

بررسی آزمایشگاهی تقویت تیرهای آسیب دیده بتنی با ورق‌های خمشی و برشی فولادی

نویسندگان: سید مهدی دهقان^۱، محمد امیر نجفقلی پور^۲، علیرضا فاموری^۱، احمد رضا عربی^۱

۱- دانشجوی ارشد زلزله، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی شیراز

۲- استادیار، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی شیراز

n.asgharnejad@sutech.ac.ir

چکیده

روش‌های مختلفی برای مقاوم‌سازی و بهبود عملکرد خمشی و برشی تیرهای بتنی توسعه یافته است. مقاوم‌سازی تیرهای بتن مسلح با استفاده از ورق‌های فولادی، یکی از روش‌های معمول و مناسبی است که در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است. این مقاله به بررسی نتایج آزمایشگاهی تیرهای آسیب دیده‌ای می‌پردازد که با ورق‌های فولادی ترمیم و تقویت شده‌اند. دو تیر بتن مسلح که تحت بارگذاری بار افزون شبه استاتیکی در ناحیه خمشی آسیب شدیدی دیدند، با ورق فولادی، در برش و خمش، ترمیم و تقویت شده و مجدداً تحت بارگذاری بار افزون شبه استاتیکی قرار گرفته‌اند. تفاوت نمونه‌ها، شیوه اتصال ورق فولادی خارجی به تیر می‌باشد. در یک نمونه، اتصال ورق‌ها به تیر به وسیله چسب و در نمونه دیگر، به وسیله چسب و مهار مکانیکی برقرار شده است. نتایج نشان می‌دهد مقاومت و سختی نمونه‌ها پس از ترمیم افزایش یافته است، اما نمونه با اتصال چسب و مهار مکانیکی نسبت به نمونه با اتصال چسب، مقاومت و سختی بیشتری نشان داده است. نمونه‌های ترمیم شده شکل‌پذیری محدودی در مقایسه با نمونه‌های سالم دارند.

کلمات کلیدی: تیر بتن مسلح، ترمیم، ورق فولادی، تقویت خمشی، تقویت برشی

۱. مقدمه

ایران از نظر لرزه خیزی در منطقه فعال جهان قرار دارد و به استناد پایگاه‌های علمی لرزه‌نگاری از خطر پذیرترین مناطق جهان محسوب می‌شود. از جمله راهکارهای مناسب برای مدیریت خطرپذیری در برابر زلزله، می‌توان به مقاوم‌سازی سازه‌های مختلف از جمله ساختمان‌های دولتی مهم، تأسیسات زیربنایی و شریان‌های حیاتی کشور اشاره کرد. موفقیت در مقاوم‌سازی لرزه‌ای به عنوان جزئی از بهسازی لرزه‌ای منوط به بهره بردن از فنون و مهارت‌های نوین مقاوم‌سازی است [۱].

عناصر سازه‌های بتنی موجود ممکن است بر اثر عوامل متعددی همچون خطای طراحی و مسائل اجرایی، تغییر کاربری، افزایش بارگذاری و عوامل محیطی همچون خوردگی و زلزله نیاز به ترمیم و مقاوم‌سازی داشته باشند. از جمله روش‌های مقاوم‌سازی می‌توان به پاشش بتن، استفاده از ورق فولادی و استفاده از الیاف‌های مسلح FRP اشاره کرد. اتصال ورق فولادی به تیر بتنی یکی از روش‌های معمول تقویت و ترمیم تیر بتن مسلح است. از جمله مزیت‌های این روش می‌توان به استفاده آسان، هزینه کمتر و قابلیت بهره‌برداری از سایر قسمت‌های سازه حین عملیات بهسازی اشاره کرد. از نقطه ضعف‌های این روش می‌توان به مشکل اجرایی و امکان جداشدگی ناگهانی ورق فولادی اشاره کرد که همین موضوع می‌تواند باعث گردد نتوان از کل ظرفیت ورق استفاده کرد. شروع گسیختگی در اثر جدا شدن اتصال ورق در تیرهای بتن مسلح، معمولاً در محلی که تمرکز تنش وجود دارد، اتفاق می‌افتد. روند گسترش این جداشدگی به عواملی از جمله، خصوصیات بتن مصرفی، ورق فولادی و شیوه اتصال ورق فولادی خارجی به سطح بتن بستگی دارد.

