

بررسی آزمایشگاهی مقاومسازی برشی تیرهای بتن مسلح با استفاده از

صفحات پیش ساخته RPC (کد B۳۱)

کیان آغنی^۱، حسن افشین^۲

۱- دانشجوی دکتری مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی سهند تبریز - kian.aghani@gmail.com

۲- دانشیار دانشکده مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی سهند تبریز - hafshin@sut.ac.ir

چکیده:

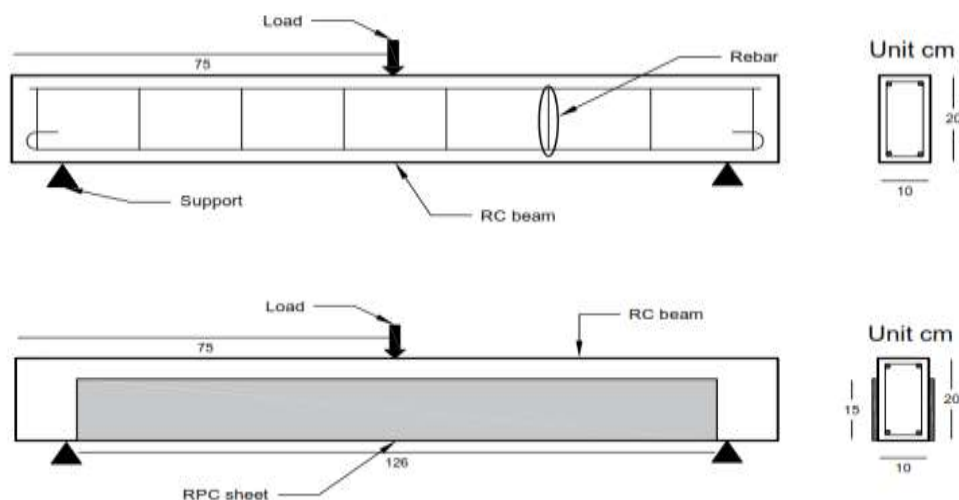
روش‌های مختلفی برای مقاومسازی اعضای بتن آرمه وجود دارد. یکی از روش‌های نوین در این زمینه، استفاده از الحاق صفحات بتنی ساخته شده از بتن پودری واکنش‌پذیر یا RPC جهت افزایش ظرفیت خمشی و برشی عضو بتنی می‌باشد. این تحقیق، کاربرد استفاده از صفحات پیش ساخته بتن پودری واکنش‌پذیر به عنوان قطعات چسبانده شده به وجوه جانبی تیرهای بتن آرمه جهت تامین مقاومت برشی و خمشی را به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار می‌دهد. تعداد ۸ نمونه تیر مسلح شده بتن معمولی به ابعاد $10 \times 20 \times 150$ cm با دو ظرفیت خمشی مختلف و با نقاط ضعف و کمبود ظرفیت برشی ساخته شده‌اند. ۴ عدد از این نمونه‌ها به عنوان نمونه‌های کنترلی و ۴ عدد دیگر به عنوان نمونه‌های مقاومسازی شده با صفحات جانبی RPC تحت آزمایش بارگذاری سه نقطه‌ای قرار گرفته‌اند. ابعاد ورق‌های ساخته شده جهت مقاومسازی تیرهای بتن مسلح $3 \times 15 \times 126$ cm می‌باشد. نتایج بدست آمده از این پژوهش آزمایشگاهی نشان می‌دهند که الحاق و چسباندن صفحات RPC به خوبی می‌تواند در مقاومسازی تیرهای بتن مسلح به کار روند. در این نوع مقاومسازی نحوه اتصال صفحات الحاقی به تیرهای اصلی نقش اساسی در رفتار تیرهای مقاومسازی شده دارد.

