

Experimental study of high-performance fiber reinforced cementitious composite (HPFRCC) precast laminates for flexural strengthening of reinforced concrete beams

Reza Khaleghi¹, Ahmad Shokoohfar^{2*}, Reza Farokhzad³, Mehrzad TahamouliRoudsari⁴

1- PhD student, Department of Civil Engineering, Qazvin, Islamic Azad University, Qazvin, Iran

2- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Qazvin Branch, Islamic Azad University, Qazvin, Iran

3- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Qazvin Branch, Islamic Azad University, Qazvin, Iran

4- Associate Professor, Department of Civil Engineering, Kermanshah Branch, Islamic Azad University, Kermanshah, Iran

ABSTRACT

One of the common techniques for enhancing the strength of existing reinforced concrete bridge beams involves adding reinforcing elements to the lower section of the beam. In the recent years, the reinforcement of concrete bridge beams is developing with the installation of precast high performance fiber reinforced cement composites, in addition to Fiber-Reinforced Polymer (FRP) sheets or strips and placed rebars near the surface. This study explores both the mechanical properties of composite cement laminates and how the presence of polymer rebars impacts these laminates. To create specimens, a total of 45 mixing designs were utilized, incorporating fibers and consumable materials. For comparison purposes, the specimens underwent various tests including four-point bending test with dimensions measuring 25×125×500 and 25×125×1700 mm, three-point bending test with dimensions measuring 40×40×160 mm, direct tension test on 8 shaped briquettes and compressive strength tests on cubic shapes measuring 40 mm. The results indicated good compliance with both direct tension and bending tests. After evaluation, the most suitable design was determined to consist of 1.8% micro steel fibers, 0.5% polyvinyl alcohol fibers, 42 kilograms of quartz powder, 28.6 kilograms calcium carbonate particles and 482 kilograms of silica fume slurry, per cubic meter of mortar. To analyze the chosen specimen, we conducted direct tension test on dogbone-shaped specimen and compressive strength test on cubic specimen measuring 100 millimeters. Adding quartz powder has a positive impact on enhancing the energy absorption capability of the laminate specimens. The use of two polymer rebars with a diameter of 8 millimeters lead to 2.3 times increase in the flexural stress tolerance. No significant difference was observed between the flexural behavior of the precast laminate under cyclic loading and the monotonic loading.

ARTICLE INFO

Receive Date: 18 November 2023

Revise Date: 21 January 2024

Accept Date: 16 March 2024

Keywords:

HPFRCC

precasted laminate

GFRP rebar

stress-displacement curve

strain hardening

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2024.424606.3268>

*Corresponding author: Ahmad Shokoohfar

Email address: a.shokoohfar@aut.ac.ir

مطالعه آزمایشگاهی ورقه‌های پیش‌ساخته‌ی کامپوزیت سیمانی الیافی توانمند برای تقویت خمشی تیرهای بتن مسلح

رضا خالقی^۱، احمد شکوه‌فر^{۲*}، رضا فرخ‌زاد^۳، مهرزاد تحملی‌رودسری^۴

- ۱- دانشجوی دکتری، گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران
 ۲- استادیار گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران
 ۳- استادیار گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران
 ۴- دانشیار گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران

چکیده

از روش‌های پرکاربرد تقویت خمشی تیرهای بتن مسلح پل‌های موجود، استفاده از نصب الیاف تقویت کننده در قسمت زیرین تیر می‌باشد. در سال‌های اخیر علاوه بر استفاده از ورقه یا نوارهای پلیمری تقویت شده با الیاف و کاشت میلگرد در نزدیک سطح، تقویت تیر پل‌های بتنی با نصب ورقه‌های پیش‌ساخته‌ی کامپوزیت سیمانی الیافی توانمند در حال توسعه است. در تحقیق جاری علاوه بر بررسی مشخصات مکانیکی ورقه‌های کامپوزیت سیمانی، به تاثیر حضور میلگرد پلیمری در این ورقه‌ها نیز پرداخته شده است. ۴۵ طرح اختلاط با تنوع در الیاف و مصالح مصرفی برای ساخت نمونه‌ها استفاده شد. برای مقایسه‌ی نتایج از آزمایش خمش چهار نقطه‌ای نمونه‌ها با ابعاد $500 \times 125 \times 25$ و $1700 \times 125 \times 25$ میلی‌متر، آزمایش خمش سه نقطه‌ای نمونه‌ها با ابعاد $1600 \times 400 \times 40$ میلی‌متر، آزمایش کشش مستقیم نمونه بریکت ۸ شکل و آزمایش مقاومت فشاری نمونه مکعبی با ابعاد $400 \times 400 \times 40$ میلی‌متر استفاده شد. نتایج آزمایش کشش مستقیم نمونه‌های بریکت ۸ شکل و آزمایش‌های مقاومت خمشی نمونه‌ها با ابعاد $500 \times 125 \times 25$ و $1600 \times 400 \times 40$ میلی‌متر به‌عنوان یک نوع آزمایش کشش غیرمستقیم، انطباق مناسبی دارند. در ادامه، مناسب‌ترین طرح انتخاب شد که شامل $1/8$ درصد الیاف فولادی میکرو، $0/5$ درصد الیاف پلی‌وینیل‌الکل، 42 کیلوگرم پودر کوارتز، $28/6$ کیلوگرم ذرات کربنات کلسیم و 482 کیلوگرم دوغاب سیلیکا فیوم برای ساخت یک مترمکعب ملات است. برای نمونه‌ی منتخب، آزمایش کشش مستقیم نمونه دمبل‌ی شکل و آزمایش مقاومت فشاری نمونه مکعبی با ابعاد 100 میلی‌متر انجام شد. افزودن پودر کوارتز در افزایش ظرفیت جذب انرژی نمونه‌های ورقه‌ای اثر مطلوبی دارد. استفاده از دو عدد میلگرد پلیمری با قطر 8 میلی‌متر، میزان تحمل تنش خمشی را $2/3$ برابر افزایش داد. رفتار خمشی ورقه‌ی پیش‌ساخته تحت بارگذاری چرخه‌ای تفاوت چندانی نسبت به بارگذاری یکنواخت نشان نداد.

کلمات کلیدی: کامپوزیت سیمانی توانمند مسلح شده به الیاف، ورقه‌ی پیش‌ساخته، میلگرد پلیمری تقویت شده با الیاف شیشه، منحنی تنش-تغییر مکان، سخت‌شدگی کرنش.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://doi.org/10.22065/jsce.2024.424606.3268	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2024.424606.3268	۱۴۰۳/۰۹/۳۰	۱۴۰۲/۱۲/۲۶	۱۴۰۲/۱۲/۲۶	۱۴۰۲/۱۱/۰۱	۱۴۰۲/۰۸/۲۷
			*نویسنده مسئول: احمد شکوه‌فر ahmad.shokoohfar@qiau.ac.ir		پست الکترونیکی:	

۱- مقدمه

پل، سازه‌ای است که برای حمل ترافیک جاده یا سایر بارهای متحرک به منظور عبور از مانع یا سازه‌های دیگر ساخته می‌شود. پل‌ها سازه‌های مهمی در سیستم‌های حمل و نقل بزرگراهی و راه‌آهن مدرن هستند [۱]. بتن یکی از مصالح ساختمانی ابتدایی در مهندسی عمران مدرن است. دارای مقاومت فشاری کمابیش بالایی است و ساخت آن با دردسترس بودن گسترده مواد خام، راحت است. با این وجود، بتن معمولی ماده‌ای شبه‌شکننده با مقاومت کششی و ظرفیت کرنش کششی پایین است که منجر به ایجاد ترک‌های نامطلوب می‌شود. عواملی مانند یخ‌زدگی، ذوب و انقباض نیز بر دوام بتن معمولی تأثیر می‌گذارد و کاربردهای مهندسی آن را محدود می‌کند [۲]. تقریباً از ۳۵۰۰ سال پیش، مصالح ساختمانی ترد، به‌عنوان مثال آجرهای سفالی پخته‌شده توسط آفتاب توسط موی اسب، کاه و سایر الیاف گیاهی تقویت شدند [۳].

پل تیری به پلی گفته می‌شود که از تیرها به عنوان وسیله‌ای برای نگه‌داشتن عرشه خود استفاده می‌کند. پل‌های بتنی که به صورت تیری احداث می‌شوند رایج‌ترین، ارزان‌ترین و ساده‌ترین فرم‌های سازه‌ای هستند که بین تکیه‌گاه‌ها یا پایه‌ها قرار می‌گیرند. پل‌ها به دلایل مختلفی همچون قرار گرفتن در شرایط نامناسب و تغییر کاربری نیاز به تقویت دارند که در این راستا تقویت خمشی تیر این پل‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است [۱]. بتن الیافی، اثربخشی خود را در افزایش سختی شکست و شکل‌پذیری بتن نشان داده است. در دهه‌های اخیر، توسعه کامپوزیت سیمانی الیافی توانمند با رفتار سخت‌شدگی کششی همراه با ترک‌خوردگی متعدد و ظرفیت جذب انرژی بالا، یک حوزه تحقیقاتی متمرکز بوده و توجه گسترده‌ای را از سوی محققان در سراسر کشورها به خود جلب نموده است. مقاومت پس از ترک HPFRCC^۱ از اولین مقاومت ترک‌خوردگی آن بیشتر است [۲]. در صورت بروز رفتار نرم‌شدگی کرنش پس از ایجاد اولین ترک، کامپوزیت در دسته FRCC^۲ قرار می‌گیرد [۴]. یکی از راه‌های تقویت خمشی تیر پل‌های بتنی، نصب ورقه‌های ملات پیش‌ساخته‌ی کامپوزیت سیمانی الیافی توانمند (PML-HPFRCC)^۳ با یا بدون میلگردهای GFRP^۴ در سطح زیرین تیرها است.

نتایج بررسی سایر محققین در مورد کامپوزیت پایه سیمانی الیافی [۳ و ۴]، دوغاب سیلیکا فیوم [۵]، کرنات کلسیم [۶-۸]، اثر سیلیکا فیوم و کرنات کلسیم [۹]، ماسه [۱۰]، پودر کوارتز [۱۱]، الیاف میکرو [۱۲]، الیاف فولادی ماکرو [۱۳]، اثر لرزاندن بر الیاف فولادی ماکرو [۱۴]، بیرون کشیدن الیاف از کامپوزیت سیمانی [۱۵]، ترکیب الیاف فولادی ماکرو و میکرو [۱۶]، ترکیب الیاف فولادی و پلی‌وینیل-الکل [۱۷-۱۹]، الیاف پلی‌وینیل‌الکل [۲۰]، الیاف پلی‌وینیل‌الکل با طول‌های مختلف [۲۱]، الیاف پلی‌پروپیلن [۲۲]، ترکیب الیاف پلی‌وینیل-الکل و پلی‌پروپیلن [۲۳]، پلی‌اتیلن‌ترافتالات [۲۴]، الیاف ترکیبی [۲۵]، کامپوزیت سیمانی بسیار شکل‌پذیر [۲۶]، سرباره کوره آهن‌گدازی GGBFS^۵ [۲۷]، کاشت میلگرد GFRP در نزدیک سطح [۲۸] و ورقه کامپوزیت سیمانی الیافی [۲۹ و ۳۰] در تحقیق حاضر مورد توجه قرار گرفته است.

مهدیه صباغیان و علی خیرالدین در سال ۱۳۹۸ نسبت به بررسی آزمایشگاهی اثر الیاف بر مشخصات مکانیکی و سن کامپوزیت-های سیمانی توانمند الیافی اقدام نمودند که در مرجع [۳۱] آمده است. ۶۰ نمونه را در سه حالت بدون الیاف، با یک و دو درصد الیاف در سنین مختلف مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج حاکی از آن بود که با افزایش سن نمونه‌ها در هر ۳ حالت، مقاومت کششی و فشاری افزایش داشته است. الگوی شکست نمونه‌ها با افزودن الیاف از حالت ترک‌های عمیق و تکه‌تکه شدن نمونه به ریزترک‌های سطحی بهبود یافته، و ظرفیت جذب انرژی به ترتیب برای ۱ و ۲ درصد الیاف، ۲۴ و ۵۲ درصد افزایش داده است. مرتضی فخاری فر و همکاران در سال ۲۰۱۴ مطالعات تجربی گسترده‌ای بر روی HPFRCC انجام دادند. نتایج آنها نشان داد که نمونه‌ها با درصد بالاتری از الیاف، دارای مقادیر بیشتری برای خواص مکانیکی و مقاومت ضربه‌ای HPFRCC هستند [۳۲]. ابراهیم حسامی و همکاران در سال ۱۳۹۷ خواص مکانیکی بتن فوق-توانمند غیر مسلح و مسلح‌شده به الیاف فولادی، پلی‌پروپیلن و پلی‌وینیل‌الکل را بررسی نمودند که در مرجع [۳۳] آمده است. نتایج این

¹ high performance fiber reinforced cementitious composite

² Fiber reinforced cement composites

³ Prefabricated Mortar Laminate – high performance fiber reinforced cementitious composite

⁴ Glass fiber reinforced polymer

⁵ Ground granulated blast-furnace slag

مطالعه آزمایشگاهی نشان می‌دهد که نمونه‌های حاوی ۲ درصد الیاف بهترین عملکرد مکانیکی را داشته است. در سه مرجع [۳۱-۳۳] نتایج آزمایش کشش مستقیم برای بررسی رفتار کششی کامپوزیت سیمانی وجود ندارد.