۲. پیشینه تحقیق

در این بخش به تعدادی از تحقیقات شاخص روی ترمیم تیرهای بتنی به وسیله پوشش خارجی بتن الیافی و ورق فولادی پرداخته می‌شود. مسیحات و داگنایس با بررسی رفتار وصله تیرهای بتنی ترمیم شده با بتن الیافی فوق توانمند به این نتیجه رسیدند که نمونه‌های ترمیم شده با درصد الیاف بیشتر به طور قابل توجهی مقاومت خمشی میلگردهای وصله و شکل‌پذیری نمونه‌ها را افزایش می‌دهند [۲]. علاوه بر این، مطالعات دیگر ایشان نشان می‌دهد که در نمونه‌های با طول وصله زیاد (18d) ترکی در ناحیه وصله مشاهده نشد، اما در نمونه‌های با وصله کوتاه (6d) شکاف در قسمت ترمیم شده با بتن الیافی فوق توانمند به وجود آمد. در حالت کلی نمونه‌های با عمق ترمیمی 1d و یا بیشتر رفتار بهتری از خودشان نشان می‌دهند. در واقع پوشش بتن جدید باید میلگردها را حداقل به اندازه 1d پوشش دهد. نتایج نشان می‌دهد اگر شکل‌پذیری بالا مد نظر باشد، باید طول وصله بیشتری را برای میلگردها در نظر گرفت [۳]. روان و همکاران نیز با آزمایش در این زمینه نشان داد که تیرهای بتنی ترمیم شده با بتن الیافی نسبت به بتن معمولی سختی و مقاومت بالاتری دارد و با افزایش درصد الیاف این ویژگی‌ها ارتقا می‌یابد و وجود میلگردهای عرضی از شکست ترد نمونه‌ها جلوگیری می‌کند [۴]. پژوهش‌های کیم و همکاران در زمینه ی ترمیم تیرهای بتنی با کامپوزیت های سیمانی مسلح شده به وسیله الیاف شکل پذیر در ناحیه خمشی نشان داده است که نمونه‌های با میلگرد عرضی حدوداً دو برابر نمونه‌های دیگر مقاومت برشی دارند و ظرفیت جابه‌جایی آنها نیز ۴ برابر است. همچنین پیوستگی بین بتن قدیم و جدید به خوبی حفظ شده است و از گسیختگی در سطح تماس بین بتن قدیم و جدید جلوگیری شده است، چون میلگردهای طولی مقداری از تنش برشی متمرکز شده در سطح تماس را جذب می‌کنند. مقدار و مصالح مصرفی در ترمیم، نقش کلیدی در بهبود ظرفیت برشی تیرهای بتن مصلح ندارد، بلکه نقش کلیدی آن، به تأخیر انداختن گسیختگی در سطح تماس بین بتن قدیم و جدید است [۵]. مقایسه انجام گرفته توسط مارتینول و همکاران بر روی نمونه ترمیم شده با بتن مسلح با سطح عملکرد بالا و نمونه ترمیم نشده نشان داد که، ظرفیت باربری سازه تقویت شده با بتن مسلح با سطح عملکرد بالا ۲/۱۵ برابر بیشتر است [۶].