۱- مقدمه

روش‌های مختلفی برای مقاومسازی و تامین تغییر شکل اعضا سازه ارائه شده است که از متداول‌ترین آنها می‌توان به استفاده از ورق‌های کامپوزیت FRP، ژاکت‌های فولادی و بتنی، افزایش سطح مقطع عضو با استفاده از بتن پاشی یا چسباندن ورق‌های بتنی و پلیمری و غیره اشاره کرد. هر کدام از روش‌های ذکر شده دارای مزایا و معایبی هستند که پس از بررسی شرایط توسط مهندس پروژه، روشی را برای مقاومسازی عضو انتخاب می‌کنند. استفاده از بتن‌های با مقاومت بالا (HSC) و مجموعه بتن‌های با کاربری بسیار بالا الیافی (UHPRC) برای مقاومسازی اعضای بتن آرمه، جزو روش‌های نوین در این زمینه است که به تازگی مورد توجه مهندسين قرار گرفته است. تحقیقات نشان داده است که استفاده از بتن‌های الیافی با مقاومت بالا به عنوان لایه تقویتی می‌تواند به خوبی نقاط ضعف نمونه‌ها را بهبود دهد [۱] و همچنین استفاده از ژاکت بتن FRC می‌تواند ظرفیت باربری عضو را افزایش دهد ولی استفاده از ژاکت احتیاج به بتن ریزی نیاز درجا دارد که باعث افزایش هزینه‌ها و زمان می‌شود [۲]. وانگ و همکاران از صفحات پیش ساخته بتن با مقاومت بالا (UHPRC) برای تقویت برشی تیرهای بتن آرمه استفاده کردند. نتایج آنها تاثیر مثبت این صفحات را در مقاوم سازی تیرهای بتنی نشان داد اما وجود مشکل جاداشدگی صفحات از سطح تیرها، این روش را غیر قابل اطمینان می‌کند [۳]. در این مقاله برای کاهش هزینه‌ها و همچنین سهولت اجرا، روش نوینی برای مقاومسازی تیرهای بتن مسلح ارائه داده شده است. در این پژوهش از صفحات پیش ساخته بتن پودری واکنش‌پذیر برای مقاومسازی تیرهای بتن آرمه استفاده شده است.

۲- روش مقاومسازی

در این تحقیق، از صفحات پیش‌ساخته بتن پودری واکنش‌پذیر به عنوان قطعات چسبانده شده به وجوه جانبی تیرهای بتن‌آرمه جهت تامین مقاومت برشی و خمشی را به صورت آزمایشگاهی استفاده شده است. تعداد ۸ نمونه تیر مسلح شده بتن معمولی با ابعاد $10 \times 20 \times 150$ cm با دو ظرفیت خمشی مختلف و با نقاط ضعف و کمبود ظرفیت برشی ساخته شده‌اند. ۴ عدد از این نمونه‌ها به عنوان نمونه‌های کنترلی و ۴ عدد دیگر به عنوان نمونه‌های مقاومسازی شده با صفحات RPC با ابعاد $3 \times 15 \times 126$ cm می‌باشند. شکل ۱ نحوه مقاومسازی تیرهای بتن‌آرمه و جدول ۱ جزئیات تیرها را نشان می‌دهد.



شکل ۱ نحوه مقاوم سازی تیرهای بتن‌آرمه

جدول ۱ جزئیات تیرهای بتن‌آرمه

نمونه	نوع	میلگرد کششی	میلگرد فشاری	میلگرد برشی	تعداد
B	کنترلی	$10\Phi 2$	$6\Phi 2$	$6\Phi 2 \text{ at } 20 \text{ cm}$	۲
S	کنترلی	$12\Phi 2$	$6\Phi 2$	$6\Phi 2 \text{ at } 20 \text{ cm}$	۲
B-re	مقاوم‌سازی شده	$10\Phi 2$	$6\Phi 2$	$6\Phi 2 \text{ at } 20 \text{ cm}$	۲
S-re	مقاوم‌سازی شده	$12\Phi 2$	$6\Phi 2$	$6\Phi 2 \text{ at } 20 \text{ cm}$	۲

برای یافتن ظرفیت باربری نمونه‌ها از آزمایش بارگذاری سه نقطه‌ای با دهانه خالص 130 سانتیمتر استفاده شده است. همچنین آزمایش تعیین مقاومت فشاری بر روی نمونه‌های تمامی بتن‌های ساخته شده انجام شده است.