سان کوانشنگ و ژانگ ککسین در سال ۲۰۱۶ قسمت زیرین تیر T شکل پل بتنی یون‌لینگ در هاربین کشور چین را توسط یک لایه ملات کامپوزیت سیمانی با ضخامت ۶۰ میلی‌متر تقویت کردند [۳۴]. علیرضا بی‌طرف، علی خیرالدین و محمدکاظم شربتدار در سال ۱۴۰۰ در مورد مقاوم‌سازی خمشی تیرهای سراسری بتن‌آرمه با ورقه‌ی پیش‌ساخته‌ی کامپوزیت الیافی توانمند مطالعات آزمایشگاهی انجام دادند که در مرجع [۳۵] آمده است. نتایج این بررسی تایید کرد که استفاده از ورقه‌های پیش‌ساخته‌ی کامپوزیتی در بهبود رفتار خمشی تیرهای سراسری بتن‌آرمه موثر است. همچنین کاشت میلگرد فولادی در ورقه، علاوه بر افزایش ظرفیت باربری، مانع از کاهش قابل توجه شکل‌پذیری در نمونه تقویت شده، می‌شود. علی همتی و سمیرا عزالدین در سال ۱۳۹۸ رفتار تیر بتن مسلح مقاوم‌سازی شده با مصالح HPRCC را بررسی نمودند؛ مرجع [۳۶]. نتایج تحقیقات آنها نشان داد که در تیرهای بتنی، تیرهای ترکیبی دارای لایه‌ی HPRCC بیشتر از ۲۰ میلی‌متر و تیرهای HPRCC کامل، اولین ترک‌های کششی در پایین‌ترین وجه تیر تشکیل می‌شوند اما در تیر ترکیبی دارای لایه تحتانی HPRCC به ضخامت ۲۰ میلی‌متر، اولین ترک‌های کششی در بتن بالای لایه تقویتی رخ می‌دهد. رامین احسانی، محمدکاظم شربتدار و علی خیرالدین در سال ۲۰۲۲ تیر سراسری دودهانه را توسط HPRCC و میلگرد فولادی بصورت درجا تقویت کردند که در مرجع [۳۷] قابل مشاهده است. با توجه به اینکه هدف نهایی در چهار مرجع [۳۴-۳۷] افزودن لایه یا ورقه کامپوزیت سیمانی به تیر بتن مسلح برای مقاوم‌سازی است اما رفتار خمشی ورقه‌های ملات کامپوزیت به تنهایی و قبل از نصب بر روی تیر، بررسی نشده است.

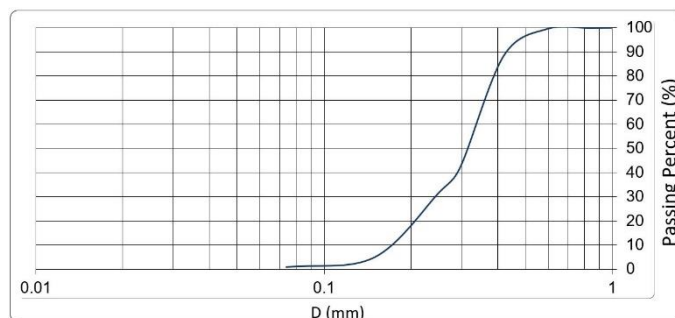
نوع، درصد و ترکیب الیاف بر خواص مکانیکی کامپوزیت سیمانی موثر است. همچنین، ماده افزودنی می‌تواند خواص مکانیکی کامپوزیت سیمانی الیافی را تغییر دهد. با مطالعه‌ی تحقیقات انجام شده‌ی پیشین، مشخص شد که بررسی جامعی برای مقایسه اثر الیاف مختلف و ترکیب مصالح گوناگون بر رفتار خمشی PML-HPRCC با و بدون میلگردهای GFRP وجود ندارد. در تحقیق حاضر، برای بررسی اثر الیاف مختلف و مواد افزودنی بر خواص مکانیکی کامپوزیت سیمانی الیافی، ۴۵ طرح اختلاط بررسی شده است. در ابتدا انتخاب هر طرح اختلاط بر اساس مطالعات سایر محققین انجام شد، به عنوان نمونه اضافه کردن ۱ درصد پودر کربنات کلسیم بصورت یکسان با استناد به مراجع [۷ و ۸] است. سپس، بر اساس نتایج آزمایش‌های انجام شده، طرح‌های اختلاط پیشنهادی ارائه و بررسی شد. برای هر طرح اختلاط یک نمونه با ابعاد $25 \times 125 \times 50$ میلی‌متر ساخته و آزمایش خمش چهارنقطه‌ای بر روی آنها انجام شد. آزمایش خمش چهارنقطه‌ای یک نوع آزمایش کشش غیرمستقیم است و مساحت زیر نمودار تنش خمشی-تغییر مکان در این آزمایش بیانگر ظرفیت جذب انرژی نمونه است. رفتار خمشی نمونه‌های ورقه‌ای مسلح به میلگرد GFRP نیز بررسی شد. برای مقایسه‌ی اثر دو نوع الیاف فولادی ماکرو و میکرو در کامپوزیت سیمانی، سه نمونه با ابعاد $25 \times 125 \times 170$ میلی‌متر مسلح به میلگردهای GFRP تحت آزمایش خمش چهارنقطه‌ای قرار گرفتند. در ادامه‌ی مطالعه، نمونه‌های با ظرفیت جذب انرژی پایین و دارای مشکلات ساخت از جریان مطالعه حذف شدند. بررسی نمونه‌های مناسب، با انجام آزمایش خمش سه نقطه‌ای نمونه‌ها با ابعاد $40 \times 40 \times 160$ میلی‌متر، آزمایش مقاومت فشاری بر روی نمونه‌های مکعبی با ابعاد ۴۰ میلی‌متر و آزمایش کشش مستقیم بریکت ۸ شکل ادامه یافت. در پایان، مناسب‌ترین طرح اختلاط برای ساخت PML-HPRCC معرفی و به منظور بررسی دقیق‌تر خواص مکانیکی آن، سه نمونه دمبلی شکل برای آزمایش کشش مستقیم و پنج نمونه مکعبی با ابعاد ۱۰۰ میلی‌متر برای آزمایش فشار، بررسی شد. ترسیم منحنی تنش-کرنش آزمونه‌های کشش مستقیم دمبلی شکل برای مناسب‌ترین طرح مورد تاکید است.

۲- طرح اختلاط و ساخت نمونه‌ها

در ساخت HPRCC از سیمان پرتلند نوع ۱ با مقاومت فشاری حداقل ۴۲۵ کیلوگرم بر سانتیمترمربع کارخانه سیمان غرب کرمانشاه با نرمی بلین $3250 \text{ cm}^2/\text{gr}$ استفاده شده است. دوغاب سلیکا فیوم ساخت شرکت شیمیایی بتن پاس^۶ است و استفاده از آن باعث افزایش مقاومت فشاری، نفوذ ناپذیری بتن در برابر یون کلر و سولفات، آب‌بند کردن بتن، افزایش دوام، افزایش مقاومت در برابر سیکل‌های یخبندان و افزایش تراکم بتن می‌شود. استفاده از سلیکا فیوم بصورت دوغاب مزایایی دارد که عبارتند از عدم آسیب‌رسانی به محیط زیست،

⁶ BETON PAS CHEMICAL COMPANY

توانایی پخش شدگی بیشتر، امکان استفاده از روان کننده مناسب به میزان دلخواه، عدم وجود روان کننده در دوغاب و کاهش زمان اختلاط بتن نسبت به پودر میکروسیلیس. حالت فیزیکی مایع غلیظ و رنگ خاکستری با چگالی 1.35 gr/cm^3 دارد. چگالی پودر خشک شده 2.2 gr/cm^3 و اندازه دانه‌ها بین 0.05 الی 0.15 میکرون است. شکل ذرات بصورت کروی و غیر کریستاله (آمورف) می‌باشد. GGBFS استفاده شده رنگ تیره، چگالی 1.2 gr/cm^3 و سطح مخصوص 425 تا 470 مترمربع بر کیلوگرم دارد و از کارخانه ذوب آهن بیستون تهیه شده است. کربنات کلسیم (CaCO_3) با چگالی 2.86 gr/cm^3 به کارگیری شد. پودر کوارتز میکرونیزه فوق ممتاز معادن شهر همدان با نام صنعتی پودر سیلیس استفاده شد؛ نام دیگر آن سیلیسیم دی اکسید است. ماسه شماره ۱۶۱ فیروزکوه با منحنی دانه‌بندی شکل ۱ بکار گرفته شد. همچنین ترکیبات شیمیایی سیمان، سیلیکا فیوم بصورت خشک شده، کربنات کلسیم، پودر کوارتز و ماسه در جدول ۱ ارائه شده است.



شکل ۱: منحنی دانه‌بندی ماسه ۱۶۱ فیروزکوه.

جدول ۱: ترکیب شیمیایی مواد (درصد وزنی).

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	C	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	CaO	SO ₃	TiO ₂	L.O.I	ماده شیمیایی
20.50	5.4	4.3	-	-	-	2.3	63.4	2.1	-	-	سیمان
90-95	0.3-1.2	1.2-1.8	0.8-2	0.3-0.6	0.4-0.8	0.6-1.2	0.5-1	-	-	1.5-2.5	سیلیکا فیوم
0.14	-	0.02	-	0.08	0.01	-	55.85	-	0.005	43.66	کربنات کلسیم
99.5	0.006	0.015	-	0.03	0.001	0.01	0.13	0.03	0.002	0.007	پودر کوارتز
97.5	0.95	0.85	-	-	0.19	0.24	0.27	-	-	-	ماسه

ابروان کننده بتن کوانتوم محصول صنایع شیمی ساختمان رامکا^۷ دارای قدرت کاهندگی آب و افزایش روانی بسیار بالا با چگالی 1.08 gr/cm^3 مورد استفاده قرار گرفت. در مواردی ملات تعمیری پایه سیمانی بدون انقباض و مسلح به الیاف شرکت شیمیایی بتن پاس با نام تجاری R-S45^۸ جهت ساخت ورقه‌های پیش ساخته استفاده شد که پودر خاکستری با چگالی 1.95 gr/cm^3 می‌باشد. مقاومت فشاری ۲۸ روزهی 60 MPa و چسبندگی بیش از $1/8$ نیوتن بر میلی مترمربع دارد. در جدول ۲ و شکل ۲ مشخصات الیاف استفاده شده، آمده است.

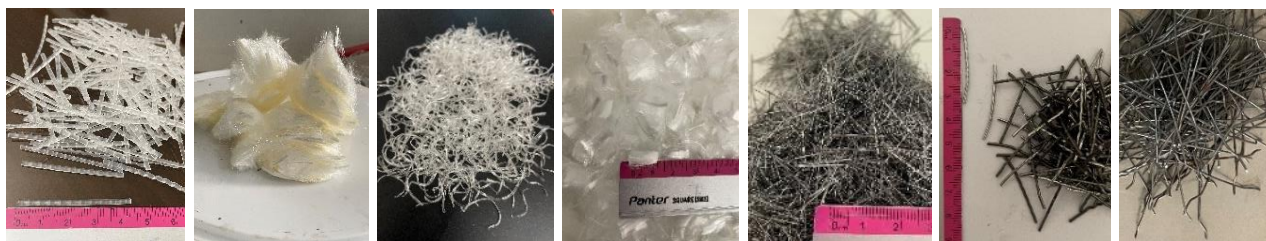
جدول ۲: مشخصات الیاف.

الیاف	نام اختصاری	مقاومت کششی (MPa)	مدول الاستیک (GPa)	چگالی (gr/cm^3)	طول (mm)	قطر (mm)
فولادی ماکرو دو انتها قلاب	MSH	1120	200	7.85	50	0.7
فولادی ماکرو موجدار	MSC	1500	200	7.86	32	1.2
فولادی میکرو	mS	2720	210	7.85	16	0.25
پلی پروپیلن	PP	400	3.5	0.91	12	0.038
پلی اتیلن ترفتالات بازیافتی	PET	260	-	1.19	10-15	1-1.5
پلی وینیل الکل	PVA	1250	33	1.18	12	0.015
ماکرو سنتتیک پلیمری	MSP	480	3.6	0.8	30	3

⁷ شرکت پارسین بتن سازه آپریک با نام تجاری رامکا

⁸ Repair S45

طرح‌های اختلاط کامپوزیت سیمانی الیافی توانمند در جدول ۳ ارائه شده است. در نام‌گذاری ترکیبات، برای الیاف از درصد استفاده شد که معادل وزنی آن در ردیف مربوطه آمده است.



ماکروسنتتیک پلیمری پلی‌وینیل‌الکل پلی‌اتیلن ترفتالات پلی پروپیلن فولادی میکرو فولادی موجدار فولادی ماکرو

شکل ۲: الیاف مورد استفاده.

جدول ۳: طرح‌های اختلاط (کیلوگرم بر مترمکعب).

