



بررسی آزمایشگاهی رفتار برشی دال‌های یک طرفه مقاوم‌سازی شده با ورق پیش ساخته کامپوزیت‌های سیمانی توانمند الیافی مسلح

مهديه صباغیان، علی خیرالدین*

دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۱۲/۲۹

بازنگری: ۱۳۹۹/۰۶/۰۴

پذیرش: ۱۳۹۹/۰۶/۰۶

ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۶/۱۹

کلمات کلیدی:

دال بتن مسلح یک طرفه

مقاوم‌سازی برشی

مقاوم‌سازی خمشی

کامپوزیت سیمانی توانمند الیافی

HPFRCC

خلاصه: به منظور حفظ و نگهداری سازه‌ها و نیز افزایش عمر مفید آن‌ها، مقاوم‌سازی سازه‌های آسیب دیده متداول گردیده است. دال‌های بتنی به عنوان عضو سازه‌های کلیدی، نقشی تاثیر گذار در توزیع بار و رفتار سازه داشته و از سوی دیگر عدم برطرف سازی آسیب‌های وارد بر دال‌های بتنی میتواند خسارات جبران ناپذیری را به همراه داشته باشد. در این پژوهش آزمایشگاهی مقاوم‌سازی دال‌های بتن مسلح یک طرفه با کمک ورق‌های پیش ساخته از جنس کامپوزیت سیمانی توانمند الیافی در ناحیه کششی دال انجام شده است. سپس سطوح جانبی آن برای افزایش ظرفیت برشی با ورق‌های پلیمری مسلح شده به الیاف کربن مقاوم‌سازی شده است. این مطالعه به طور خلاصه در سه گام انجام شده است. در گام اول طرح اختلاط و مشخصات مکانیکی مصالح کامپوزیت سیمانی توانمند الیافی بررسی گردید. در گام دوم ظرفیت خمشی ورق‌های پیش ساخته کامپوزیت سیمانی توانمند الیافی به طور جداگانه قبل از اتصال به دال تعیین گردید. در گام نهایی دال‌های بتن مسلح مقاوم‌سازی شده به صورت خمشی و برشی، تحت آزمایش بررسی رفتار برشی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که مقاوم‌سازی برشی وجوه جانبی دال باعث بهبود ظرفیت خمشی، الگوی شکست، سختی و جذب انرژی به واسطه آزمایش بررسی رفتار برشی نمونه‌ها شده است. همچنین برای دال‌های یک طرفه مقاوم‌سازی شده با ورق پیش ساخته کامپوزیت سیمانی توانمند الیافی، در صورتی که بار متمرکز به دال اعمال شود به طوری که نسبت دهانه برش به ارتفاع مؤثر از $2/5$ کمتر باشد، حتی اگر در سطوح جانبی برای افزایش ظرفیت برشی مقطع مقاوم‌سازی شده باشد، مد شکست دال به طور حتم برشی خواهد بود.

۱- مقدمه

(FRP)^۱ و چسباندن ورق‌های فولادی که در هنگام آتش سوزی دچار مشکل شده یا استفاده از ژاکت‌های بتنی که نیاز به حداقل ۶۰ الی ۷۰ میلی‌متر پوشش بتنی دارند [۵-۱]. از این رو محققین در زمینه مقاوم‌سازی قسمت‌های مختلف ساختمان، ایده‌های نوینی بر اساس نیاز کشور ارائه نموده‌اند. از جمله روش‌های نوین مقاوم‌سازی قسمت‌های مختلف ساختمان می‌توان به استفاده از یک لایه نازک بتن مسلح به الیاف به صورت پیش ساخته اشاره کرد. روش دیگر استفاده از بتن توانمند (HPC)^۲ به عنوان مصالح اصلی مقاوم‌سازی می‌باشد. بتن توانمند، بتنی با مقاومت و دوام بالاست که از معایب

امروزه اهمیت مقاوم‌سازی و بهسازی ساختمان‌ها به دلایلی از جمله وجود سازه‌های با طول عمر زیاد، وجود سازه‌های آسیب دیده مانند نواقص ناشی از شرایط محیطی به خصوص در مناطق خورنده، کیفیت پایین مصالح، ضعف‌های موجود در مرحله اجرا و طراحی ساختمان‌ها و همچنین افزایش عملکرد سازه‌های موجود و دستیابی به الزامات تخمینی آیین‌نامه‌های طراحی جدید، پررنگ‌تر شده است. روش‌های سنتی گزینه‌های مناسبی بوده ولی با محدودیت‌هایی همراه است. به عنوان مثال مقاوم‌سازی با پلیمرهای مسلح شده به الیاف

1Fiber Reinforced polymer
2High Performance Concrete

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: kheyroddin@semnan.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لایسنس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لایسنس، از آدرس <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode> دیدن فرمائید.



جدول ۱. طرح اختلاط کامپوزیت سیمانی توانمند الیافی
Table 1. HPFRCC mix designs

وزن مصالح در حالت اشباع با سطح خشک (کیلوگرم بر مترمکعب)	مصالح
۱۹۴	آب
۵۸۰	سیمان پرتلند
۶۸	میکروسلیس
۱۴۶	ماسه سیلیسی (به اندازه ۰/۳۵ تا ۰/۹ میلی‌متر)
۲۵۰	ماسه سیلیسی (به اندازه ۰/۱۸ تا ۰/۷۱ میلی‌متر)
۱/۸	ماسه معمولی تا اندازه ۴/۷۵ میلی‌متر
۰/۸	فوق روان کننده* (/.)
۱	الیاف فولادی# (/.)
پارامترهای طراحی طرح اختلاط	
۳۴/۴۵	نسبت آب به سیمان (/.)
۳۴/۳۴	نسبت آب به سیمان* (/.)
۲۹/۹۴	نسبت آب به مصالح سیمانی (/.)
۳۰/۷۴	نسبت آب به مصالح سیمانی* (/.)
روانی	
۷۰	اسلامپ متوسط (میلی‌متر)

[۱۲]. فارنلا و نامن به بررسی مشخصات نمودار تنش-کرنش در کامپوزیت‌های مسلح شده به الیاف تحت فشار پرداخته و رابطه‌ای برای پیش‌بینی کامل رفتار آن پیشنهاد نموده اند [۱۳]. مطالعاتی نیز در زمینه به دست آوردن پاسخ تنش-کرنش برای بتن‌های با مقاومت ۳۵ تا ۸۵ مگاپاسکال و مسلح شده با الیاف انجام گرفته است [۱۴]. عرض ترک‌های ریز به شدت تحت تأثیر نوع الیاف و ماسه می‌باشند به گونه‌ای که می‌توان گفت استفاده از ماسه سیلیسی در HPFRCC ها به همراه الیاف فولادی مقاومت بالا، منجر به بهبودی سریع ترک‌های ریز با عرض ترک کمتر از ۲ میکرون می‌شود [۱۵]. جیووانی و همکاران در سال ۲۰۱۰ پژوهشی آزمایشگاهی در زمینه‌ی مقاوم‌سازی و تعمیر تیرهای بتن‌آرمه توسط مصالح HPFRCC انجام دادند و نتایج نشان داد که HPFRCC باعث افزایش ظرفیت باربری ۲/۱۵ برابر تیر مقاوم‌سازی شده نسبت به نمونه شاهد می‌شود [۱۶]. موستوسی و همکاران در سال ۲۰۱۱ تحقیقاتی در زمینه مقاوم‌سازی تیرهای بتن مسلح با HPFRCC انجام دادند. در این تحقیق نمونه‌های تیر با ژاکت U-شکل از جنس HPFRCC

آن می‌توان به حالت‌های شکنندگی و مقاومت کششی پایین و قابلیت انعطاف‌پذیری محدود اشاره نمود. ایده اضافه کردن الیاف به منظور افزایش مقاومت کششی و انعطاف‌پذیری، قابل تأمل بوده و کاربردهای زیادی در زمینه‌های مختلف طرح اختلاط و رفتار سازه‌ای پیدا کرده است [۱۱-۶]. کامپوزیت‌های سیمانی توانمند الیافی^۱ (HPFRCC) را می‌توان به عنوان مواد پیشرفته کامپوزیتی که رفتار سخت‌شوندگی کرنشی تحت بار کششی از خود نشان می‌دهند، تعریف کرد (بتن‌هایی که طرح اختلاطشان فاقد درشت‌دانه (شن) بوده و در آن صرفاً از ریزدانه (ماسه) استفاده شده است، کامپوزیت سیمانی^۲ می‌نامند). بنابراین HPFRCC ها می‌توانند به طور بالقوه مشکلاتی از قبیل شکل‌پذیری کم و ازدیاد میلگردها در مقاطع پر فولاد را از طریق توانایی ذاتی در ایجاد پیوستگی و محصورشدگی رفع کنند. از جمله مشخصات HPFRCC ها، می‌توان به ظرفیت برشی و کششی نسبتاً زیاد به همراه ظرفیت کنترل ترک و توانایی اتلاف انرژی اشاره کرد

1 High performance Fiber Reinforced Cementitious composite
2 Cementitious composite

جدول ۲. مشخصات فیزیکی و مکانیکی الیاف فولادی دو سر قلاب
Table 2. Physical and mechanical characteristics of Hooked steel fiber

نسبت ابعادی	مقاومت کششی (MPa)	چگالی (gr/cm ³)	طول (mm)	قطر (mm)
۳۷/۵	۱۰۵۰	۷/۸۵	۳۰	۰/۸



شکل ۱. الیاف فولادی دو سر قلاب دار [19]
Fig. 1. Hooked steel fiber

مصالح سنگی به کار گرفته شده در طرح اختلاط HPFRCC شامل ماسه شسته شده با کمترین میزان فیلر و ماسه سیلیسی^۲ به جهت تأمین پرکننده‌های مورد نیاز بوده و جهت بهبود ترک‌های ریز با ۲ اندازه مختلف شامل ۰/۱۸ تا ۰/۷۱ میلی‌متر و ۰/۹ تا ۰/۳۵ میلی‌متر مورد استفاده قرار گرفته است. مصالح سیمانی شامل سیمان پرتلند نوع II از کارخانه سیمان شاهرود و پودر میکروسیلیس از کارخانه بتن پاس می‌باشد. فوق روان کننده PX-MIX محصولی پلیمری بر پایه پلی کربکسیلات اتر از شرکت شیمی سازه آرمانی طبق استاندارد ASTM C۴۹۴ [۲۴] و از نوع F بوده که به مقدار ۰/۸ وزن مصالح سیمانی مورد استفاده قرار گرفته است. الیاف فولادی ۲ سر قلاب باروکش مسی به طول ۳۰ میلی‌متر و قطر ۰/۸ میلی‌متر با نسبت ابعادی (نسبت طول به قطر الیاف) ۳۷/۵ مطابق شکل ۱ استفاده شده است که مشخصات فیزیکی و مکانیکی الیاف فولادی مطابق جدول ۲ می‌باشد.