۳- مصالح

برای ساخت بتن معمولی و بتن پودری واکنش پذیر از طرح اختلاط ارائه شده در جدول ۲ استفاده شده است. مقاومت فشاری استاندارد ۲۸ روزه بتن معمولی و بتن پودری واکنش پذیر به ترتیب ۳۴ و ۱۴۰ مگاپاسکال می باشد. شکل ۲ نمونه‌ای از صفحات پیش ساخته بتن پودری واکنش پذیر را نشان می دهد.

جدول ۲ طرح اختلاط بتن پودری واکنش پذیر [۴] و بتن معمولی

ماده	بتن معمولی (kg/m ³)	بتن پودری واکنش پذیر (kg/m ³)
سیمان	۳۷۲	۹۲۸
آب	۲۱۱	۲۰۷
ماسه	۹۶۵	-
نخودی	۸۵۵	-
ماسه سیلیسی	-	۸۷۷
فوق روان کننده	-	۲۹
میکروسیلیس	-	۲۲۲
پودر سیلیس	-	۷۷
الیاف فولادی	-	۱۵۷



شکل ۲ صفحات پیش ساخته بتن RPC

۴- الحاق صفحات پیش ساخته

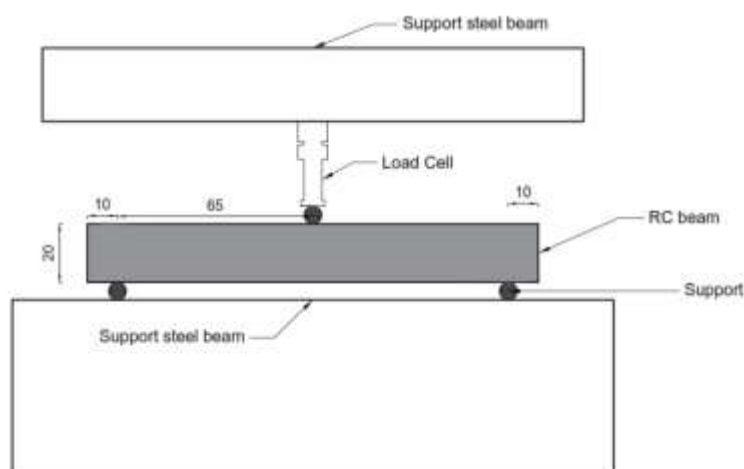
ابتدا سطوح تیرهای بتن معمولی توسط دستگاه مینی فریز با عمق کم تراشیده است. پس از تمیز کردن سطوح تیرها، چسب رزین اپوکسی با نام صنعتی Sikadur 330 که مشخصات مکانیکی آن مطابق جدول ۳ می باشد، به سطوح جانبی تیر و سطح ناصاف صفحات پیش ساخته بتن پودری واکنش پذیر مالیده شده است. پس از تثبیت و قرارگیری مناسب صفحات پیش ساخته بتن RPC بر روی سطوح تیرهای بتن مسلح، به نمونه‌ها مدت ۷ روز مهلت گیرش (بر اساس توصیه شرکت سازنده چسب [۵]) داده شده است. از هیچ گونه پیچ یا پرچ برای الحاق صفحات پیش ساخته به سطوح تیر استفاده نشده است.