Mixture series	PC	SF*	CaCo3	QP	S	W	SP	Fiber								
								MSH	MSC	mS	PP	PET	PVA	MSP		
RMS45-SF0-SP0-F0	***					390										
RMS45-SF0-SP22.5-F0	***					350	22.46									
SFPW0.27-SP27-F0	1050	94.5			926.8	352.5	27									
SFPW0.45-SP27-F0	1050	155			926.8	345	27									
SF0-SP12.2-F0	723				1220	246	12.15									
SFPW0.54-SP27-F0	1050	175			926.8	325	27									
SFPW0.41-GGBS-F0	1050	132			926.8	243	27									
SFPW0.54-SP40-F0	900	175			1020	325	40									
SFPW1.05-QP-F0	1034	252.65		183	730	239.85	44									
SFPW0.28-MSH1.9	1011	90.9			892	321.4	50.5	150								
SFPW1.2-MSH1.2	900	218			1066	181	22.9	92								
SFPW0.54-MSH2D	1034	172.4			913	320.1	18	157								
SFPW0.54-MSH1.5D-mS0.5**	1034	172.4			913	320.1	18	117.75			39.25					
SFPW1.05-QP-mS1.5-MSH0.5	1034	252.65		42	871	239.85	36	39.25			117.75					
SFPW1.05-QP-mS1.5-MSH1	1034	252.65		42	871	239.85	32	78.5			117.75					
SFPW1.05-QP-mS1-MSH1.5	1034	252.65		42	871	239.85	32	117.75			78.5					
SFPW1.1-CC-mS1.5-MSH1	1005	253	28.6		913	229	22	78.5			117.75					
SFPW1.1-CC-QP-mS1.5-MSH1	1005	253	28.6	42	871	229	27	78.5			117.75					
SFPW0.54-MSH1.5D-PP0.5**	1034	172.4			913	320.1	18	117.75				4.55				
SFPW0.94-CC-MSH1.8-PP0.2	1034	238.9	28.6		913	253.6	22	141.3				1.82				
SFPW0.54-MSH1.5D-PVA0.5**	1034	172.4			913	320.1	18	117.75							5.9	
SFPW1.1-CC-MFH1.8-PVA0.2	1005	253	28.6		913	229	22	141.3							2.36	
SFPW1.1-CC-QP-MSH1.8-PVA0.2	1005	253	28.6	42	871	229	27	141.3							2.36	
SFPW1.1-CC-QP-MSC1.8-PVA0.2	1005	253	28.6	42	871	229	27	141.3							2.36	
SFPW1.05-mS0.5-MSH1.5-PVA0.5	1034	252.65		42	871	239.85	32	117.75			39.3				5.9	
SFPW1-QP-mS1.5-MSC1	1034	245.8		53	860	246.7	40		78.5		117.75					
SFPW1.1-CC-QP mS1.5-MSC1	1005	253	28.6	42	871	229	27		78.5		117.75					
RMS45-SF0-mS1	***					390	25				78.5					
SFPW0.45-mS2	1034	152.7			913	339.8	26.6				157					
SFPW1.05-QP-mS2	1034	252.65		150	763	239.85	47				157					
SFPW1.05-QP-mS1.5-PP0.5	1034	252.65		140	773	239.85	47				117.75	4.55				
SFPW1-QP-mS1.5-PVA0.5	1034	245.8		103	810	246.7	44				117.75				5.9	
SFPW1.05-QP-mS1.5-PVA0.5	1034	252.65		42	871	239.85	36				117.75				5.9	
SFPW1.1-CC-mS1.5-PVA0.5	1005	253	28.6		913	229	22				117.75				5.9	
SFPW1.1-CC-QP-mS1.5-PVA0.5	1005	253	28.6	42	871	229	27				117.75				5.9	
SFPW1.1-CC-QP-mS1.8-PVA0.5	1005	253	28.6	42	871	229	30				141.3				5.9	
SFPW0.54-mS0.5-PP1-PVA0.5	1050	175			926.8	325	27				39.25	9.1			5.9	
SFPW1.05-mS0.5-MSP1-PVA0.5	1034	252.65		42	871	239.85	36				39.3		5.9		8	
SF0-PP1.5	600				1200	270	11.2				13.65					
SFPW0.54-PP2	1050	175			926.8	325	27				18.2					
SFPW0.54-PP2-PVA1	1050	175			926.8	325	27				18.2				11.8	
SFPW0.54-PP1.5-PVA0.5	1050	175			926.8	325	27				13.65				5.9	
SFPW0.72-PVA2	1034	150			913	207	45								23.6	
SFPW1.05-QP-MSP1-PVA1	1034	252.65		42	871	239.85	36								11.8	8
SFPW1.05-QP-MSP2	1034	252.65		42	871	239.85	40									16

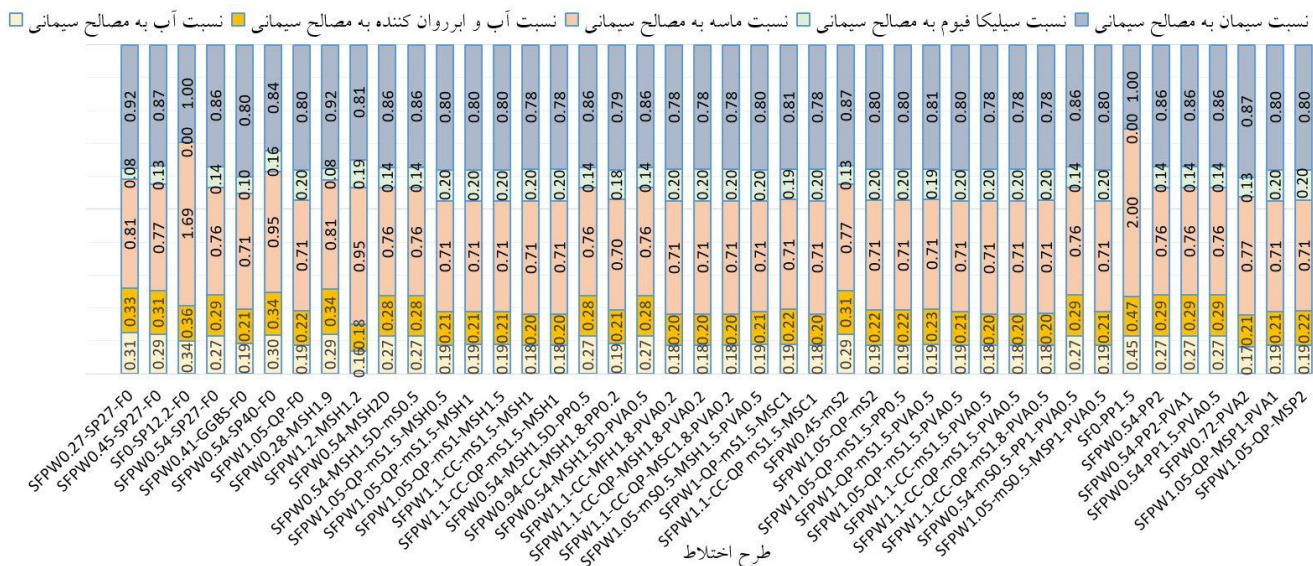
PC: سیمان پرتلند، SF: سیلیکا فیوم، QP: پودر کوارتز، S: ماسه، W: آب، SP: ابرروان‌کننده، SFPW: نسبت سیلیکا فیوم خشک به آب در دوغاب سیلیکا فیوم.

SF* بیانگر میزان سیلیکا فیوم خشک موجود در دوغاب سیلیکا فیوم است. میزان آب موجود در دوغاب در ستون W آمده است.

** حرف D (Down) بیانگر قرارگیری کنترل شده الیاف در نیمه پایینی نمونه است. در این حالت، درصد الیاف مصرفی برای قسمت کششی کامپوزیت دو برابر است.

*** در سه مورد مشخص شده، میزان ملات تعمیری R-S45 برابر ۱۹۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب است. فقط از یک نوع سیمان در طرح‌های اختلاط استفاده شده است. همچنین میزان مصرف کربنات کلسیم در طرح‌های مربوطه ثابت است.

به دلیل طولانی شدن بیش از حد نام طرح‌های اختلاط دارای پودر کوارتز و کربنات کلسیم، از درج مقدار آنها صرف نظر شد؛ برای اطلاع از مقادیر به جدول ۳ مراجعه شود. در شکل ۳ نسبت مصالح مصرفی آمده است. در مورد ملات تعمیری R-S45 هیچ‌گونه اطلاعاتی در مورد مصالح تشکیل دهنده آن یافت نشد؛ بنابراین طرح اختلاط دارای ملات تعمیری در شکل ۳ درج نشد. مصالح سیمانی شامل سیمان، سیلیکا فیوم، سرباره کوره آهن‌گدازی شده زمین‌ی و کربنات کلسیم است. وزن پودر کوارتز در محاسبه وزن ماسه در نظر گرفته شد.



شکل ۳: نسبت مصالح استفاده شده در تحقیق.

ساخت نمونه‌های خمشی، فشاری و کششی ۸ شکل توسط قالب فلزی و ساخت نمونه‌های خمشی ورقه‌ای با طول ۵۰۰ و ۱۷۰۰ میلی‌متر توسط قالب ساخته شده از ورق ام‌دی‌اف انجام شد. انواع قالب‌های به کارگیری شده در شکل ۴ به ترتیب معرفی شده‌اند.



شکل ۴: انواع قالب مورد استفاده.

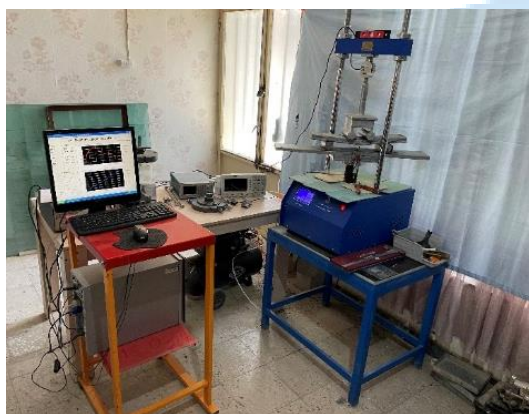
قبل از ریختن ملات در قالب، ابتدا قالب به روغن آغشته شده تا نمونه به راحتی از قالب خارج شود و آسیب نبیند. در هیچ‌یک از طرح‌های اختلاط از لرزاننده استفاده نشده است و تنها با تکان‌های ایجاد شده در قالب بصورت دستی، تراکم مناسب حاصل شد. نمونه‌ها بعد از ۲۴ ساعت از قالب خارج شده و پس از شماره‌گذاری به مدت ۲۷ روز در حوضچه آب با دمای ۲۱ تا ۲۵ درجه سانتی‌گراد عمل‌آوری شدند. با بررسی مراجع [۲۲ و ۲۳ و ۳۸-۴۰] مشخص شد که استاندارد مشخصی جهت مخلوط کردن مصالح کامپوزیت سیمانی وجود ندارد. بنابراین، الگوی مخلوط کردن مصالح بصورت تجربی به دست آمد. ابتدا ماسه، دوغاب سیلیکا فیوم و ابروان‌کننده به مدت یک دقیقه با سرعت پایین و یک دقیقه با سرعت بالا مخلوط شد، سپس الیاف غیر فولادی به مخلوط اضافه شده و به مدت دو دقیقه با سرعت پایین مخلوط شد. پس از اضافه کردن سیمان، مخلوط کردن با سرعت پایین به مدت دو دقیقه ادامه یافت. جهت مخلوط کردن تا قبل از اضافه شدن الیاف فولادی از

مخلوط کن استفاده شده است که مطابق استاندارد ASTM C305 [۴۱] می باشد. پس از افزودن الیاف فولادی، عمل مخلوط کردن به صورت دستی و به مدت دو دقیقه انجام شد. همچنین برای اختلاط ملات تعمیری M-S45 از دستورالعمل شرکت سازنده بهره گرفته شد.

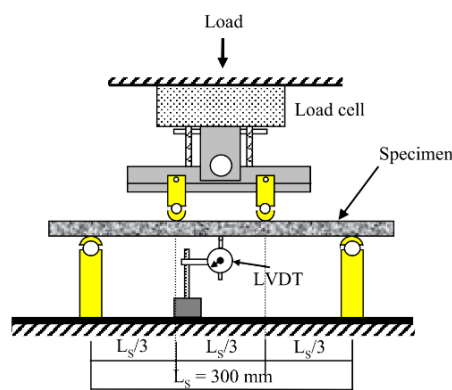
۳- روش انجام آزمایش

۳-۱- آزمایش مقاومت خمشی نمونه های ۲۵×۱۲۵×۵۰۰ میلی متر

مساحت زیر منحنی تنش خمشی-تغییر مکان به دست آمده از این آزمایش بیانگر میزان جذب انرژی ورقه‌ی کامپوزیت سیمانی است [۴۲]. برای آزمایش مقاومت خمشی چهار نقطه‌ای نمونه‌ها با طول ۵۰۰ میلی متر، عرض ۱۲۵ میلی متر و ضخامت ۲۵ میلی متر، طبق مرجع [۴۲] و [۴۳] عمل شد. در ورقه HPRCC با طول ۵۰۰ میلی متر مطابق شکل ۵، فاصله بین دو تکیه‌گاه یعنی ۳۰۰ میلی متر به سه طول مساوی تقسیم شد. از یک ورق فولادی با ضخامت ۲۰ میلی متر به عنوان بستر صلب استفاده شده است. یک عدد LVDT^۹ جهت محاسبه تغییر مکان در نقطه میانی نصب و سرعت بارگذاری ۰/۵ میلی متر بر دقیقه منطبق با مراجع [۴۳-۴۷] در نظر گرفته شد. شکل ۶.



شکل ۶: تجهیزات و نحوه بارگذاری آزمایش خمش.



شکل ۵: تجهیزات و نحوه بارگذاری آزمایش [۴۲].

۳-۲- آزمایش مقاومت خمشی نمونه های ۲۵×۱۲۵×۱۷۰۰ میلی متر

هدف از انجام آزمایش مقاومت خمش بر روی ورقه‌های پیش ساخته با مقیاس واقعی، بررسی اثر دو نوع الیاف فولادی ماکرو و میکرو، شناسایی مشکلات ساخت و نیز بررسی رفتار ترکیبی PML-HPFRCC به همراه میلگردهای GFRP است. نمونه PML-HPFRCC با ابعاد واقعی پس از خروج از قالب در شکل ۷ قابل مشاهده است. همچنین تجهیزات آزمایش مقاومت خمشی چهار نقطه‌ای در شکل ۸ نشان داده شده است. طول بین دو تکیه‌گاه ۱۵۰۰ میلی متر در نظر گرفته شد. فاصله دو نقطه اعمال نیرو ۵۰۰ میلی متر و فاصله هریک از نقاط اعمال نیرو تا تکیه‌گاه مجاور ۵۰۰ میلی متر است. از یک عدد نیروسنج و یک عدد LVDT در وسط تیر استفاده شده است. از جک پنوماتیک که نیرو کنترلی است و نمی‌توان سرعت بارگذاری را براساس جابجایی تنظیم کرد، به کارگیری شد. سرعت بارگذاری ۰/۲۵ نیوتن بر ثانیه است. در مرجع [۴۸] برای بارگذاری ورقه UHPC با طول ۳۰۰۰ میلی متر به سرعت مشخصی اشاره نشده است.

۳-۳- آزمایش مقاومت خمشی نمونه های ۴۰×۴۰×۱۶۰ میلی متر

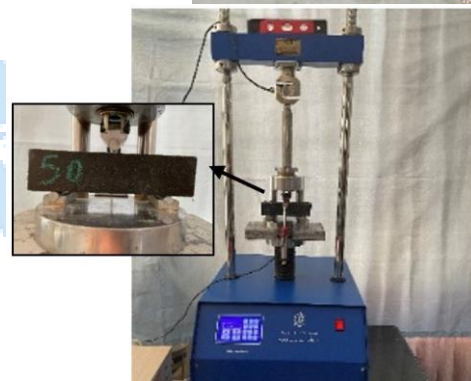
آزمایش مقاومت خمشی سه نقطه‌ای طبق استاندارد ASTM C293 [۴۹] با اعمال بار در وسط دهانه انجام شد. این روش مطابق ASTM C348-19، استاندارد برزیل^{۱۰}، ISO 679 و استاندارد چین^{۱۱} است. در انجام آزمایش از تجهیزات شکل ۹ استفاده شد که این دستگاه

⁹ Linear variable differential transformer

¹⁰ ABNT NBR 13279:2005

¹¹ GB/T 17671-1999

دارای مکانیزم برقی مکانیکی با قابلیت کنترل سرعت بارگذاری از 0.001 تا 10 میلی‌متر بر دقیقه است، قابلیت اعمال بار تا 5 تن را دارد و از لودسل 2 تن بهره می‌برد. یک LVDT در وسط تیر نصب و میزان تغییر مکان نقطه میانی اندازه‌گیری شد. بر اساس توصیه استاندارد ASTM C293 برای آزمایش خمشی سه‌نقطه‌ای از نرخ بارگذاری 0.2 میلی‌متر بر دقیقه استفاده شده است.