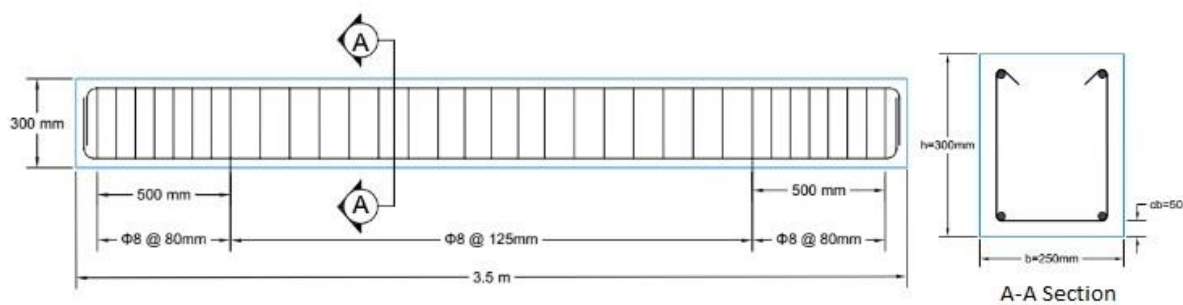
آرسلن و همکاران با بررسی آزمایشگاهی تیرهای بتنی ترمیم شده با ورق فولادی و در نظر گرفتن چیدمان‌های مختلف، به این نتیجه رسید که نمونه‌های با مقاومت فشاری بالاتر و تقویت شده با ورق طولی بزرگتر در مقایسه با طول کمتر ظرفیت باربری و اتلاف انرژی بیشتری دارند، ولی در بیشینه جابه‌جایی آنها اختلافی وجود ندارد. تیر تقویت شده با طول ورق جانبی بیشتر ظرفیت جابه‌جایی بالایی ندارد ولی وجود ورق برشی اتلاف انرژی و ظرفیت جابه‌جایی را افزایش می‌دهد [۷]. نتایج پژوهش‌هایی که در زمینه ترمیم تیرهای بتن مسلح با ترکیب ورق فولادی و پلیمرهای کربنی (CFRP) انجام شده است، نشان می‌دهد که ترمیم با ترکیب ورق فولادی و CFRP باعث بالا رفتن مقاومت برشی تیر می‌شود. تأثیر نوارهای CFRP در بهبود رفتار برشی تیر بتنی تقویت شده با ترکیب ورق فولادی و CFRP نسبت به تیر تقویت شده با CFRP تنها بیشتر است. مقاومت برشی تیر تقویت شده با ورق فولادی و CFRP با افزایش نسبت دهانه برشی به عمق، افزایش می‌یابد. تیر تقویت شده در سه جهت با ورق فولادی و CFRF نسبت به دو جهت مناسب‌تر است [۸]. یکی از اهداف مهم تقویت با ورق فولادی، بررسی نحوه اتصال ورق و به تأخیر افتادن گسیختگی اتصال است. الم و همکاران با بررسی این موضوع روی تیرهایی که دچار شکست برشی شده بودند، سپس با ورق فولادی و اتصالات مختلف ترمیم شده بودند، به این نتیجه رسید که ظرفیت باربری کلیه تیرهای تقویت شده افزایش و ظرفیت جابه‌جایی آنها کاهش یافته است. وجود اتصال دهنده‌های جسی و فولادی در نمونه‌های ترمیم شده، گسیختگی ناشی از پیوستگی ورق را نسبت به نمونه بدون اتصال دهنده به تأخیر می‌اندازد. حالت گسیختگی نمونه ترمیم شده بدون اتصال دهنده، جداشدگی ورق در اثر گسیختگی برشی و در نمونه‌های ترمیم شده با اتصال