جدول ۳ مشخصات مکانیکی چسب رزین اپوکسی [۵]

مقاومت کششی	مدول خمشی	مدول کششی
MPa	GPa	GPa
۳۰	۳/۸	۴/۵

۵- روش آزمایش

در این پژوهش برای یافتن ظرفیت باربری تیرهای کنترلی و مقاوم سازی شده، از آزمایش بار سه نقطه‌ای فزاینده با دهانه خالص ۱۳۰ سانتیمتر استفاده شده است. شکل شماتیک نحوه آزمایش مطابق شکل ۳ می‌باشد.



شکل ۳ نحوه آزمایش بار سه نقطه‌ای فزاینده

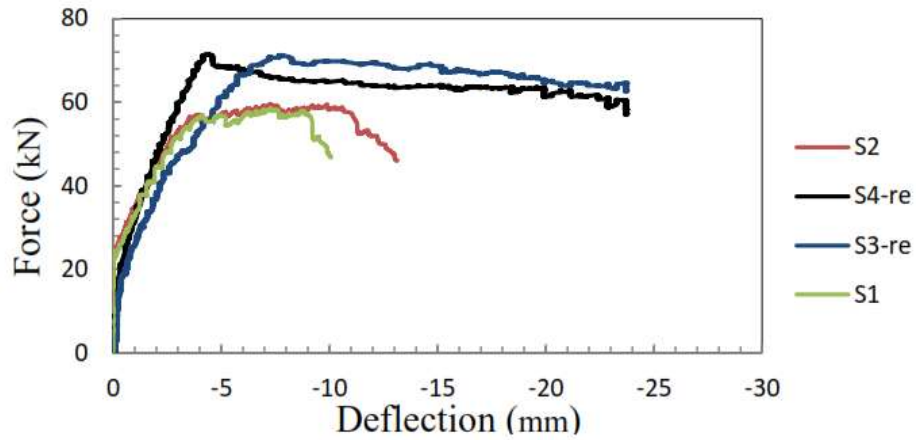
در این آزمایش از جک هیدرولیکی دستی با ظرفیت ۲۰ تن با بازشدگی ۵ سانتیمتر و LVDT با ظرفیت بازشدگی ۲۵ میلیمتر و حساسیت ۰/۰۱ میلیمتر برای اندازه‌گیری تغییر مکان میانه دهانه استفاده شده است. تمامی آزمایش‌ها در محل آزمایشگاه سازه دانشگاه صنعتی سهند انجام شده است.

۶- نتایج آزمایش بر روی سری S و S-re

نتایج حاصل از آزمایش بر روی سری S و S-re، افزایش قابل توجه ظرفیت باربری، سختی و ظرفیت جذب انرژی را نشان می‌دهد. جزئیات بدست آمده از آزمایش مطابق جدول ۴ و همینطور نمودار منحنی‌های بار-تغییر مکان میانه دهانه مطابق شکل ۴ می‌باشد. با توجه به نتایج آزمایشات، تمامی خرابی‌ها به صورت شکست خمشی در صفحات چسبانده شده و تیر اصلی می‌باشد و حداکثر اندازه ترک به صورت تقریبی ۲ سانتی متر بوده است (شکل ۵). لازم بذکر است که هیچگونه جداشدگی مابین صفحات چسبانده شده و تیر اصلی تحت بارگذاری رخ نداده است. الگوی ترک خوردگی تیرهای سری S و S-re مطابق شکل ۶ می‌باشد.

جدول ۴ نتایج آزمایش بر روی تیر نوع S-re و S

نمونه	بار حداکثر kN	نوع خرابی
S1	۵۸/۱	شکست برشی
S2	۵۹/۷	شکست برشی
S3-re	۷۳/۰	شکست خمشی
S4-re	۷۲/۳	شکست خمشی