شکل ۹: تجهیزات و نحوه بارگذاری آزمایش خمشی سه نقطه‌ای نمونه‌های $160 \times 40 \times 40$ میلی‌متر.

شکل ۸: تجهیزات و نحوه بارگذاری آزمایش خمشی PML-HPFRCC با طول 1700 میلی‌متر.

شکل ۷: خروج از قالب PML-HPFRCC پس از

۳-۴- آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های $40 \times 40 \times 40$ میلی‌متر

استاندارد برزیل^{۱۲}، استاندارد اروپایی EN 1015 و استاندارد چین^{۱۳} استفاده از نیمه‌های شکسته‌ی نمونه‌ها با ابعاد $160 \times 40 \times 40$ میلی‌متر که از آزمایش خمشی به‌دست آمده را توصیه می‌کنند. براساس مراجع [۵۱ و ۵۰] شش نمونه خمشی شکسته‌شده برای به‌دست آوردن مقاومت فشاری، استفاده شدند. شکل ۱۰ روش انجام آزمایش فشاری روی نیمه‌ی شکسته‌شده‌ی نمونه‌های خمشی با ابعاد $160 \times 40 \times 40$ میلی‌متر را در مرجع [۵۲] نشان می‌دهد. جزئیات پیکربندی بارگذاری و شرایط مرزی مرجع [۲۰] در شکل ۱۱ آمده است. با استناد به مراجع [۵۲-۵۰ و ۲۰] و ملاحظات استاندارد ASTM C109 انجام آزمایش فشاری بر روی نمونه‌های خمشی $160 \times 40 \times 40$ میلی‌متر انجام شد که در شکل ۱۲ مشهود است. این آزمایش راهکار مناسب و اقتصادی برای مقایسه‌ی نتایج مقاومت فشاری طرح‌های اختلاط مختلف است.

طبق مرجع [۵۳] پس از انتخاب نمونه مناسب جهت ساخت PML-HPFRCC تعداد ۵ آزمون مکعبی با ابعاد 100 میلی‌متر از طرح اختلاط آن ساخته و بر اساس دستورالعمل JSCE ژاپن و BSI BS EN 12390 [۵۴] آزمایش فشاری بر روی آنها انجام شد که تجهیزات آزمایش در شکل ۱۳ نشان داده شده است. در این آزمایش از جک بتن‌شکن با ظرفیت 200 تن استفاده شد.

^{۱۲} ABNT NBR 13279:2005

^{۱۳} GB/T 17671-1999



شکل ۱۳: آزمایش مقاومت فشاری نمونه مکعبی با ابعاد ۱۰۰ میلی‌متر.



شکل ۱۴: آزمایش مقاومت فشاری نمونه مکعبی با ابعاد ۴۰ میلی‌متر.



شکل ۱۱: آزمایش مقاومت فشاری بر روی نیمه‌ی نمونه خمشی [۲۰].



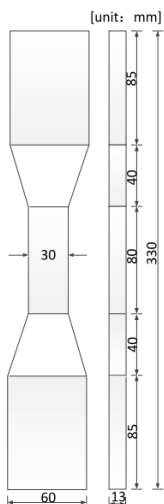
شکل ۱۰: آزمایش مقاومت فشاری بر روی نیمه‌ی نمونه خمشی [۵۲].

۳-۵- آزمایش مقاومت کششی

آزمایش کشش مستقیم، یک آزمایش تک محوری است که در آن مقاومت کششی ملات با کشیدن نمونه مشخص می‌شود. AASHTO T132 یک روش آزمایشی به نام روش آزمایش کشش بریکت را توصیف می‌کند که شامل آزمایش کشش مستقیم یک بریکت ملات سیمانی کوچک است [۵۵]. بریکت ۸ شکل (dog-bone shaped) به طول ۷۵ میلی‌متر، ۲۵ میلی‌متر ضخامت و مقطع عرضی ۶۲۵ میلی‌متر مربع در وسط طول خود است. از آنجایی که این روش برای نمونه‌های ملات سیمان توصیه شده، برای بتن معمولی با سنگدانه‌های درشت نمی‌تواند روش فوق‌العاده مطمئنی باشد [۵۶]. نمونه‌های تحقیق جاری دارای ریزدانه بوده و می‌توان از این روش استفاده کرد. در مرجع [۵۷] از این آزمایش استفاده شده است. در شکل ۱۴ تجهیزات بارگذاری آمده است. سرعت بارگذاری دستگاه مطابق با استاندارد AASHTO T132 برابر ۶۰۰ پوند بر دقیقه معادل ۲۶۶۹ نیوتن بر دقیقه است.

دستگاه آزمایش فقط مقدار بیشینه مقاومت کششی نمونه‌ها را ارائه می‌کند و قادر به رسم نمودار تنش-تغییر مکان نیست. این آزمایش به دلیل کم‌هزینه بودن و امکان مقایسه‌ی نتایج برای به‌دست‌آوردن بیشترین مقاومت کششی، در پژوهش حاضر مورد استفاده قرار گرفت. مطابق مرجع [۵۸] برای آزمایش کشش مستقیم هر طرح اختلاط، شش بریکت ۸ شکل بر اساس AASHTO T132 آزمایش شد.

پس از بررسی مقایسه‌ای نتایج آزمایش کششی نمونه‌های بریکت ۸ شکل و مشخص شدن مناسب‌ترین نمونه، برای دستیابی به نتایجی که رفتار سخت‌شدگی کرنش را نشان دهد، اقدام به ساخت نمونه‌های دمبلی شکل شد. ساخت نمونه و روش آزمایش با استناد به روش پیشنهادی انجمن مهندسی عمران ژاپن (JSCE 2008) در نظر گرفته شده؛ همچنانکه در مرجع [۵۹] نیز آمده است. برای این منظور، فک کششی از جنس فولاد و متناسب با ابعاد نمونه، ساخته و طبق شکل ۱۵ توسط دستگاه یونیورسال سرووالکتریکال با ظرفیت ۲ تن آزمایش کششی انجام شد. سرعت بارگذاری ۰/۵ میلی‌متر بر دقیقه لحاظ و از نمونه با ابعاد مرجع [۵۹] طبق شکل ۱۶ استفاده شد. اکستنسومتر برای اندازه‌گیری تغییرات طول در طول ۸۰ میلی‌متر وسط نمونه نصب شده است.



شکل ۱۶: ابعاد نمونه [۵۹].



شکل ۱۵: تجهیزات آزمایش کشش نمونه دمبلی شکل.

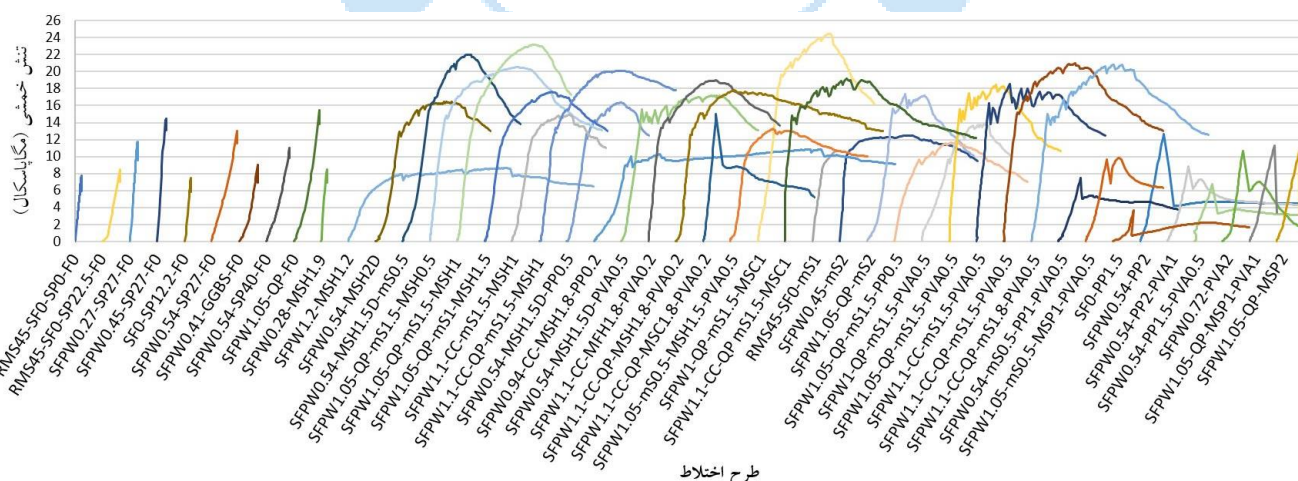


شکل ۱۴: تجهیزات و نحوه بارگذاری کشش بریکت ۸ شکل.

۴- بررسی نتایج

۴-۱- آزمایش مقاومت خمشی نمونه‌های ۲۵×۱۲۵×۵۰۰ میلی‌متر

آزمایش مقاومت خمشی چهارنقطه‌ای، یک نوع آزمایش کشش غیرمستقیم است [۶۰]. بنابراین، برای انتخاب طرح مناسب، مقایسه رفتار خمشی چهارنقطه‌ای ورقه‌ای ملات پیش‌ساخته، اهمیت بسیاری دارد. منحنی تنش خمشی-تغییر مکان در شکل ۱۷ قابل مشاهده می‌باشد. به دلیل تعداد بالای منحنی‌ها، امکان ترسیم و مقایسه در یک شکل وجود ندارد؛ به این دلیل، منحنی رفتار خمشی هر نمونه با اختلاف ۱ میلی‌متر از منحنی رفتار نمونه قبلی ترسیم شد. در ترسیم منحنی‌ها از ترسیم بخش کاهشی هر منحنی صرف‌نظر شد تا تداخل کمتری در شکل‌ها ایجاد شود. برای هر نمونه، یک آزمون ساخته و آزمایش شد.



شکل ۱۷: منحنی تنش-تغییر مکان آزمایش خمشی چهارنقطه‌ای برای نمونه‌ها با ابعاد ۲۵×۱۲۵×۵۰۰ میلی‌متر.

در طرح اختلاط دارای الیاف فولادی ماکرو، به دلیل وزن بیشتر این الیاف نسبت به الیاف فولادی میکرو، باید ته‌نشینی این الیاف با دقت بیشتری بررسی شود. در شکل ۱۷ به دلیل ته‌نشینی الیاف، رفتار نمونه SFPW0.28-MSH1.9 دقیقاً مشابه رفتار نمونه‌های بدون الیاف است زیرا در هنگام ساخت، تمام الیاف در قسمت پایین نمونه ته‌نشین شد و در هنگام آزمایش، نمونه بصورت وارونه تحت اعمال نیرو قرار

گرفت. بنابراین، در هنگام آزمایش خمش، الیاف برای مقابله با نیروی کششی در قسمت پایین نمونه وجود ندارد که در شکل ۱۸ آمده است. در شکل ۱۹ مخلوط تازه‌ی نمونه SFPW1.2-MSH1.2 که در آن ته‌نشینی رخ نداد، نشان داده شده است.



شکل ۱۹: مخلوط تازه SFPW0.28-MSH1.9 بدون ته‌نشینی الیاف.



شکل ۱۸: نمای قسمت بدون الیاف در نمونه SFPW0.28-MSH1.9 به دلیل ته‌نشینی.

همچنین در نمونه SFPW1-QP-mS1.5-MSC1 که از الیاف فولادی ماکرو موجدار استفاده شد و بیشترین مقاومت خمشی به دست آمد، ته‌نشینی الیاف رخ داد که در شکل ۲۰ مخلوط تازه نمونه و در شکل ۲۱ موقعیت قرارگیری الیاف در پایین ورقه کامپوزیت نشان داده شده است. با بررسی شکل ۲۱، می‌توان تشخیص داد که الیاف فولادی میکرو ته‌نشین نشدند. هنگام استفاده از الیاف ماکرو فولادی به دلیل وزن بالای آنها، تعداد کمتری از الیاف در مخلوط استفاده می‌شود که باعث شد بخش‌هایی از مقطع بدون الیاف فولادی ماکرو باشند.



شکل ۲۱: ته‌نشینی الیاف ماکرو فولادی موجدار در مقطع عرضی ورقه SFPW1-QP-mS1.5-MSC1.



شکل ۲۰: مخلوط تازه SFPW1-QP-mS1.5-MSC1

در میان نمونه‌های بدون الیاف فولادی ماکرو، نمونه‌های SFPW1.1-CC-QP-mS1.5-PVA0.5 و SFPW1.1-CC-QP-mS1.8-PVA0.5 بیشترین تنش خمشی را تحمل کردند. نمونه دوم با ۱/۸ درصد الیاف فولادی میکرو، ۲۰/۸ مگاپاسکال یعنی ۰/۲ مگاپاسکال کمتر از نمونه اول، تنش خمشی را تحمل کرد اما با مقایسه سطح زیر منحنی تنش-تغییر مکان دو نمونه تا تغییر مکان ۲۰ میلی‌متر، مشاهده شد که سطح زیر منحنی نمونه دوم با ۱/۸ درصد الیاف فولادی میکرو، ۱/۸ درصد بیشتر از نمونه اول است که بیانگر استهلاک انرژی بیشتر می‌باشد. بنابراین، مناسب‌ترین رفتار خمشی مربوط به نمونه SFPW1.1-CC-QP-mS1.8-PVA0.5 است. برای این نمونه روانی ملات کامپوزیت سیمانی قبل و بعد از افزودن الیاف فولادی میکرو پس از گذشت ۱۵ ثانیه در شکل ۲۲ و ۲۳ نمایش داده شده است. در انتهای مرحله ساخت با افزودن الیاف فولادی میکرو به طرح اختلاط، متوسط قطر نهایی گسترش کامپوزیت سیمانی از ۱۵۰ میلی‌متر به ۱۷۰ میلی‌متر افزایش یافت.