دهنده، جداشدگی ورق در اثر ریزش پوشش بتن بود. لذا نحوه اتصال، تأثیر بسیار مهمی در به تأخیر انداختن جداشدگی ورق دارد [۹]. علاوه بر این آلتین و همکاران به بررسی تقویت ظرفیت برشی ۱۱ تیر بتن مسلح T شکل با ورق‌های فولادی پرداختند. هدف اصلی رسیدن به گسیختگی خمشی شکل‌پذیر برای نمونه‌های تقویت شده بود. سه مدل صفحه‌ای فولادی با چیدمان مختلف برای جان تیرها در نظر گرفته شد از جمله، ۱-تسمه‌های فولادی باریک ۲-تسمه‌های فولادی پهن ۳- صفحه‌های فولادی. اتصال ورق‌ها با سطح تیر به وسیله چسب اپوکسی برقرار شد. نتایج نشان داد که در هر سه حالت تقویت، مقاومت و سختی نمونه‌ها افزایش یافت. حالت‌های گسیختگی و شکل‌پذیری نمونه‌ها با توجه به هندسه صفحه فولادی و چیدمان آنها متفاوت است ولی تیری که با صفحه فولادی پیوسته در طول دهانه برشی تقویت شده، رفتار خمشی شکل‌پذیرتری از خود نشان می‌دهد. نمونه‌های تقویت شده با تسمه L شکل به علت جدا شدن ناگهانی پایه‌ی L، شکل‌پذیری کمتری دارند و دچار شکست برشی شدند. نمونه‌های تقویت شده با صفحه فولادی رفتار خمشی شکل‌پذیری دارند و به علت ریختن بتن در ناحیه فشاری وسط دهانه دچار زوال شدند [۱۰]. آپکاک و همکاران نیز در این زمینه پژوهش‌هایی انجام داد و به این نتیجه رسید که که نحوه مهار ورق‌ها (میل مهار و یا تسمه) تأثیر زیادی در کنترل و مهار جداشدگی ورق از سطح بتن دارد. پیچ مهار ورق‌های با ضخامت کم در شکل‌پذیری و ظرفیت باربری تیر مشارکتی ندارند. مهار ورق زیرین تیر به وسیله حلقه U شکل، تأثیر زیادی در افزایش ظرفیت باربری تیر تقویت شده دارد. استفاده از ورق‌های سوراخ دار به جای ورق‌های عادی در تقویت تیرها باعث افزایش شکل‌پذیری می‌شود و این امر با افزایش ضخامت ورق افزایش می‌یابد. اما به علت کاهش سطح مقطع، باعث کاهش ظرفیت باربری نهایی می‌شود [۱۱].