شکل ۴ نمودار مقایسه منحنی‌های بار - تغییر مکان میانه دهانه تیرهای S-re و S

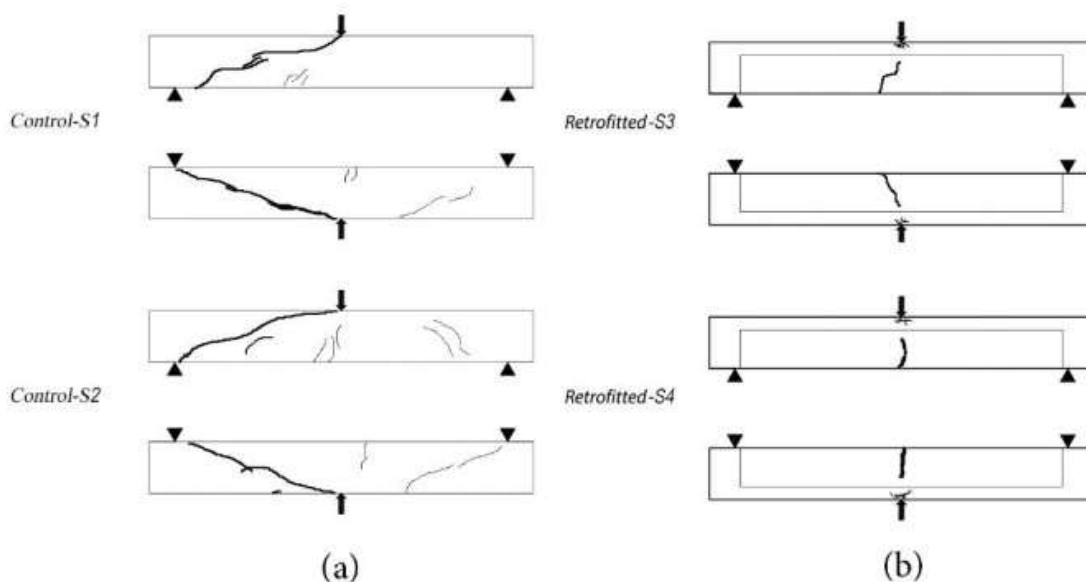


شکل ۵ نحوه ترک خوردگی تیر مقاوم‌سازی شده از نوع S-re

۷- نتایج آزمایش بر روی سری B و B-re

نتایج حاصل از آزمایش بر روی سری B و B-re، افزایش قابل توجه ظرفیت باربری، سختی و ظرفیت جذب انرژی را نشان می‌دهد. جزئیات بدست آمده از آزمایش مطابق جدول ۵ و همینطور نمودار منحنی‌های بار - تغییر مکان میانه دهانه مطابق شکل ۷ می‌باشد. با توجه به نتایج آزمایشات، تمامی خرابی‌ها به صورت شکست خمشی در صفحات چسبانده شده و تیر اصلی می‌باشد و حداکثر اندازه ترک به صورت تقریبی ۳

سانتی متر بوده است شکل ۸. لازم بذکر است که هیچگونه جداسدگی مابین صفحات چسبانده شده و تیر اصلی تحت بارگذاری رخ نداده است. الگوی ترک خوردگی تیرهای سری B و B-re مطابق شکل ۹ می باشد.