برحسب درصد حجمی الیاف

* برحسب درصد وزنی فوق روان کننده نسبت به مصالح سیمانی (مجموع سیمان و میکروسیلیس)
جهت ساخت کامپوزیت‌های سیمانی توانمند الیافی از استاندارد

مقاوم‌سازی شده و مورد بررسی قرار گرفته‌اند. با استفاده از نتایج به دست آمده می‌توان گفت استفاده از ژاکت HPFRCC می‌تواند باعث افزایش شکل‌پذیری تیر و مقاومت آن گردد، همچنین می‌تواند باعث تغییر مد گسیختگی از برشی به خمشی در تیرها گردد [۱۷]. تانارسلن در سال ۲۰۱۷ به بررسی رفتار تیرهای بتن مسلح تقویت شده با ورق‌های بتنی مسلح به الیاف با توانمندی بالا (UHPFRC) به ضخامت ۵۰ میلی‌متر پرداخت. نتایج نشان داد که مهار مکانیکی روشی مؤثر برای اتصال ورق پیش ساخته به تیرها است که باعث افزایش ظرفیت جذب انرژی شده است [۱۸]. کارهای تحقیقاتی دیگری نیز در زمینه‌ی کاربرد مصالح HPFRCC در سایر اعضای سازه‌ای بتنی مانند تیرهای رابط، محل اتصال تیر و ستون، ناحیه مفصل پلاستیک در تیرها، ستون‌ها و دیوارهای سازه‌ای انجام شده است [۱۹-۲۳].

۲- برنامه آزمایش

۱-۲- مشخصات مصالح HPFRCC

طرح اختلاط HPFRCC با نسبت پایین آب به مصالح سیمانی (مجموع مقدار سیمان و میکروسیلیس) در جدول ۱ ارائه شده است.



شکل ۲. الف) آزمایش فشاری، ب) آزمایش کششی غیرمستقیم [19]
Fig. 2. The details of test setup (a) splitting tensile test; (b) compressive strength test



شکل ۳. نحوه ساخت ورق‌های پیش ساخته HPFRCC
Fig. 3. The manufacturing process of laminates specimens
 a) laminate's rebar installation (b) laminate's wet curing (c) laminate's slotting

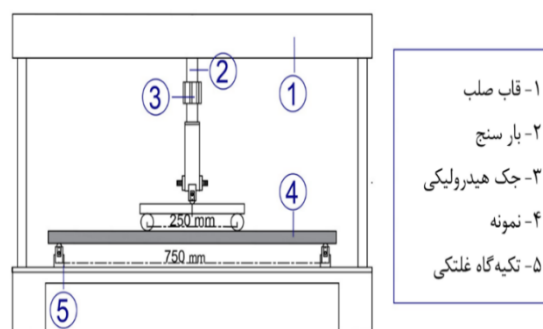
و در دمای ۲۳ درجه سانتی‌گراد، مطابق با استاندارد ASTM C۳۱ [۲۷] به روش غرقاب عمل‌آوری شده است. آزمایش مقاومت فشاری مخلوط‌های HPFRCC با کمک استاندارد BS ۱۸۸۱ - ۱۰۸ [۲۸] برای نمونه‌های مکعبی مطابق شکل (۲-الف) انجام شده است. آزمایش کششی نمونه‌ها در سنین مختلف با کمک دستگاه هیدرولیکی آزمایش مقاومت فشاری مطابق شکل (۲-ب) که شامل دو صفحه فولادی با سطح سخت است، با روش دو نیم شدن نمونه استوانه‌ای^۱، طبق استاندارد ASTM C۴۹۶ [۲۹] انجام شده است. به این صورت که نیروی فشاری قطری در امتداد طول نمونه استوانه‌ای شکل، باعث ایجاد تنش کششی متعامد در نمونه شده است. بار با سرعت ثابت به صورت پیوسته در محدوده ۰/۷ تا ۱/۴ مگاپاسکال

۵۴۴ R-ACI [۲۵] که برای بتن‌های الیافی می‌باشد کمک گرفته شده است به این صورت که، ابتدا مصالح سنگی و مواد سیمانی شامل سیمان و پودر میکروسیلیس با یکدیگر ترکیب شده است، سپس ۷۵ درصد از آب را به مخلوط اضافه کرده تا اجزا مرطوب شوند، بعد از یک دقیقه فوق روان کننده، ۲۵ درصد دیگر آب و سپس الیاف‌های فولادی به مخلوط اضافه شده و هنگامی که مخلوط همگن شد-از روی تجربه مدت آن ۵ الی ۷ دقیقه بعد از افزودن فوق روان کننده و آب است- می‌توان مخلوط‌کن را خاموش کرد. آزمون اسلامپ بر اساس آیین‌نامه ASTM C۱۴۳ [۲۶] انجام شده است و مقدار نشست متوسط ۷۰ میلی‌متر گزارش شده است. مخلوط آماده شده را در قالب‌ها ریخته و با کمک میز لرزان حباب‌های هوای موجود در آن نیز خارج می‌شود. نمونه‌ها بعد از یک روز از قالب خارج شده

¹Splitting Tension Test or Split Cylinder Test



شکل ۴. مهار میلگردهای فولادی در ورق پیش ساخته
 Fig. 4. Anchoring of steel rebar's in HPFRCC laminate



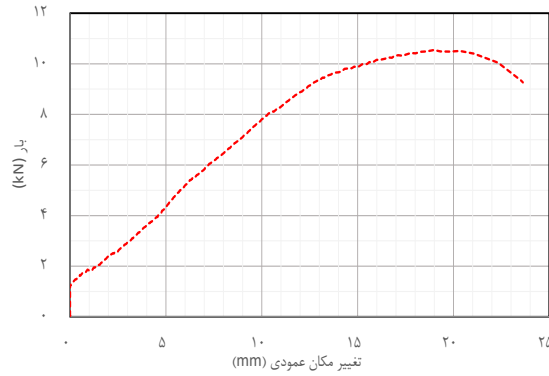
شکل ۵. نحوه بارگذاری واقعی ورق‌های پیش ساخته
 Fig. 5. Laminate's test setup

در ناحیه کششی و به علت عدم وجود فضای کافی جهت خم زدن میلگرد، از تسمه فلزی استفاده شده است. ابعاد تسمه فلزی، 400×25 میلی‌متر مربع و ضخامت آن، ۴ میلی‌متر در نظر گرفته شده است که با ایجاد سوراخ در تسمه فلزی، میلگردهای فولادی در دو انتها ورق پیش ساخته مطابق شکل ۴ جوش داده شده است. مشخصات مکانیکی میلگردهای فولادی شامل تنش تسلیم، مقاومت نهایی و مدول الاستیسیته به ترتیب ۴۰۰ مگاپاسکال، ۵۰۰ مگاپاسکال و ۱۹۲ گیگاپاسکال می‌باشد. مصالح HPFRCC مطابق توضیحات قسمت ۱-۲ ساخته و سپس در قالب‌های مورد نظر ریخته شد. ورق‌ها بعد از ۲۴ ساعت از قالب چوبی خارج شده سپس به مدت ۲۸ روز و در دمای ۲۳ درجه سانتی‌گراد، مطابق با استاندارد ASTM C۳۱ [۲۷] به روش غرقاب عمل‌آوری شده است (شکل ۳-ب)). یکی از ورق‌ها به صورت جداگانه مورد آزمایش قرار گرفت تا سهم آن به عنوان مصالح مقاوم‌سازی بررسی شود و دو ورق پیش ساخته دیگر برای مقاوم‌سازی دال‌ها به کار رفته است. هدف از تعریف و آزمایش ورق پیش ساخته

بر ثانیه وارد شده است. متوسط مقاومت فشاری و کششی نمونه‌ها به ترتیب ۷۰ و ۶/۲ مگاپاسکال است.

۲-۲- مشخصات ورق‌های پیش ساخته HPFRCC

جهت مقاوم‌سازی دال‌های بتن‌آرمه اگر مصالح HPFRCC به صورت درجا و در زیر دال استفاده شود، باید از سیستم بتن‌پاشی یا شاتکریت استفاده گردد، در صورتی ورق پیش ساخته HPFRCC به راحتی در زیر دال نصب و اجرا ساده‌تر می‌گردد. ضخامت ورق پیش ساخته با توجه به ضخامت دال که ۱۰۰ میلی‌متر بود، ۲۵ میلی‌متر انتخاب شد. نسبت ضخامت ورق پیش ساخته به ضخامت دال بتنی ضعیف (t_{HPFRCC} / t_{slab}) ۲۵ درصد می‌باشد. در کل سه ورق پیش ساخته HPFRCC با طول ۸۰۰، عرض ۴۰۰ میلی‌متر و ضخامت مورد نظر حاوی دو میلگرد فولادی با قطر ۱۲ میلی‌متر با فاصله مرکز تا مرکز ۱۶۰ میلی‌متر مطابق شکل (۳-الف) ساخته شده است. برای رعایت طول مهاری میلگردهای فولادی با پوشش ۶/۵ میلی‌متر



شکل ۶. نمودار بار-تغییر مکان ورقه پیش ساخته

Fig. 6. Load-deflection curve of laminate



شکل ۷. الگوی شکست ورق پیش ساخته

Fig. 7. Laminates failure pattern

۶ الگوی شکست نمونه می‌باشد.