شکل ۲۲: روانی ملات پس از افزودن الیاف فولادی میکرو.



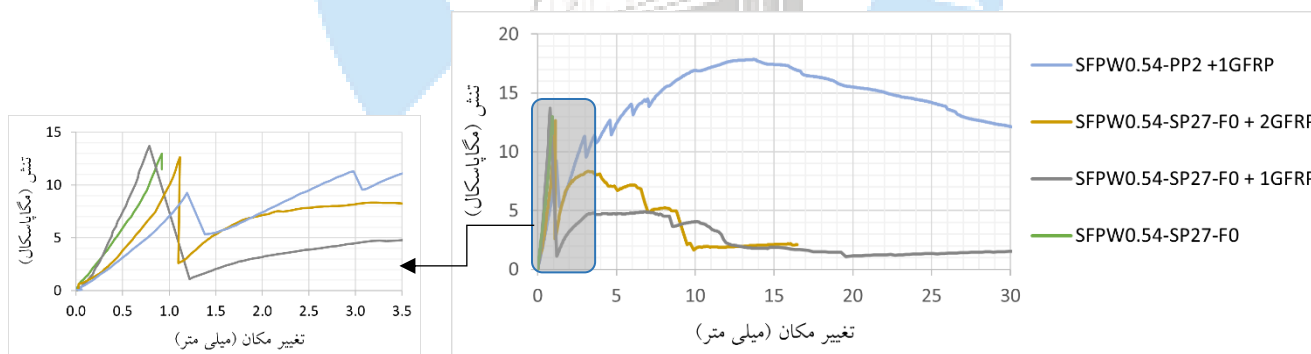
شکل ۲۳: روانی ملات قبل از افزودن الیاف فولادی میکرو.

در ادامه، آزمایش خمش بر روی نمونه‌های مسلح شده با میلگرد GFRP انجام شد. نمونه SFPW0.54-SP27-F0 که فاقد الیاف است به عنوان الگوی ۱۰ نمونه‌ی بدون الیاف، انتخاب و سپس با یک و دو عدد میلگرد GFRP به قطر ۶ میلی‌متر مسلح شد. طبق شکل ۲۴ مشاهده شد که به دلیل عدم پیوستگی کامپوزیت سیمانی، میلگرد GFRP باعث دونیم‌شدن کامپوزیت سیمانی بدون الیاف می‌شود. بنابراین، نمونه‌های بدون الیاف برای ساخت PML-HPFRCC مناسب نیستند. در نمونه SFPW0.54-PP2 که ۲ درصد الیاف پلی‌اتیلن به مخلوط SFPW0.54-SP27-F0 اضافه شد، با یک میلگرد GFRP به قطر ۶ میلی‌متر مسلح شد که نتیجه آن توسعه یکنواخت ترک‌های خمشی و در نتیجه رفتار مناسب نمونه در خمش بود؛ در شکل ۲۵ آمده است. منحنی تنش-تغییر مکان آزمون‌ها در شکل ۲۶ ترسیم شده است.



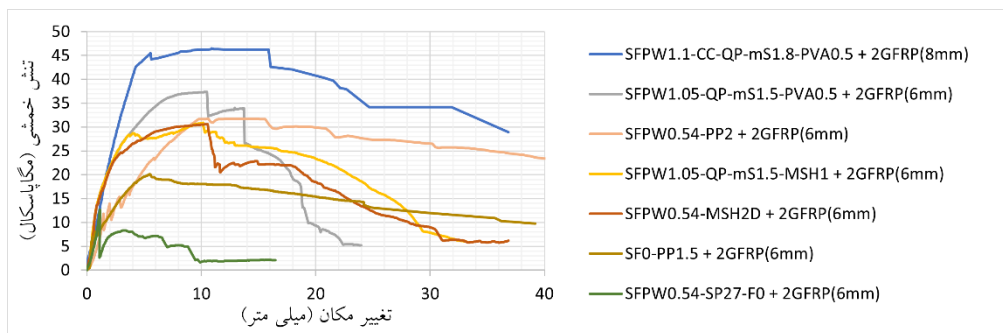
شکل ۲۵: نمونه SFPW0.54-PP2 مسلح به یک میلگرد GFRP به قطر ۶ میلی‌متر.

شکل ۲۴: دونیم‌شدن نمونه SFPW0.54-SP27-F0



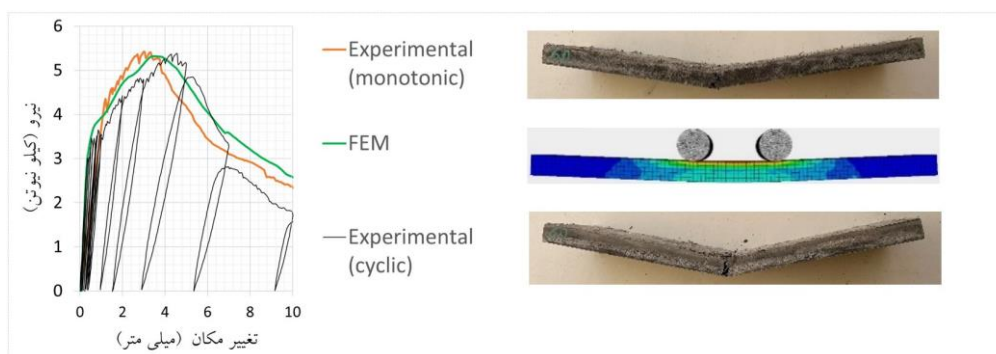
شکل ۲۶: منحنی تنش-تغییر مکان آزمایش خمش چهار نقطه‌ای نمونه SFPW0.54-PP2 و SFPW0.54-SP27-F0 مسلح به میلگرد GFRP.

نمونه‌های کامپوزیت سیمانی الیافی پس از مسلح شدن به میلگرد GFRP رفتار مناسبی دارند، بدون دونیم‌شدن کامپوزیت سیمانی. در شکل ۲۷ منحنی تنش-تغییر مکان تعدادی از نمونه‌های مسلح به دو عدد میلگرد GFRP ارائه شده است. در تمام حالت‌ها، پوشش ملات سیمانی میلگردها در قسمت زیرین نمونه ۶ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. در نمونه‌های دارای الیاف فولادی ماکرو، ابتدا ملات حاوی الیاف فولادی در قسمت پایینی قالب پخش و سپس میلگردهای GFRP در فاصله ۶ میلی‌متری کف قالب قرار داده شد.



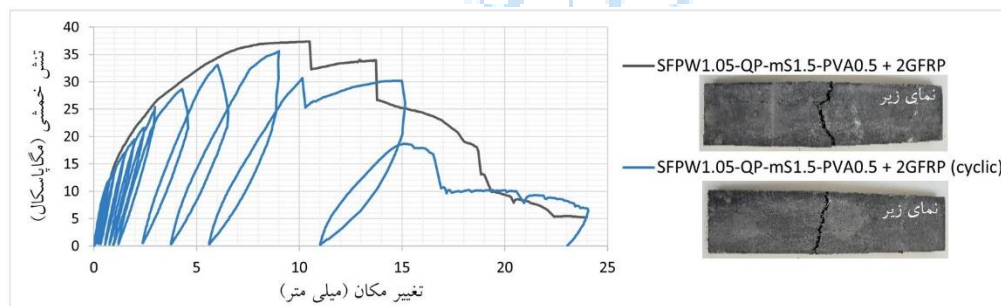
شکل ۲۷: منحنی تنش-تغییر مکان آزمایش خمش چهار نقطه‌ای نمونه‌های مسلح به دو عدد میلگرد GFRP.

نمونه SFPW1.1-CC-QP-mS1.8-PVA0.5 تحت بارگذاری چرخه‌ای قرار گرفت. نمودار نیرو-تغییر مکان در دو حالت بارگذاری یکنواخت و چرخه‌ای به همراه نتایج مدل‌سازی عددی توسط نرم‌افزار المان محدود آباکوس تحت بارگذاری یکنواخت در شکل ۲۸ آمده است.

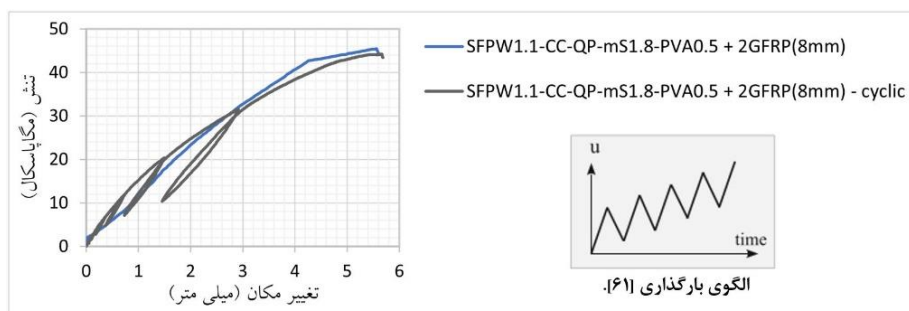


شکل ۲۸: منحنی نیرو-تغییر مکان نمونه SFPW1.1-CC-QP-mS1.8-PVA0.5 در دو حالت بارگذاری یکنواخت و چرخه‌ای.

در ادامه، از میان نمونه‌های شکل ۲۷، نمونه SFPW1.05-QP-mS1.5-PVA0.5 که دارای شرایط متوسط بین تمام نمونه‌ها است، به عنوان الگو انتخاب و سپس با دو عدد میلگرد GFRP به قطر ۶ میلی‌متر مسلح شد. تحت بارگذاری خستگی بسیار کم چرخه قرار گرفت که در شکل ۲۹ منحنی رفتار در دو حالت بارگذاری یکنواخت و چرخه‌ای برای مقایسه قابل مشاهده است؛ برای این نمونه از الگوی بارگذاری چرخه‌ای مرجع [۶۱] استفاده شد. همچنین نمونه SFPW1.1-CC-QP-mS1.8-PVA0.5 تا ایجاد اولین ترک در کامپوزیت سیمانی بررسی شد؛ الگوی بارگذاری و منحنی تنش-تغییر مکان در شکل ۳۰ قابل ملاحظه است. می‌توان دریافت که رفتار خمشی PML-HPFRCC مسلح به دو میلگرد GFRP در برابر بارهای چرخه‌ای به حالت بارگذاری یکنواخت بسیار نزدیک است.



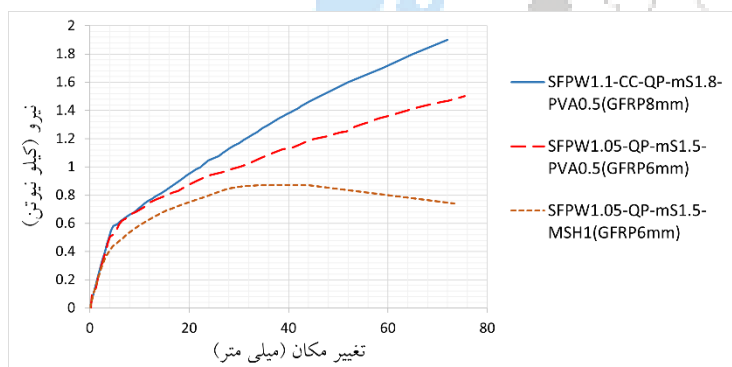
شکل ۲۹: منحنی تنش-تغییر مکان نمونه SFPW1.05-QP-mS1.5-PVA0.5 مسلح به دو میلگرد GFRP با قطر ۶ میلی‌متر تحت بارگذاری یکنواخت و چرخه‌ای.



شکل ۳۰: منحنی تنش-تغییر مکان نمونه SFPW1.1-CC-QP-mS1.8-PVA0.5 مسلح به دو میلگرد GFRP با قطر ۶ میلی‌متر تحت بارگذاری یکنواخت و چرخه‌ای.

۴-۲- آزمایش مقاومت خمشی نمونه‌های ۱۷۰۰×۱۲۵×۲۵ میلی‌متر

از میان نمونه‌های با طول ۵۰۰ میلی‌متر که دارای عملکرد مناسبی در خمش بودند، سه نمونه با طول ۱۷۰۰ میلی‌متر، عرض ۱۲۵ میلی‌متر و ضخامت ۲۵ میلی‌متر ساخته و تحت آزمایش خمش چهار نقطه‌ای قرار گرفت. این سه نمونه عبارتند از SFPW1.05-QP-mS1.5-PVA0.5، SFPW1.1-CC-QP-mS1.8-PVA0.5 و SFPW1.05-QP-mS1.5-PVA0.5. MSH1. قطر ۶ میلی‌متر و نمونه سوم با دو عدد میلگرد GFRP با قطر ۸ میلی‌متر مسلح شده است. میلگردها به فاصله ۶ میلی‌متر از کف قالب و فاصله ۴۵ میلی‌متر از یکدیگر و در محدوده‌ی وسط مقطع قرار گرفتند. شکل ۳۱ نمونه SFPW1.1-CC-QP-mS1.8-PVA0.5 را تحت بارگذاری نشان می‌دهد. در شکل ۳۲ نمودار نیرو - تغییر مکان هر سه نمونه ترسیم شده است. نمونه‌ها قابلیت تغییر مکان بالایی دارند اما به دلیل طول محدود LVDT امکان بررسی تغییر مکان‌های بیشتر وجود ندارد.



شکل ۳۲: نمودار نیرو-تغییر مکان نمونه‌ها با ابعاد ۱۷۰۰×۱۲۵×۲۵ میلی‌متر.



شکل ۳۱: تغییر شکل نمونه SFPW1.1-CC-QP-mS1.8-PVA0.5.

در هنگام ساخت نمونه SFPW1.05-QP-mS1.5-MSH1 مشخص شد که استفاده از الیاف فولادی ماکرو با طول بلند راهکار مناسبی نیست؛ چراکه الیاف فولادی ماکرو هنگام پخش شدن در قالب با میلگردهای GFRP برخورد کرده و نمی‌توانند در فضای زیر میلگردها قرار گیرند و این فضا تنها با ملات حاوی الیاف میکرو مسلح شده و نمونه نسبت به دو نمونه دیگر رفتار مناسبی نشان نداد. در شکل ۳۳ نحوه مناسب قرارگیری کامپوزیت سیمانی حاوی الیاف فولادی میکرو و پلی‌وینیل‌الکل در قسمت زیرین میلگردهای GFRP نمایش داده شده است.