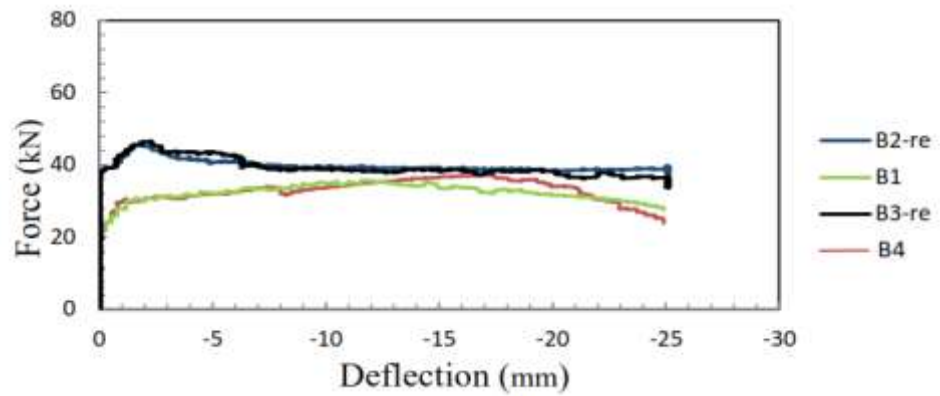


شکل ۶ الگوی ترک خوردگی سری (a) کنترلی S و (b) مقاومسازی شده S-re

جدول ۵ نتایج آزمایش بر روی تیر نوع B و B-re

نمونه	بار حداکثر kN	نوع خرابی
B1	۳۶/۰	شکست خمشی - برشی
B4	۳۸/۲	شکست خمشی - برشی
B2-re	۴۶/۸	شکست خمشی
B4-re	۴۷/۵	شکست خمشی

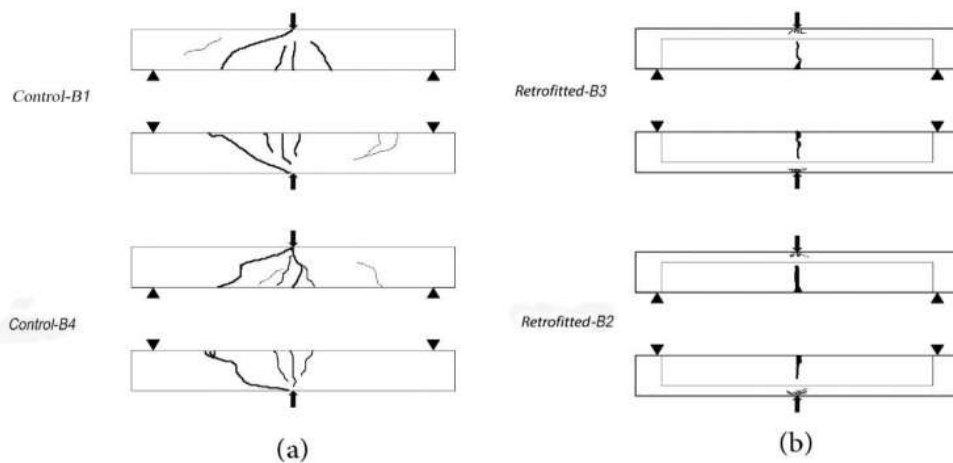
همانطور که نتایج آزمایش نشان می دهد، صفحات پیش ساخته بتن RPC باعث افزایش ظرفیت باربری تیرهای مسلح بتن معمولی شده است. همچنین علاوه بر افزایش ظرفیت باربری، نحوه خرابی تیرهای مقاومسازی شده را از حالت شکست ناگهانی به حالت پیش هشدار دهنده بهبود داده است که این امر جزو مزیت های مهم یک روش مقاومسازی به حساب می آید. از دیگر نتایج مهم آزمایش، افزایش ظرفیت جذب انرژی در تیرهای مقاومسازی شده می باشد که این میزان افزایش برای تیرهای مقاومسازی شده نوع S-re و B-re به صورت میانگین تقریباً برابر ۲۷۸٪ و ۱۵۹٪ می باشد. همچنین هیچگونه جداسدگی مابین صفحات چسبانده شده و تیر اصلی تحت بارگذاری وجود نداشته است. جمع بندی نتایج حاصل از آزمایش به قرار جدول ۶ می باشد.