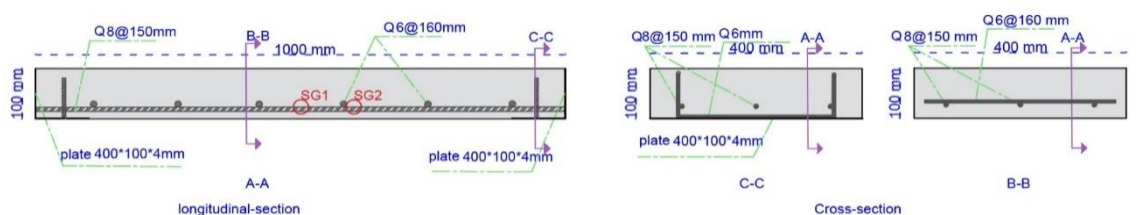
۲-۳- آماده‌سازی دال‌های یک‌طرفه ضعیف

جهت بررسی رفتار دال‌های آسیب‌دیده و مقاوم‌سازی آن‌ها با ورق پیش ساخته کامپوزیت‌های سیمانی توانمند الیافی، سه دال بتن مسلح ضعیف مشابه، از لحاظ ابعاد، سطح مقطع و همچنین آرایش میلگردهای طولی و عرضی در این پژوهش ساخته و مورد آزمایش قرار گرفته است. برای دال‌ها ابعادی به طول ۱۰۰۰ میلی‌متر و سطح مقطع مستطیلی به عرض ۴۰۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۱۰۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. تمامی دال‌ها بر طبق آیین‌نامه ACI ۳۱۸-۱۴ [۳۰] طراحی شده است. سه میلگرد فولادی آجدار به قطر ۸ میلی‌متر در ناحیه کششی دال با در نظر گرفتن ۲۰ میلی‌متر پوشش بتنی قرار داده شده است (درصد آرماتور کششی از حداقل درصد آرماتور دال بتنی بیش‌تر است $(0.02 > 0.047)$). در دال‌های

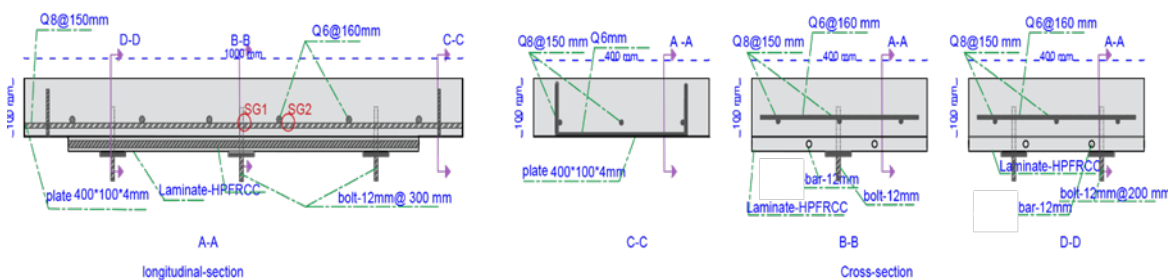
قبل از اتصال به دال‌ها این است که خواص ورق پیش ساخته، به طور جداگانه در مقیاس اصلی به دست آید. در این پژوهش از اثر وجود سوراخ و مهار مکانیکی صرف نظر شده است. آزمایش خمشی چهار نقطه‌ای با سرعت بارگذاری ۰/۵ میلی‌متر بر دقیقه برای ورق پیش ساخته مطابق شکل ۵ انجام گرفته است. نمودار بار-تغییر مکان وسط دهانه نمونه مطابق شکل ۶ می‌باشد که نشان می‌دهد ورق پیش ساخته تا بار حدوداً ۱/۳ کیلو نیوتن رفتار کاملاً خطی داشت و اولین ترک خوردگی در این بار مشاهده شد و نمونه از آنجا به بعد رفتاری کاملاً متفاوت از خود نشان داد. با افزایش بار، ترک‌های دیگری روی ورقی پیش ساخته و در حد فاصل دو نقطه اعمال بار ایجاد شد که به مرور زمان این ترک‌ها باز شد تا شکست نهایی رخ داد. هنگامی که بار به حداکثر مقدار قابل تحمل نمونه (۱۰/۵ کیلونیوتن) رسید، شیب منحنی بار-تغییر مکان تغییر کرد. وجود میلگرد درون ورق پیش ساخته، مانع از دو نیم شدن کامل ورق پیش ساخته شده است. شکل

جدول ۳. مشخصات دال‌های آزمایش شده
Table 3. Properties of tested slab specimens

نام نمونه	نحوه اتصال			نوع میلگرد	مقاوم‌سازی		
	چسب سیکادور ۳۱۰	مه‌ار مکانیک ی	نوار CFRP		الی اف (%)	ورق پیش ساخته HPFRCC	ورق CFR P
WS	خیر	خیر	خیر	-	-	خیر	خیر
WS-L1-Steel	بله	بله	خیر	فولادی	۱	بله	بله
WS-L1-Steel-Shear	بله	بله	بله	فولادی	۱	بله	خیر



(الف)



(ب)

شکل ۸. جزئیات مقاطع طولی و عرضی (الف) دال مرجع، (ب) دال‌های مقاوم‌سازی شده

Fig. 8. Reinforcement details of the specimens (a) reference; (b) strengthened slabs

یک درصد الیاف فولادی، "Steel" نشان دهنده میلگرد فولادی درون ورق پیش ساخته و "Shear" نشان دهنده مقاوم‌سازی نمونه با ورق پیش ساخته CFRP هست. به دلیل کم بودن ضخامت دال که ۱۰۰ میلی‌متر لحاظ شده است و عدم وجود فضای کافی جهت رعایت طول خم برای مه‌ار میلگردهای طولی درون دال‌ها، از صفحه‌های فولادی به ضخامت ۴ میلی‌متر و با ابعاد متناسب با سطح مقطع دال یعنی عرض ۱۰۰ میلی‌متر و طول ۴۰۰ میلی‌متر در دو انتهای دال کمک گرفته شده است که با ایجاد سوراخ در صفحه فلزی، میلگردهای فولادی در دو انتها دال مطابق شکل ۸ جوش داده شده است. علاوه بر آن

متعارف عموماً درصد آرماتور کششی حدوداً نصف درصد فولاد بالانس در نظر گرفته می‌شود و از آنجایی که در این پژوهش درصد آرماتور کششی حدوداً ۲۰٪ فولاد بالانس در نظر گرفته شده است (۰/۰۲۳ < ۰/۰۴۷) بنابراین در متن مقاله از کلمه "دال ضعیف" به جای "دال" استفاده شده است. جزئیات طولی و عرضی دال‌های مرجع و دال‌های مقاوم‌سازی شده با ورق‌های پیش ساخته حاوی میلگرد فولادی مطابق جدول ۳ و شکل ۷ هست. علامت اختصاری "Steel--WS-L1" برای نام‌گذاری دال‌ها انتخاب شد که در آن "WS" نشان دهنده دال ضعیف، "L1" نشان دهنده ورق پیش ساخته حاوی

جدول ۴. طرح اختلاط بتن دال‌ها
Table 4. Mixture proportions of concrete

w/s (%)	وزن (کیلوگرم بر مترمکعب)			
	سیمان	ماسه (۰-۴/۷۵ میلی‌متر)	شن (۴/۷۵-۱۲/۵ میلی‌متر)	آب
۰/۸	۲۵۰	۱۲۸۰	۵۵۰	۲۰۵
	W/S: منظور نسبت آب به سیمان است			



شکل ۹. ورق‌های تکیه‌گاهی دال‌ها
Fig. 9. Slab's support sheets



(ج) ایجاد شیار در ناحیه کششی دال

(ب) بتن‌ریزی نمونه‌ها

(الف) آرما توری بند

شکل ۱۰. نحوه‌ی ساخت دال‌های ضعیف
Fig. 10. The manufacturing process of slabs specimens
(a) slab's rebar installation (b) slab's concrete placement (c) slab's slotting

حاوی سیمان، ماسه با ابعاد ۰ تا ۴/۷۵ میلی‌متر و شن با ابعاد ۴/۷۵ تا ۱۲/۵ میلی‌متر است که بزرگ‌ترین ابعاد سنگ‌دانه به کار رفته شده در آن ۱۲/۵ میلی‌متر است. آزمون اسلامپ بر اساس آیین‌نامه ASTM C ۱۴۳ [۲۶] انجام شده است و مقدار نشست متوسط ۵۰ میلی‌متر شده است. دال‌ها بعد از ۲۴ ساعت از قالب چوبی خارج شده سپس به مدت ۲۸ روز و در دمای ۲۳ درجه سانتی‌گراد، به کمک گونی‌های خیس عمل‌آوری شده است. مقاومت فشاری متوسط بتن

دو ورق با مشخصات مشابه (۴۰۰×۱۰۰×۱۰۰ میلی‌متر) در قسمت تکیه‌گاه به صورت افقی در کف دال در نظر گرفته شده است که به جهت اتصال بهتر صفحه با دال، یک میلگرد U-شکل مطابق شکل ۷ و شکل ۸ لحاظ شده است. مشخصات مکانیکی میلگردهای فولادی شامل تنش تسلیم، مقاومت نهایی و مدول الاستیسیته به ترتیب ۳۲۱ مگاپاسکال، ۴۲۸ مگاپاسکال و ۱۶۹ گیگاپاسکال هست. طرح اختلاط بتن به کاربرده شده در ساخت دال مطابق جدول ۴ از نوع بتن ضعیف



شکل ۱۱. گام‌های سوراخ‌کاری ورق‌های پیش ساخته حاوی میلگرد و دال‌های ضعیف
 Fig. 11. Drilling steps HPFRCC laminate using steel bars and weak slabs

۲-۴-روش‌های مقاوم‌سازی

۲-۴-۱-روش مقاوم‌سازی خمشی

اتصال ورق‌های پیش ساخته به دال‌ها به دلیل وجود میلگرد، با کمک گرفتن از مهارهای مکانیکی و چسب است که به دلیل وجود احتمال جداشدگی ورق از دال، استفاده شده است. به این صورت که ابتدا مطابق شکل ۱۱ سوراخ‌هایی درون دال و ورق پیش ساخته ایجاد شده سپس با کمک پمپ باد گرد و غبار درون سوراخ‌ها زدوده شد. مطابق شکل ۱۲ از آیین‌نامه [۳۱] ACI 308.2R برای تعیین قطر، عمق و فاصله بین مهارها استفاده شده است که طبق محاسبات صورت گرفته برای مهارهای مکانیکی از میله‌های رزوه شده به قطر ۱۰ میلی‌متر و به فاصله ۲۰۰ میلی‌متر از یکدیگر در عرض دال و به فاصله ۳۵۰ میلی‌متر در جهت طولی دال استفاده شده است. عمق فرورفتگی مهارها درون دال ۸۰ میلی‌متر است که با مته‌ی به قطر ۱۲ میلی‌متر (یک شماره بزرگ‌تر از قطر سوراخ) حفاری شده است. درون این سوراخ‌ها به قطر ۱۲ میلی‌متر با چسب مخصوص کاشت آرماتور پر شده است، سپس میله‌های رزوه شده با دقت سر جای خود کاشته می‌شود. قبل از قرار دادن میله‌ها باید دو سوم عمق سوراخ از چسب پر شود و سپس میله در حفره قرار داده شده و در نهایت سوراخ با چسب پُر شود. مراحل کاشت مهارهای مکانیکی در شکل ۱۳ نشان

دال که با نمونه مکعبی به ابعاد ۱۰۰ میلی‌متر اندازه‌گیری شده، حدود ۲۰ مگاپاسکال است. مراحل ساخت دال‌ها و ورق‌های پیش ساخته HPFRCC به ترتیب مطابق شکل ۹ و شکل ۱۰ هست.