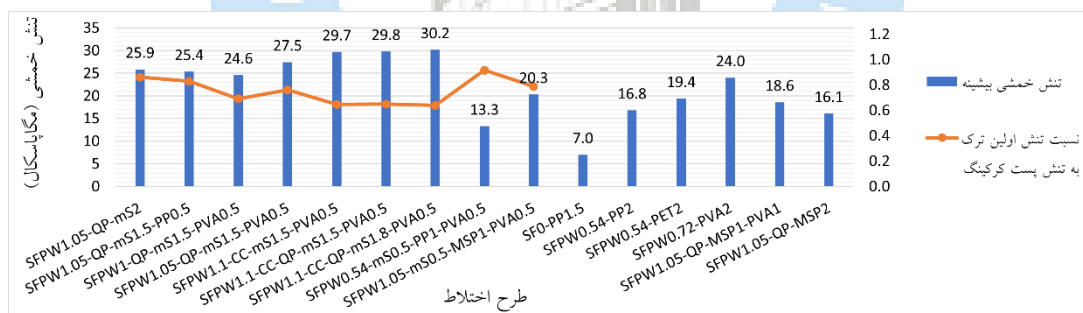


شکل ۳۳: نفوذ ملات کامپوزیت سیمانی با الیاف میکرو به بخش زیرین میلگردهای GFRP بدون استفاده از لرزاننده.

۳-۴- آزمایش مقاومت خمشی نمونه‌های $۱۶۰ \times ۴۰ \times ۴۰$ میلی‌متر

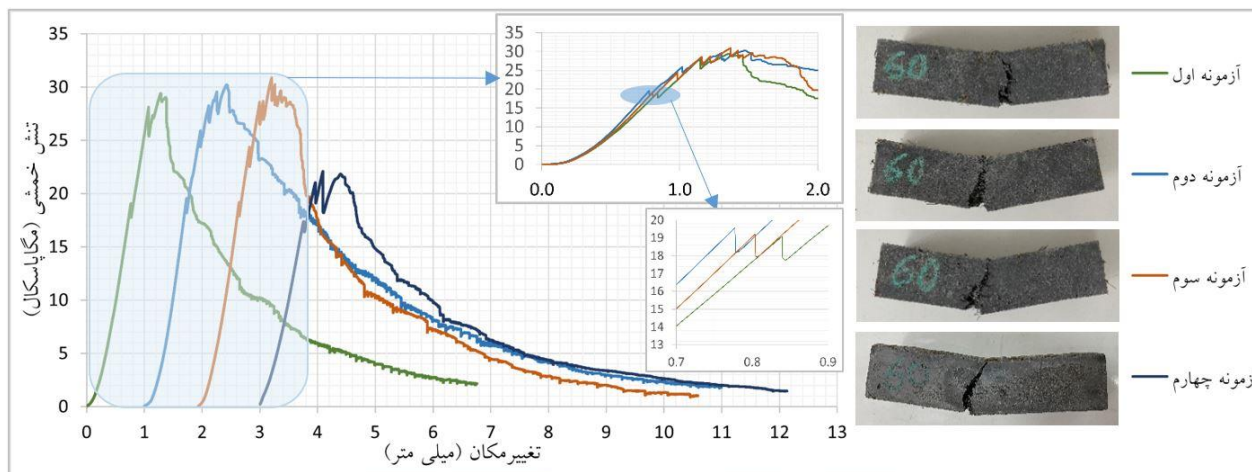
برای آزمایش خمش سه نقطه‌ای از سه نمونه برای هر نمونه استفاده شد. نمودار بیشترین تنش برحسب مگاپاسکال در مقابل طرح اختلاط، در شکل ۳۴ نمایش داده شده است. با توجه به مشکل عدم جاگیری الیاف فولادی ماکرو در قسمت تحتانی میلگردها برای ساخت PML-HPFRCC که در بخش قبل اشاره شد، در این بخش نیز در نمونه‌های $۱۶۰ \times ۴۰ \times ۴۰$ میلی‌متر با توجه به اینکه طول الیاف از ارتفاع قالب بیشتر است معمولاً در قسمت بالای قالب بیرون زدگی دارند و باید آنها را بصورت دستی هم‌جهت و موازی طول قالب قرار داد که در اینصورت نتایج به دست آمده قابل استناد نخواهد بود. برای حل این مشکل در مرجع [۶۲] راهکار ارائه شده است اما راه حل پیشنهادی برای نمونه‌های با ابعاد زیاد، قابل اجرا نیست. یک روش دیگر، ریختن الیاف فولادی ماکرو در قالب بصورت جدا از ملات می‌باشد تا بتوان الیاف را به صورت کنترل شده در کل مقطع، با تعداد مناسب و جهت مناسب قرار داد. اما این روش نیز با مراحل ساخت در محیط خارج از آزمایشگاه متفاوت بوده و قابل استناد نخواهد بود؛ بنابراین، از این پس ترکیب‌های دارای الیاف فولادی ماکرو مورد بررسی قرار نمی‌گیرند. همچنین، در مورد نمونه‌های فاقد الیاف به دلیل رفتار غیرشکل‌پذیر نسبت به نمونه‌های الیافی، از این مرحله به بعد، از جریان تحقیق حذف شدند.

در نمونه‌های دارای الیاف پلیمری، پس از ایجاد اولین ترک، سخت‌شدگی تغییرمکان مشاهده نشد و شاهد نرم‌شدگی تغییرمکان هستیم؛ بنابراین، نمونه‌های بدون الیاف فولادی میکرو در دسته FRCC قرار دارند. در طرح نهایی ساخت PML-HPFRCC، طرح‌های اختلاط دارای الیاف ترکیبی شامل الیاف فولادی میکرو و پلی‌وینیل‌الکل، به دلیل رفتار سخت‌شدگی کرنش مورد تاکید قرار گرفتند.



شکل ۳۴: بیشترین مقدار تنش خمشی و نسبت تنش اولین ترک به تنش پست‌کرنش برای نمونه‌های HPFRCC.

نمونه SFPW1.1-CC-QP-mS1.8-PVA0.5 کمترین نسبت تنش اولین ترک به تنش پس از تشکیل ترک‌های چندگانه را دارد، منحنی تنش-تغییرمکان ۴ نمونه برای این نمونه در شکل ۳۵ آمده است؛ فاصله ۱ میلی‌متر در ترسیم منحنی‌ها لحاظ شد تا از تداخل آنها جلوگیری شود.

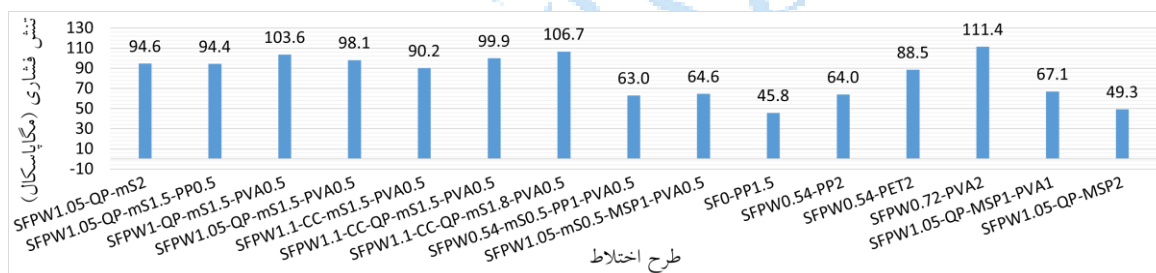


شکل ۳۵: منحنی تنش-تغییر مکان به همراه نمای روبروی ۴ آزمونه برای نمونه SFPW1.1-CC-QP-mS1.8-PVA0.5.

تنش خمشی متناظر با ایجاد اولین ترک در سه آزمونه به ترتیب برابر ۱۹/۱، ۱۹/۵ و ۱۹/۲ مگاپاسکال و در محدوده تغییر مکان ۰/۷۵ تا ۰/۸۵ میلی متر واقع شده است. پس از ایجاد اولین ترک، در تمام آزمونه‌ها سخت‌شدگی تغییر مکان مشهود است که به دلیل پل زدن الیاف و ایجاد ترک‌های چندگانه در ناحیه کششی است. آزمونه چهارم ۳۰۰ سیکل انجماد و ذوب یخ بر اساس ASTM C 666 [۶۳] را سپری نموده و سپس مورد آزمایش خمش قرار گرفت؛ در این آزمونه تنش نهایی نسبت به میانگین ۳ آزمونه‌ی دیگر، ۲۵ درصد کاهش نشان داد. در آزمونه چهارم تنش متناظر با ایجاد اولین ترک ۱۷ مگاپاسکال است.

۴-۴- آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی با ابعاد ۴۰ میلی‌متر

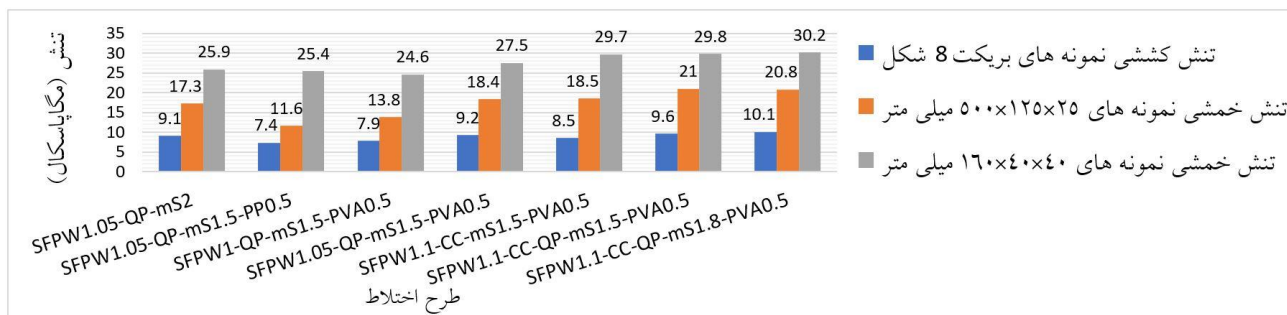
میانگین مقاومت فشاری ۶ آزمونه برای هر نمونه به دست آمد که در شکل ۳۶ ارائه شده است. در مرجع [۲۰] از الیاف پلی‌وینیل-الکل در ترکیب HPRCC استفاده شده و بیشترین مقاومت فشاری برای نمونه‌ها، ۲۱ مگاپاسکال به دست آمده است؛ نمونه SFPW0.72-PVA2 با مقاومت فشاری ۱۱۱/۴ مگاپاسکال، بیش از ۵ برابر مقاومت بیشتری در برابر فشار نسبت به نمونه مرجع [۲۰] نشان داد. اما در بخش قبل، به دلیل رفتار نرم‌شدگی کرنش پس از ایجاد اولین ترک، گزینه مناسب برای ساخت PML-HPFRCC شناخته نشد. بنابراین، بدون در نظر گرفتن نمونه SFPW0.72-PVA2، نمونه SFPW1.1-CC-QP-mS1.8-PVA0.5 بیشترین مقاومت فشاری را در میان نمونه‌های HPRCC با رفتار سخت‌شدگی کرنش به دست آورد.



شکل ۳۶: میانگین تنش فشاری برای نمونه‌های مکعبی با ابعاد ۴۰ میلی‌متر.

۴-۵- آزمایش مقاومت کششی نمونه‌های بریکت 8 شکل

برای هر نمونه، شش آزمونه آزمایش شد؛ در شکل ۳۷ میانگین مقاومت کششی به دست آمده به همراه نتایج آزمایش‌های خمش برای مقایسه آمده است. آزمایش خمش یک نوع آزمایش کشش غیرمستقیم به حساب می‌آید. نتایج به دست آمده از آزمایش کشش مستقیم نمونه‌های بریکت 8 شکل با نتایج آزمایش خمشی نمونه‌های ۴۰×۴۰×۱۶۰ و ۲۵×۱۲۵×۵۰ میلی‌متر، انطباق مناسبی دارد.



شکل ۳۷: میانگین تنش کششی برای نمونه های بریکت 8 شکل به همراه نتایج آزمایش های خمش برای مقایسه.

نمونه SFPW1.1-CC-QP-mS1.8-PVA0.5 بیشترین تنش کششی به میزان ۱۰/۱ مگاپاسکال را تحمل کرد. این مقدار در مرجع [۳۵] برابر ۷/۷۲ مگاپاسکال، در مرجع [۵۶] برابر ۹ مگاپاسکال، در مرجع [۵۷] برابر ۸/۸ مگاپاسکال و در مرجع [۵۸] برابر ۴/۲ مگاپاسکال است؛ بنابراین، نمونه SFPW1.1-CC-QP-mS1.8-PVA0.5 در مقایسه با این مقادیر تنش کششی بیشتری را تحمل نموده است. سرانجام با بررسی تمام نتایج آزمایشگاهی، طرح اختلاط SFPW1.1-CC-QP-mS1.8-PVA0.5 به عنوان مناسب ترین طرح انتخاب شد.

۴-۶- آزمایش مقاومت فشاری نمونه مکعبی SFPW1.1-CC-QP-mS1.8-PVA0.5 با ابعاد ۱۰۰ میلی متر

برای طرح اختلاط برگزیده، پنج نمونه مکعبی با ابعاد ۱۰۰ میلی متر مورد آزمایش فشاری قرار گرفت که نتایج به ترتیب شکل ۳۸ از راست به چپ عبارتند از ۹۵/۷، ۸۳/۵، ۹۳/۲، ۱۰۰ و ۹۲/۵ مگاپاسکال. میانگین مقاومت فشاری ۹۳ مگاپاسکال است.