۳. وضعیت اولیه نمونه‌ها

۲ تیر بتنی با مقطع مستطیلی به ابعاد 250×300 میلی‌متر و طول ۳۵۰۰ میلی‌متر (جدول ۱-۱) طبق آیین‌نامه ACI318-14 [12] و ACI408R-03 [13] طراحی شده‌اند و به صورت دو نقطه‌ای تحت بارگذاری بار افزون، آسیب دیده‌اند. هندسه نمونه‌ها در شکل ۱ و وضعیت آسیب دیدگی نمونه‌ها در شکل ۲ مشاهده می‌شود.

جدول ۱- مشخصات نمونه‌های آزمایشگاهی

نمونه‌ها	نوع بارگذاری	میلگرد کششی	میلگرد فشاری	خیز باقی مانده
F3D20	بار افزون	2Φ20	2Φ20	۸۰ mm
N3D20	بار افزون	2Φ20	2Φ20	۶۰ mm



شکل ۱- جزئیات نمونه‌ها



(ب)



(الف)

شکل ۲- وضعیت آسیب دیدگی نمونه‌ها: الف) N3D20 ، ب) F3D20

۴. روش ترمیم

همان طور که در شکل ۲ مشاهده می شود نمونه ها در یک سوم میانی آسیب زیادی دیده اند و علاوه بر وجود ترک های خمشی بسیار، پوشش بتن در این ناحیه از بین رفته است. لذا لازم است پیش از اتصال ورق ها و بازگردانی ظرفیت تیر، بستر را جهت عملکرد بهتر فراهم کرد. ابتدا بتن سست، در یک سوم دهانه میانی را تا ۲۰ میلی متر زیر میلگرد طولی تخریب شده تا سطح بتن مقاوم نمایان شود (شکل ۳-الف). برای اتصال بهتر بتن ترمیمی و سطح بتن قدیم از میلگردهای عصبایی شکل به قطر ۸ میلی متر، طول و خم ۱۰۰ میلی متر استفاده شد و پس از سوراخ کردن سطح بتن قدیم و هوادهای جهت خروج گرد و غبار (شکل ۳-ب) میلگردهای عصبایی به همراه چسب هیلتی R500 در محل های مشخص شده، قرار داده شد (شکل ۳-پ). سپس ترک های موجود بر سطح نمونه ها با استفاده از چسب اپوکسی Sikadur 32 پوشانده شد (شکل ۳-ت). پس از قالب بندی نمونه ها، ملات ترمیمی با توجه به طرح اختلاطی که در جدول ۲ بیان شده است، تهیه گشت و در ۳ مرحله، و پس از هر بار ویبره کردن ملات روی سطح مورد نظر، قرار داده شد (شکل ۳-ث). مدت عمل آوری ملات، ۱۰ روز به طول انجامید. برای تزریق رزین اپوکسی Sikadur 52، پکرها با توجه به محل ترک ها در فواصل ۴۰۰ میلی متر از هم، در یک سوم میانی تیر نصب شد. رزین دو جزئی پس از اختلاط به درون ترک ها پمپ شد، به طوری که همه منافذ نمونه ها را پر کرد (شکل ۳-ج).

جدول ۲- مقدار مصالح مصرفی در بتن ترمیمی

مصالح	مقدار برای هر کیسه گروت سیمانی
گروت سیمانی	۲۵ kg
آب	۲ lit
چسب Sika Bond DV	۳ lit
ماسه شسته	۵ kg

در هر دو نمونه طول، عرض و ضخامت ورق ها یکسان بوده و تنها تفاوت آن ها، شیوه اتصال ورق های خمشی و برشی است. مشخصات ورق های نمونه ها در جدول ۳ ارائه شده است. برای چسباندن ورق ها از چسب اپوکسی دو جزئی فراتک 3005 A/B استفاده شد (جدول ۴). پس از تمیز کردن ورق ها با محلول استون، سطح آن با چسب به اندازه ۳ میلی متر پوشانده شد و پس از قرار دادن در محل مورد نظر، آن را با گیره نگه داشته تا چسب کاملاً خشک شود (شکل ۴-الف) و در مورد نمونه با مهار مکانیکی، ورق ها با بستن مهره مقید شدند (شکل ۴-ب).

جدول ۳- مشخصات ورق های فولادی

شیوه اتصال ورق	ابعاد ورق برشی	ابعاد ورق خمشی	ضخامت ورق	نمونه ها
چسب و مهار مکانیکی	۱۷۰×۲۷۰ mm ۲۱۰×۲۷۰ mm	۸۰×۲۸۰۰ mm	۶ mm	F3D20
چسب	۱۷۰×۲۷۰ mm ۲۱۰×۲۷۰ mm	۸۰×۲۸۰۰ mm	۶ mm	N3D20

جدول ۴- مشخصات مکانیکی چسب اپوکسی دو جزئی برای اتصال ورق به سطح تیر

زمان گیرش در ۲۵ °C	مقاومت برشی (MPa)	چسب اپوکسی
۳۵ دقیقه	۱۰-۱۲	فراتک 3005 A/B



(ب)



(الف)



(ت)



(پ)



(ج)



(ث)

شکل ۳- مراحل ترمیم نمونه‌ها



(ب)



(الف)