مشخصات هر یک از دال‌ها به طور جداگانه به صورت زیر است:

- دال (WS): دال مقاوم‌سازی نشده و به عنوان دال مرجع هست که برای بررسی میزان افزایش ظرفیت باربری دال‌های مقاوم‌سازی شده نسبت به دال مرجع و همچنین ارزیابی رفتار دال‌ها بعد از مقاوم‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

- دو دال باقی‌مانده مشابه دال مرجع در نظر گرفته شده و با ورق‌های پیش ساخته از جنس کامپوزیت سیمانی توانمند با یک درصد الیاف فولادی به ضخامت ۲۵ میلی‌متر مقاوم‌سازی شده است. دو میلگرد فولادی به قطر ۱۲ میلی‌متر و با فاصله ۱۶۰ میلی‌متر از یکدیگر در ورق پیش ساخته در نظر گرفته شده است. خواص مکانیکی و جزئیات دو دال ضعیف نمونه‌های مقاوم‌سازی شده مشابه دال ضعیف مرجع است. نمونه‌های "Steel-WS-L1" و "WS-Shear-L1" با ورق‌های HPFRCC شامل یک درصد الیاف و دو میلگرد فولادی در ناحیه خمشی مقاوم‌سازی شده‌اند با این تفاوت که وجوه جانبی "Steel-Shear-WS-L1" با ورق‌های CFRP جهت افزایش ظرفیت برشی مقاوم‌سازی شده است.



شکل ۱۲. تمیزکاری سوراخ‌ها از گرد و غبار
Fig. 12. Cleaning the holes from dust



شکل ۱۳. کاشت مهارهای مکانیکی
Fig. 13. Anchorage procedure



(ب)

(الف)

شکل ۱۴. نحوه اتصال ورق پیش ساخته حاوی میلگرد به دال‌ها
Fig. 14. How to apply a laminate using bars on the slabs

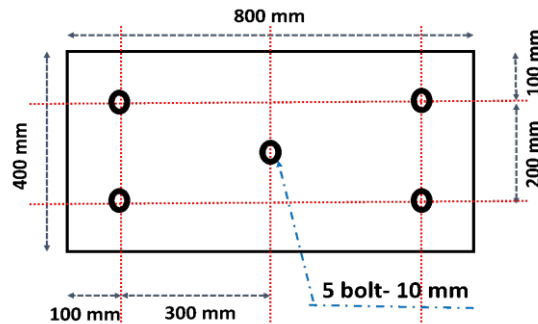
ترتیب ۷۰ و ۴۰ نیوتن بر میلی‌مترمربع و مدول الاستیسیته کششی چهارده روزه آن (طبق آیین‌نامه ISO ۵۲۷ [۳۲]) ۵۰۰۰ مگاپاسکال است. پس از عمل‌آوری (گیرش) اولیه چسب، سطوح اتصال تمیز شده و چسب سیکادور ۳۱ در لایه‌ای به ضخامت ۴ میلی‌متر مطابق شکل ۱۴-الف روی سطح دال اعمال شده و بعد از عبور ورق‌های پیش ساخته سوراخ شده از مهارهای مکانیکی، انتهای آن با پیچ مطابق شکل ۱۴-ب محکم می‌شود. جهت گیرش هر چه بهتر از گیره‌های مخصوص استفاده شده است. در هر دال از چهار گیره استفاده شده

داده شده است. چسب استفاده شده جهت چسباندن ورق‌های تقویت به دال‌های ضعیف از نوع چسب دو جزئی شامل واکنش‌گر و رزین پایه با نام تجاری Sikadure-۳۱ هست که بعد از اختلاط حدوداً ۳ دقیقه‌ای طبق توصیه نامه ارائه شده توسط شرکت سازنده، می‌توان به ماده‌ای یکنواخت و همگن به رنگ خاکستری رسید. مشخصات مکانیکی چسب شامل مقاومت کششی مستقیم (طبق آیین‌نامه ISO ۵۲۷ [۳۲]) ۲۴ نیوتن بر میلی‌مترمربع همچنین مقاومت فشاری و مقاومت خمشی هفت روزه (طبق آیین‌نامه DIN ۱۹۶ [۳۳]) به



شکل ۱۵. گیرش بهتر با قرار دادن وزنه‌های سنگین

Fig. 15. Bonding application for HPFRCC laminate



شکل ۱۶. محل قرارگیری مهارهای مکانیکی در ورق‌های پیش ساخته حاوی میلگرد

Fig. 16. Mechanical anchorages on laminate locate

ورق‌های CFRP به دست می‌آید. روابط استفاده شده برای افزایش ظرفیت برشی مقطع با ورق CFRP مطابق روابط (۱) و (۲) هست.

$$V_{frp} = \frac{\phi_{frp} E_{frp} A_{frp} \left(\sin \hat{\alpha} + \hat{\alpha} \cos \hat{\alpha} \right)}{S_{frp}} \quad (1)$$

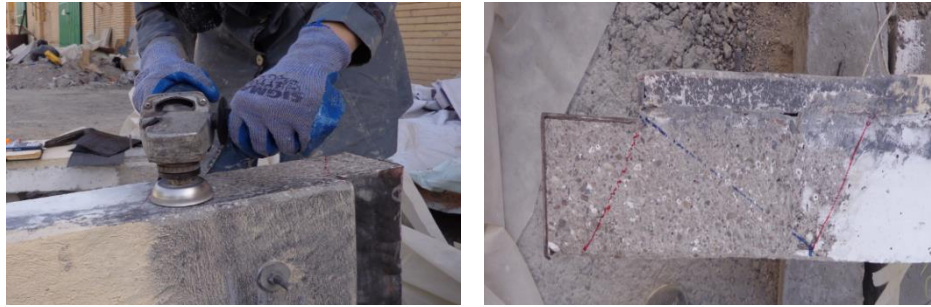
$$A_{frp} = 2t_{frp} w_{frp} \quad (2)$$

که در آن ϕ_{frp} ، E_{frp} ، A_{frp} ، $\hat{\alpha}$ ، t_{frp} ، w_{frp} به ترتیب ضریب جزئی ایمنی، مدول الاستیسیته (مگاپاسکال)، کرنش، سطح مقطع (میلی‌متر مربع)، زاویه نوار تقویتی با محور طولی عضو، ضخامت (میلی‌متر) و عرض مؤثر نوار تقویتی برشی CFRP (میلی‌متر) هست. مدول الاستیسیته، مقاومت کششی و ضخامت ورق‌های CFRP استفاده شده در این پژوهش، به ترتیب ۲۳۰ گیگاپاسکال، ۴۹۰۰ مگاپاسکال و ۰/۱۶۶ میلی‌متر است. هدف

و در فاصله بین گیره‌ها از وزنه‌های ۲۰ کیلوگرمی مطابق شکل ۱۵ کمک گرفته شده است. با توجه به توصیه نامه ارائه شده توسط شرکت سازنده چسب مورد نظر، حداقل زمان لازم قبل از آزمایش برای گیرش نهایی مناسب ۳ الی ۷ روز با توجه به دمای محیط است. همچنین ترسیم‌های شماتیک محل قرارگیری مهارهای مکانیکی در ورق‌های پیش ساخته حاوی میلگرد مطابق شکل ۱۶ است.

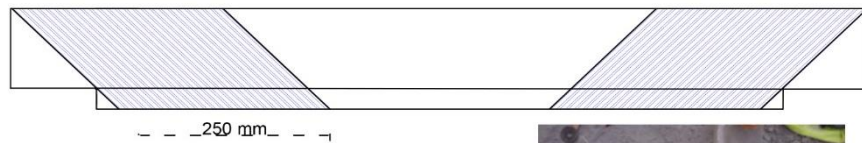
۲-۴-۲- روش مقاومت‌سازی برشی

از آنجایی که دال‌ها با ورق‌های HPFRCC برای افزایش ظرفیت خمشی تقویت شدند، در این مرحله ظرفیت برشی یکی از دال‌ها با کمک ورق CFRP افزایش داده شد تا اثر مقاومت‌سازی سطوح جانبی بر دال‌های تقویت شده با ورق‌های HPFRCC بررسی گردد. مقاومت‌سازی دال مورد نظر به کمک ورق CFRP بر طبق آیین‌نامه ACI ۲R-۴۴۰ [۳۴] انجام شده است. با توجه به این آیین‌نامه مقاومت برشی نهایی تأمین شده توسط بتن، آرماتورهای برشی و