شکل ۷ نمودار مقایسه منحنی‌های بار- تغییر مکان میانه دهانه تیرهای B و B-re



شکل ۸ نحوه ترک خوردگی تیر مقاوم‌سازی شده از نوع B-re



شکل ۹ الگوی ترک خوردگی سری (a) کنترلی B و (b) مقاوم‌سازی شده B-re

جدول ۶ جمع بندی نتایج حاصل از آزمایش

نمونه	نوع	میانگین میزان افزایش ظرفیت باربری (kN)	میزان افزایش ظرفیت باربری (%)	میزان افزایش ظرفیت جذب انرژی (%)	نحوه خرابی
B	کنترلی	—	—	—	شکست خمشی- برشی
B-re	مقاوم سازی شده	۱۰/۰۵	۲۷/۰	۱۵۹	شکست خمشی
S	کنترلی	—	—	—	شکست برشی
S-re	مقاوم سازی شده	۱۳/۷۵	۲۳/۲	۲۷۸	شکست خمشی

۸- نتیجه گیری

در این پژوهش، به بررسی آزمایشگاهی رفتار تیرهای بتن آرمه مقاوم سازی شده به صورت برشی با صفحات پیش ساخته بتن پودری واکنش پذیر پرداخته شده و همچنین میزان افزایش ظرفیت باربری و تاثیر قطعات چسبانده شده بر رفتار عضو در نتایج نشان داده شده است. نتایج کلی آزمایش به شرح ذیل می باشد:

- صفحات پیش ساخته بتن RPC باعث افزایش ظرفیت باربری تیرهای مسلح بتن معمولی شده است. همچنین علاوه بر افزایش ظرفیت باربری، نحوه خرابی تیرهای مقاوم سازی شده را از حالت شکست ناگهانی به حالت پیش هشدار دهنده تغییر داده است که این امر جزو مزیت های مهم یک روش مقاوم سازی به حساب می آید. میزان افزایش مقاومت به صورت میانگین برای تیرهای مقاوم سازی شده نوع B-re ، ۲۷/۰٪ و برای تیرهای مقاوم سازی شده نوع S-re ، ۲۳/۲٪ می باشد.
- استفاده از صفحات پیش ساخته بتن RPC باعث افزایش قابل توجه سفتی نمونه شده است. با توجه به نتایج ارائه شده، الیاف فولادی موجود در این نوع بتن به خوبی توانسته اند میزان انرژی جذب شده را افزایش دهند و حتی ظرفیت شکل پذیری نمونه ها را تا ۲۷۸٪ بهبود بخشند .
- از مزیت های دیگر مقاوم سازی با صفحات پیش ساخته RPC می توان به سهولت روش اجرا مقاوم سازی، هزینه پائین و دوام بالا اشاره کرد.
- در این پژوهش از چسب رزین اپوکسی برای الحاق صفحات پیش ساخته به سطوح جانبی تیر بتن مسلح استفاده شده است. با توجه به نتایج بدست آمده و همچنین عدم وجود جداشدگی مابین صفحات بتنی و چسب پس از بارگذاری، استفاده از چسب رزین اپوکسی به عنوان روش الحاقی به منظور اطمینان از عدم جداشدگی صفحات پیش ساخته از سطح تیر بتن مسلح تحت بارگذاری و کاهش هزینه ها بسیار مناسب می باشد.

۹- مراجع

1. Iskhakov I, Ribakov Y, Holschemacher K and Mueller T, "High performance repairing of reinforced concrete structures." Journal of Materials and Design, 2013, 44: 216-222.
2. Martinola G, Meda A, Plizzari GA, Rinaldi Z, "Strengthening and Repair of RC beams with Fiber Reinforced Concrete", Cement and Concrete Composites, 2010
3. Jian W, Hidenori M, Tetsuo K, "Shear strengthening of RC beams using ultra-high-strength fiber-reinforced concrete panels." Magazine of concrete research, 2015, 67(13), 718-729.

۴. ملائی، ابومیشم، "بررسی روش‌های افزایش مقاومت نمونه‌های کامپوزیتی در برابر برخورد گلوله" پایان نامه کارشناسی ارشد سازه، پردیس دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، ۱۳۹۳

5. Sikadur 330® , “ *Construction Manual – Sikadur 330 2-part Epoxy Impregnation Resin*”, Sika Gulf B.S.C ©