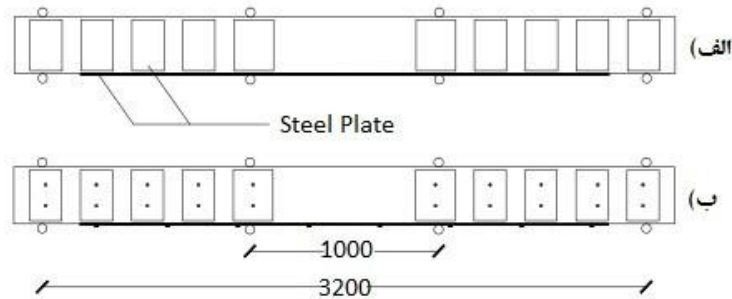
شکل ۴- نحوه اتصال ورق

۵. روش آزمایش

پس از آماده شدن نمونه‌ها، جهت اندازه‌گیری تغییر شکل بتن و ورق فولادی، در وسط تیر روی وجه فشاری، کرنش سنج مخصوص بتن و روی وجه کششی فولاد، کرنش سنج مخصوص فولاد نصب شد. برای انجام آزمایش از یک قاب فولادی به همراه یک جک هیدرولیکی با ظرفیت ۲۵۰ kN استفاده شد. نمونه‌ها بر روی تکیه‌گاه‌هایی که به صورت مفصلی عمل می‌کنند قرار گرفت. بارگذاری به صورت دو نقطه‌ای در یک سوم میانی تیرها اعمال شد. به منظور اعمال بار در دو نقطه، از اتصال دو پروفیل I شکل به هم به عنوان تیر بارگذاری روی تیرهای بتنی استفاده شد. در این تحقیق از دو نیروسنج S شکل با ظرفیت ۱۵۰ کیلو نیوتن جهت اندازه‌گیری نیروی اعمالی بر نمونه‌ها استفاده شد. جابه‌جایی وسط دهانه تیر توسط حسگر جابه‌جایی LVDT اندازه‌گیری شد. بارگذاری تا لحظه‌ای ادامه یافت که نمونه‌ها در اثر جدا شدن ورق و یاریزش پوشش بتن گسیخته شوند. در شکل ۵ پیکربندی سیستم آزمایش به همراه جزئیات آزمایش را نشان می‌دهد.



شکل ۵- پیکربندی آزمایش



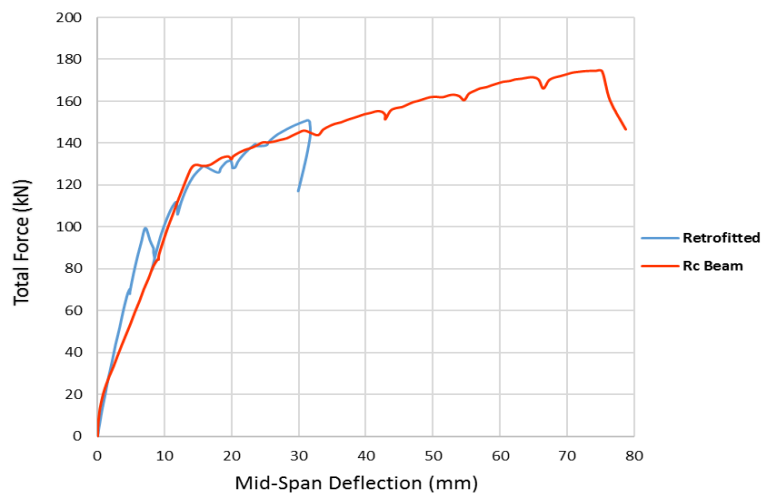
شکل ۶- الگوی ترمیم نمونه‌ها به وسیله ورق‌های فولادی: الف) N3D20، ب) F3D20

۶. نتایج آزمایش

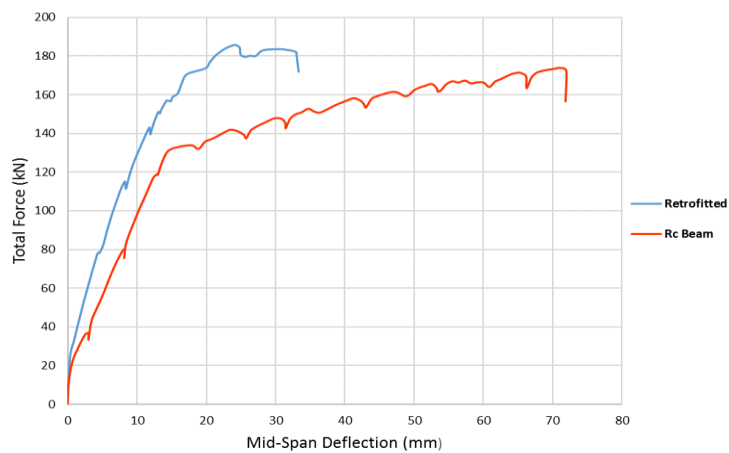
مقایسه رفتار خمشی نمونه‌های ترمیم شده با نمونه‌های سالم را می‌توان در شکل ۷ مشاهده کرد. شکل ۷ منحنی نیروی کل بر حسب جابه‌جایی وسط دهانه را نشان می‌دهد.