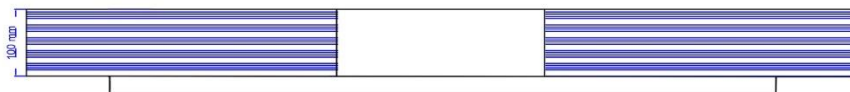


ب

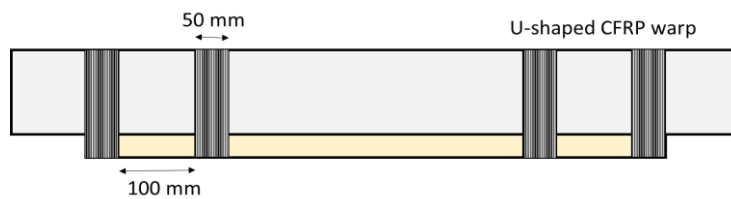
الف



پ



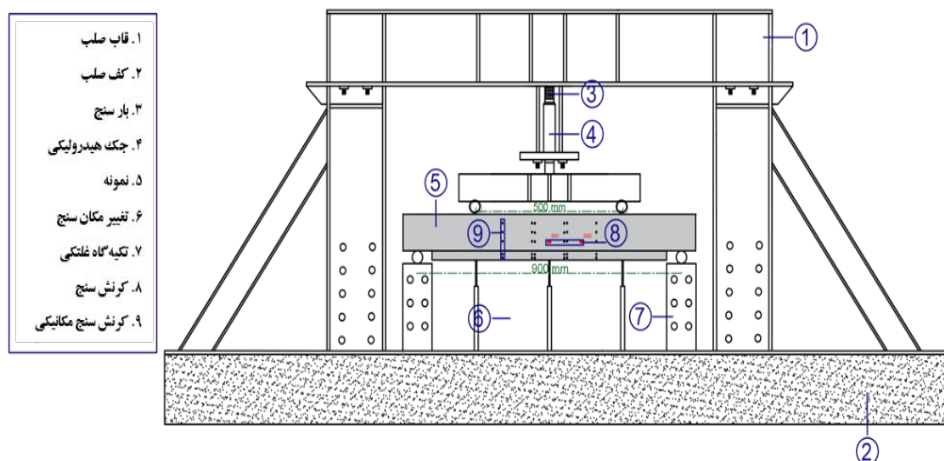
شکل ۱۷. مقاومسازی برشی دال‌ها
Fig. 17. shear strengthening of slabs specimens



شکل ۱۸. محل قرارگیری نوار CFRP به صورت U-شکل
Fig. 18. U-shaped CFRP wraps locate

از CFRP از دو طرف بر سطح فوقانی و تحتانی دال، تا ۱۰۰ میلی‌متر ادامه داده شد. در مرحله دوم، دو لایه ورق CFRP به طول ۴۰۰ میلی‌متر و عرض ۱۰۰ میلی‌متر در دو انتهای دال (مطابق شکل ۱۷-ت) نصب شده است. علاوه بر آن، برای مقابله با وجود تمرکز تنش در دو انتهای آزاد ورق پیش ساخته HPFRCC می‌توان با توجه به

از مقاومسازی نمونه‌ها با ورق‌های CFRP افزایش ظرفیت برشی مقطع هست. در مرحله اول، دو لایه ورق CFRP به عرض ۲۵۰ میلی‌متر به طوری که زاویه راستای الیاف بر محور طولی دال ۴۵ درجه باشد در دو انتهای دال (مطابق شکل ۱۷-پ) چسبانده شد. از آنجایی که ضخامت دال محدود هست، برای تأمین مهار انتهایی، ورق



شکل ۱۹. نحوه بارگذاری شماتیک نمونه‌ها (آزمایش بررسی رفتار برشی)

Fig. 19. Test setup and instrumentation of specimens (examination of shear behavior)

ازای هر مترمربع از CFRP نیاز است که مقدار ۷۰۰ گرم از آن در زیر CFRP و ۳۰۰ گرم بر روی آن اعمال شده است. لازم به ذکر است که بعد از قرار دادن CFRP بر روی چسب نیاز است با کمک غلتک یا کاردک در جهت اصلی CFRP حباب‌های هوا موجود خارج گردد، در صورت عدم دقت در چسباندن الیاف معمولاً پدیده تورق صورت می‌گیرد.

۲-۵- نحوه بارگذاری نمونه‌ها

تمامی نمونه‌ها مطابق با استاندارد ASTM C۷۸-۰۲ [۳۷] تحت آزمایش خمشی چهار نقطه‌ای قرار گرفتند. اندازه هر یک از دال‌ها ۱۰۰۰ میلی‌متر انتخاب شده است. طول خالص دهانه یا فاصله بین تکیه‌گاه‌ها ۹۰۰ میلی‌متر و فاصله بین نقاط اعمال بار ۵۰۰ میلی‌متر مطابق شکل ۱۹ لحاظ شده است. سه عدد LVDT^۱ برای ثبت جابه‌جایی‌های عمودی قسمت وسط دهانه که بیشترین جابه‌جایی در آن رخ داده است و دو عدد دیگر در زیر محل اعمال بار قرار داده شده است. مقادیر کرنش میلگردها با کمک کرنش‌سنج‌ها در قسمت میانی و ۱۰۰ میلی‌متری از وسط میلگردها قرار داده شده است. همچنین مقادیر کرنش بتن و عرض ترک‌ها با نصب کرنش‌سنج‌های مکانیکی (DEMEC)^۲ مطابق شکل ۲۰ در وجه جانبی دال‌ها در مقطع میانی و ۱۰۰ میلی‌متری از وسط دال قرار داده شده است که تا قبل از ترک‌خوردگی بتن، کرنش بتن و بعد از رخداد ترک‌ها، نشان دهنده‌ی

پیشنهاد تانارسلن در سال ۲۰۱۷ [۳۵ و ۱۸]، از ورق‌های CFRP استفاده کرد که در این پژوهش در دو انتهای آزاد ورق‌های پیش ساخته، دو ردیف نوار U-شکل CFRP به عرض ۵۰ میلی‌متر و به صورت دو لایه و با فاصله ۱۰۰ میلی‌متر جهت جلوگیری از جداسازی ورق‌های پیش ساخته HPFRCC متصل شده است (مطابق شکل ۱۸). از جمله اشتباهات رایج در نصب و اجرای ورق‌های CFRP چسباندن آن بر روی سطوح کثیف، ناصاف و مرطوب است. لذا در ابتدا آماده‌سازی سطوح تماس مطابق شکل ۱۹-الف با فرچه فلزی انجام شده است. سپس به طور کامل از گرد و غبار پاک‌سازی شده است. جهت جلوگیری از تمرکز تنش در گوشه‌ها، می‌بایست لبه‌های سازه به کمک فرز گرد شود یا پخ زده شوند. نام تجاری چسب استفاده شده برای چسباندن ورق‌های CFRP به نمونه‌ها، Sikadure-۳۳۰ است که از دو جزء رزین و سخت کننده تشکیل شده است و مقاومت کششی مستقیم ۷ روزه (طبق آیین‌نامه DIN ۵۳۴۵۵ [۳۶]) ۳۰ مگاپاسکال هست. از دیگر نکات مهم، فاصله زمانی بین آغشته نمودن سطح و نصب CFRP هست که در این مورد سعی شده این زمان به کمتر از ۱۵ دقیقه محدود شود. با توجه به دستورالعمل شرکت سازنده برای لایه اول در هر مترمربع ۱/۵ کیلوگرم چسب نیاز است و به این صورت عمل شده است که ابتدا یک کیلوگرم از چسب در زیر ورق CFRP اعمال شد سپس CFRP را در جهت مناسب روی سطح بتن نصب کرده و بعد از آن ۰/۵ کیلوگرم باقی مانده از چسب نیز اعمال شده است. در لایه‌های بعدی مقدار یک کیلوگرم چسب به

1Linear Variable Differential Transformers

2Demountable Mechanical Strain Gauge



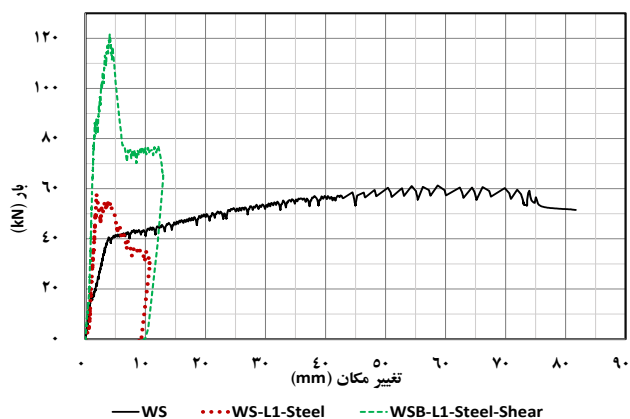
شکل ۲۰. کرنش‌سنج مکانیکی (دمک)

Fig. 20. The demountable mechanical strain gauge (DEMEC)



شکل ۲۱. نحوه استفاده از کرنش‌سنج‌های مکانیکی

Fig. 21. How to use mechanical strain gauges



شکل ۲۲. مقایسه منحنی بار-تغییر مکان نمونه‌های آزمایش شده

Fig. 22. Comparison of load-displacement curve of tested specimens

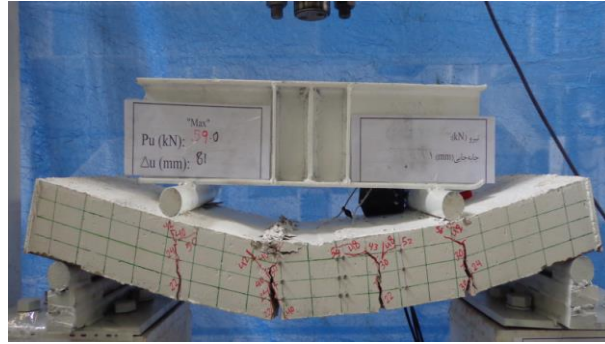
شروع آزمایش برای اولین مرحله (قبل از شروع بارگذاری) با دستگاه مخصوص اندازه‌گیری فاصله بین دمک‌ها انجام شده است.