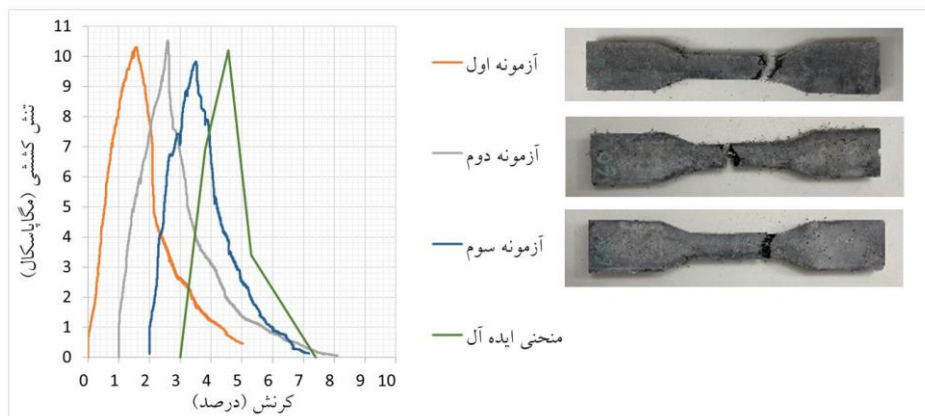


شکل ۳۸: آزمون های مکعبی نمونه SFPW1.1-CC-QP-mS1.8-PVA0.5 پس از آزمایش مقاومت فشاری.

در مرجع [۷] از میان ترکیب های مختلف، ترکیب دارای ۱/۸ درصد الیاف فولادی میکرو و ۰/۲ درصد الیاف پلی وینیل الکل به همراه ۲۸/۶ کیلوگرم کربنات کلسیم در هر متر مکعب کامپوزیت سیمانی، دارای بیشترین مقاومت فشاری استوانه ای برابر ۵۹ مگاپاسکال است. در نمونه SFPW1.1-CC-QP-mS1.8-PVA0.5 نسبت به مرجع [۷] درصد الیاف فولادی میکرو و میزان کربنات کلسیم تغییر نکرده اما از ۰/۵ درصد الیاف پلی وینیل الکل استفاده شد. همچنین از پودر کوارتز و طرح اختلاط مناسب استفاده شد تا بتوان به مقاومت فشاری مکعبی ۹۳ مگاپاسکال رسید. مقاومت فشاری نمونه مکعبی با ابعاد ۱۰۰ میلی متر در مرجع [۳۵] برای ساخت PML-HPFRCC، ۹۰/۴ مگاپاسکال است.

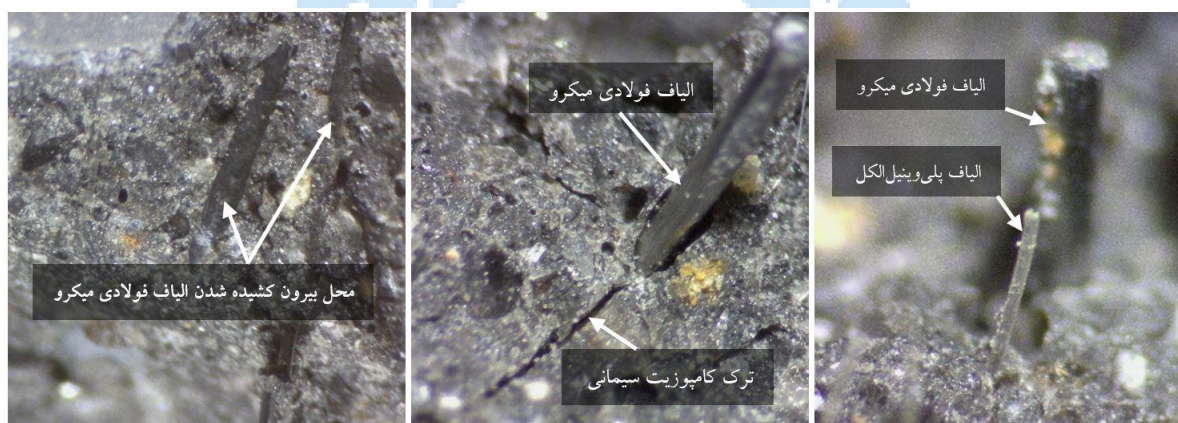
۴-۷- آزمایش مقاومت کشش مستقیم دمبلی شکل نمونه SFPW1.1-CC-QP-mS1.8-PVA0.5

سه نمونه دمبلی شکل برای نمونه منتخب ساخته و آزمایش کشش مستقیم بر روی آزمون ها انجام شد. در شکل ۳۹ منحنی تنش- کرنش آزمون ها با حفظ فاصله آمده است. تنش کششی آزمون ها به ترتیب برابر ۱۰/۳، ۱۰/۵ و ۹/۸ مگاپاسکال و میانگین تنش کششی سه آزمون ۱۰/۲ مگاپاسکال است که از میانگین تنش کششی نمونه های 8 شکل ۰/۱ مگاپاسکال بیشتر است. منحنی چهارم که بیانگر تنش و کرنش ترک خوردگی و پست کرکینگ است از میانگین مقادیر سه آزمون کششی به دست آمد. از این منحنی در مدل سازی عددی رفتار خمشی ورقه ی کامپوزیت سیمانی توسط نرم افزار المان محدود آباکوس که در شکل ۲۸ آمده، استفاده شده است.



شکل ۳۹: منحنی تنش- کرنش سه آزمونه دمبلی شکل تحت کشش مستقیم و منحنی ایده آل برای نمونه SFPW1.1-CC-QP-mS1.8-PVA0.5.

در شکل ۴۰ تصاویر میکروسکوپی با بزرگنمایی ۴۰۰ برابر در مقطع عرضی آزمونه‌ها پس از انجام آزمایش کشش قابل مشاهده است. با بررسی سطح مقطع تمام آزمونه‌ها، مشاهده شد که الیاف فولادی میکرو از داخل کامپوزیت سیمانی بیرون کشیده شده و هیچ‌گونه آسیبی در آنها مشاهده نشد. اما الیاف پلی‌وینیل‌الکل، بر خلاف الیاف فولادی، در تمامی موارد دچار آسیب شده و بیرون کشیده شدن این الیاف از داخل کامپوزیت سیمانی بدون ایجاد خرابی در الیاف، مشاهده نشد.



شکل ۴۰: تصاویر میکروسکوپی آزمونه کششی دمبلی شکل با بزرگنمایی ۴۰۰ برابر.

۵- نتیجه گیری

تیر پل‌های بتنی در طول عمر خود تحت تاثیر عوامل مخربی مانند خرابی بتن در اثر عوامل جوی، خوردگی میلگردهای فولادی و یا خستگی ناشی از بارگذاری چرخه‌ای قرار دارند که استفاده از PML-HPFRCC که با میلگردهای GFRP مسلح شده برای تقویت تیر بتنی پل‌های موجود یک راهکار مناسب است. کامپوزیت سیمانی الیافی توانمند و میلگرد GFRP در برابر عوامل مخرب دارای مقاوم بالایی هستند که باعث شده استفاده از این مصالح به سرعت توسعه یابد. در پژوهش حاضر، مطالعه آزمایشگاهی برای ۴۵ طرح اختلاط مختلف انجام شده است. با انجام آزمایش‌های مختلف، طرح اختلاط SFPW1.1-CC-QP-mS1.8-PVA0.5 به عنوان گزینه مناسب برای ساخت PML-HPFRCC معرفی شد. به طور کلی نتایج به‌دست آمده به شرح زیر است:

۱- افزودن کربنات کلسیم به طرح اختلاط دارای سیلیکا فیوم به دلیل فعالیت پوزولانی بالا و اثر پرکنندگی سیلیکا فیوم، در تمام نمونه‌ها باعث افزایش اندک مقاومت خمشی و فشاری شد. مقدار مناسب سیلیکا فیوم خشک ۲۵۳ کیلوگرم و کربنات کلسیم ۲۸/۶ کیلوگرم در یک مترمکعب ملات است.

- ۲- افزودن الیاف فولادی میکرو به ملات بر خلاف الیاف پلی‌وینیل‌الکل و پلی‌پروپیلن، روانی ملات را افزایش داد. متوسط قطر نهایی گسترش کامپوزیت سیمانی از ۱۵۰ میلی‌متر به ۱۷۰ میلی‌متر افزایش پیدا کرد.
- ۳- در آزمایش خمش چهار نقطه‌ای PML-HPFRCC با ابعاد $۲۵ \times ۱۲۵ \times ۵۰۰$ میلی‌متر، در تمام نمونه‌ها با افزودن پودر کوارتز به طرح اختلاط، مساحت زیر نمودار تنش-تغییر مکان نسبت به حالت بدون پودر کوارتز افزایش نشان داد.
- ۴- در PML-HPFRCC با ابعاد $۲۵ \times ۱۲۵ \times ۵۰۰$ میلی‌متر مسلح به میلگرد GFRP، بکارگیری الیاف از هر نوعی باعث جلوگیری از دونیم شدن ورقه در هنگام بارگذاری خمشی چهار نقطه‌ای شد.
- ۵- در نمونه‌های ورقه‌ای به دلیل ارتفاع بسیار کم مقطع، ته‌نشینی الیاف فولادی ماکرو بسیار سریع‌تر است؛ در صورت قرارگیری نمونه بصورت وارونه در موقیت بارگذاری، وجود الیاف در ناحیه فشاری هیچ‌گونه تاثیری بر رفتار خمشی ورقه‌های کامپوزیت ندارند.
- ۶- در آزمایش خمش چهار نقطه‌ای نمونه‌های ورقه‌ای، تعدادی از نمونه‌ها مقاومت بیشتری را نشان دادند که پس از شکسته شدن نمونه، مشخص شد که الیاف فولادی ماکرو ته‌نشین شده و مقاومت کششی بخش تحتانی PML-HPFRCC را افزایش دادند. این در حالی است که الیاف میکرو در کل نمونه پخش شده و ته‌نشین نشدند. بنابراین، استفاده از الیاف فولادی میکرو در ساخت PML-HPFRCC به دلیل امکان ته‌نشینی کمتر نسبت به الیاف فولادی ماکرو، توصیه می‌شود.
- ۷- در آزمایش خمش چهار نقطه‌ای PML-HPFRCC با طول ۵۰۰ میلی‌متر، با افزایش میزان $۰/۳$ درصد الیاف فولادی میکرو به ترکیب SFPW1.1-CC-QP-mS1.5-PVA0.5 سطح زیر منحنی تنش-تغییر مکان نمونه SFPW1.1-CC-QP-mS1.8-PVA0.5 به مقدار $۱/۸$ درصد افزایش یافت. بنابراین، بدون در نظر گرفتن نمونه‌های دارای الیاف فولادی ماکرو به دلیل عدم نفوذ به قسمت زیرین میلگرد GFRP، بیشترین مساحت زیر نمودار تنش-تغییر مکان متعلق به نمونه SFPW1.1-CC-QP-mS1.8-PVA0.5 است؛ استفاده از دو عدد میلگرد GFRP با قطر ۸ میلی‌متر در ورقه کامپوزیت، قابلیت تحمل تنش خمشی را ۲۳۰ درصد افزایش داد.
- ۸- در نمونه‌های ورقه کامپوزیت سیمانی دارای الیاف پلیمری بدون ترکیب با الیاف فولادی و بدون میلگرد GFRP، پس از ایجاد اولین ترک در کامپوزیت سیمانی، رفتار نرم‌شدگی کرنش مشاهده شد. به دلیل نداشتن رفتار سخت‌شدگی کرنش، نمونه‌های فاقد الیاف فولادی در دسته‌بندی HPFRCC قرار نگرفته و باید آنها را در دسته‌ی FRCC قرار داد.
- ۹- در نمونه‌های PML-HPFRCC با ابعاد $۲۵ \times ۱۲۵ \times ۵۰۰$ میلی‌متر دارای الیاف فولادی میکرو تحت آزمایش خمش چهار نقطه‌ای، اولین ترک در زیر یکی از دو نقطه‌ی اعمال نیرو ایجاد شد؛ سپس با افزایش نیرو، به دلیل پل زدن الیاف، رشد اولین ترک متوقف شده و ترک دیگری در این محدوده ایجاد شد. به همین ترتیب تعداد ترک‌ها میان دو نقطه‌ی اعمال نیرو افزایش پیدا کرده و در نهایت، عرض یکی از این ترک‌ها شروع به افزایش کرد و باعث ایجاد نرم‌شدگی کرنش در رفتار خمشی نمونه شد. در زمان افزایش تعداد ترک، نمونه‌ها رفتار سخت-شدگی کرنش دارند. در تحقیق جاری به دلیل مقاومت بالای کششی و فشاری ملات کامپوزیت سیمانی نسبت به سایر مراجع و نیز بکارگیری الیاف فولادی میکرو صاف، سخت‌شدگی کرنش دارای شیب تندتر اما طول این ناحیه کوتاه‌تر است.
- ۱۰- استفاده از آزمایش فشاری بر روی نمونه‌های شکسته شده‌ی آزمایش خمش با ابعاد $۴۰ \times ۴۰ \times ۱۶۰$ میلی‌متر از نظر زمان و هزینه صرفه اقتصادی دارد و نتایج مقایسه‌ای مطلوب را در اختیار محققین قرار می‌دهد. میانگین نتایج آزمایش فشاری نمونه‌های با ابعاد ۴۰ میلی‌متر برای نمونه SFPW1.1-CC-QP-mS1.8-PVA0.5 برابر $۱۰۶/۷$ مگاپاسکال و ۱۵ درصد بیشتر از میانگین نتایج آزمایش فشاری نمونه‌های با ابعاد ۱۰۰ میلی‌متر که برابر ۹۳ مگاپاسکال است، به دست آمد.
- ۱۱- در منحنی تنش-کرنش آزمایش‌های کشش مستقیم دمبلی شکل، ایجاد ترک‌های چندگانه باعث رفتار سخت‌شدگی کرنش شد. طبق منحنی ایده‌آل نمونه‌ها، ایجاد اولین ترک در تنش $۶/۹$ مگاپاسکال و پست‌کرکینگ در تنش $۱۰/۲$ مگاپاسکال است.
- پیشنهاد می‌شود مطالعه آزمایشگاهی بر روی تیر بتن مسلح که با ورقه ملات پیش‌ساخته با طرح اختلاط SFPW1.1-CC-QP-mS1.8-PVA0.5 تقویت شده است، تحت بارگذاری یکنواخت و خستگی صورت گیرد.