بررسی رفتار تیر N3D20: همان‌طور که در شکل ۷ مشخص است در جابه‌جایی ۴ تا ۸ میلی‌متر، نمونه ۱۰٪ افزایش مقاومت داشته و پس از آن به دلیل جدا شدن ناگهانی انتهای ورق دچار افت مقاومت شده است. در جابه‌جایی ۱۶ تا ۲۰ میلی‌متر بتن ناحیه فشاری ترک خورده است. در جابه‌جایی ۲۴ تا ۳۲ میلی‌متر مقاومت نمونه افزایش یافته است و در نهایت در جابه‌جایی ۳۲ میلی‌متر ورق دهانه خمشی جدا شده است (شکل ۸-ا). در مقایسه با حالت اولیه و رفتار نمونه سالم، شکل پذیری نمونه کاهش یافته و رفتار تردی ملاحظه شده است. با توجه به شیب نمودار، سختی تیر تقویت شده، نسبت به نمونه سالم ۳۳٪ افزایش داشته است.

بررسی رفتار تیر F3D20: به دلیل اتصال ورق با مهار مکانیکی، این نمونه رفتار بهتری داشته است. با توجه به شکل ۷ نمونه در جابه‌جایی ۲۴ میلی‌متر تسلیم شده و در مقایسه با نمونه اولیه که میلگردها در جابه‌جایی ۱۶ میلی‌متر تسلیم شده اند، ۴۱٪ افزایش مقاومت داشته است. ورق ناحیه خمشی تیر در جابه‌جایی ۳۲ میلی‌متر جدا شده است. با توجه به شیب نمودار، سختی تیر در مقایسه با نمونه اولیه ۳۹٪ افزایش و شکل پذیری کاهش یافته است. در مقایسه با تیر N3D20 ترک‌های ناحیه خمشی کمتر است.



(الف)

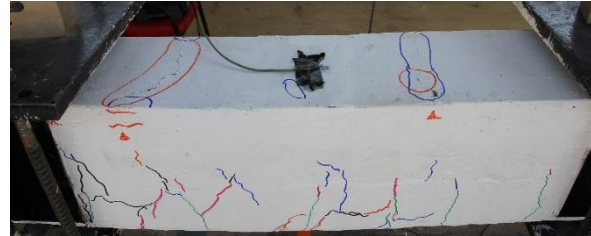


(ب)

شکل ۷-مقایسه منحنی نیرو- جابه‌جایی نمونه‌ها، قبل و پس از ترمیم: (الف) N3D20 - استفاده از چسب ، (ب) F3D20 - استفاده از چسب و مهار مکانیکی



(اب)

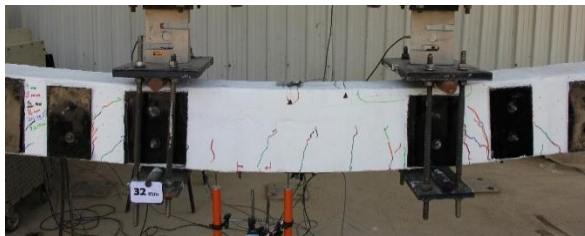


(الف)



(ج)

شکل ۸- حالت‌های گسیختگی نمونه N3D20: (الف) ترک بتن فشاری، (ب) جدا شدن ورق زیرین، (پ) الگوی ترک خوردگی در انتهای بارگذاری



(ب)



(الف)

شکل ۹- گسیختگی نمونه F3D20: (الف) جدا شدگی انتهای ورق، (ب) الگوی ترک در پایان بارگذاری