۳- نتایج و بحث

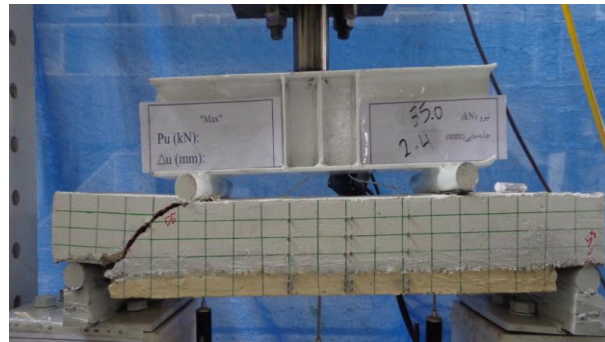
این پژوهش آزمایشگاهی شامل سه دال یک طرفه با طول ۱۰۰۰ میلی‌متر است، دال شماره یک با نام "WS" مخفف کلمه انگلیسی "Weak Slab" به عنوان نمونه ضعیف و فاقد ورق پیش ساخته انتخاب شده است. این دال جهت ارزیابی میزان افزایش ظرفیت

بازشدگی ترک‌ها هست (مطابق شکل ۲۱).

اندازه‌گیری کرنش ایجاد شده میلگرد در دو ناحیه از هر دال، یکی به فاصله ۴۰۰ میلی‌متر و دیگری ۵۰۰ میلی‌متر از تکیه‌گاه در نظر است. فاصله عمودی DEMEC‌ها در دال ۲۵ میلی‌متر و در ورق پیش ساخته ۱۰۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است که در واقع سه ردیف دمک در هر دال و در دو ردیف دمک در هر ورق پیش ساخته (در نمونه‌های حاوی ورق پیش ساخته) در نظر گرفته شده است. هر دو دمک برای اندازه‌گیری کرنش یک نقطه به کار رفته است). قبل از



شکل ۲۳. الگوی شکست نمونه WS
Fig. 23. The failure mode of the WS



شکل ۲۴. الگوی شکست نمونه WS-L1-Steel
Fig. 24. The failure mode of the WS-L1-Steel

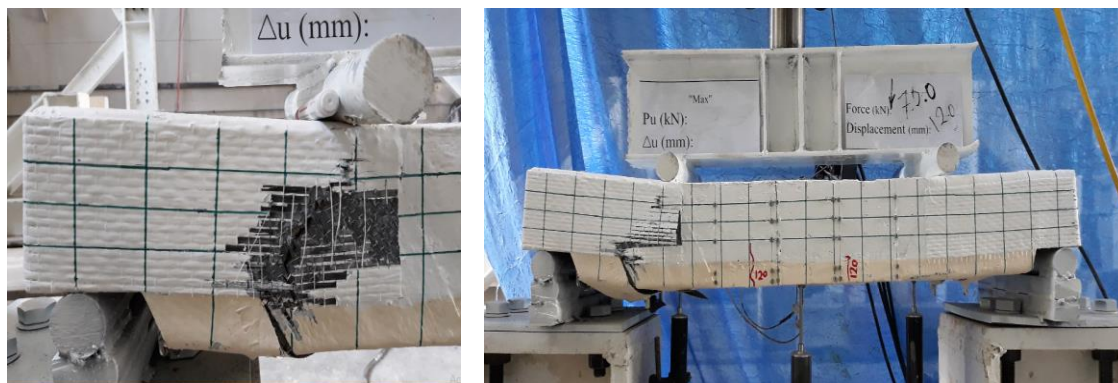
تحمل شده توسط دال مرجع، در بار ۶۱ کیلونیوتن و تغییر مکان ۵۸ میلی‌متر هست. شیب منحنی بار-تغییر مکان بعد از این مرحله تقریباً ثابت شده است که در واقع نشان دهنده افزایش تغییر مکان وسط دهانه و بازشدگی عرض ترک هست. در نهایت دال مرجع با مشاهده ترک‌هایی در قسمت بتن فشاری در وسط دهانه در تغییر مکان ۸۰ میلی‌متر دچار شکست نهایی شده است. شکل ۲۳ مربوط به شکست نهایی دال مرجع هست.

دال Steel-WS-L1، دال مقاوم‌سازی شده در ناحیه کششی با ورق پیش ساخته HPFRCC هست. اولین ترک خوردگی به صورت ترک برشی از نقطه بارگذاری تا تکیه‌گاه ادامه پیدا کرده است که در بار ۵۵ کیلونیوتن و تغییر مکان ۱/۸ میلی‌متر، رخ داده است. با افزایش بار، عرض ترک خوردگی برشی افزایش یافت. حداکثر بار تحمل شده توسط این نمونه ۵۷ کیلونیوتن و در تغییر مکان ۲/۴ میلی‌متر اتفاق افتاده است. شکست نهایی دال با رفتار برشی در بار ۳۰/۲ کیلونیوتن و جابه‌جایی ۱۰/۷ میلی‌متر رخ داده است. شکل ۲۴ مربوط به شکست نهایی دال مقاوم‌سازی شده Steel-WS-L1 هست.

خمشی و برشی در مقایسه با رفتار سایر دال‌ها در آزمایش بررسی رفتار برشی بعد از مقاوم‌سازی خمشی در نظر است. خواص مکانیکی و جزئیات دو دال ضعیف نمونه‌های مقاوم‌سازی شده مشابه دال ضعیف مرجع است. نمونه‌های "WS-L1-Steel" و "WS-L1" با ورق‌های HPFRCC شامل یک درصد الیاف و دو میلگرد فولادی در ناحیه خمشی مقاوم‌سازی شده‌اند با این تفاوت که وجوه جانبی "WS-L1-Steel-Shear" با ورق‌های CFRP جهت افزایش ظرفیت برشی مقاوم‌سازی شده است.

۳-۱- رفتار و نحوه شکست نمونه‌ها

منحنی بار-تغییر مکان وسط دهانه دال‌ها تا لحظه شکست مطابق شکل ۲۲ است. منحنی بار-تغییر مکان دال WS به عنوان دال مرجع، شامل دو قسمت الاستیک و پلاستیک هست. اولین ترک خوردگی به صورت ترک خمشی در بارگذاری ۱۵ کیلونیوتن و تغییر مکان ۱/۲ میلی‌متر، رخ داده است. با افزایش بار، ترک خوردگی‌ها به طور متقارن در فاصله بین دو نقطه بار گسترش پیدا کردند و حداکثر بار



شکل ۲۵. الگوی شکست نمونه WS-L1-Steel-Shear
 Fig. 25. The failure mode of the WS-L1-Steel-Shear

جدول ۵. نتایج و مشاهدات اولیه کلیه نمونه‌ها
 Table 5. Results and initial observations of all specimens

Δ_f (mm)	P_f (kN)	Δ_{pmax} (mm)	P_{max} (kN)	Δ_{cr} (mm)	P_{cr} (kN)	نام نمونه‌ها
۸۰	۵۱	۵۸	۶۱	۱/۲	۱۵	WS
۱۰/۷	۳۰/۲	۲/۴	۵۷	۱/۸	۵۵	WS-L1-Steel
۱۲/۹	۶۴	۴	۱۲۱	۱/۷۴	۸۰	WS-L1-Steel-Shear

در حالی است که برای نمونه‌های مقاوم‌سازی شده با ورق‌های پیش ساخته HPFRCC شکست برشی به همراه کاهش ناگهانی سطح بار مشاهده می‌شود. همچنین به دلیل افزایش سختی نمونه‌های مقاوم‌سازی شده با ورق پیش ساخته HPFRCC شیب اولیه منحنی بار-تغییر مکان نسبت به نمونه مرجع افزایش داشته است.

۲-۳- مقایسه نتایج بارگذاری

در این بخش مقادیر اولیه نتایج آزمایش‌ها شامل مقدار بار اولین ترک‌خوردگی (P_{cr})، حداکثر بار قابل تحمل (P_{max}) و بار شکست نهایی (P_f) که در واقع بار در لحظه شکست نهایی نمونه است، در جدول ۵ بیان شده است. همچنین تغییر مکان عمودی وسط دهانه متناظر با هر بار که به ترتیب شامل تغییر مکان ترک‌خوردگی (Δ_{cr})، تغییر مکان حداکثر بار (Δ_{pmax}) و تغییر مکان شکست نهایی نمونه (Δ_f) که از روی داده‌های استخراج شده از تغییر مکان سنج هست، در این جدول ثبت شده است.

دال $WS-L1-Steel-Shear$ ، دال مقاوم‌سازی شده در قسمت کششی با ورق پیش ساخته HPFRCC هست و همچنین با ورق‌های CFRP در سطوح جانبی دال، مقاوم‌سازی شده است. اولین ترک‌خوردگی به صورت ترک خمشی در بار ۸۰ کیلونیوتن و تغییر مکان ۱/۷۴ میلی‌متر، رخ داده است. حداکثر بار تحمل شده توسط این نمونه ۱۲۱ کیلونیوتن و در تغییر مکان ۴ میلی‌متر اتفاق افتاده است. سپس در همین بار ترک به صورت ترک برشی از نقطه بارگذاری تا ورق پیش ساخته ادامه پیدا کرده است. با افزایش بار، عرض ترک‌خوردگی برشی افزایش یافت. شکست نهایی دال با رفتار برشی در بار ۶۴ کیلونیوتن و جابه‌جایی ۱۲/۹ میلی‌متر رخ داده است. شکل ۲۵ مربوط به شکست نهایی دال مقاوم‌سازی شده $WS-L1-Steel-Shear$ هست.