مراجع

- [1] Lin, W. and Yoda, T. (2017). *Bridge engineering: classifications, design loading, and analysis methods*. Butterworth-Heinemann.
- [2] Zhang, Y. X., and Yu, K. (Eds.). (2022). *Advances in Engineered Cementitious Composite: Materials, Structures, and Numerical Modeling*. Woodhead Publishing, 294,418.
- [3] Brandt, A. M. (2008). Fibre reinforced cement-based (FRC) composites after over 40 years of development in building and civil engineering. *Composite structures*, 86(1-3), 3-9.
- [4] Naaman, A.E. and Reinhardt, H.W., 2004. High performance fiber reinforced cement composites HPFRCC-4: International workshop Ann Arbor, Michigan, June 16-18, 2003. *Cement and Concrete Composites*, 6(26), pp.757-759.
- [5] Banar, R. and Dashti, P. and Zolfagharnasab, A. and Ramezaniapour, A. M. and Ramezaniapour, A. A. (2022). A comprehensive comparison between using silica fume in the forms of water slurry or blended cement in mortar/concrete. *Journal of Building Engineering*, 46, 103802.
- [6] Wu, L. S. and Yu, Z. H., Zhang, C. and Bangi, T. (2022). Effect of CaCO₃ whiskers on tensile properties of ultra-high-performance engineered cementitious composites. *Journal of Building Engineering*, 57, 104896.
- [7] Cao, M. and Liu, Z. and Xie, C. (2020). Effect of steel-PVA hybrid fibers on compressive behavior of CaCO₃ whiskers reinforced cement mortar. *Journal of Building Engineering*, 31, 101314.
- [8] Cao, M. and Xie, C. and Guan, J. (2019). Fracture behavior of cement mortar reinforced by hybrid composite fiber consisting of CaCO₃ whiskers and PVA-steel hybrid fibers. *Composites Part A*, 120, 172-187.
- [9] Khan, M. and Cao, M. and Hussain, A. and Chu, S. H. (2021). Effect of silica-fume content on performance of CaCO₃ whisker and basalt fiber at matrix interface in cement-based composites. *Construction and Building Materials*, 300, 124046.
- [10] Gyawali, T. R. (2023). Effect of sand types and mixing procedures on the flexural behaviour of the high ductile mortar in monotonic and cyclic loadings. *Heliyon*, 9(3).
- [11] Zeng, J. J. and Feng, P. and Dai, J. G. and Zhuge, Y. (2022). Development and behavior of novel FRP-UHPC tubular members. *Engineering Structures*, 266, 114540.
- [12] Zhang, D. and Yu, J. and Wu, H. and Jaworska, B. and Ellis, B. R. and Li, V. C. (2020). Discontinuous micro-fibers as intrinsic reinforcement for ductile Engineered Cementitious Composites. *Composites Part B: Engineering*, 184, 107741.
- [13] Bošnjak, J. and Sharma, A. and Grauf, K. (2019). Mechanical properties of concrete with steel and polypropylene fibres at elevated temperatures. *fibers*, 7(2), 9.
- [14] Saheban Zand, S. (2012). *Effect of vibration time on some mechanical properties of high strength steel fiber reinforced concrete* (Doctoral dissertation, Eastern Mediterranean University (EMU)).
- [15] Cao, Y. Y. Y. and Yu, Q. L. and Brouwers, H. J. H. and Chen, W. (2019). Predicting the rate effects on hooked-end fiber pullout performance from Ultra-High Performance Concrete (UHPC). *Cement and Concrete Research*, 120, 164-175.
- [16] Kim, D. J. and Park, S. H. and Ryu, G. S. and Koh, K. T. (2011). Comparative flexural behavior of hybrid ultra high performance fiber reinforced concrete with different macro fibers. *Construction and Building Materials*, 25(11), 4144-4155.
- [17] Wang, Z. and Liang, X. and Zhai, T. (2023, May). Predicting the flexural behavior of steel-PVA hybrid fiber reinforced cementitious composite. In *Structures* (Vol. 51, pp. 1189-1204). Elsevier.
- [18] Wang, Z. and Sun, P. and Hu, Y. and Han, S. (2023). Crack morphology tailoring and permeability prediction of polyvinyl alcohol-steel hybrid fiber engineered cementitious composites. *Journal of Cleaner Production*, 383, 135335.
- [19] Sridhar, R. (2022). Durability study on engineered cementitious composites with hybrid fibers under sulfate and chloride environments. *Cleaner Materials*, 5, 100121.
- [20] Mercuri, M. and Vailati, M. and Gregori, A. (2023). Lime-based mortar reinforced with randomly oriented polyvinyl-alcohol (PVA) fibers for strengthening historical masonry structures. *Developments in the Built Environment*, 14, 100152.
- [21] Betterman, L. R. and Ouyang, C. and Shah, S. P. (1995). Fiber-matrix interaction in microfiber-reinforced mortar. *Advanced Cement Based Materials*, 2(2), 53-61.
- [22] Tan, G., Zhu, Z. and Wang, W. and He, X. (2022). A fractal-based approach for cracking characterization and whole process prediction exploration of PP fiber reinforced ECC containing sustainable ingredients. *Construction and Building Materials*, 318, 126015.
- [23] Lin, J. X. and Song, Y. and Xie, Z. H. and Guo, Y. C. and Yuan, B. and Zeng, J. J. and Wei, X. (2020). Static and dynamic mechanical behavior of engineered cementitious composites with PP and PVA fibers. *Journal of Building Engineering*, 29, 101097.
- [24] Ali, O. K. and Al-Hadithi, A. I. and Noaman, A. T. (2022). Flexural performance of layered PET fiber reinforced concrete beams. In *Structures* (Vol. 35, pp. 55-67). Elsevier.
- [25] Vairagade, V. S. and Dhale, S. A. (2023). Hybrid fibre reinforced concrete—A state of the art review. *Hybrid Advances*, 100035.
- [26] Ding, Y. and Yu, J. T. and Yu, K. Q. and Xu, S. L. (2018). Basic mechanical properties of ultra-high ductility cementitious composites: From 40 MPa to 120 MPa. *Composite structures*, 185, 634-645.

- [27] Ganesh, P. and Murthy, A. R. (2021). Static and fatigue responses of retrofitted RC beams with GGBS based UHPC strips. *Engineering Structures*, 240, 112332.
- [28] De Lorenzis, L. and Teng, J. G. (2007). Near-surface mounted FRP reinforcement: An emerging technique for strengthening structures. *Composites Part B: Engineering*, 38(2), 119-143.
- [29] Sabbaghian, M. and Kheyroddin, A. (2020). Flexural strengthening of RC one way slabs with high-performance fiber-reinforced cementitious composite laminates using steel and GFRP bar. *Engineering Structures*, 221, 111106.
- [30] Lei, D. Y. and Guo, L. P. and Li, Y., Zheng, Z. and Liu, J. P. and Li, S. C. and Zhong, B. M. (2021). The investigating on mechanical properties of ultra-high strength and ultra-high ductility cementitious composites (UHS-UHDCC). *Journal of Building Engineering*, 43, 102486.
- [31] Sabbaghian, M and Kheyroddin, A. (2019). Experimental Investigation of the Effect of Fiber on Mechanical and the Age Properties of High-Performance Fiber Reinforced Cement Composites. *Concrete Research*, 12(4), 53-68
- [32] Fakharifar, M. and Dalvand, A. and Arezoumandi, M. and Sharbatdar, M. K. and Chen, G. and Kheyroddin, A. (2014). Mechanical properties of high performance fiber reinforced cementitious composites. *Construction and building materials*, 71, 510-520.
- [33] Hesami, E. and Mostofinejad, D. and Eftekhari, M. R. (2019). Investigation of the Mechanical Properties of Ultra High Performance Concrete Unarmed and Armed with Steel fibers, Polypropylene and Polyvinyl alcohol. *Concrete Research*, 12(4), 18-5
- [34] Kexin, Z. and Quansheng, S. (2016). Strengthening of a reinforced concrete bridge with polyurethane-cement composite (PUC). *The Open Civil Engineering Journal*, 10(1).
- [35] Bitaraf, A. and Kheyroddin, A. and Sharbatdar, M. K. (2021). Flexural Strengthening of Continuous RC Beams Using HPFRCC Precast Laminates. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 8(6), 221-240.
- [36] Hemti, A and Ezzoddin, S. (2019). Behavior of reinforced concrete beam Strengthened by HPFRCC material. *Concrete materials and structures*, 4(1), 86-99
- [37] Ehsani, R. and Sharbatdar, M. K. and Kheyroddin, A. (2022, January). 'Estimation of the moment redistribution and plastic hinge characteristics in two span beams cast with high-performance fiber reinforced Cementitious composite (HPFRCC). In *Structures* (Vol. 35, pp. 1175-1190). Elsevier.
- [38] Li, F., Wen, T., Li, J., Tang, H., Chen, Z., & Wu, H. (2022). Ultrasonic-detected damage and bending behavior of reinforced PP-ECC beams after coupled action of freeze-thaw cycles and constant flexural load. *Case Studies in Construction Materials*, 17, e01284.
- [39] Chen, H. and Chen, Q. and Xu, Y. and Lawi, A. S. (2022). Effects of silica fume and Fly ash on properties of mortar reinforced with recycled-polypropylene. *Construction and Building Materials*, 316, 125887.
- [40] Koksai, F. and Yıldırım, M. S. and Benli, A. and Gencel, O. (2021). Hybrid effect of micro-steel and basalt fibers on physico-mechanical properties and durability of mortars with silica fume. *Case Studies in Construction Materials*, 15, e00649.
- [41] ASTM C305-13. (2013). *Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency*. Annual Book of ASTM Standards, 188-190.
- [42] Sujivorakul, C. and Muhummud, T. and Dokkhan, N. (2012). High Performance Light-Weight Cement Composite Plates Using Wastepaper Fibers and Wire Mesh. *High Performance Fiber Reinforced Cement Composites 6: HPFRCC 6*, 495-502. [43] Zhang, Q. and Yang, Q. C. and Li, W. J. and Gu, X. L. and Dai, H. H. (2023). Study on model of flexure response of carbon fiber textile reinforced concrete sheets with short AR-glass fibers. *Case Studies in Construction Materials*, 18, e01791.
- [44] Li, W. and Zhao, J. and Huang, X. and Zheng, J. and Shi, T. and Shumuye, E. D. (2022). Mechanical properties of SAC-ECC reinforced with fiber-reinforced polymer mesh. *Construction and Building Materials*, 344, 128279.
- [45] Toledo Filho, R. D. and de Andrade Silva, F. and Fairbairn, E. M. R. and de Almeida Melo Filho, J. (2009). Durability of compression molded sisal fiber reinforced mortar laminates. *Construction and building materials*, 23(6), 2409-2420.
- [46] Tanarlan, H. M. (2017). Flexural strengthening of RC beams with prefabricated ultra high performance fibre reinforced concrete laminates. *Engineering Structures*, 151, 337-348.
- [47] Wu, J. D. and Guo, L. P. and Cao, Y. Z. and Lyu, B. C. (2022). Mechanical and fiber/matrix interfacial behavior of ultra-high-strength and high-ductility cementitious composites incorporating waste glass powder. *Cement and Concrete Composites*, 126, 104371.
- [48] Tanarlan, H. M. and Alver, N. İ. N. E. L. and Jahangiri, R. and Yalçınkaya, Ç. and Yazıcı, H. (2017). Flexural strengthening of RC beams using UHPFRC laminates: Bonding techniques and rebar addition. *Construction and Building Materials*, 155, 45-55.
- [49] ASTM, A. (2007). C293/C293M-10: *Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete*. American Society for Testing and Materials: West Conshohocken, PA, USA.
- [50] Wu, Z. and Shi, C. and He, W. and Wu, L. (2016). Effects of steel fiber content and shape on mechanical properties of ultra high performance concrete. *Construction and building materials*, 103, 8-14.

- [51] Li, J. and Yan, J. and Xue, G. and Niu, J. (2021). Acoustic emission behavior of polyvinyl alcohol (PVA) fiber reinforced calcium sulphoaluminate cement mortar under flexural load. *Journal of Building Engineering*, 40, 102734.
- [52] Nalon, G. H. and Martins, R. O. G. and Alvarenga, R. D. C. S. S. A. and Lima, G. E. S. D. and Pedroti, L. G. and Santos, W. J. D. (2018). Effect of specimens' shape and size on the determination of compressive strength and deformability of cement-lime mortars. *Materials Research*, 20, 819-825.
- [53] Kusumawardaningsih, Y. and Fehling, E. and Ismail, M. (2015). UHPC compressive strength test specimens: Cylinder or cube?. *Procedia Engineering*, 125, 1076-1080.
- [54] Standard, B. (2009). Testing hardened concrete. *Compressive Strength of Test Specimens, BS EN*, 12390-3.
- [55] AASHTO T132. (2000). Standard Method of Test for Tensile Strength of Hydraulic Cement Mortars. *America Association of State Highway and Transportation Officials*, Washington, DC.
- [56] Shafieifar, M. and Farzad, M. and Azizinamini, A. (2017). Experimental and numerical study on mechanical properties of Ultra High Performance Concrete (UHPC). *Construction and Building Materials*, 156, 402-411.
- [57] Rahdar, H. A. and Ghalehnavi, M. (2016). Characteristics of UHPC and cracking behavior of tensile samples of reinforced concrete. *Structural and construction engineering*, 3(2), 42-58
- [58] Valikhani, A. and Jaberi Jahromi, A. and Mantawy, I. M. and Azizinamini, A. (2020). Numerical modelling of concrete-to-UHPC bond strength. *Materials*, 13(6), 1379.
- [59] Zhu, M. and Zhang, J. and Chen, B. and Wu, M. and Han, J. (2022). Numerical simulation of cost-effective green high-ductility engineered cementitious composites based on meso-scale particle flow model. *Construction and Building Materials*, 356, 128973.
- [60] Lo Monte, F., & Ferrara, L. (2020). Tensile behaviour identification in Ultra-High Performance Fibre Reinforced Cementitious Composites: indirect tension tests and back analysis of flexural test results. *Materials and Structures*, 53, 1-12.
- [61] Baktheer, A. and Chudoba, R. (2021). Experimental and theoretical evidence for the load sequence effect in the compressive fatigue behavior of concrete. *Materials and Structures*, 54(2), 82.
- [62] Hajforoush, M. and Kheyroddin, A. and Rezaifar, O. (2020). Investigation of engineering properties of steel fiber reinforced concrete exposed to homogeneous magnetic field. *Construction and Building Materials*, 252, 119064.
- [63] ASTM, A. (Reapproved 2008). C 666/C 666M – 03: *Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing*. American Society for Testing and Materials: West Conshohocken, PA, USA.