۷. نتیجه‌گیری

از آنجا که نمونه‌های اولیه در ناحیه خمشی دچار آسیب زیادی شده بودند، ترمیم آنها با ورق فولادی در ناحیه خمشی و برشی راه حل مناسبی برای بازیابی ظرفیت اولیه تیر و یا حتی افزایش مقاومت است. نحوه اتصال ورق به سطح، یکی از مهمترین عوامل برای به تأخیر انداختن زوال ورق و گسیختگی تیر بتنی است. در این پژوهش دو روش اتصال بررسی شد. اتصال ورق با چسب به تنهایی، رفتار تیر را بسیار ترد می‌کند و باعث می‌شود نتوان از کل ظرفیت ورق فولادی استفاده کرد. اتصال با مهار مکانیکی به همراه چسب، روند جداسازی ورق را تا حدودی به تأخیر می‌اندازد و به همین دلیل، نمونه ترمیم شده با مهار مکانیکی و چسب، علاوه بر بازیابی ظرفیت از دست رفته، افزایش مقاومت نیز داشته است. در هر دو نمونه، سختی افزایش و شکل پذیری در مقایسه با رفتار نمونه سالم کاهش یافته است.

مراجع

- [۱] یارکه سلخوری، ح، (۱۳۹۲). "بررسی تحلیل غیرخطی و مدل سازی عددی تیر عمیق بتن مسلح دارای باز شو تقویت شده با FRP توسط نرم افزار اجزاء محدود"
- [۲] Dagenais, M. A., Massicotte, B. (2016). "Cyclic behavior of lap splices strengthened with ultrahigh performance fiber-reinforced concrete". *Journal of Structural Engineering*, 143(2), 04016163.
- [۳] Dagenais, M.A. and Massicotte, B. (2014). "Tension lap splices strengthened with ultrahigh-performance fiber-reinforced concrete". *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27(7), p.04014206.
- [۴] Ruano, G., Isla, F., Pedraza, R.I., Sfer, D. and Luccioni, B. (2014). "Shear retrofitting of reinforced concrete beams with steel fiber reinforced concrete". *Construction and Building Materials*, 54, pp.646-658.
- [۵] Kim, J.H.J., Lim, Y.M., Won, J.P., Park, H.G. and Lee, K.M. (2007). "Shear capacity and failure behavior of DFRCC repaired RC beams at tensile region". *Engineering structures*, 29(1), pp.121-131.
- [۶] Martinola, G., Meda, A., Plizzari, G.A. and Rinaldi, Z. (2010). "Strengthening and repair of RC beams with fiber reinforced concrete". *Cement and Concrete Composites*, 32(9), pp.731-739
- [۷] Arslan, G., Sevuk, F. and Ekiz, I. (2008). "Steel plate contribution to load-carrying capacity of retrofitted RC beams". *Construction and Building Materials*, 22(3), pp.143-153.
- [۸] Lu, Y.Y., Li, N. and Li, S. (2014). "Shear Resistance of RC Beams Strengthened with Combined CFRP and Steel Plate". In *Applied Mechanics and Materials* (Vol. 638, pp. 219-223).
- [۹] Alam, M.A., Jabbar, A.S.A., Jumaat, M.Z. and Mustapha, K.N. (2014). "Effective Method of Repairing RC Beam Using Externally Bonded Steel Plate". In *Applied Mechanics and Materials* (Vol. 567, pp. 399-404).
- [۱۰] Altin, S., Anil, Ö. and Kara, M.E. (2005). "Improving shear capacity of existing RC beams using external bonding of steel plates". *Engineering structures*, 27(5), pp.781-791.
- [۱۱] Aykac, S., Kalkan, I., Aykac, B., Karahan, S. and Kayar, S. (2012). "Strengthening and repair of reinforced concrete beams using external steel plates". *Journal of Structural Engineering*, 139(6), pp.929-939.
- [۱۲] ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-14) and Commentary"
- [۱۳] ACI Committee 318, "Bond and Development of Straight Reinforcing Bars in Tension"