با توجه به شکل ۲۰ که شامل نمودار بار-تغییر مکان عمودی وسط دهانه تمامی دال‌ها هست، می‌توان گفت که شیب منحنی برای نمونه‌ی مرجع بعد از تحمل حداکثر بار، تقریباً مستقیم هست. این

جدول ۶. مقایسه کلی بارها و تغییر مکان نمونه‌های مقاوم‌سازی شده با دال مرجع

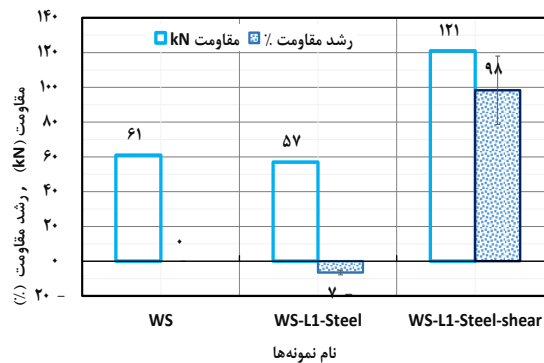
Table 6. General comparison of loads and displacement of strengthened specimens with reference slab

$\frac{\Delta_f}{\Delta_{f-WS}}$	$\frac{P_f}{P_{f-WS}}$	$\frac{\Delta_{pmax}}{\Delta_{pmax-WS}}$	$\frac{P_{max}}{P_{max-WS}}$	$\frac{\Delta_{cr}}{\Delta_{cr-WS}}$	$\frac{P_{cr}}{P_{cr-WS}}$	نام نمونه‌ها
۰/۱۳	۰/۵۹	۰/۰۴	۰/۹۳	۱/۵	۳/۶۶	WS-L1-Steel
۰/۱۶	۱/۲۵	۰/۰۷	۱/۹۸	۱/۴۵	۵/۳۳	WS-L1-Steel-Shear

جدول ۷. مقایسه بارها و تغییر مکان‌های نمونه‌های مقاوم‌سازی شده با یکدیگر

Table 7. Comparison of loads and displacements of strengthened specimens with each other

$\frac{P_f}{P_{f-WSB-L1-Steel}}$	$\frac{P_{max}}{P_{max-WSB-L1-Steel}}$	$\frac{P_{cr}}{P_{cr-WSB-L1-Steel}}$	نام نمونه‌ها
۲/۱۲	۲/۱۲	۱/۴۵	WS-L1-Steel-Shear
$\frac{\Delta_f}{\Delta_{f-WSB-L1-Steel}}$	$\frac{\Delta_{max}}{\Delta_{max-WSB-L1-Steel}}$	$\frac{\Delta_{cr}}{\Delta_{cr-WSB-L1-Steel}}$	نام نمونه‌ها
۱/۲۱	۱/۶۷	۰/۹۶	WS-L1-Steel-Shear



شکل ۲۶. مقاومت و رشد مقاومت نسبت به نمونه مرجع

Fig. 26. Strength and strength growth compared to the reference specimen

مقاومت در تمامی نمونه‌های مقاوم‌سازی شده نسبت به نمونه مرجع شده است. افزودن ورق CFRP جهت تقویت برشی دال‌ها باعث تحمل بیش‌تر مقاومت و مقاومت شکست نهایی شده است. نمودار ستونی مقاومت و رشد مقاومت نسبت به نمونه مرجع در شکل ۲۶ و نمودار ستونی بار شکست و رشد آن نسبت به نمونه مرجع در شکل ۲۷ قابل مشاهده است.

۳-۳- مقایسه کلی بارها و تغییر مکان‌ها

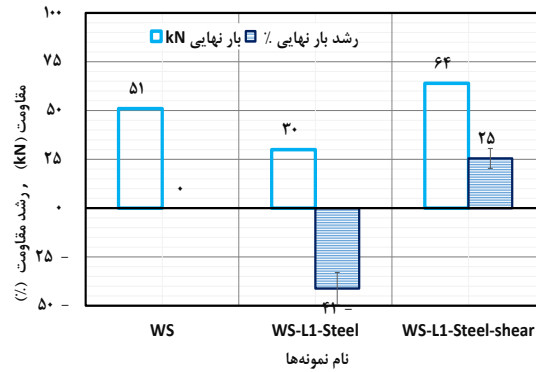
کلیه بارها و تغییر مکان‌های دال‌های مقاوم‌سازی شده در جدول ۶ با نمونه مرجع مقایسه شده است. همچنین در جدول ۷ دو نمونه مقاوم‌سازی شده با یکدیگر مقایسه شده است تا قابلیت مقاوم‌سازی مشخص گردد.

۳-۵- بررسی میزان جذب انرژی

سطح زیر منحنی بار-تغییر مکان تا لحظه شکست نمونه به عنوان شاخص میزان جذب انرژی است که مطابق جدول ۸ هست. ظرفیت

۳-۴- مقایسه مقاومت و بار شکست

مقاومت، به صورت بیش‌ترین باری که توسط نمونه تحمل می‌شود، تعریف می‌گردد. افزودن ورق پیش ساخته HPFRCC باعث افزایش



شکل ۲۷. بار شکست و رشد بار شکست نسبت به نمونه مرجع

Fig. 27. Failure load and failure load growth compared to the reference specimen

جدول ۸. جذب انرژی نمونه‌ها

Table 8. Energy absorption of specimens

$\frac{E}{E_{WS}}$	E (kN mm)	نام نمونه‌ها
۱	۲۷۸۵	WS
۰/۲۲	۶۰۵	WS-L1-Steel
۰/۴۷	۱۳۲۳	WS-L2-Steel-Shear

جدول ۹. سختی اولیه

Table 9. Initial stiffness

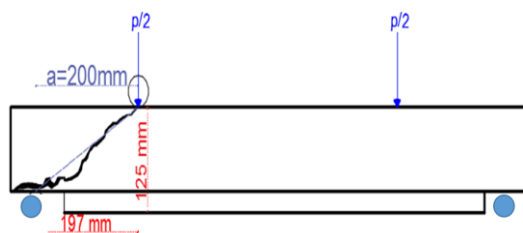
$\frac{S}{S_{WS}}$	$S = \frac{F_{cr}}{\Delta_{cr}}$ (kN/mm)	نام نمونه‌ها
۱	۱۲/۵	WS
۲/۴۵	۳۰/۵۶	WS-L1-Steel
۳/۶۷	۴۵/۹۸	WS-L2-Steel-Shear

تغییرات آن‌ها نسبت به نمونه مرجع در جدول ۸ بیان شده است.

۳-۶- بررسی سختی

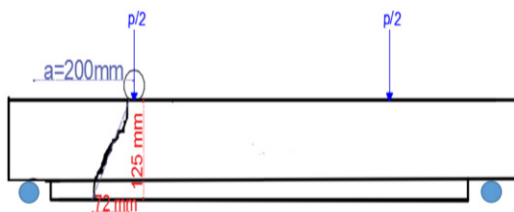
جهت بررسی اثر ورق‌های CFRP، مقادیر سختی اولیه برای نمونه‌های آزمایش شده مؤثر است. سختی اولیه برابر با شیب خطی است که از مبدأ به نقطه اولین ترک خوردگی رسم می‌شود. مقادیر سختی اولیه نمونه‌ها به دلیل متفاوت بودن روش‌های مقاوم‌سازی، متفاوت است. بر اساس نتایج ارائه شده در جدول ۹ کمترین سختی مربوط به دال مرجع است ولی از میان دال‌های مقاوم‌سازی شده،

جذب انرژی نمونه مرجع "WS" ۲۷۸۵ کیلونیوتن میلی‌متر است. با توجه به آن که رفتار نمونه‌های مقاوم‌سازی شده در هنگام شکست نسبت به نمونه مرجع متفاوت و از نوع شکست برشی بوده، بنابراین ظرفیت جذب انرژی نمونه‌های مقاوم‌سازی شده کمتر از نمونه مرجع است. نمونه مقاوم‌سازی شده "Steel-WS-L1" دارای جذب انرژی ۶۰۵ کیلونیوتن میلی‌متر و نمونه "Steel-Shear-WS-L1" دارای جذب انرژی ۱۳۲۳ کیلونیوتن میلی‌متر است که بیان‌گر این است که مقاوم‌سازی برشی دال‌ها باعث تحمل بار بیش‌تر و جذب انرژی بیش‌تر می‌شود. مقدار جذب انرژی در نمونه‌های مقاوم‌سازی شده و نسبت



شکل ۲۸. الگوی ترک برشی نمونه WS-L1-steel

Fig. 28. The shear crack pattern of WS-L1-steel



شکل ۲۹. الگوی ترک برشی نمونه WS-L1-steel-Shear

Fig. 29. The shear crack pattern of WS-L1-steel-Shear

۴- نتیجه گیری

جهت بررسی رفتار دال‌های آسیب‌دیده و مقاوم‌سازی آن‌ها با ورق پیش ساخته کامپوزیت‌های سیمانی توانمند الیافی، سه دال بتن مسلح ضعیف مشابه، از لحاظ ابعاد، سطح مقطع و همچنین آرایش میلگردهای طولی و عرضی در این پژوهش ساخته و جهت ارزیابی ظرفیت خمشی و برشی پس از مقاوم‌سازی مورد آزمایش قرار گرفته است. در نهایت تأثیر مقاوم‌سازی برشی وجوه جانبی دال بر روی ظرفیت خمشی، الگوی شکست، سختی و جذب انرژی به واسطه آزمایش بررسی رفتار برشی نمونه‌ها، مورد مطالعه قرار گرفته است که نتایج به دست آمده از این پژوهش به شرح زیر هست:

- برای دال‌های یک طرفه مقاوم‌سازی شده با ورق پیش ساخته HPFRCC اگر بار به صورت متمرکز به دال اعمال شود به طوری که نسبت دهانه برش به ارتفاع مؤثر (فاصله بالاترین تار تا پایین‌ترین میلگرد کششی) از $2/5$ کمتر باشد، حتی اگر در سطوح جانبی برای افزایش ظرفیت برشی مقطع مقاوم‌سازی شده باشد، مد شکست دال حتماً برشی است.

- در دال‌های مقاوم‌سازی شده با ورق پیش ساخته HPFRCC، اگر ورق پیش ساخته حاوی میلگرد باشد، به دلیل افزایش ارتفاع

کمترین سختی برای نمونه Steel-WS-L^۱ و بیشترین سختی مربوط به دال Steel-Shear-WS-L^۱ هست بنابراین می‌توان گفت مقاوم‌سازی برشی نمونه‌ها باعث افزایش سختی اولیه شده است.

۳-۷- مقایسه الگوی ترک خوردگی

مقایسه الگوی ترک خوردگی به دلیل آن که عملکرد سازه‌های عضو را در مراحل مختلف بارگذاری نشان می‌دهد حائز اهمیت هست. همچنین چگونگی گسترش ترک‌ها و میزان تعمیرات مورد نیاز بعد از خسارت را مشخص می‌کند. در این مرحله الگوی ترک خوردگی هر یک از نمونه‌ها در لحظه شکست نهایی رسم شده است. در تیرها و دال‌های یک طرفه معمولی تحت بار نقطه‌ای، اگر دهانه a بین برش و d ارتفاع مؤثر مقطع باشد و در صورتی که نسبت a/d بین 1 تا $2/5$ باشد، شکست حتماً به صورت شکست برشی خواهد بود [۳۸]. این مسئله در دال‌های مقاوم‌سازی شده نیز بررسی شده است. نسبت دهانه برش به ارتفاع مؤثر دال برای نمونه مرجع $2/63$ و برای نمونه‌های مقاوم‌سازی شده با میلگرد فولادی به دلیل اینکه ارتفاع مؤثر مقطع به جای $7/6$ به $11/5$ افزایش یافته است، نسبت a/d برابر $1/73$ شده است، شکست برشی رخ داده است. از طرفی با مقاوم‌سازی برشی مطابق شکل‌های ۲۸ و ۲۹ زاویه ترک برشی از 32 درجه به 60 درجه تغییر یافت.

