسی دو جزئی، مود شکست از گسیختگی ترد به نرم تبدیل شد.
- * مود شکست بتن های سبک و نرمال در تیرهای شاهد، انهدام ناحیه فشاری، در تیرهای تقویت شده به روش EBR، پدیده جداشدگی ورق از سطح بتن و در تیرهای تقویت شده به روش GM، پارگی ورق و جداشدن پوشش بتن بود.

* ظرفیت باربری نهایی تیرهای بتن سبک و بتن نرمال تقویت شده به روش شیارزنی نسبت به تیر شاهد به ترتیب ۲۵ و ۲۷ درصد و در تیرهای تقویت شده به روش نصب خارجی، به ترتیب ۶ و ۱۵ درصد افزایش داشته است. میزان افزایش باربری نهایی در روش شیارزنی نسبت به روش نصب خارجی، نمایانگر برتری روش GM در بتن سبک و نرمال است.

* حداکثر خیز نهایی وسط دهانه در تیرهای شاهد گزارش شد. در اثر استفاده از ورق برای تقویت تیرها، خیز نهایی تیر بتن سبک در روش شیارزنی ۱۰ و در روش نصب خارجی ۱۸ درصد و خیز نهایی تیر بتن نرمال در روش شیارزنی ۹ و در روش نصب خارجی ۳۱ درصد کاهش یافته است. از مقایسه نتایج دو روش تقویت EBR و GM نتیجه شد که خیز وسط دهانه تیر بتن سبک و نرمال در روش شیارزنی نسبت به روش نصب خارجی به ترتیب ۹٫۵ و ۳۲ درصد افزایش داشته است.

* افزایش شکل پذیری تیر بتن سبک و بتن نرمال در روش شیارزنی نسبت به روش نصب خارجی به ترتیب ۴ و ۶۶ درصد گزارش شد. افزایش شکل پذیری در بتن نرمال بیش از بتن سبک بود و استفاده از ورق، موجب کاهش شکل پذیری تیرهای بتنی شد. بیشترین مقدار مربوط به شکل پذیری تیرهای بتنی، مربوط به نمونه های شاهد بود که در آن ها از ورق استفاده نشد.

* با افزایش بارگذاری، کرنش ورق تقریباً به صورت ارتجاعی بالا رفته و درصد افزایش کرنش ورق در روش GM بیش از روش EBR بوده است. افزایش کرنش نهایی ورق در لحظه گسیختگی تیر، در روش شیارزنی نسبت به روش نصب خارجی در بتن سبک ۴۵ و در بتن نرمال ۱۰ درصد بوده است. بنابراین در روش شیارزنی ظرفیت بیشتری از ورق نسبت به روش نصب خارجی استفاده شد.

۵- منابع و مراجع

- [1] Saradhi Babu, Danneti., Ganesh Babu, K., Wee Tiong-Huan. (2006). "Effect of polystyrene aggregate size on strength and moisture migration characteristics of lightweight concrete". Cement & Concrete Composites, 28, 520-527.
- [2] Saradhi, D., Ganesh Babu, K. (2003). "Behavior Of Lightweight Expanded Polystyrene Concrete Containing Silica Fume". Cement & Concrete Research, 33, 755-762.
- [۳] حاجی رضایی، کامین. (۱۳۹۳). "بررسی اثر آرایش الیاف CFRP در افزایش باربری جانبی دیوارهای برشی کوپله تقویت شده در تیر همبند". دلدنوا، دانشگاه آزاد قزوین.
- [4] Attari, N., Amziane, S., Chemrouk, M. (2012). "Flexural strengthening of concrete beams using CFRP, GFRP and hybrid FRP sheets". Construction and Building Materials, 37, 746-757.
- [5] Carolin, Auder. (2003). "Carbon Fiber Reinforced Polymers For Strengthening Of Structural Elements". Doctoral Thesis, ISBN:LTU-DT -3/18 -SE PP, 15-80.
- [6] ACI Committee 440, ACI 440.2R-08. Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures, USA.
- [7] International Federation for Structural Concrete, 2001, Externally bonded FRP reinforcement for RC structures, fib Bulletin 14.
- [8] Barros, J.A.O., Dias, S.J.E., Lima, J.L.T. (2007). "Efficacy of CFRP-based techniques for the flexural and shear strengthening of concrete beams". Cement & Concrete Composites, 29, 203-217.
- [9] Mostofinejad, D., Tabatabaei Kashani, A. (2013). "Experimental study on effect of EBR and EBROG methods on debonding of FRP sheets used for shear strengthening of RC beams". Composites: Part B, 45, 1704-1713.
- ۱۰- مستوفی نژاد، داود، خزاعی، کامیار. (۱۳۹۱). "تعیین طول موثر شیار در روش شیارزنی جهت جلوگیری از جداشدگی ورق CFRP از سطح بتن". چهارمین کنفرانس ملی سالیانه بتن ایران - تهران.

- ۱۱- مدندوست، رحمت، صادقی چهارده، علی. (۱۳۹۵). "ارزیابی روش کاشت پیچ و تأثیر آن بر مشخصات مکانیکی نمونه های مقاوم سازی شده با CFRP تحت بارگذاری خمشی". دومین کنفرانس بین المللی دستاوردهای نوین پژوهشی در عمران، معماری و مدیریت شهری.
- [12]Mostofinejad, D., Moghaddas, Amirreza. (2014). " Bond-efficiency-of-EBR-and-EBROG-methods-in-different-flexural-failure-mechanisms-of-FRP-strengthened-RC-beams". Construction and Building Materials, 54, 605-614.
- ۱۳- صدر ممتازی، علی، مومنی نژاد، کسری. (۱۳۹۳). " رفتار خمشی تیرهای بتنی مسلح با سنگدانه لیکا تقویت شده به وسیله میلگرد های GFRP به روش NSM". پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه گیلان، گیلان.
- [14]Jumaat, M.Z., Rahman, M.A., Alam, M.A., Rahman, M.M. (2011). " Premature failures in plate bonded strengthened RC beams with an emphasis on premature shear: A review". Journal Of Structural Engineering, 4, 367-373.
- [15]Mostofinejad, D., Khozaei, K. (2015). " Effect of GM patterns on ductility and debonding control of FRP sheets in RC strengthened beams". Construction and Building Materials, 93, 110-120.