- [4] F. du béton, Retrofitting of Concrete Structures by Externally Bonded FRPs, With Emphasis on Seismic Applications: Technical Report, International Federation for Structural Concrete, 2006.
- [5] F. du béton, I.F.S. Concrete, Seismic Assessment and Retrofit of Reinforced Concrete Buildings: State-of-the-art report, International Federation for Structural Concrete (fib), 2003.
- [6] Y. Chen, J. Yu, C.K.Y. Leung, Use of high strength Strain-Hardening Cementitious Composites for flexural repair of concrete structures with significant steel corrosion, *Construction and Building Materials*, 167 (2018) 325-337.
- [7] A. Hemmati, A. Kheyroddin, M. Sharbatdar, PROPOSED EQUATIONS FOR ESTIMATING THE FLEXURAL CHARACTERISTICS OF REINFORCED HPRCC BEAMS, *Iranian Journal of Science and Technology Transactions of Civil Engineering*, 38(C2) (2014) 395-407.
- [8] A. Hemmati, A. Kheyroddin, M.K. Sharbatdar, Plastic Hinge Rotation Capacity of Reinforced HPRCC Beams, *Journal of Structural Engineering*, 141(2) (2015) 04014111.
- [9] A. Hemmati, A. Kheyroddin, M.K. Sharbatdar, Increasing the flexural capacity of RC beams using partially HPRCC layers, *Computers and Concrete*, 16 (2015) 545-568.
- [10] M. Sabbaghian, A. Kheyroddin, Experimental Investigation of the effect of fiber on mechanical properties and the age of high-performance fiber reinforced cement composites, *Concrete Research Magazine*, 12(4) (2019) 53-68. (in persian)
- [11] M. Sabbaghian, A. Kheyroddin, Effect of grading and superplasticizer content on mechanical properties of high-performance fiber reinforced cement composites (HPRCC), in: 11th National Congress on Civil Engineering, Shiraz University, Shiraz, 2019.
- [12] T.H.-K. Kang, W. Kim, L.M. Massone, T.A. Galleguillos, Shear-flexure coupling behavior of steel fiber-reinforced concrete beams, *ACI Structural Journal*, 109(4) (2012) 435-444.
- [13] D. Fanella, A. Naaman, Stress-Strain Properties of Fiber Reinforced Mortar in Compression, *Materials Science*, 82 (1985) 475-483.

مؤثر، احتمال شکست برشی افزایش می‌یابد.

- در صورت افزایش ظرفیت برشی با ورق‌های CFRP در سطوح جانبی دال‌های مقاوم‌سازی شده با ورق پیش ساخته HPRCC با مد شکست برشی، زاویه ترک برشی در این دال نسبت به دال بدون مقاوم‌سازی سطوح جانبی، ۲ برابر شده است و ترک برشی در ورق پیش ساخته نیز ادامه پیدا کرده است.
- جهت جلوگیری از جداشدگی ورق‌های پیش ساخته از قسمت پوشش بتن دال، استفاده از مهارهای مکانیکی در ناحیه اتصال پیشنهاد شده است. از طرفی با توجه به وجود تنش‌های زیاد در دو انتهای آزاد ورق‌های پیش ساخته، استفاده از نوارهای CFRP به صورت U-شکل نیز مطرح شده است.
- مقاوم‌سازی برشی وجوه جانبی دال‌ها، باعث بهبود الگوی شکست، سختی، جذب انرژی به واسطه آزمایش بررسی رفتار برشی نمونه‌ها شده است به طوری که به ترتیب سختی و جذب انرژی نمونه مقاوم‌سازی شده با ورق CFRP، ۱۱۸ و ۵۰ درصد نسبت به نمونه بدون مقاوم‌سازی وجوه جانبی "Steel-WS-L۱" رشد شده است.

تشکر و قدردانی

نویسندگان تشکر صمیمانه خود را به اعضای آزمایشگاه‌های فتاوری بتن، سازه و مواد دانشگاه سمنان به خاطر همکاری‌های لازم در طول مدت انجام پژوهش ابراز می‌کنند.

مراجع

- [1] I. Stratov, C.J. Dale, S.J. Kent, Phenotypic and kinetic analysis of effective simian-human immunodeficiency virus-specific T cell responses in DNA- and fowlpox virus-vaccinated macaques, *Virology*, 337(2) (2005) 222-234.
- [2] O. Buyukozturk, B. Hearing, Failure Behavior of Precracked Concrete Beams Retrofitted with FRP, *Journal of Composites for Construction*, 2(3) (1998) 138-144.
- [3] F. du béton, Externally Bonded FRP Reinforcement for RC Structures: Technical Report on the Design and Use of Externally Bonded Fibre Reinforced Polymer (FRP) Reinforcement for Reinforced Concrete (RC) Structures, International Federation for Structural Concrete, 2001.

- Civil Engineering Journal, 11 (2017) 650–663.
- [24] A. International, ASTM C494 / C494M-04, Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete, in, West Conshohocken,, PA, 2004.
- [25] A.C. Institute, ACI Committe 544: State of the Art Report on fiber reinforced concrete Reported (ACI 544.1R-96 Reapproved 2002), in, ACI Structural Journal, 2002.
- [26] A. International, ASTM C143, Standard test method for slump of hydraulic-cement concrete, in, West Conshohocken,, PA, 2003.
- [27] A. International, ASTM C31 / C31M-00e1, Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field, in, West Conshohocken,, PA, 2000.
- [28] B.S. Institute, BS 1881-108:1983-Testing hardened concrete. Making and curing specimens for strength tests, in, 1983.
- [29] A. International, ASTM C496 / C496M-17, Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimen, in, West Conshohocken,, PA, 2017.
- [30] A.C. Institute, ACI 318-14. Building code requirements for structural concrete and commentary, in, ACI Structural Journal, 2014.
- [31] A.C. Institute, ACI Committee 355. Guide for design of anchorage to concrete: Examples using ACI 318 appendix D, in, ACI Structural Journal, 2014.
- [32] I. 527, Plastics -Determination of tensile properties -Part 1: General principles tensile test methods for plastics, in, MTS Systems Corporation 2012.
- [33] DIN, DIN EN 196-1: Methods of testing cement - Part 1: Determination of strength, in, German Institute for Standardization, 2016.
- [34] A.C. Institute, ACI 440-2R: Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures, in, ACI Structural Journal, 2008.
- [35] H.M. Tanarlan, N. Alver, R. Jahangiri, Ç. Yalçınkaya, H. Yazıcı, Flexural strengthening of RC beams using UHPFRC laminates: Bonding techniques and rebar addition, Construction and Building Materials, 155 (2017) 45-55.
- [14] A.S. Ezeldin, P.N. Balaguru, Normal and High Strength Fiber Reinforced Concrete under Compression, Journal of Materials in Civil Engineering, 4(4) (1992) 415-429.
- [15] D.J. Kim, S.H. Kang, T.-H. Ahn, Mechanical Characterization of High-Performance Steel-Fiber Reinforced Cement Composites with Self-Healing Effect, Materials (Basel), 7(1) (2014) 508-526.
- [16] G. Martinola, A. Meda, G.A. Plizzari, Z. Rinaldi, Strengthening and repair of RC beams with fiber reinforced concrete, Cement and Concrete Composites, 32(9) (2010) 731-739.
- [17] S. Mostosi, R. Paolo, S. Maringoni, M. Alberto, Shear strengthening of RC beams with high performance jacket, in: fib Symposium: Concrete engineering for excellence and efficiency, Prague, 2011.
- [18] H.M. Tanarlan, Flexural strengthening of RC beams with prefabricated ultra high performance fibre reinforced concrete laminates, Engineering Structures, 151 (2017) 337-348.
- [19] M. Sabbaghian, A. Kheyroddin, Flexural strengthening of RC one way slabs with high-performance fiber-reinforced cementitious composite laminates using steel and GFRP bar, Engineering Structures, 221 (2020) 111106.
- [20] K. Daneshvar, M.J. Moradi, M. Amooie, S. Chen, G. Mahdavi, M.A. Hariri-Ardebili, Response of low-percentage FRC slabs under impact loading: Experimental, numerical, and soft computing methods, Structures, 27 (2020) 975-988.
- [21] M. Sabbaghian, Experimental strengthening of weak one-way RC slabs with precast high performance fiber reinforced cement composite laminates with GFRP bars, Semnan University, Semnan, 2019.
- [22] A. Nouri, M.H. Saghafi, A. Golafshar, Evaluation of beam-column joints made of HPFRCC composites to reduce transverse reinforcements, Engineering Structures, 201 (2019) 109826.
- [23] M. Ali Abbaszadeh Mashhad, M.K. Sharbatdar, A. kheyroddin, Performance of Two-way RC slabs Retrofitted by Different Configurations of High Performance Fibre Reinforced Cementitious Composite Strips, The Open

- third-point loading), in, West Conshohocken, PA, 2002.
- [38] D. Mostofinejad, Reinforced Concrete Structures, 2 ed., Arkan Danesh, Isfahan, 2013.
- [36] DIN, DIN 53 455: Testing of plastics; Tensile test, in, German Institute for Standardization, 1981.
- [37] A. International, ASTM, C 78-02. Standard test method for flexural strength of concrete (Using simple beam with

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

Sabbaghian M., Kheyroddin A., *Experimental investigation of shear behavior of one-way reinforced slabs with high-performance fiber-reinforced cementitious composite laminates*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 53(10) (2022) 4183-4204.

DOI: [10.22060/ceej.2020.18138.6778](https://doi.org/10.22060/ceej.2020.18138.6778)

